



中国材料大会 2024
暨第二届世界材料大会
CMC 2024 & WMC 2024

July 8-11, 2024
Guangzhou, China

C13-先进钢铁材料
C13-Advanced Steels

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

C13-先进钢铁材料

分会主席：赵栋梁、毛新平、张福成、梁剑雄

C13-01

以钢铁材料科技创新，推动高端装备高质量发展

梁剑雄*

钢铁研究总院有限公司

高端装备和重大工程需求牵引先进钢铁材料发展，超超临界电站机组、先进核电、光伏新能源等能源装备，大型客机等宇航装备，深海钻采集输等海洋工程，低温工程，CCUS等双碳工程都对先进钢铁材料的研发应用提出新要求。科技创新自立自强推动钢铁材料高质量发展，新一代长寿命轴承钢抗疲劳组织调控技术、新型超高强度钢强韧化技术、氮合金化技术、基于使役性能提升的组织调控技术等关键核心技术突破和自主创新，不断推动钢铁材料向高端化、绿色化发展，在高端装备和战新产业中应用提升。

C13-02

钢铁在双辊薄带连铸连轧过程中表面裂纹形成过程及原理

徐万强^{*1,2,3}，马海建^{1,5}，方园⁴，王成全^{1,4}，王秀芳^{1,4}，Michael Ferry^{1,2}

1. UNSW Sydney (澳大利亚新南威尔士大学)

2. 澳大利亚宝山钢铁公司海外联合研发中心 (BAJC)

3. 华北理工大学

4. 宝武集团中央研究院前沿技术研究所

5. 潍坊学院机电工程学院

钢铁的双辊薄带连铸连轧 (Twin-Roll Strip Casting Steel) 是近 30 年来开发出来的短流程近终型前沿钢铁生产技术，能够通过一条长 50 米左右的生产线，将位于两个相向转动的轮辊表面之间的钢水，在轮辊表面实现高速凝固，形成坯壳，并在双辊辊缝处受到挤压而焊合为带材。该带材在其后序的在线热轧过程中，厚度得以进一步降低，在钢材内部产生一系列特定组织、赋予带材一系列相应性能的、年产量在 50-60 万吨、厚度在 1-3 mm 左右的薄带产品。相对于通常长流程热轧生产工艺，该技术能够有效降低能源消耗和碳排放 80%，是实现钢铁生产双碳目标的、最为绿色的钢铁的薄带产品前沿生产技术之一。但该技术在使用和开发过程中所面临的最为核心的挑战之一是薄带产品表面微裂纹的形成。

本项目通过对这些微裂纹由薄带表面向内部逐次抛光的方式，对每一个抛光截面使用光学和扫描电子显微镜 (SEM)、EDS 和 EBSD 等表征工具，对微裂纹周围的组织、化学成分和晶体学进行分析，以此揭示出这些裂纹的三维组织和晶体结构。该分析表明，在微裂纹中下部，经常存在着由 MnO 和 SiO₂ 低熔点共晶氧化物所形成的树枝晶组织。这些低熔点液态氧化物是钢水在铸模熔池表面受到氧化所形成的产物。该液态产物在熔池表面形成后，在向熔池表面与向着熔池内部转动着的辊轮表面交界处，被轮辊卷进了与熔池的界面。在钢水在轮辊表面凝固过程中，这些导热性较差的液态低熔点共晶氧化物，在坯壳表面钢水凝固过程中，与坯壳受到的拉应力和剪切应力相互作用，促进了表面微裂纹在坯壳上的形核，并被形核产生的真空吸入了这些微裂纹中，并极大地促进了这些裂纹以最为容易的方式向薄带深处发展，最终导致了微裂纹在坯壳和带材表面的广泛形成。该微裂纹形成过程和机理的成功揭示，为其成功克服奠定了重要基础。

C13-03

薄带铸轧微合金高强钢中的团簇诱导强塑机制

黄禹赫*

北京科技大学

薄带铸轧工艺具有简约的制造流程和高效的能量利用特性，能源消耗和二氧化碳排放量仅为传统连续热连轧工艺的 10% 和 16%，成为双碳背景下钢铁工业实现节能减排目标的重要手段。微合金高强钢是制造业重要的钢铁材料，传统长流程生产的微合金高强钢中要达到最佳析出强化效果需要高浓度（数千 ppm）的碳化物形成元素（如 Nb、V 和 Ti）等，和复杂的热机械处理工艺，包括多道次热轧和再加热过程，提高生产成本的同时增加了二氧化碳排放量。薄带铸轧工艺的快速凝固速度和单道次热轧允许微合金溶质在奥氏体中保持过饱和固溶状态，为通过随后的 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变在冷却或卷取过程中引入团簇强韧化机

制开辟了道路，可在节约能源消耗的同时节省微合金元素的添加量。本报告将介绍我们在薄带铸轧微合金高强钢中的团簇诱导强塑机制方面的研究进展，包括 Nb-N 富集团簇和 Nb-V-N 富集团簇对微合金高强钢的强韧化作用，以及团簇状态、分布模式及其与位错的动态相互作用，并探讨其在薄带铸轧先进高强钢开发中的潜在应用。

C13-04

新一代核聚变工程用超低温高强韧无磁不锈钢研发

王长军*, 梁剑雄, 刘雨, 张梦醒, 杨志勇, 刘振宝, 孙永庆, 褚韦涵
钢铁研究总院有限公司

核聚变工程实验堆是关系到我国能源保障的重大科学装置，也是世界大国之间竞争的重要战略资源。相比于国际热核聚变实验堆 (ITER)，中国新一代聚变工程实验堆，其超导磁体最高磁场 20T 和电磁力 1400KN/m，分别超过 ITER 实验堆 54%和 75%，ITER 通用类低温结构材料已无法满足工程要求，因此研发新一代核聚变工程用高强韧无磁不锈钢已迫在眉睫。笔者及其团队近年来针对中国新一代聚变工程关键结构部件 (线圈盒、铠甲) 的设计需求，针对超低温、强磁场环境下合金“强/韧/塑性”难以协调及组织稳定性差等关键科学问题，开展了超低温高强韧特种合金设计、多相组织精确调控、多元强/韧/塑协同控制机理等研究工作。主要研究结果有：(1)通过材料计算学仿真与试验钢验证，成功开发了新一代聚变工程用 GY50G 高强韧抗敏化无磁钢板，其 4.2K 温度下屈服强度 $\geq 1500\text{MPa}$ ，抗拉强度 $\geq 1800\text{MPa}$ ，伸长率 $>25\%$ ， $KIC > 150\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ，裂纹扩展速率优于 ITER 级 316LN。(2)采用传统的“电炉+炉外精炼+电渣重熔”低成本冶炼装备，通过冶金工艺仿真+四元渣系优化+梯度扩散脱氧等技术手段，突破了超低碳 ($C\leq 0.01\%$)、控氮 ($N: 0.3\sim 0.4\%$)、超纯净 ($P\leq 0.01\%$ 、 $S\leq 0.005\%$ 、 $Al\leq 0.002\%$ 、 $O\leq 20\text{ppm}$) 冶炼工艺，单炉组批能力 ≥ 40 吨/批次，并实现了工业化稳定批产。(3)通过高温组织调控+热变形仿真+控温均细化锻造等技术手段，完成了 6 吨级大锻件 ($\delta 260\times 5000\text{mm}$) 的均细化锻造，厚度中心区晶粒度达到 3 级以上，解决了控氮型奥氏体无磁不锈钢大锻件可锻性差，热塑性区间窄的热成形开裂问题。(4)基本阐明了 GY50G 钢在 4.2K 超低温环境下的强/韧/塑性协同控制机制，强度的主控单元为 N 的间隙固溶强化与细晶强化，塑韧性的主控单元为低温变形过程中产生的纳米级孪晶增韧。

C13-05

超高强度钢的晶界析出机理及其调控

焦增宝*
香港理工大学

马氏体时效钢是以超低碳马氏体为基体，利用金属间化合物析出强化的一种超高强度钢，被广泛用于航空航天、原子能、模具制造等领域，深入理解马氏体时效钢的强韧化机制，对开发新型高性能超高强度钢具有重要的科学意义和工程价值。在本研究中，我们利用扫描透射电镜、三维原子探针和第一性原理计算等方法，系统研究了 Fe-Ni-Al 和 Fe-Ni-Ti 体系中合金元素作用对晶界偏析、晶界析出、晶界断裂行为的影响。研究发现，Fe-Ni-Al 和 Fe-Ni-Ti 马氏体时效钢均存在严重的晶界粗大析出相，其析出机制分别属于不连续析出和连续析出。在 Fe-Ni-Al 体系中，晶界处形成平行排列的长条状 NiAl 析出相，我们通过调控 Cu 元素的晶内配分，可以显著促进 NiAl 相的晶内析出，进而消除 NiAl 相的晶界不连续析出，显著提高材料的强韧性。在 Fe-Ni-Ti 体系中，晶界处形成粗大的 Ni₃Ti 析出相和无析出区，导致裂纹在晶界处形核和扩展；我们发现 Mo 元素能产生明显的晶界偏析，并降低了 Ni 和 Ti 在晶界处的偏析，有效的抑制了粗大 Ni₃Ti 析出相在晶界处的形成，从而减轻了沿晶断裂的倾向，提高马氏体时效钢的强韧性。

C13-06

短时回火工艺实现高强高塑马氏体汽车钢制备

赵立佳*¹, 罗葆钦^{1,2}, 张峰², 马文斌^{1,2}, 盛绍龙^{1,2}, 罗双宗^{1,2}, 赵耀轩², 王强¹

1. 东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室
2. 东北大学冶金学院

先进高强钢是实现汽车轻量化的重要材料。马氏体钢作为强度级别最高的先进高强钢之一，在实现汽车轻量化方面具有明显优势。然而，马氏体钢的强塑性匹配不佳，特别是塑性差，导致其在实际应用中受到局限。回火虽然可以提高马氏体钢的塑性，但是会使其强度发生显著下降。快速回火工艺采用极快的回火加热速度，虽然能避免回火中的强度下降，但是对生产设备有极高的要求，难以在实际的工业

生产中大规模应用。因此，急需一种新型工艺，既能提高马氏体钢的塑性，又不以牺牲其极高的强度为代价，并同时易于在工业中大规模生产。

基于此，笔者及其团队发明了一种称为“短时回火”的新型热处理工艺。短时回火是指以较慢的加热速度（通常为 $1^{\circ}\text{C}/\text{s}\sim 10^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ）将马氏体钢加热至特定的回火温度（取决于强度要求），保温极短的时间，随后快速冷却至室温的一种回火方式。我们将短时回火与快速回火和传统回火进行对比，采用电子万能试验机、数字图像相关法、X射线衍射、场发射扫描电子显微镜、电子背散射衍射、透射电子显微镜等先进手段对马氏体钢进行了力学性能测试和微观组织表征，系统分析了（亚）组织尺寸、基体碳含量、位错密度、析出碳化物的分布和尺寸等材料学因素对马氏体钢的力学性能的协同影响方式。主要研究结果如下：（1）短时回火和快速回火同样具有阻止回火过程中马氏体相软化的效果，在相同的回火温度下，短时回火样品的塑性与传统回火相近，而抗拉强度和屈服强度都普遍提高了约 250MPa 。（2）影响马氏体位错密度的主要因素是回火温度而不是回火时间和回火加热速度，当回火温度从 300°C 提高至 600°C 时，根据位错强化机制公式计算得到的强度差值与实际强度差值相近，说明随着回火温度的上升马氏体的软化主要是由于位错密度降低导致的。（3）淬火之后固溶在马氏体基体中的碳原子会发生偏聚和轻微析出，回火之后固溶在马氏体基体中的碳原子数量急剧下降，几乎全部析出，这表示在马氏体钢回火之后碳的固溶强化的作用对强度的影响较小。（4）在相同的回火温度下影响马氏体钢析出碳化物尺寸的主要因素是回火时间，与回火加热速度的关系不大，同时较短的回火时间可以有效增加马氏体中析出碳化物的数量密度。（5）传统回火处理的马氏体中在大角晶界附近析出的碳化物尺寸明显大于非大角晶界附近析出的碳化物，而短时回火处理马氏体钢中的碳化物分布更加均匀。（6）不同回火温度和时间下马氏体的大角度晶界的长度和板条尺寸差距很小，说明短时回火马氏体钢强度的提升不是由细晶强化和晶界强化导致的。

基于以上研究结果，结合汽车钢的连续退火生产工艺，我们开发出了一种抗拉强度大于 1900MPa ，屈服强度大于 1600MPa ，总延伸大于 11% 的具有超高强度和良好塑性的马氏体汽车钢。本工艺易于在现有的工业生产线上实施，无需特殊的加热设备，降低了对设备的要求；本工艺能够在更短的时间内达到优异的材料性能，显著提高生产效率，为企业节省时间和成本；因此，短时回火工艺的研究不仅提供了一种改善马氏体钢性能的新方法，还具有良好的工业应用潜力，能够为材料科学和工程领域带来显著的经济和环境效益。

C13-07

面向终端应用场景的先进钢铁材料服役性能评价

梁治国*

国家材料服役安全科学中心

先进钢铁材料的研发，不仅需要解决材料设计与制备加工工艺等一系列技术研发问题，随着工业领域大量全新应用场景的出现，面向终端场景的产品验证与服役性能表征越来越成为决定先进钢铁材料投入应用的速度与范围。客观上讲，与国外先进制造企业相比，目前我国多数钢铁企业对于先进钢铁产品的服役性能总和评价能力还有一定的差距。本文重点分析先进钢铁材料如何以终端用户需求为导向，对标国际同类型产品，重点开展国产化开发，根据终端场景开展多场耦合试验研究并建立服役性能数据体系，通过对先进钢铁材料面向应用场景的服役性能和寿命的精准评价，一方面加速高端新产品的研发优化迭代，另一方面为其打入新领域甚至国际市场竞争提供宝贵的“入场资格证”。

C13-08

S32750 双相不锈钢冲击韧性提升研究进展

丰涵*¹，宋志刚¹，王宝顺¹，王曼²，吴明华³，李国平⁴，周灿栋⁵

1. 钢铁研究总院有限公司
2. 浙江久立特材科技股份有限公司
3. 永兴特种材料科技股份有限公司
4. 山西太钢不锈钢股份有限公司
5. 宝武特种冶金有限公司

双相不锈钢兼具奥氏体不锈钢的优异耐点蚀性能与铁素体不锈钢的较高强度和耐氯化物应力腐蚀性能，在海洋工程、核电、石油石化、船舶等领域有广泛应用。近年来双相不锈钢产品进一步向低温环境拓展应用，但国内双相不锈钢产品普遍存在冲击韧性低的问题。目前不锈钢断裂机理研究多针对奥氏体钢或铁素体钢，需要完善和发展多相组织耦合下的双相不锈钢低温冲击韧性研究。

笔者及合作团队近年来以 UNS S32750 双相不锈钢为对象, 系统研究了基体两相比比例 (Phase ratio)、相形态 (Phase morphology)、晶粒长径比 (Aspect ratio)、第二相析出等材料学因素对双相不锈钢低温断裂行为的影响, 分析了作用机制。主要研究结果有: (1) 固溶态 S32750 双相不锈钢在室温下具有高的冲击韧性, 过高的铁素体相比比例和粗化的铁素体晶粒损害试验钢冲击韧性: α 相含量从 50%增加到 60%, 对应室温冲击功值从 236J 单调递减至 144J, 主要体现在裂纹扩展功的下降。(2) γ 相形态由层片状向球状转变、 γ 相大长径比晶粒比例从 55%降至 15%, 可有效提高试验钢冲击韧性、降低韧脆转变温度, 并改善冲击韧性各向异性, 提高横向冲击功。(3) 试验钢在 900°C 时具有非常快的第二相析出速度, 并倾向于在高界面能的 α/γ 相界和三叉晶界处发生粗化; 1%含量的 σ 相即可严重恶化试验钢的低温冲击韧性, 韧脆转变温度上升可达 65°C; Cr₂N 相对试验钢冲击韧性的恶化作用弱于 σ 相。(4) 试验钢在 20°C~100°C 范围内的冲击功值随测试温度降低呈 S 形下降, 两者符合以下 Boltzmann 关系: $KV=211.1+(-186.8)/(1+e^{-(T-(-39.9))/11.4})$ 。(5) 测试温度从 US 区降至 DBT 和 LS 区, 试验钢冲击功能量构成呈“高裂纹扩展功+高裂纹萌生功”→“中低裂纹扩展功+高裂纹萌生功”→“低裂纹扩展功+低裂纹萌生功”变化。(6) 在 DBT 温度区冲断后, 试验钢出现同时穿越铁素体和奥氏体的解理断面, 铁素体相多呈河流状解理形貌, 奥氏体相呈“解理小平面+起源于 γ 晶界处和 α/γ 相界处的撕裂棱”的准解理形貌。

基于以上研究结果, 结合我国双相不锈钢生产工艺路线, 开发了“双相不锈钢两相双细化工艺技术”、“双相不锈钢中有害相的消除方法”、“控相形态热加工工艺方法”等技术, 在我国主要生产企业得到应用, 工业生产的 S32750 双相不锈钢管材-46°C 低温冲击韧性提升 60%以上, 冲击功值稳定达到 100J 以上。结合冲击韧性提升技术的发展, 引导双相不锈钢材料组织调控手段从“相比比例”向“相比比例+相形态+晶粒尺寸”转变, 推动了我国高质量双相不锈钢产品竞争力提升。

C13-09

无碳化物 Fe-C 马氏体的新概念

熊志平*, 杨德振, 张超, 程兴旺
北京理工大学

近百年的研究表明, 在板条马氏体的回火过程中, 过饱和碳原子从马氏体基体中扩散出来, 陆续形成碳的偏聚、过渡型碳化物和渗碳体, 并伴随着残余奥氏体的分解。在变形过程中, 一方面孔洞和裂纹易在碳化物处萌生, 对塑性有害; 一方面残余奥氏体转变为马氏体, 有利于塑性的提高。通过构建非均质锰分布的高温奥氏体, 淬火得到富锰奥氏体和贫锰马氏体, 利用锰对碳的强相互作用, 突破百年来板条马氏体的回火规律, 促进碳从马氏体向奥氏体的扩散, 从而完全抑制回火时碳化物的析出, 原创性地提出了无碳化物 Fe-C 马氏体的新概念。与此同时, 提高了残余奥氏体的含量, 改善了强塑性匹配。

C13-10

差温轧制工艺对特厚板 10Ni5CrMoV 组织和性能的影响

王卫卫*, 丛菁华, 王宝山, 张宏亮, 潘涛
钢铁研究总院有限公司

对于特厚钢板 10Ni5CrMoV 钢, 采用传统轧制方法, 由于坯料尺寸和轧机能力限制, 变形渗透性差, 心部韧性不足, 通过分级冷却和差温轧制耦合的高渗透轧制工艺可以改善厚板性能。本文针对特厚板轧制过程中变形不均匀的问题, 采用数值模拟和验证实验相结合的方法, 研究了均温轧制和分级差温轧制工艺对 10Ni5CrMoV 钢的组织 and 性能的影响规律, 阐明了高渗透轧制工艺对厚规格 10Ni5CrMoV 钢轧制变形的强化机理。结果表明: 为了获得相同的厚向轧制渗透效果, 提高开轧温度、降低轧制速度、增加辊径、提高差温温度、延长冷却时间、增加冷却强度、前移差温位置都有利于改善特厚板轧件的心部变形。差温冷却时间来控制厚向温差在 200-300 °C 的高渗透轧制工艺, 变形区域向心部扩大, 使得心部层的变形渗透绝对值增加 7~13%, 同时心表的显微组织差异化减小, 有利于提高显微组织和性能的均匀性。

C13-11

低温环境及海冰磨损对高强度极地船舶用钢的影响

王超逸*^{1,2}, 严玲¹, 常雪婷³, 洪晓莉⁴, 赵金环⁴

1. 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室 辽宁 鞍山 114009
2. 鞍钢集团北京研究院有限公司, 北京 102200
3. 上海海事大学海洋科学与工程学院 上海 201306

4. 青岛海检集团有限公司, 山东, 青岛, 266000

为了研究低温环境及海冰磨损对高强度极地船舶用钢的影响, 使用 TMCP 工艺生产了 460MPa 级别的高强度极地船舶用钢, 采用 OM、EBSD 等手段分析了材料的微观组织, 测试了极地船舶用钢在低温环境下的强度和断裂韧性, 进一步开展极地船舶用钢低温海冰介质磨损试验, 得到了极地船舶用钢在低温海冰介质下的厚度磨损参考数据。结果表明, 材料组织以多边形铁素体(PF)、珠光体(P)及粒装贝氏体(GB)为主, 低温导致材料的强度升高, -10°C 低温裂纹张开位移值 (CTOD) 大于 0.5mm, -70°C 极端低温环境下材料发生脆性失效。常温海水环境下材料的磨损失重率约为 $0.44\text{E-}05 \text{ g}/(\text{N}\cdot\text{m})$, 而在 -40°C 低温干摩擦环境下, 磨损失重率高达 $1.90\text{E-}05 \text{ g}/(\text{N}\cdot\text{m})$, 是常温海水环境下的 4 倍多; 在低温海冰磨损模拟试验表明, 海冰磨损会对无保护钢板表面造成明显损伤, 因低温海冰磨损而导致的高强度极地船舶用钢表面厚度损失约为 0.082mm/海里。研究低温环境及海冰磨损对高强度极地船舶用钢的影响, 对于推广国产极地船舶用钢, 加快我国远洋船舶事业有积极的推动作用。

C13-12

多组元析出和膜状奥氏体协同强化低碳低合金超高强韧钢

张游游, 荣雪荃, 刘世纯, 王岩, 陈浩*
清华大学

针对大型装备结构轻量化、安全性和节能减排对低成本超高强韧钢(UHSS)的需求。基于化学界面工程(CBE)理念和快速加热技术, 将多组元碳化物(MCC)、膜状亚稳奥氏体、高密度位错和超细马氏体同时调控到 Fe-0.25C-4Mn 钢中, 利用多机制协同强化作用, 实现了力学性能的突破。实验钢的非平衡相变和组织演变规律研究结果表明两相区退火(ART)阶段 MCC 析出显著细化逆转变膜状奥氏体尺寸, 在快速加热过程具有细化奥氏体晶粒的作用。进一步的力学性能分析显示高稳定性膜状奥氏体和 MCC, 能够减小对屈服强度的损害并通过持续的 TRIP 效应来提高材料的塑韧性和抗拉强度, 同时保持良好的抗氢脆性能。该研究将为工业生产低成本高强韧 UHSS 及其在国家重大工程中的应用提供工艺思路和理论支撑。

C13-13

汽车用先进高强钢动态力学行为与应变率敏感性机理

梁志远*¹, 刘晖¹, 商雪坤², 何斌斌², 黄明欣³
1. 松山湖材料实验室
2. 南方科技大学
3. 香港大学

中国汽车工业快速发展, 汽车轻量化和碰撞安全性需求不断提高。高强钢是既可实现轻量化又可有效提升安全性的理想车身结构材料。考虑到汽车碰撞时零部件在冲击载荷作用下发生高速变形, 因此了解高强钢的动态力学行为及背后的机理, 对预测零部件在碰撞时的变形和失效特性、优化零部件设计、提高汽车的碰撞安全性至关重要, 对新钢种的研发及其在汽车上的应用至关重要。本研究选取了两种具有代表性的高强钢作为研究对象: 1. 具有全奥氏体组织 (FCC 结构) 的孪生诱发塑性钢; 2. 具有全马氏体组织 (BCC 结构) 的热成形钢。研究通过不同应变率 ($10^{-3} - 10^3 \text{ s}^{-1}$) 的拉伸试验测定应变率对钢材力学性能的作用, 并通过先进的微观组织表征手段 (背散射电子衍射、透射电镜、同步辐射等) 分析应变率对钢材高速变形过程中微观组织结构演化的作用规律。在实验的基础上, 研究对钢材不同强化机理的贡献进行理论计算, 并进一步建立包含应变率作用以及微观组织演变信息的本构模型, 最后综合实验与理论建模结果揭示两种钢材应变率敏感性背后的微观机理。

C13-14

固溶处理工艺对 Fe-Mn-Al-Cr-Si 系轻质钢组织形貌及力学性能的影响

毕思瑶, 宋仁伯*, 王永金
北京科技大学

近年, 我国对高性能、高质量、高可靠性装备的需求不断提升, 特别是由于数字、智能、高端等多元化需求结构的快速发展, 推动了我国工程机械装备的升级换代, 使我国工程机械用钢需求发生新的变化。工程机械用钢板主要用于制造机械、煤炭、运输、矿山及各类工程施工设备, 随着工程机械向大型化、轻量化发展, 对工程机械用钢的轻质化也提出了更高要求。

本论文在传统 Mn13Cr2 的基础上添加 6% 的 Al 和 3.5% 的 Si 元素, 设计了成分为 Fe-13Mn-6Al-3.5Cr-3.5Si-0.5V-1.23C 的轻质钢, 轻质钢密度可达到 6.95g/cm^3 , 相较于传统钢材下降了约 12%。通过热轧后得到实验钢, 在 400°C 、 1000°C 、 1100°C 、 1200°C 下保温 1h 后水淬至室温, 观察其组织形貌, 对热处理后的实验钢进行室温拉伸试验, 测定其力学性能, 得到不同热处理温度对实验钢组织形貌及力学性能的影响。

通过对比实验钢经过不同温度热处理后的组织形貌, 可以看出在较低热处理温度 (400°C) 下, 实验钢的组织形貌相较轧态并未发生明显变化, 相组成为奥氏体+少量铁素体, 组织中存在大量碳化物沿轧向分布。当热处理温度升高至 1000°C , 奥氏体晶粒明显细化, 铁素体占比增多, 碳化物尺寸和数量均减少, 当热处理温度达到 1100°C 时, 奥氏体晶粒再次变大, 出现了大量孪晶组织, 当热处理温度达到 1200°C 时, 奥氏体晶粒进一步增大, 孪晶组织消失, 同时在奥氏体晶粒间出现 δ 铁素体, 奥氏体晶粒呈规则的多边形分布。

通过对比实验钢经过不同温度热处理后的室温拉伸结果, 可以看出随着热处理温度升高, 抗拉强度和屈服强度均呈下降趋势, 延伸率先升高后降低。热处理温度为 1100°C 时实验钢力学性能最好, 抗拉强度为 972MPa , 屈服强度为 547MPa , 延伸率为 65.9%, 强塑积可达到 $64.1\text{GPa}\cdot\%$ 。

C13-15

Nb 微合金化对硬线钢组织与性能的影响

卢超¹, 曹建春*¹, 张永青², 王珍传⁴, 周晓龙¹, 郭爱民², 雍岐龙³, 赵伟男¹

1. 昆明理工大学

2. 中信金属股份有限公司

3. 中国钢研科技集团有限公司

4. 江苏沙钢集团有限公司

本文对比研究了 Cr 含量 0.170 wt.% 和 Nb 含量 0.025 wt.% 的高碳硬线钢的组织及力学性能。微量 Nb 的加入能够细化珠光体团, 并改变珠光体片层和轧制方向的夹角, 同时 NbC 发挥析出强化作用。含 Nb 硬线钢降低了合金元素的用量, 在不牺牲任何强度的条件下提高了珠光体钢的延展性和韧性。利用"原位"扫描拉伸试验, 在纳米和微米尺度上研究了珠光体钢的变形和断裂过程, 细小的珠光体团能够延缓珠光体钢的断裂。利用经典分子动力学模拟研究了 $\alpha\text{-Fe}/\theta\text{-Fe}_3\text{C}$ 界面模型的单轴拉伸应力应变行为, 珠光体在平行于片层方向的抗变形能力高于在垂直于片层方向的抗变形能力。因此, 通过 Nb 微合金化技术可以增加垂直于轧制方向的珠光体含量, 以提高冲击韧性。

C13-16

两种强度等级的热冲压成形用钢的氢损伤行为研究

常智渊*

攀钢集团研究院

热冲压成形用钢在汽车轻量化技术中有着广阔的应用前景。然而, 由于热冲压成形用钢以及零部件生产或使用过程中常会有氢的侵入, 对热冲压钢零部件的服役性能有着很大的困扰。本文对 1000MPa 和 2000MPa 两种不同强度的热成形用钢热冲压板在无外部载荷、充氢条件下的氢脆敏感性进行了对比研究。结合 TEM 和 EBSD 的微观结构表征结果表明, 这两种钢表现出不同的表面氢损伤模式, 例如, 强度为 1000MPa 的钢表现出氢鼓泡, 强度为 2000MPa 的钢表现为氢致延迟开裂, 尽管它们的损伤敏感性比在很大程度上服从强度和氢脆敏感性之间的折衷关系。基于研究发现, 内部氢压力是形成氢鼓泡的必要条件, 因为该压力应为气泡表面的塑性变形提供驱动力, 这表明与氢致延迟开裂相比, 氢气泡在氢脆机制上有所不同。另外, 两种实验钢的主要裂纹扩展模式都是穿晶裂纹, 并且裂纹路径集中在 $\{110\}$ 滑移面上, 特别是沿着块体/板条界面, 这表明板条间产生了脱粘裂纹, 因此, 在没有施加载荷的情况下, 与原奥氏体晶界相比, 变体内的界面具有更高的氢脆敏感性。

C13-17

非均质锰分布对淬火-配分钢中碳扩散行为的研究

张超^{1,2}, 熊志平*²

1. 钢铁研究总院有限公司

2. 北京理工大学

淬火-配分 (Q & P) 钢作为第三代先进高强钢的典型代表, 因其良好的强度塑性匹配引起研究学者的广泛关注。Q & P 钢的微观组织主要由马氏体基体和残余奥氏体构成, 其中马氏体基体提供了高强度, 残余奥氏体通过相变诱导塑性 (TRIP) 效应改善了塑性。残余奥氏体的稳定性是调控 TRIP 效应的关键, 主要取决于配分阶段碳原子自马氏体向奥氏体的富集。然而, 传统 Q & P 工艺在配分阶段存在着竞争反应, 如碳在马氏体中的偏聚、碳化物的析出和贝氏体转变等。其中, 碳化物析出因消耗较多碳原子引起广泛关注。为避免碳化物析出对碳原子的消耗, 传统 Q & P 钢通常添加一定的 Si 和/或 Al 元素 (如 1.5 wt.%), 虽然能抑制渗碳体的析出, 但是无法阻碍过渡 (ϵ/η) 型碳化物的析出。本研究采用 Fe-0.29C-3.83Mn-1.50Si (wt.%) 钢, 首先制备具有强烈 Mn 配分的珠光体作为初始组织, 再进行快速奥氏体化构建非均质高温奥氏体, 最后进行 Q & P 处理, 制备出由仿珠光体 (ghost pearlite, GP) 区域和正常马氏体 (normal martensite, NM) 区域的微观组织 (PPQ&P130)。得益于锰元素非均质分布, GP 区域马氏体板条中几乎不存在过渡型碳化物, 而对照组 NM 区域则存在明显的碳化物析出; 同时, PPQ&P130 试样具有比相同淬火-配分参数下的传统 Q & P 试样 (CQ&P130) 更高的体积分数和碳含量。由此可见, 非均质锰分布能够有效抑制过渡型碳化物的析出, 削弱配分阶段竞争反应对碳元素的消耗, 从而提高 Q & P 钢利用碳原子稳定残余奥氏体的效率。相应地, 由于残余奥氏体中更高的碳、锰含量, 以及片层为主的形貌, PPQ&P130 试样呈现更持久的 TRIP 效应, 导致强度和塑性得到了全面提升。

C13-18

基于氧化物成分比例的大梁钢铁氧化物粘附特性及其剥落规律研究

宋玉玮, 孔宁*

北京科技大学

本文针对大梁钢氧化铁粉剥落现象严重的问题进行工业试验, 研究了不同热轧终轧温度及卷取温度对氧化铁粉剥落量的影响, 并采用扫描电镜分析了氧化铁皮的结构和致密度。通过定量研究 610L 大梁钢热轧卷中氧化铁皮中 Fe_3O_4 和 FeO 含量与氧化铁皮剥落之间的关系, 确定了形成不掉粉、高塑性的“黑皮钢”特性的氧化物比例关系。通过三点弯曲试验研究了 FeO 含量与氧化铁粉剥落特性之间的关系, 发现在塑性弯曲的不同阶段 FeO 含量与氧化层剥落量表现出“先负后正”的特点, 并通过 FeO 的低强度和良好塑性特点进行分析, 揭示了不同 FeO 含量的带钢氧化铁粉剥落规律。本研究通过探究氧化铁皮形成与冲压过程稳定性、粘附性能及车间环境之间的直接关系, 提出的大梁钢中粉状氧化铁皮剥落的定量评价分析在理论和工业实践上具有重要意义。

C13-19

多步回火配分处理对 25Cr2Ni3MoV 钢低温性能的影响

陈业, 李伟*

上海交通大学

在这项研究中, 通过多步回火和分配 (MTP) 实现中碳 25Cr2Ni3MoV 钢中基体组织和析出相的双重细化, 以实现高低温强度-延展性组合。此外, 通过 SEM, EBSD, TEM 以及 XRD 等表征手段, 对低温夏比冲击试验中, 微观结构演变、应力集中分布情况以及相应的微裂纹形成和扩展进行研究。与调质状态 (QT) 相比, MTP 钢在液氮温度下的屈服强度 (1300 MPa)、总伸长率 (25%) 和冲击韧性 (>25 J) 显着提高。强度提升主要来源于细化逆相变奥氏体, 以及其在随后回火过程分解形成高位错密度的马氏体板条 (宽度: 1.5 μm) 和细化渗碳体 (尺寸: 70 nm)。韧性提升主要源于高的晶界强度和高的抗裂纹扩展能, 两种工艺钢的裂纹在原奥氏体晶界处形核, 但较小的渗碳体颗粒能够降低原奥氏体晶界附近应变集中, 提高晶界强度, 同时, 相比于 QT 样品, MTP 样品拥有更多的大角度晶界和更曲折的裂纹扩展路, 提高裂纹扩展过程中的能量耗散。结合晶塑性有限元模拟结果发现, 在变形过程中, 具有大尺寸 (>200 nm) 渗碳体的原奥氏体晶界更容易形成连续高应变集中区, 导致其阻止裂纹扩展能力降低 (低于大角度晶界), 从而获得较低冲击韧性。

C13-20

汽车用超高强 DP 钢的制备及强韧化机理研究

刘浪¹, 何佳珍², 李烈军¹, 梁志远³, 黄明欣⁴, 彭政务⁴, 高吉祥⁵, 骆智超^{*2}

1. 华南理工大学

2. 广东省科学院

3. 松山湖材料实验室

4. 香港大学
5. 广东技术师范大学

近来, 通过调整冷轧及退火工艺, 已成功制备出一种中锰含量的超高强度 (>1400MPa) 双相 (DP) 钢。然而, 由于高密度的铁素体/马氏体 (F/M) 界面存在, 这种广泛的 F/M 界面脱粘机制在很大程度上降低了 DP 钢的抗损伤性能。因此, 提升超高强度 DP 钢的断裂韧性显得尤为重要。本研究通过调整冷轧后的热处理工艺, 成功制备了六种微观组织不同但抗拉强度相当的超高强度 DP 钢。研究表明, 所有样品均存在 F/M 界面脱粘现象, 超高强度 DP 钢的断裂韧性与微观结构密切相关。此外, 还建立了结合 Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) 模型和内聚区模型 (CZM) 的有限元 (FE) 模拟方法, 通过构建八种具有不同铁素体尺寸和 F/M 硬度差的 DP 钢模型用于模拟 DP 钢的断裂行为。实验和模拟结果表明: (i)保持铁素体基体可使断裂韧性提高 1-2 倍; (ii)增加马氏体基体 DP 钢中铁素体的尺寸可提高韧性, 而 F/M 硬度差的变化对韧性的影响较小; (iii)板状 DP 钢的断裂韧性比传统等轴 DP 钢高约 15 倍。板状 DP 钢之所以具有超高的断裂韧性, 这与相界面分层引起的裂纹偏转、裂纹分化和裂纹阻断机制有关。

C13-21

激光增材制造高强度抗氢脆奥氏体不锈钢

郑留伟*, 张慧云
太原理工大学

传统工艺制备的不锈钢材料存在强度越高, 抗氢脆性能越差的问题, 这是设计在含氢环境中工作构件的内在障碍。激光增材制造 304 奥氏体不锈钢在临氢载荷环境中兼具高强度和高抗氢脆性能, 这与 3D 打印后形成的高密度位错胞结构密切相关。经原位动态充氢-慢应变速率实验表明胞状亚晶界可限制位错滑移, 抑制孪晶生长, 限制奥氏体向马氏体转变, 同时晶界处氢的富集程度可以通过氢向附近的胞状位错壁中扩散而得到缓解, 氢分布的均匀性也降低沿晶断裂发生的可能性, 这使其抗氢脆性能大幅提高。激光增材制备不锈钢有望实现“强度-抗氢脆”平衡, 可能是制备临氢载荷服役抗氢脆金属材料的可行选择。

C13-22

超细晶 304 不锈钢低温变形行为的原位中子衍射研究

毛文奇*¹, 高斯², 龚武³, 赵立佳¹, Stefanus Harjo³, Nobuhiro Tsuji², 王强¹

1. 东北大学
2. 京都大学
3. 日本原子能机构

由于面心立方晶体结构, 304 奥氏体不锈钢在低温下的屈服强度相对较低。研究表明, 通过冷轧和退火的方式, 可以实现 304 奥氏体不锈钢的超细晶化。与传统的粗晶粒 304 奥氏体不锈钢相比, 由于晶粒细化强化, 超细晶 304 奥氏体不锈钢在室温下屈服强度显著提高, 同时仍保持良好的延展性。然而, 超细晶 304 奥氏体不锈钢的低温力学性能和变形行为仍不明确。在本研究中, 我们结合原位中子衍射方法和数字图像关联法, 系统地研究了超细晶 304 奥氏体不锈钢在 77K 至 295 K 不同温度下的拉伸变形行为。我们发现这种材料在屈服后表现出明显的吕德斯变形。当温度从 295 K 下降到 77 K, 吕德斯变形行为从位错滑移和马氏体相变的合作机制转变为主要受马氏体相变支配的机制。这种由马氏体转变控制的吕德斯变形会延迟奥氏体母体和马氏体产物中塑性变形的激活, 从而延迟加工硬化的发生, 为变形后期保留了加工硬化能力。因此, 在 77 K 时达到 1.87 GPa 高抗拉强度的同时保持了 29% 的延伸率。

C13-23

超级奥氏体不锈钢凝固组织演变及偏析规律的研究

张月¹, 赵爱民*², 肖俊², 李青春¹

1. 辽宁工业大学 材料科学与工程学院
2. 北京科技大学 钢铁共性技术协同创新中心

超级奥氏体不锈钢是一种合金元素含量高达 50 % 的奥氏体不锈钢, 耐点蚀当量 ≥ 40 , 具有优异的耐腐蚀性能和力学性能。但超级奥氏体不锈钢存在凝固组织粗大、柱状晶发达、偏析严重和硬脆相大量析出的问题, 严重恶化了超级奥氏体不锈钢的性能, 是限制其生产应用的主要原因。

本研究采用热力学计算、模铸试验、定向凝固试验、高温共聚焦显微镜原位观察试验和连铸凝固模拟试验，系统研究了 7Mo 超级奥氏体不锈钢的凝固组织演变、元素偏析和第二相析出规律，探究稀土 Ce 对凝固组织和元素偏析的影响规律，分析了凝固参数对热模拟连铸坯凝固组织和元素偏析的影响规律。本研究先采用热力学计算与试验相结合的方式，研究了 7Mo 超级奥氏体不锈钢的析出相种类、元素偏析规律和凝固路径。再通过对铸锭不同位置的组织进行观察与统计，结合模拟结果获得了二次枝晶间距与冷速之间的关系式。然后通过真空非自耗电弧熔炼的方法制备了有无稀土两种成分的超级奥氏体不锈钢，分析了稀土对超级奥氏体不锈钢组织的影响，另外原位观察了超级奥氏体不锈钢凝固形核和晶粒长大的过程，阐明了稀土元素在超级奥氏体不锈钢中的作用机理。最后，采用连铸模拟试验装置研究了超级奥氏体不锈钢热模拟连铸坯凝固过程，分析了过热度和拉速对热模拟连铸坯凝固过程的影响规律。本研究有利于推进我国 7Mo 超级奥氏体不锈钢的发展。

C13-24

利用不均匀碳元素分布提升超高强度板条马氏体的塑性

黄吉铭^{1,2}, 李烈军², 骆智超³, 黄明欣⁴, 彭政务⁴, 高吉祥⁵, 柯海波¹, 梁志远*¹

1. 松山湖材料实验室
2. 华南理工大学
3. 广东省科学院
4. 香港大学
5. 广东技术师范大学

本研究旨在利用板条马氏体内的不均匀碳元素分布来提升超高强度（大于 2 GPa）热成形钢（Press hardening steels, PHS）的塑性。本研究提出的策略在一种中碳 PHS 中得到了验证，该 PHS 具有由对奥氏体进行淬火而获得的板条马氏体组织。研究发现，通过强化自回火，马氏体相变早期形成的粗板条中的固溶碳含量将会降低，从而使这些板条软化和韧化。具有小体积分数的粗板条的软化并不会损害板条马氏体的超高强度。引人注目的是，软化的粗板条可以显著改善板条马氏体的颈缩后延伸率（Post-uniform elongation, PUE）。利用不均匀碳元素分布获得超高强度板条马氏体 PUE 的极大提升，有望为开发具有良好塑性以及断裂韧性的超高强度 PHS 提供指导。

C13-25

低温预变形 316L 不锈钢的马氏体相变调控与力学性能

位云涛¹, 赖庆全*^{2,3}, 冯涛¹

1. 南京理工大学
2. 南京工业大学
3. 长三角先进材料研究院

316L 不锈钢因其优异的耐蚀性、抗辐照性和可加工性等特征，广泛应用于石油化工与核能发电等领域。然而，室温下该体系的奥氏体稳定性较高，难以激发变形诱发马氏体相变，因而无法有效利用相变诱发塑性（TRIP）效应这种高效的增韧手段实现强韧化。本研究采用低温预应变的方法，在液氮温度下对 316L 不锈钢进行轧制，引入 α' -马氏体晶核调控马氏体相变，在室温变形过程中利用马氏体晶核的长大实现马氏体的增加，利用 TRIP 效应获得良好的强度-塑性匹配。微观组织表征结果显示，低温预变形在奥氏体晶粒中引入了大量由层错和 ε -马氏体组成的剪切带， α' -马氏体在剪切带交叉处形核。同时，利用高分辨率图像相关技术（HRDIC）和原位 EBSD 技术，在亚微米尺度上精细分析了亚稳奥氏体组织在室温下的组织演变及变形机制。室温拉伸过程中， α' -马氏体沿着低温预应变引入的剪切带长大，从而实现马氏体变形诱发马氏体相变；微观应变分析表明，材料中存在显著的应变不均匀性，各相内部应变均呈对数正态分布，且奥氏体与 α' -马氏体之间存在明显的应变配分，其中奥氏体承担了更高的塑性应变。最后，本研究结合了细观力学模型讨论组织中两相的力学行为及其对宏观力学性能的贡献。

C13-26

超薄硅钢中形变孪晶对 Goss/ η 取向晶粒再结晶的影响

孟利*, 徐江杰, 牛澄洲, 涂杨, 张宁
钢铁研究总院有限公司

硅钢（电工钢）是典型的体心立方（BCC）晶体结构多晶组织，在冷轧过程中经常发生形变孪晶，在形变的原始晶粒中孪晶两侧形成大量不均匀变形区，影响再结晶形核的位置和后续退火过程中晶粒的

长大。重要的是，原始的 Goss/ η 取向形核位置点大多位于这些非均匀变形区，并且 Goss/ η 取向是硅钢不可缺少的利于磁性能的取向。本文以 0.27-0.35mm 晶粒取向硅钢为原料，经冷轧和适当的退火工艺制备了 0.08mm 超薄硅钢带。利用 EBSD 技术研究了 Goss/ η 取向晶粒的组织 and 结构演变、再结晶和晶粒长大过程。特别强调了形变孪晶对 Goss/ η 取向晶粒再结晶的影响。

C13-27

几种 316L 奥氏体不锈钢铸坯铁素体特征研究

陈超*, 王洋, 张政睿
太原理工大学

316L 奥氏体不锈钢是在 304 不锈钢的基础上添加 Mo 元素，提高了材料的耐点蚀能力，316L 奥氏体不锈钢因其优异的性能广泛用于石油、化工、核电等行业。316L 奥氏体不锈钢连铸中通常存在残留铁素体相，在后续的热处理过程中也不能将其完全消除，残留铁素体相的存在会严重危害材料的使用性能和磁导率，需要对 316 不锈钢中残留铁素体相进行严格控制。316L 不锈钢的成分一定程度上决定了残留铁素体含量，本研究选取了四种连铸和电渣重熔生产不同 Ni 含量的 316L 奥氏体不锈钢，四种铸坯和铸锭 Cr 含量在 17% 左右，Mo 含量 2.5% 左右，Ni 含量分别为：10%、12.17%、13.60%、14.25%。以上四种不同成分的 316L 不锈钢根据 Ni 含量从低到高分别为 1 号板坯、2 号电渣锭、3 号板坯、4 号方坯。1 号板坯凝固模式为 FA 模式，铁素体形貌主要有骨骼状、板条状和网状结构，铁素体含量在 6.98-11.2% 范围内变化。2 号电渣锭中凝固模式发生了改变，边部位置凝固模式为 AF 模式，中心位置凝固模式为 FA 模式，铁素体形貌为短棒状、骨骼状和平行的短棒状结构，铁素体含量在 2.34-3.47% 范围内变化。3 号板坯凝固模式无变化均为 AF 模式，铁素体形貌为颗粒状、短棒状和网状结构，铁素体含量在 0.61-1.47% 范围内很少，铁素体含量很少，除在板坯厚度中心外铁素体含量均在 1% 以下。4 号方坯凝固模式也为 AF 模式，铁素体形貌为短棒状和网状结构，铁素体含量在 1.37-4.41% 范围内变化。总体来看，Ni 含量增加会降低 316L 不锈钢中铁素体含量，同时还会改变 316L 奥氏体不锈钢的凝固模式，3 号板坯以 AF 模式凝固时可以将铁素体含量控制在最低 1% 以下。Ni 含量从 10% 提高到 12% 可显著降低铁素体含量，Ni 含量在 12.17% 铸坯厚度在 40mm 以内可获得 AF 模式凝固的 316L 奥氏体不锈钢和较低的铁素体含量。Ni 含量在 13% 以上，可获得 AF 凝固模式的 316L 不锈钢。同时还发现在连铸坯或电渣锭生产过程中由于 Ni 含量的不同，还存在不同程度的铁素体分解现象，并发现铁素体的分解与凝固模式也有关系。在 1 号板坯中铁素体只发生了向奥氏体的转变，没有其他析出相的形成；在 2 号电渣锭中，边部和四分之一处都出现了铁素体的分解，沿晶界析出 Chi 相，还有部分铁素体转变为 Sigma 相，但是在铸锭中心也只是发生了铁素体向奥氏体的转变。3 号板坯和 4 号方坯中也出现了铁素体的分解现象，4 号方坯铁素体已经基本转变为 Sigma 相。以 FA 模式凝固的 316L 不锈钢，由于元素偏析较轻，铁素体不容易分解为 Sigma 相；而以 AF 模式凝固的 316L 不锈钢元素偏析比较严重，Ni 含量越高铁素体向 Sigma 相的转变越多。316L 奥氏体不锈钢中 Ni 含量对铁素体有重要影响，Ni 含量从 10% 增加到 12%，可以显著的降低铁素体含量，而继续增加 Ni 含量会增加其他有害析出相的形成。316L 不锈钢 Ni 含量控制在 12% 左右为控制铁素体含量的最佳方案。

C13-28

不锈钢复合板的制备工艺与焊接性能研究

李小兵*, 陆立婷, 陈程, 束长荣, 居殿春
江苏科技大学冶金工程学院

不锈钢复合板具有高强度高韧性、强耐蚀性和低成本优势，应用十分广泛。本课题分别采用热等静压法和热轧法实现了 316L 不锈钢板与 Q370qE 桥梁钢板之间的固态复合，并进行了 316L/Q370 复合板对接熔化焊工艺试验，通过金相显微镜、SEM、TEM、EBSD、EDS 等表征手段和拉剪、拉伸、硬度、晶间腐蚀、电化学等测试方法，研究不同制备工艺条件下复合板的组织演变、力学性能、耐蚀性能及焊接接头性能。实验结果表明，热等静压复合板的界面更加致密，桥梁钢脱碳层和不锈钢渗碳层的组织均匀性改善，铬的碳化物析出量减少，界面结合强度得到提升，拉剪性能值均在 340MPa 以上。热轧复合板的基体组织在控轧控冷条件下得到调控，抗拉强度更高。两种方式的复合板覆层耐晶间腐蚀性能合格，热轧法的自腐蚀电位值更高。不锈钢复合板焊接性能良好，为改善焊接接头的强度和耐蚀性，在焊缝中添加高 Cr、Ni 含量的过渡层，同时提高桥梁钢焊接速度，降低不锈钢焊接电流。由此可见，不锈钢复合板可以在热等静压制备基础上进行热轧组织调控，可以获得更佳的综合性能。

C13-29

化学异质设计在新型低温马氏体时效不锈钢中的应用

刘赓*, 苏杰, 杨卓越, 宁静, 丁雅莉, 王敖
钢铁研究总院有限公司

亚稳奥氏体可通过应变诱发马氏体相变有效提高马氏体时效钢低温冲击韧性, 但过高奥氏体含量通常会降低材料的屈服强度。这一现象使得低温用钢的屈服强度和低温韧性的配比始终难以有所突破。本研究设计了一种新型具有化学异质核壳结构并具有特定体积分数的奥氏体。新奥氏体在 Fe-Cr-Ni-Co-Mo 系马氏体时效不锈钢中展现出良好的变形协调性能。奥氏体的核壳结构由核心区的块状残余奥氏体和壳区的富 Ni 逆转变奥氏体层组成。在变形过程中, 具有连续晶格的奥氏体相展现出的阶段性马氏体转变: 合金元素较高的奥氏体壳体部分被保存, 奥氏体核心区域优先转变成马氏体。靠近低温冲击断口的表征显示, 富合金的奥氏体壳层同样被保留下来, 因此可以有效阻碍裂纹的扩展。在异质奥氏体和纳米析出物 (Laves 相) 的共同作用下, 该合金在室温下的屈服强度高于 1200MPa, 并具有良好的低温冲击功 (77 K, >90 J), 从而优于传统马氏体时效钢和多种高熵合金。研究结果同时表明了亚稳奥氏体中的化学异质设计可显著优化结构材料的力学性能。

C13-30

多元微合金化诱导高钒高速钢耐磨性和铸造性协同提升机制

陶稀鹏*, 王鼎辰, 吴世钰, 崔传勇, 周亦胄, 孙晓峰
中国科学院金属研究所

高钒高速钢具有高硬度和优异耐磨性能, 被认为是 21 世纪冶金工程领域最理想的耐磨材料, 然而高速钢高度合金化导致铸造性能不足, 难以制备大型复杂构件, 目前针对耐磨性和铸造性协同提升问题尚缺乏系统详细的研究。本研究采用多元微合金化协同增效方法, 调控碳化物形成元素含量、添加 Al 元素以及调控 Si/Mn 比值, 实现高钒高速钢高硬度、高韧性、优异耐磨性能和良好铸造性能, 解决高合金化材料耐磨性和铸造性难以平衡控制问题。结果表明: V/C 和 Nb/C 分别为 2.5-3 和 0.15-0.17 时, 可构筑出与奥氏体呈界面共格关系且弥散分布的高硬度碳化物 (VC 和 NbC), 高硬度碳化物可有效抵抗磨损过程中硬磨粒划伤, 同时高强度共格相界面保证碳化物颗粒在磨损过程中不易脱落; 加入 0.6-0.8wt% Al 固溶于基体中, 可提升 C 在奥氏体的活度和 Ms 点温度, 细化晶粒和提升片状马氏体含量, 提升耐磨钢的强韧性, 显著抑制磨损过程中材料基体剥落; 高速钢铸造流动性较差主要归因于高合金化导致大量凝固枝晶形成, 通过调控 Si/Mn 比值降低合金液相线温度, 缩小凝固温度区间, 消除凝固枝晶、减小熔体流动阻力, 改善合金铸造流动性。本研究通过多元微合金化协同增效思想, 自主研发出一种耐磨性和铸造性俱优的新型超硬耐磨铸造合金 NM169, 目前已应用于国产盾构机关键部件, 显著提升了关键耐磨部件的服役寿命, 为大国重器国产盾构机的研发制备提供重要支撑。

C13-31

基于高能 X 射线衍射的中锰钢微观力学行为和应变硬化行为的定量评估

张明赫*
华北理工大学

截至目前, 中锰钢在拉伸过程中 TRIP 效应对应变硬化行为的影响还有待进行定量和深入的研究。此外, 中锰钢奥氏体层错能与吕德斯带扩展行为之间的关系仍鲜有报道。利用原位高能 X 射线衍射 (High-energy X-ray diffraction, HE-XRD) 技术研究了 600°C 下退火 1h 的 Fe-0.1C-10Mn 钢在 100, 63, 25 和 50°C 不同变形温度条件下的微观力学行为。实验钢屈服强度和抗拉强度随着变形温度的下降而不断上升, 而样品延伸率随着变形温度降低先上升后下降。变形过程中, 局部变形带的扩展会促进奥氏体向马氏体转变。随着变形温度降低, 奥氏体稳定性下降, 残余奥氏体随真应变向马氏体的转变动力学遵循 OC 模型预测的 S 形状。实验钢在拉伸过程发生屈服后, 组成相之间发生应力配分现象。 γ -311 的晶格应变在吕德斯带扩展过程中会突然下降。基于组成相的晶格应变, 获得了组成相所贡献的相应力和流变应力。应变硬化率被分解为与组成相之间的应力分配和 TRIP 效应有关的四个因素, 即奥氏体的相应力、奥氏体和马氏体之间的应力配分、马氏体的形成速率以及奥氏体和铁素体之间的应力配分。定量评估了四个因素对应变硬化行为的影响, 四个因素的叠加结果与真实应力-应变曲线中获得的应变硬化率吻合较好。在所研究的变形温度下, 奥氏体的层错能均低于 20mJ/m²。奥氏体的层错能与奥氏体在吕德斯带扩展过程中的转变量两者均与变形温度之间存在良好的线性关系。随着奥氏体层错能的降低, 奥氏体在吕

德斯带扩展过程中的转变量线性增大。本研究的发现有助于深入了解中锰钢中的 TRIP 效应以及 Lüders 带传播行为。

C13-32

分裂增韧型钢材的组织调控及韧化机理

沈鑫珺*¹, 李德志², 王保军¹, 张永鹏¹, 王晓南¹

1. 苏州大学

2. 东北大学

具有层状结构组织的材料, 可产生分裂增韧效应, 显著提高钢材的低温韧性, 但存在上平台能量值低的问题。本工作以低碳微合金钢为对象, 系统研究了变形温度、变形量对层状组织演变及韧性的影响机理。研究表明, 临界区轧制过程铁素体主要发生动态回复, 这是形成层状结构组织的原因。提高轧制温度, 组织的层状结构略有减弱, 上平台能量值提高, 并可达常规粗晶组织钢材的水平。当总厚向真应变超过 1.1 时, 可时冲击过程的主裂纹沿层状界面偏转 90°, 大幅度提高韧性。810 °C 轧制后的钢材, 分裂增韧可使 -140 °C 的 V 型缺口冲击吸收功高达 300 J。分裂增韧的机理是冲击过程中会在裂纹下方的层状界面形成偏平状的微孔, 随后微孔聚集长大, 形成分裂裂纹, 改变主裂纹扩展方向, 使剩余金属在后续冲击过程中发生大范围剧烈的塑性变形, 韧性大幅度提高。本研究可为分裂增韧性钢材的组织调控提供理论和实验依据。

C13-33

稀土对贝/马复相轴承钢显微组织和力学性能的影响机理研究

李赞, 付志豪, 杨超云*, 李星, 栾义坤, 李殿中

中科院金属所

轴承是运转部件的“关节”, 以 GCr15 为代表的高碳铬轴承钢的生产量约占世界轴承钢总产量的 80%。对于承受冲击载荷或复杂应力的大尺寸轴承, 如矿山机械轴承, 高铁主轴轴承, 除了典型的接触疲劳破坏外, 往往还会由于韧性差引起轴承断裂, 这对轴承钢韧性和疲劳性能提出了更高的要求。本研究以贝氏体/马氏体 (B/M) 轴承钢为研究对象, 拟在阐明稀土元素对 B/M 复相组织相变行为以及轴承钢力学性能影响机制的基础上, 设计出疲劳性能优异的高韧性稀土轴承钢。研究表明, B/M 复相轴承钢相较于马氏体轴承钢具有更加优异的韧性和疲劳性能, 其滚动接触疲劳额定寿命 L10 可增加 5 倍以上。同时, 稀土元素可以降低晶界能和碳元素的扩散速率, 抑制晶界贝氏体转变, 促进马氏体相变均匀性, 稳定岛状残余奥氏体, 从而获得细小、均匀分布的针状贝氏体, 实现 B/M 复相组织调控及细化。在不降低硬度的情况下, B/M 复相稀土轴承钢的冲击韧性提高 26.4%, 滚动接触疲劳额定寿命 L10 增加 120% 以上。相关研究结果对于深入认识稀土元素在高碳铬轴承钢中的微合金化作用和超长寿命轴承钢的开发具有重要意义。

C13-34

间隙原子 C+N 协同提升高锰奥氏体钢强塑性

齐向阳¹, 陈晨*^{1,2}, 杨志南^{1,2}, 张福成³

1. 燕山大学 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室

2. 燕山大学 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心

3. 华北理工大学 冶金与能源学院

与置换原子相比, 间隙原子具有更强的固溶强化效果。基于此, 我们在高锰奥氏体钢中引入不同含量的间隙 C、N 原子并制备出 Mn18Cr7C0.6、Mn18Cr7C0.6N0.2 和 Mn18Cr7C0.7N0.2 (wt.%) 3 种试验钢。在室温下对其试验钢的拉伸性能进行了测试, 并通过 EBSD、TEM 和 XRD 等测试手段对其变形前后的组织进行了观察和分析。结果表明, 高锰奥氏体钢的强度随着间隙原子 C/N 含量的增加而增加; 与只含 C 高锰钢相比, C+N 合金化高锰奥氏体具有更高的延伸率。热力学计算表明 C、N 含量的升高提高了高锰钢的层错能。在塑性变形过程中, 三种试验钢的应变硬化率均表现出先上升后下降的趋势。在硬化率上升阶段, C0.7N0.2 钢具有更高的位错密度, 但 C0.6 钢较低的层错能降低了形变孪晶形核的临界应力, 更多的形变孪晶与位错间的交互作用导致 C0.6 钢与 C0.7N0.2 钢相近的应变硬化率。在应变硬化率下降阶段, C0.7N0.2 钢中孪晶的逐步释放导致变形后期更高的应变硬化率。此外, Cr 元素的加入抑制了变形过程中动态应变时效的发生, 避免了高锰钢的早期剪切断裂。

C13-35

首钢 MCCR 薄板坯高拉速连铸技术开发与应用

罗衍昭*¹, 王胜东¹, 马硕², 张聪聪¹, 王皓², 季晨曦¹, 杨春政²

1. 首钢集团有限公司技术研究院
2. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司

首钢京唐 MCCR 产线为了实现无头轧制, 连铸机必须实现高拉速, 但高拉速生产存在液位波动大、板坯裂纹、卷渣等系列问题, 严重时引发漏钢事故。本文通过对保护渣、结晶器电磁制动、水口、冷却水等连铸工艺的优化, 实现了连铸机的高拉速 6.0m/min 稳定生产工艺, 满足了世界首条多模式连铸连轧产线的无头轧制稳定生产, 探明了电磁制动铁芯形状与不同水口的匹配规律, 结晶器液面 $\pm 3\text{mm}$ 命中率 99.8%, 揭示了冷齿与铸坯表面裂纹的形成机理, 实现卷渣发生率大幅降低, 冷齿指数由 3.85 降低至 0.73。通过系列攻关, MCCR 连铸机实现了高拉速 6.0m/min 稳定生产, 产品质量显著提升, 无头轧制技术得到了成功的应用和推广, 引领了全新一代薄板坯连铸连轧的发展, 在同行业具有示范作用。

C13-36

机器学习辅助的高屈服强度高锰 TWIP 钢成分设计

周晓舟*

钢铁研究总院有限公司

孪晶诱发塑性(TWIP)高锰钢具有优异的强塑性、良好的成形性能、高应变硬化性和高能量吸收能力, 是一种理想的抗冲击结构材料和吸能材料, 可应用于汽车、军工、电力、航空、石油开采等领域。然而, 与其他先进高强钢相比, TWIP 钢较低的屈服强度严重限制了它的工程化应用。因此, 本文通过收集文献中 TWIP 钢组织和性能的数据, 采用机器学习多目标优化方法, 开发出了 2 种高屈服强度兼具高强塑积的新型 TWIP 钢。在常规热轧-冷轧-退火工艺下, 两种新型 TWIP 钢的屈服强度分别为 585 MPa 和 560 MPa、抗拉强度分别为 1055 MPa 和 1101 MPa、延伸率分别为 55%和 58.5%、强塑积分别为 58.03 GPa%和 66.41 GPa%。在保持合理强塑性积的前提下, 新型 TWIP 钢的屈服强度显著提高, 可为新型 TWIP 钢的理性开发提供重要参考。

C13-37

应变对双相不锈钢中相分离的影响研究

许鑫*^{1,2}, 原野¹, 柯于斌³, 董朝晖⁴

1. 中山大学
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)
3. 中国散裂中子源
4. 上海同步辐射光源

双相不锈钢(Duplex stainless steels, DSSs)因其较好的强塑性结合, 良好的焊接性与优异的耐蚀性, 被广泛应用于化工、石油、海洋、造纸和核电等领域。然而, DSSs 在 280-550°C 长期服役时, 铁素体中的相分离现象会导致其塑、韧性和耐蚀性急剧下降, 严重影响构件的使用安全与服役寿命。应变对相分离有重要影响, 但影响机制和规律尚不完全清楚。然而, 在生产 DSSs 和利用 DSSs 制造构件的过程中, 材料均需经历塑性变形, 从而对后续热处理和服役中的相分离过程产生影响, 进而影响 DSSs 的服役表现。因此, 为了提高 DSSs 性能、拓宽其应用温度区间、预测构件服役寿命, 需澄清应变对 DSSs 中相分离的影响。2507 DSS 作为第三代 DSSs 的代表钢种, 其不仅综合力学性能突出, 抗点蚀性能也极其优异。本研究以 2507 DSS 作为研究对象, 系统研究塑性应变对相分离过程的影响。通过冷轧使 2507 DSS 获得不同程度的塑性变形, 然后在混溶间隙内的不同温度对其进行时效。结合电子背散射衍射(EBSD)、同步辐射(HE-SXRD)、小角中子散射(SANS)和透射电子显微镜(TEM)等方法, 分析了不同变形量下 2507 DSS 中微观结构和相分离纳米组织的演变。结果表明, 应变导致的铁素体中晶体缺陷含量的增加, 降低了相分离的能量势垒, 并加速了原子扩散速率, 因此在时效早期对相分离过程有促进作用。然而, 位错等晶体缺陷同样会促进其他合金元素团簇的形成, 进而导致铁素体基体中 Ni 含量降低。随着基体中 Ni 元素的贫化, 相分离动力学减慢, 从而逐渐抵消了晶体缺陷对早期相分离过程的促进作用, 并最终在长期时效后将其转变为抑制作用。本研究可为预测双相不锈钢的服役寿命与开发新型防老化双相不锈钢提供理论支撑。

C13-38

以激光增材制造残余应力为驱动的晶界特征分布优化研究

王小艳*

西安文理学院

激光选区熔化过程中由于热诱导会在材料内部产生不均匀的残余应力，逐渐累积会危害材料的性能，严重时引发应力腐蚀开裂影响使用寿命。晶界工程是通过冷加工预先在材料内部引入一定的应力，随后利用退火处理使得应力释放成为晶界迁移的驱动力，某些低应力分布区的晶粒通过微小的晶体取向调整得以保留并在界面应力梯度和位向梯度的作用下，向周围某些高应力或有利位向区发生特定界面的优先迁移，促使特殊晶界增殖反应的发生，提高材料的低 Σ CSL特殊晶界比例，改善材料与晶界相关的性能。本研究提出在激光增材制造的基础上引入晶界工程的概念，目的在于将激光增材制造过程中形成的残余应力“变废为宝”，以激光选区熔化（SLM）316L不锈钢为研究对象，通过热处理消除材料内部的残余应力的同时，以残余应力为驱动力，实现材料晶界特征分布优化。研究热处理过程中残余应力及显微组织变化，以及对316L不锈钢耐蚀性能的影响。实验结果表明：SLM 316L不锈钢内部有孔洞及缺口，晶界处存在Cr、Mn以及Ni的富集现象；通过热处理工艺，316L不锈钢残余应力由拉应力转变为压应力，当加热时间从24h到72h，材料晶粒内部发生再结晶趋势完整，晶粒长大粗化，当时间为72h时，变形晶粒消失，完全再结晶晶粒最多，低 Σ CSL晶界的比例明显增多且分布均匀，随机晶界被打断重组的数量增多；随着热处理温度和时间的上升，材料，钝化电位整体上升，钝化区间减小，耐蚀性增强。本研究为改善激光增材制造金属构件的使用性能提供理论和技术参考，对激光增材制造技术的广泛应用具有一定的推动作用。

C13-39

首钢高成形性能超高强钢开发及应用

阳锋*

首钢技术研究院

介绍了首钢高成形性能超高强钢产品开发及应用。基于高强镀锌线退火工艺，研究了不同初始组织对TBF980+Z组织和力学性能的影响。初始组织为变形铁素体+珠光体时，退火后的显微组织主要由等轴状的铁素体、贝氏体、马氏体和少量残余奥氏体组成，A80介于17~21%。初始组织为马氏体时，退火后显微组织由板条状铁素体、板条状马氏体和残余奥氏体组成，A80可达25%左右，延伸率得到明显提升。

墙报

C13-P01

时效温度对316L不锈钢在模拟质子交换膜燃料电池阴极环境下腐蚀性能的影响

王宸，何嘉仪，吴子恺，李益民，罗丰华*

中南大学粉末冶金研究院

采用动电位极化曲线、电化学阻抗谱(EIS)、电化学动电位再活化法(DL-EPR)等方法，研究了时效温度对316L不锈钢在质子交换膜燃料电池(PEMFCs)模拟阴极环境中腐蚀行为的影响。结果表明，在PEMFCs的模拟阴极环境中，在750-900℃时效1小时后，316L的耐腐蚀性能显著下降。在850℃时效后，对晶间腐蚀有很强的敏感性，富铬M₂₃C₆碳化物在晶界上析出。M₂₃C₆的析出导致晶界附近钝化膜的不连续性，导致晶界处的贫铬区，增加晶间腐蚀，降低耐蚀性。当时效温度超过950℃时，不会发生M₂₃C₆的晶界析出，耐腐蚀性提高。在1050℃的时效温度下，在极化试验过程中，合金表面形成致密的Cr₂O₃膜，使其在PEMFCs的模拟阴极环境中具有最佳的耐腐蚀性。

C13-P02

钒对X80管线钢显微结构及氢致塑性损失影响研究

李龙飞*¹，宋波²，林腾昌¹，孟华栋¹，贺庆¹，姚同路¹

1. 钢铁研究总院有限公司

2. 北京科技大学

管线钢在服役过程中内部会受到酸性油气的侵蚀，外部则受到潮湿土壤或者复杂海洋环境的作用，势必会造成大量的氢原子在管道长时间服役过程中扩散进入钢材内部，降低原子间结合力，引起钢局部

塑性下降。纳米级含钒碳化物具有很强的捕获氢能力，在一定的氢扩散通量下，降低钢中可扩散氢原子的数量，且细小碳化物自身不会作为裂纹源。因此，笔者及团队以运输范围最广且用量最大的 X80 级管线钢作为研究对象，借助扫描电镜、透射电镜、电子背散射衍射技术、Devanathan-Stachurski 双电解槽氢渗透实验装置、热脱附实验以及拉伸试验等研究方法和手段，探究 4 种不同钒含量 (0%、0.042%、0.084%、0.130%) 对控轧控冷回火态管线钢中纳米尺度析出相、显微组织、位错密度等显微结构特征的影响，分析了不同实验钢中的氢扩散行为以及氢致塑性损失的差异性。结果表明：随着钒含量的增加，钢中纳米尺度析出相体积分数增大，其中 20 nm 以下析出相主要为球状或椭球状含钒碳化物；不同钒含量实验钢经控轧控冷回火处理显微组织均由块状铁素体和少量粒状贝氏体组成；钢中位错密度随着钒含量增加而增多，4 种实验钢中位错密度分布均匀，未发现有位错胞和亚晶结构，对提高钢的均匀塑性有益；随着钢中钒含量增加，有效氢扩散系数降低 (由 $3.32 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $1.51 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)，有效氢陷阱效率提升 (由 $9.74 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 升至 $5.40 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)，氢致塑性损失得到明显改善。综合以上结果可知，随着钒含量的升高，实验钢中纳米尺度碳化钒颗粒数量增多、平均尺寸降低，氢的有效扩散系数降低，可以捕获可扩散氢原子的氢陷阱数量增加，降低了引起界面能降低或造成局部塑性变化的可扩散氢原子数量。同时，纳米尺度碳化钒颗粒可以阻碍位错运动，且颗粒越小阻碍效果越强。因而纳米尺度碳化钒相作为有效氢陷阱和阻碍位错运动的双重作用使得管线钢的抗氢致塑性损失能力得到了改善。

C13-P04

中碳贝氏体多相钢组织分析及定量强化评价

孙晓文¹，孙东云¹，张福成¹，王天生*²

1. 华北理工大学

2. 燕山大学

以贝氏体铁素体(BF)为基础相的多相贝氏体钢的组织与性能是当前研究的热点。本文对中碳贝氏体钢进行等温淬火处理以得到预生成马氏体-贝氏体铁素体-残余奥氏体 (PM-BF-RA) 多相组织，并定量分析了多相组织特征与力学性能的相互关系。结果表明，与 BF-RA 试样相比，PM-BF-RA 试样中贝氏体铁素体厚度较细且其位错密度较高，残余奥氏体尺寸较小且其含碳量较高。与 BF-RA 试样相比，PM-BF-RA 试样具有更高的硬度和屈服强度。基于多相组织中各相分数及其单一相中组分特点建立的屈服强度强化模型与实验结果具有良好匹配。BF-RA 试样的屈服强度贡献量的主导相为 BF，而 PM-BF-RA 试样的贡献量为 BF 和 PM。其中，贝氏体铁素体的强化机制为晶界强化，预生成马氏体和残余奥氏体的强化机制为固溶强化。机械稳定性较强的残余奥氏体导致 PM-BF-RA 组织具有更优异的加工硬化行为。而且，由于尺寸较小的 BF 和块状 RA 使得 PM-BF-RA 试样具有较高的冲击韧性。含有 PM-BF-RA 多相组织的中碳贝氏体钢实现了强度-塑形-韧性良好的配合。

C13-P05

Custom 455 不锈钢在 480 °C 时效过程中析出强化行为研究

孙光岩，彭剑超，刘文庆*

上海大学

Custom 455 不锈钢的超高强度源于高密度、弥散分布的纳米尺寸析出相。本研究将以 Cu、Ti、Si 作为主要强化元素的 Custom 455 马氏体析出强化不锈钢在 850 °C 固溶 0.5 h 后水淬，在 480 °C 回火不同时间，得到硬度变化曲线。利用透射电子显微镜(transmission electron microscopy,TEM)和原子探针层析技术(atom probe tomography,APT)研究时效过程中析出相演变规律和成分变化对其硬度的影响。

主要结果如下：时效 5 min，Cu、Ni、Ti 原子偏聚在一起形成球状团簇，导致硬度迅速上升；时效 0.5 h，富 Cu 相与富 Ni 相发生分离，形成两类富 Ni 相(棒状富 Ni 相尺寸大，密度低，Ni、Ti 原子比接近 3:1，应为 Ni₃Ti 相，球状富 Ni 相尺寸小，密度高，Ni、Si、Ti 原子比接近 15:5:5，应为 G 相前驱相)；时效 4h，富 Cu 相数量密度降低，棒状 Ni₃Ti 相数量密度升高，G 相形成(Ni、Si、Ti 原子比接近 16:7:6)，导致硬度达到峰值；时效 128h，富 Cu 相、Ni₃Ti 相和 G 相尺寸均发生粗化，数量密度下降，导致硬度下降。富 Cu 相、Ni₃Ti 相、G 相和马氏体间存在如下的位向关系： $(111)\text{Cu} // (0004)\text{Ni}_3\text{Ti} // (011)\text{G} // (011)\text{M}, [0-11]\text{Cu} // [-12-10]\text{Ni}_3\text{Ti} // [100]\text{G} // [100]\text{M}$ 。

C13-P06

异质构多相晶粒微观结构促进 Fe-18Mn-3Ti 温轧钢的强度-塑性平衡

李一锋^{1,2,3}，刘树林^{1,2}，夏远光^{1,2}，徐菊萍^{1,2}，陈怀灿^{1,2}，殷雯*^{1,2,3}

1. 中国科学院高能物理研究所
2. 散裂中子源科学中心
3. 中国科学院大学

高锰钢由于其优异的力学性能和焊接性能而受到汽车工业界的广泛关注。为了实现其力学性能的提升,往往会向高锰钢中添加钼、铌、钒等合金化元素,这显著提升了高锰钢的生产成本,不利于高锰钢在工业中的广泛应用。钛作为一种常规的合金化元素,其成本相对较低,该元素的引入也可实现高锰钢力学性能的提升,这引起了学术界的广泛关注。然而,在含钛高锰钢中如何实现强度-塑性平衡仍然是一种挑战。最近有研究表明,通过退火工艺制备出了含有纳米尺度 α -Mn析出强化相的Fe-18Mn-3Ti钢。该合金具有1.8 GPa的极限抗拉强度,但是其塑性只有7%。近年来,通过温轧工艺、临界温度退火工艺等手段可以实现锰钢的强度-塑性平衡。本研究报道了基于温轧工艺实现Fe-18Mn-3Ti钢强度-塑性平衡的机制。微观结构分析表明,在温轧过程中,热和应变的共同作用使得晶粒的变形和再结晶过程同时进行。力学性能的提高归因于多相(α -马氏体、奥氏体和 ϵ -马氏体)微观结构。极限抗拉强度的提高归因于晶粒细化、晶粒变形和塑性变形前期的TRIP效应(奥氏体向 ϵ -马氏体转变)。同时,总伸长率(TEL)的增加与塑性变形中期的TRIP效应(ϵ -马氏体向 α -马氏体转变)有关。

C13-P07

奥氏体化制度对 22MnB5 钢氢脆敏感性的影响

李碧波*¹, 陈鹰¹, 李继康¹, 赵小龙², 王昌¹, 王毛球¹

1. 钢铁研究总院有限公司
2. 酒泉钢铁(集团)有限责任公司

氢脆现象是影响热成形钢使用的一大重要因素,且热成形钢的强度级别越高,越易发生氢脆。本文以酒钢 CSP 生产线生产的 22MnB5 钢冷轧板为实验材料,通过改变奥氏体化温度和保温时间来研究 22MnB5 钢在奥氏体化过程中的组织性能变化和氢脆敏感性变化,旨在为热成形 22MnB5 钢的热处理过程工艺参数的优化设计提供理论依据,为降低热成形钢的氢脆危害提供数据支撑。本文采用金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)、X射线衍射仪(XRD)和拉伸试验机对奥氏体化前后的组织和性能进行了研究,发现随着奥氏体化温度的增加,原奥晶粒尺寸和淬火后的板条尺寸不断增大,而抗拉强度和屈服强度先增大后减小,延伸率保持不变。而随着保温时间的延长,奥氏体化程度升高,原奥晶粒尺寸和淬火后的板条尺寸不断增大,而抗拉强度不断增大,屈服强度减小,延伸率变化不大。从上可知,改变奥氏体化参数会使得 22MnB5 钢淬火后的组织性能发生变化,而组织性能变化则会影响热成形钢的氢脆敏感性,因此需要采用慢应变速率拉伸试验法(SSRT)对不同奥氏体化制度处理后 22MnB5 钢的氢脆敏感性进行研究,并采用热脱氢分析仪(TDS)对其氢含量进行测定分析。实验结果表明随着奥氏体化温度的升高,22MnB5 钢中的位错密度增加,使得可逆氢陷阱的氢含量不断增高,从而氢脆指数不断提高;而随着保温时间的延长,氢脆指数不断提高。综合考虑奥氏体化制度对 22MnB5 钢组织性能和氢脆敏感性的影响,发现 920 °C 保温 5 min 是较为合适的奥氏体化制度,此时组织均匀,力学性能优良,氢脆敏感性低。

C13-P08

一种用于增材制造的新型中碳合金钢的组织及性能

张舒博, 马梦晗, 刘伟*, 张文井
清华大学

中碳合金钢如 H13 等模具钢与增材制造技术相结合,能够一体化设计高自由度零件,并具有高性能,具有十分重要的应用意义。但是由于增材制造中碳合金钢过程中,超快冷速导致的内应力,以及的合金本身成分问题,往往在成形样品中出现裂纹等缺陷,影响其进一步应用。

本研究基于增材制造技术开发了一种新型中碳合金钢,具有良好的成形性和优秀的强塑性。其致密度高于 99.7%,基体中不存在裂纹,退火后强度超过 2150MPa,均匀延伸率超过 12%。本报告对其成分设计思路、组织演变机理、性能演化进行分析。

C13-P09

Mo 对马氏体不锈钢轴承钢渗层组织及显微硬度影响

郭春成*¹, 李海宏², 庞学东³, 孙勇³, 迟宏宵¹, 谷金波¹

1. 钢铁研究总院特殊钢研究院

2. 中国航发哈尔滨东安发动机有限公司
3. 抚顺特殊钢股份有限公司

目前, 渗碳工艺难点是限制高合金不锈钢推广应用的最重要因素, Mo 含量对渗层组织的影响规律尚不明晰。本文采用 OM、SEM、TEM 和 XRD 研究了不同 Mo 元素 (0Mo、2Mo、4.6Mo) 含量对马氏体不锈钢渗碳组织和显微硬度的影响规律。结果表明: 渗碳处理后, 随 Mo 含量增加, 试验钢碳化物由网状分布向半封闭网状转变, 最终呈弥散分布, 显微硬度随 Mo 含量提高而升高; 淬火处理后, 试验钢碳化物结成网状倾向减弱, 最终呈均匀分布, 但 4.6Mo 试验钢碳化物数量少于 2Mo 试验钢; 2Mo 试验钢显微硬度最高, 4.6Mo 显微硬度最低; 深冷处理后, 试验钢碳化物变化趋势与淬火处理后保持一致; 回火处理后, 碳化物由链状碳化物像网状碳化物转变, 最终弥散分布, 2Mo 试验钢渗碳层显微硬度最高, 0Mo 试验钢显微硬度最低, 心部组织 2Mo 试验钢显微硬度最高, 4.6Mo 试验钢显微硬度最低。通过上述试验结果表明, Mo 元素含量提高可以降低形成网状碳化物的倾向, 使碳化物分布更加均匀、弥散, 并且提高试验钢的显微硬度, 但是对于高 Mo 含量试验钢, 常规渗碳工艺不再适应, 提升渗碳温度或延长渗碳保温时间是改善渗碳工艺的两个方向。由点带面, 即使是强碳化物形成元素 Mo, 含量过高时都会阻碍渗碳过程中 C 的迁移, 那么对于表面硬化型钢材进行成分优化时, 渗碳工艺均需要进行适当调整。

C13-P10

原子尺度研究超高强度马氏体钢的孪晶亚结构

闫建辉¹, 薛鹏^{2,3}, 张来启*¹, 尤力¹, 朱晓东³, 魏旭¹

1. 北京科技大学
2. 上海交通大学
3. 宝山钢铁股份有限公司

超高强度马氏体钢作为最高强度冷成型吉帕钢, 其强韧搭配制约它的进一步发展。超高强度马氏体钢主要由板条 (位错) 马氏体构成, 但其内部还存在少量的片状 (孪晶) 马氏体。这些少量孪晶看似微不足道, 但其与基体之间可能存在较大的物理性质差异, 进而影响材料的强韧性。目前对于高密度位错内部孪晶亚结构的认识存在不足, 对于孪晶亚结构的系统研究尚未报道。

本研究旨在原子尺度上揭示超高强度马氏体钢中孪晶亚结构的详细特征, 并建立起孪晶形成-特征-作用的直接关联。该工作中试验钢的碳含量为 0.19%, 经熔炼-连铸-热轧-冷轧-淬火后制备得到。首先, 利用高能聚焦离子束系统 (FIB) 和场发射透射电子显微镜 (TEM) 揭示孪晶亚结构的原子排列特征; 接着, 通过几何相位分析 (GPA) 方法对孪晶亚结构的应变分布进行重构; 然后, 借助场发射电子显微探针 (EPMA) 和三维原子探针 (3DAP) 厘清钢中不同位置及孪晶特定区域的元素分布行为; 最后, 利用纳米力学测试系统明确元素分布与孪晶形成对超高强度马氏体钢力学性能的影响规律。

结果表明, 在孪晶亚结构内部孪晶与基体界面为非共格界面, 并存在原子排列不规则区域。当基体/孪晶的宽度在几纳米范围内时, 孪晶界上存在几个原子范围的不规则区域。若基体/孪晶宽度超过此范围, 则在基体/孪晶内部可以形成接近基体/孪晶宽度的不规则区域。不规则区域与基体/孪晶之间为共格界面, 应变能较小, 可以降低体系能量, 保持孪晶系统的稳定性。这种独特的孪晶亚结构源于碳的不均匀分布, 局部的碳富集会促进孪晶的形成。碳富集区域内部存在纳米尺度的片状碳团簇, 这是孪晶亚结构中不规则区域产生的直接原因。碳的不均匀分布使得纳米硬度表现出正态分布特征, 而孪晶的存在导致局部纳米硬度显著增加。该研究为理解超高强度马氏体钢的孪晶亚结构提供了新的视角, 对材料的设计和改进行具有重要意义。

C13-P11

700L 钢焊接接头软化行为研究

任志国*

钢铁研究总院有限公司

高强度大梁钢焊接过程中, 存在焊接接头韧性低、焊接热影响区软化等问题。对比研究了 700L 钢气体保护电弧焊接和激光-电弧复合焊接接头显微组织与力学性能, 分析了焊接热影响区软化行为。结果表明, 软化区位于靠近母材的焊接热影响区, 在焊接热循环的作用下, 软化区 M-A 组元易分解, 硬度降低。采用气体保护焊接, 700L 钢焊接热影响区软化区宽度约 2.0 mm, 硬度 220 HV0.2, 较母材降低了 18.5%, 致使拉伸试样断裂于热影响区, 焊接接头抗拉强度 752 MPa, -20°C 冲击吸收能量 43 J。与气体

保护焊接比较, 激光-电弧复合焊接软化区硬度提高 $\geq 12\%$, 宽度减少 $\geq 50\%$; 随着电弧热输入的降低, 软化区宽度减小; 当电弧热输入 $\leq 1.95 \text{ kJ/cm}$ 时, 软化区宽度降低至 0.6mm , 焊接接头拉伸试样断裂于母材, -20°C 冲击吸收能量达到 50 J 。

C13-P12

压痕和单轴拉伸中 Portevin–Le Chatelier 效应的直接比较

彭修星¹, 王灵禹¹, 徐伟¹, 梁志远*²

1. 东北大学
2. 松山湖材料实验室

压痕仪具有在小尺度下表征 Portevin–Le Chatelier(PLC)效应的能力。然而, 由于应力和应变的复杂性, 利用压痕的结果对潜在的动态应变时效机制进行定量评估是具有挑战性的。在这里, 我们通过关联压痕和单轴拉伸之间的 PLC 效应来解决这个问题。采用一种具有显著 PLC 效应的孪生诱导塑性钢作为模型材料。在粗晶样品的单个晶粒中进行压痕应变速率范围从 5×10^{-4} 到 10 s^{-1} 的系统压痕试验。为了进行直接比较, 在等效单轴应变率下, 在多晶样品中进行了结合数字图像相关技术的单轴拉伸试验。结果表明, 与单轴拉伸相比, 锯齿形塑性流动和负应变率敏感性(nSRS)的应变率范围、nSRS 值以及锯齿形尺寸的速率依赖性方面压痕实验展现了相似的结果。与单轴拉伸相反, 压痕中 PLC 效应可能会在较低的速率下变得随机, 因为样品体积有限。此外, 还对单个压痕锯齿进行了分析, 揭示了其形成和速率依赖特征背后的物理原理。

C13-P13

超高强度马氏体时效钢电弧增材制造构件微观组织与力学性能研究

阚成玲*

钢铁研究总院有限公司

超高强度马氏体时效钢因其超高强度与良好韧性而广泛应用于航空航天和国防工业领域。采用电弧增材制造技术制备了马氏体时效钢单壁墙构件, 深入研究了其在不同热处理条件下的微观组织演变和强化行为。研究表明, 增材制造成形组织主要由板条马氏体、残余奥氏体和少量原位强化相组成, 晶内和晶间存在明显的元素偏析, 成形构件极限抗拉强度 (UTS) 1184 MPa , 断后伸长率 16.8% 。经过 $480^\circ\text{C} \times 4\text{h}$ 时效处理, 板条马氏体中形成了不均匀分布的纳米沉淀相, 成形构件 UTS 增加至 1484 MPa , 并且显微组织中逆转变奥氏体比例超过 10% , 断后伸长率达到 14.8% 。高温固溶处理 ($840^\circ\text{C} \times 1\text{h} + \text{空冷}$) 能够抑制成形构件的元素偏析, 残余奥氏体含量降至 3% 以下, 再经过 $480^\circ\text{C} \times 4\text{h}$ 时效处理, Ni3Ti 和 Ni3Mo 等纳米强化相弥散析出, 成形构件 UTS 达到 1686 MPa , 断后伸长率 9.2% 。

C13-P14

热输入对电弧增材制造船用高强钢组织与力学性能的影响

侯旭儒*

钢铁研究总院有限公司

采用冷金属过渡 (CMT) + 脉冲 (P) 电弧增材制造技术制备了 590 MPa (屈服强度) 级船用高强钢构件, 研究了热输入对成形构件组织与力学性能的影响。结果表明, 热输入 5.6 kJ/cm 时, 构件显微组织主要为上贝氏体和粒状贝氏体, 马氏体-奥氏体 (M-A) 组元面积占比约为 14.82% , 有效大角度晶界 ($\alpha > 45^\circ$) 比例为 36.3% , 构件在横向和纵向的抗拉强度分别达到 843 和 858 MPa , 平均硬度 286 HV , 但其 -50°C 冲击吸收能量分别仅为 15 和 16 J ; 而热输入增加至 13.5 kJ/cm 时, 低冷却速率和高有效夹杂物 ($d > 0.4 \mu\text{m}$) 含量促使增材制造构件组织中形成大量针状铁素体, 同时还出现了板条贝氏体和少量粒状贝氏体, M-A 组元面积占比降低至 4.21% , 有效大角度晶界比例增至 52.4% , 构件在横向和纵向的抗拉强度分别降低至 723 和 705 MPa , 平均硬度也降低至 258 HV , 但其低温冲击吸收能量大幅提高, 分别达到了 109 和 127 J , 约是低热输入条件下构件低温冲击吸收能量的 $7\sim 8$ 倍, 冲击断裂特征也由准解理断裂转变为典型的韧性断裂。

C13-P15

快速感应加热淬回火优化高强中碳钢的位错强化

黄思铭¹, 邢献强², 李烈军¹, 欧阳健平¹, 高吉祥³, 陈松军¹, 彭政务*¹

1. 华南理工大学

2. 广东奥赛钢线有限公司
3. 广东技术师范大学

本研究通过快速感应加热开发了高强度淬回火中碳钢，所获得的屈服强度、抗拉强度和总伸长率分别为 2103 MPa、2301 MPa 和 8.26%，实现强度和塑性的最佳组合。与传统加热相比，快速感应加热使马氏体组织更加细致，位错密度更高。研究发现感应加热的位错强化贡献占主导地位，超过 1000 MPa，而不是通常认为的晶界强化。随着回火温度的适当提高，位错相互作用并部分湮灭，导致强度下降，但塑性增加。因此，快速感应加热技术为中碳钢实现超高强度和高塑性提供了可行途径。

C13-P16

Nb 元素对镍基合金焊接接头性能的影响

齐政昕*

钢铁研究总院有限公司

采用自主研发的 3 种不同的 ENiCrMo-6 焊条 (1.14wt%Nb、1.32wt%Nb 和 1.50wt% Nb) 对 9Ni 钢进行焊接，使用 OM、SEM、EDS 等手段观察分析了焊接接头的显微组织和冲击断面，并对焊接接头的拉伸、低温冲击和硬度进行了研究。结果表明，焊材与母材匹配良好，焊接接头中未发现焊接缺陷，综合力学性能满足使用要求。焊缝金属由富 Ni 奥氏体枝晶和 Nb (C,N) 相组成，随着 Nb 元素含量的升高，焊缝金属的-196℃冲击功逐渐由 95.3 J 降低至 76.3J；抗拉强度逐渐由 669 MPa 升高至 695Mpa，均断裂于母材位置。弥散分布的 Nb 元素的碳化物对裂纹扩展具有阻碍作用，有利于提高韧性，但 Nb 含量由 1.14wt%提高至 1.50wt%时，塑性和韧性略有降低，强度和硬度有所上升。

C13-P17

δ铁素体对 ER308L 不锈钢熔敷金属高温塑性的影响

蒋聪*

钢铁研究总院有限公司

本文研究了三种不同 Cr、Ni 含量的 ER308L 焊丝对 TIG 焊熔敷金属的组织 and 350℃ 高温塑性的影响。结果表明：熔敷金属的微观组织由奥氏体基体和网状及板条状δ铁素体组成，通过计算熔敷金属的 Cr、Ni 当量使用 DeLong 图确定组织中铁素体含量。随着δ铁素体含量的降低，熔敷金属的高温延伸率由 24.5%提升至 29%，高温屈服强度和抗拉强度无明显变化。这是由于铁素体含量降低后，网状δ铁素体的变得分散，裂纹沿铁素体扩展的阻力增加，提高了组织的高温塑性。

C13-P18

焊后热处理对 1600MPa 级超高强度钢熔敷金属组织及性能的影响机理

郭文斌*

钢铁研究总院有限公司

使用自研的气保护实芯焊丝对 1600Mpa 级超高强度钢进行熔化极活性气体保护焊 (GMAW) 焊接，并进行室温拉伸和冲击试验，研究了熔敷金属的强韧性和热处理(PWHT)对强韧性的影响。结果表明：焊态熔敷金属 (As-welded) 的屈服强度为 1090Mpa，室温冲击功为 46.67J,热处理后熔敷金属的屈服强度为 1330Mpa，室温冲击功为 32.33J；组织观察和分析结果表明，焊缝金属由马氏体和残奥构成，存在枝晶状偏析。焊道间热影响区残奥的数量少于焊缝中心。经过热处理，偏析程度减弱，熔敷金属中基体组织由马氏体转变为回火马氏体，残奥的含量由 3%减少为 0.2%，位错密度由 $11.51 \times 10^{14}/m^2$ 增加到 $14.87 \times 10^{14}/m^2$ ，有大量的碳化物析出。对断面形貌进行观察，韧窝内颗粒尺寸和韧窝的尺寸的差异表明，表明热处理后碳化物的析出对韧性有不利影响。

C13-P19

焊接方法对 9%Ni 钢焊接接头低温断裂韧性的影响

齐彦昌*

钢铁研究总院有限公司

针对手工焊、埋弧焊和钨极氩弧焊方法制备的 9%Ni 钢焊接接头，按照 GB/T 21143-2014 标准，在-196℃下测试了其焊缝和热影响区的断裂韧性。通过显微组织、断面形貌和硬度分布的分析，研究了不同

焊接方法对接头低温断裂韧性的影响。结果表明,在相同的焊接方法下,焊缝的断裂韧性较稳定,而热影响区易出现 pop-in 脆断现象,导致 CTOD 值的离散性偏大。三种焊缝的显微组织均为富镍奥氏体+晶界/亚晶界析出相,CTOD 值相差不大,均在 0.25mm 以上;其中钨极氩弧焊接接头焊缝的局部硬度较高,导致其断裂韧性相对较低。热影响区的断裂韧性受焊接方法的影响较大,埋弧焊接头的热影响区试件全部发生脆断,COTD 平均值最低,较高比例的粗大马氏体和 M-A 组元是其断裂韧性较差的主要原因。

C13-P20

铌微合金化对 1000 MPa 级熔敷金属组织和性能的影响

赵琳琳*

钢铁研究总院有限公司

采用扫描电子显微镜(SEM)、电子背散射衍射(EBSD)和透射电子显微镜(TEM)等试验方法,研究了 Nb 元素对熔敷金属微观组织和性能的影响。结果表明:熔敷金属主要由板条马氏体和贝氏体的混合组织构成。与无 Nb 熔敷金属相比,0.068wt.%Nb 熔敷金属的板条内部及边界上析出少量球形和立方形的富 Nb 碳化物,并且存在少量尺寸在 100-200 nm 的球形 NbC 颗粒。由于 Nb 的加入,使得位错强化和析出强化增强,熔敷金属强度提升约 6.1%。此外,Nb 的加入使得大角度晶界密度下降,对裂纹扩展阻碍作用减弱,裂纹扩展功降低,不利于低温冲击韧性。

C13-P21

热输入对 900MPa 热影响粗晶区组织和韧性的影响

王成*

钢铁研究总院有限公司

通过示波冲击试验,结合 OM、SEM、TEM、EBSD 等微观组织表征和维氏硬度测试,研究不同热输入(12Kj/cm、16Kj/cm、19Kj/cm)对 900MPa 级低合金高强钢热影响粗晶区(CGHAZ)组织转变和低温韧性的变化,确定最佳焊接工艺参数。结果表明,热影响粗晶区组织主要为板条马氏体和板条贝氏体,在 19Kj/cm 时出现少量粒状贝氏体。随着热输入增加,板条马氏体含量减少,贝氏体含量增多,板条由平行变为交织分布状态。同时,在组织中观察到 M-A 组分,其含量增加并且由粒状变为块状,尺寸由 1.52 变为 1.95 μ m。残余奥氏体数量减少。其次,大角度晶界比例先增高后降低,其占比分别 66.4%、75.2%、60.8%,冲击韧性先增高后降低,硬度值降低,通过上述描述可以确定 16Kj/cm 为最佳工艺。

C13-P22

不同奥氏体稳定化热处理工艺对热轧 2Mn 钢组织性能的影响研究

敬树坤,宋仁伯*,赵帅,霍巍丰,王鑫玮

北京科技大学

低 Mn 系汽车钢具有低成本高强度优势,但在低 Mn 条件下实现奥氏体稳定性升高强化塑性始终是阻碍低 Mn 系汽车钢研发的主要困难。本文以 Fe-2.06Mn-0.54Al-1.59Si-0.26C-0.029Nb 实验钢为研究对象,对临界退火(IA)、临界退火-回火(IAT)和临界退火-配分(IQ&P)三个奥氏体稳定化热处理工艺后的样品进行了组织性能的对比研究。结果表明,当 Mn 含量较低时进行 IA 处理得到的奥氏体组织稳定性较差,导致钢中奥氏体含量较低,组织以铁素体和马氏体为主。随后选取 IA 后奥氏体含量最多的样品进行 IQ&P 和 IAT 的对照实验,发现 IQ&P 工艺可以显著提高组织内的奥氏体含量,样品奥氏体含量由 14%提升为 29%,且多以马奥岛的形式存在。IAT 样品中的奥氏体含量较 IA 样品有所降低,由于其冷速较快,材料内马氏体含量较高,抗拉强度更高,且塑性并未降低。奥氏体含量可通过促进 TRIP 效应,改善材料力学性能,但非决定性因素,适当的奥氏体稳定性有助于在变形过程中保持足够的奥氏体含量,而尺寸适当、块状或亚稳态、分布均匀的奥氏体更容易发生 TRIP 效应从而改善钢的强度和塑性。以实验钢为例,经 IAT 处理后的样品,其奥氏体结构更符合上述理想条件,因此其力学性能更为突出,抗拉强度 1125MPa,断后伸长率可达 19.8%。

C13-P24

Mo 微合金化对 X80 管线钢 SCGHAZ 冲击韧性的影响

李园*

钢铁研究总院

研究两种不同 Mo 含量的 X80 管线钢 (即 0Mo 和 0.11wt.%Mo)的亚临界粗晶热影响区(SCGHAZ)的显微组织和冲击韧性。使用 Gleeble 3500 热模拟实验来模拟 X80 管道环焊缝的 HAZ, 通过 SEM、TEM、EBSD 和 XRD 等一系列的材料测试技术对两种试样进行表征, 研究表明: 适量加入 Mo 元素提高了基体淬透性, 增加组织中贝氏体铁素体 BF 的含量并细化 BF 板条, BF 含量的增加大幅提高大角度晶界 HAGB 占比, 有效阻碍裂纹扩展; 另一方面, Mo 元素以固溶的方式存在时可以降低析出形核的早期能垒, 延缓高温下位错线的消失, 形成高密度的位错网格, 增加 NbC 析出的形核位点, 阻止 NbC 粗化, 提高了析出诱发微孔产生所需外加应力阈值, 阻碍裂纹的萌生。总之, 利用 Mo 元素的微合金化作用, 合理调控热影响区的显微组织结构和第二相形态, 显著提高了 SCGHAZ 的冲击韧性。

C13-P25

焊丝 Cr 含量对 HSLA 钢焊缝金属组织和性能的影响

洪瑞^{1,2}, 贾书君*²

1. 昆明理工大学

2. 钢铁研究总院有限公司

采用光学显微镜、扫描电镜和电子背散射衍射对不同 Cr 含量的 HSLA 钢的焊缝显微组织和力学性能变化进行了详细研究。结果表明: 焊接接头的主要组织为针状铁素体和侧板条铁素体, 随着 Cr 的加入, 焊缝组织中的侧板条铁素体占比降低, 针状铁素体的占比提高, 且有效晶粒尺寸变小。当 Cr 含量提高到 0.25wt%时, 焊缝金属的强度和韧性均有提高, 其中抗拉强度从 607MPa 提高到 656MPa, 冲击功从 126.37J 大幅提高到 223.79J。这是因为 Cr 元素的加入提高了焊缝金属组织的淬透性, 促进并细化了针状铁素体, 抑制了侧板条铁素体的形成, 焊缝金属中大角度晶界的密度升高, 有效的阻碍了裂纹的扩展, 提高了焊缝金属的强韧性。

C13-P26

回火温度对低合金抗硫油井管用钢组织及力学性能的影响

白金鹏, 朱康峰, 梁小凯, 孙新军, 贾书君*

钢铁研究总院有限公司

通过 660~740°C 不同温度的回火实验, 研究了回火温度对低合金抗硫油井管用钢组织及力学性能的影响规律, 采用 OM、SEM、TEM 等方法对试验钢的微观组织及析出相进行表征, 同时采用物理化学相分析法对析出相进行定量分析, 并对多种强化机制进行综合计算。结果表明: 随着回火温度的升高, 试验钢的屈服强度呈线性下降的趋势, 基体内位错发生回复现象, 位错密度显著降低, 位错强化增量降低近 70MPa, 740°C 时由于回火温度进入两相区, 导致回火过程中出现新鲜马氏体组织, 位错密度显著提高; 随回火温度升高, 马氏体板条出现合并宽化, 同时马氏体块发生粗化现象, 细晶强化增量降低约 40MPa; 随着回火温度升高, 固溶强化增量总体呈现先下降再上升的趋势, 结合相分析结果分析发现, 这是由于在 680°C 时 MC 相析出量达到峰值, 固溶强化增量下降约 100MPa。

C13-P29

X70 焊管在高压纯氢环境下的氢脆敏感性研究

帅康新*^{1,2}, 李拔², 汪兵²

1. 昆明理工大学

2. 钢铁研究总院有限公司

通过慢应变速率拉伸试验和疲劳寿命试验研究了 X70 焊管在 10MPa 高压氢气环境下的氢脆敏感性, 利用超景深显微镜、扫描电子显微镜、电子背散射衍射和透射电子显微镜等分别对母材和焊缝试样的微观组织、慢拉伸和疲劳断口形貌进行了精细表征与分析。结果表明, 高压氢气环境对 X70 管线钢母材和焊缝的强度和延伸率影响不大, 但使断面收缩率显著降低, 其中焊缝断面收缩率降低更为显著。X70 管线钢母材和焊缝在高压氢气环境下, 慢拉伸断口不平整度增加, 断口表面和边缘出现大量微裂纹, 断裂方式由韧性断裂转变为韧性断裂+准解理断裂模式。此外, 高压氢气环境降低了 X70 管线钢母材和焊缝的疲劳寿命, 且焊缝的疲劳寿命下降幅度同样大于母材。与 X70 管线钢母材相比, 虽然焊缝有效晶粒尺寸更为细小, 但是焊缝中存在大尺寸 M/A 组元以及 MnS 和富 Al 的氧化物等夹杂, 会导致氢脆敏感性显著增加。相比之下, 母材中纳米级 Nb、V 和 Ti 的碳氮化物复合第二相析出作为有效的不可逆氢陷阱, 能够显著降低氢脆敏感性。

C13-P30

稀土处理钢冶炼工艺研究

李根*, 何西扣, 刘俊, 汪仕俊
钢铁研究总院有限公司

稀土能够通过改性夹杂物、细化凝固组织及微合金化等作用显著改善钢铁材料的综合性能, 但其应用一直受到收得率波动、性能改善效果不稳定的困扰。本研究基于热力学计算和夹杂物相分析试验验证, 对稀土加入钢中的热力学行为进行了分析, 明确了钢液 O 含量及其他脱氧元素对稀土收得率的影响。结果表明, 钢液中 Ca、Mg 含量增加或 O 含量降低有助于提高稀土加入钢液后的收得率, 并通过实验室真空感应炉试验和工程化试制证明采用优化后的稀土添加工艺能够提高钢的纯净度, 且材料力学性能得到明显改善。

C13-P32

异质奥氏体结构与层错网络的协同构建对 3Mn 钢塑性失稳行为的抑制机理

赵帅, 宋仁伯*, 张应超, 霍巍丰, 苏盛睿, 王鑫玮, 敬树坤
北京科技大学

基于 3Mn 钢的两相区温轧-回火工艺, 本文发现通过降低回火温度可抑制塑性失稳行为, 于是对温轧-回火工艺中的组织演变和塑性失稳行为的抑制机理进行研究。结果表明, 3Mn 钢通过在 750℃ 进行的多道次温轧获得了由等轴晶和板条晶所组成的异质奥氏体结构, 同时温轧奥氏体内部具有较高密度的层错网络, 诱发了超点阵结构的形成。随后在 300~400℃ 回火 10min 时, 异质奥氏体结构向具有等轴晶、粗大板条晶和细小层状晶的多重异质奥氏体结构转化, 奥氏体内部层错网络密度随回火温度的升高而降低。均匀分布的多重异质奥氏体结构和高密度层错网络使得 300℃ 回火的温轧 3Mn 钢具有较强的加工硬化能力连续性, 在抑制了塑性失稳行为的同时, 使其获得了抗拉强度 1591 MPa, 和断后伸长率 24.5% 的优异性能。

C13-P33

Effect of dynamic strain aging on evolution of dislocations in an austenitic steel investigated by nanoindentation

Xuekun Shang¹, Xiuxing Peng², Zhiyuan Liang², Binbin He*¹

1. Southern University of Science and Technology
2. Songshan Lake Materials Laboratory

Dynamic strain aging (DSA) is the phenomenon in which solute atoms diffuse to the temporarily arrested dislocations and hinder dislocation motion. DSA leads to negative strain rate sensitivity and thus to plastic instabilities that can be detrimental for material processing and formability. Herein, the effect of dynamic strain aging (DSA) on evolution of dislocations is investigated by systematic nanoindentation tests with varied strain rates. Obvious serrations are observed in the load-displacement curves at low strain rates (0.01 s^{-1} and 0.001 s^{-1}) while they are absent at high strain rate (0.1 s^{-1}). The serrations manifest the occurrence of DSA rather than the formation of deformation twins. Detailed observation on the deformed defects beneath the indents with different strain rates suggests that the occurrence of DSA has no distinct influence on the evolution of dislocation density, which contradicts with the claims in some literatures. The present work indicates that DSA can restrain the mobility of dislocations but does not necessarily lead to the dislocation multiplication.

C13-P34

低碳钢薄壁包套焊接接头裂纹热等静压诱导形成机制研究

舒亮¹, 郑传波¹, 李小兵¹, 居殿春*^{1,2}, 吴战芳², 车立达², 吕周晋², 李向阳²

1. 江苏科技大学冶金工程学院, 江苏张家港, 215600
2. 钢研昊普科技有限公司, 北京海淀, 100081

包套作为控形模具对热等静压粉末近净成形具有重要影响。由于包套具有物理形态, 自身刚度客观存在, 将对应力产生不容忽视的屏蔽作用, 因此须在确保包套可靠的前提下使其尽量薄。包套通常由 Q235 钢薄板焊接成形, 而薄板焊接接头的热等静压服役可靠性正是工艺成熟的一项重要指标。生产中填充了耐热性能较好的不锈钢作为焊缝, 由此产生的异种材料界面将可能成为焊接接头失效的潜在诱导因素。本文主要通过 OM、SEM、EDS、EBSD 等表征技术与微区性能测试考察和研究在热等静压过程中薄

壁包套焊接接头熔合线裂纹的形成机理。研究表明：首先，热等静压环境使熔合线附近弱化，并随着保温温度的提高愈加严重。其次，热等静压使包套主体材料弱化，主要表现在热等静压温度越高晶粒粗化越严重，且晶粒度沿包套径向有单调性变化。同时，由于热等静压改变了低碳钢微区晶粒取向，使得铁素体与珠光体的分布特性发生变化，对原始轧板织构的消除具有一定效果，但当温度与压力较大时，织构仍较强且分布复杂。最后，热等静压环境将导致熔合线弱化成为易致裂区域，并导致包套主体材料弱化，使其抵抗不均匀应力能力下降，随着热等静压压力的提高，不均匀应力增强，裂纹将发源于应力集中区域并沿着薄弱的熔合线生长。

C13-P35

钛钼微合金钢中应变诱导析出对连续冷却相变的影响

张启凡¹，李烈军*¹，霍向东²，彭政务¹，陈松军¹

1. 华南理工大学

2. 江苏大学

本研究采用应力松弛法和热膨胀法系统研究了钛钼微合金钢中奥氏体的应变诱导析出及其对连续冷却铁素体相变的影响。结果显示，应力松弛过程中会发生纳米级(Ti, Mo)C粒子的应变诱导析出，析出最快的鼻尖温度位于 900℃。应变诱导析出的发生整体抑制了奥氏体静态再结晶，对应的应力松弛平台期为 19-500 s。在应力松弛的不同阶段进行 0-10℃/s 的连续冷却，发现应变诱导析出在提高铁素体相变温度的同时，整体细化并均匀化了铁素体晶粒 (18.9→9.1 μm)。多尺度表征与热力学计算显示，应变诱导析出物对位错的钉扎促进了奥氏体内部和边界处铁素体的同时成核，而其对晶界的钉扎抑制了相界面的迁移。这不仅缩短了连续冷却过程中铁素体相变所需的时间，而且提高了相变比例，还改善了先共析铁素体相变伴随着的残余奥氏体稳定化。结合抗压强度测试，量化了应变诱导析出造成的细晶强化和析出强化效果变化。结果表明，充分的应变诱导析出在细化铁素体晶粒的同时会削弱铁素体中的随机析出，从而导致细晶强化效果的增强 (127→179 MPa) 与析出强化效果的下降 (180→87 MPa)。由此可见，合理调控应变诱导析出过程，有助于全面发挥微合金元素在细晶强化和析出强化中的作用。

C13-P36

风电用钢板开发及全厚度均匀性研究

尤景田，张福成，杨志南，张朋*

华北理工大学冶金与能源学院，河北唐山 063210

在全球“碳达峰，碳中和”发展趋势下，风电作为技术成熟、环境友好的可再生能源，在全球范围内实现了大规模的开发应用。随着全球风电行业快速发展的迫切需求，开发风电用钢并研究其应用性能具有重要的行业意义。本研究采用 Nb、Cr 和 Ni 复合微合金化成分设计，同时保持低碳和低碳当量来保证焊接性能。采用 JMatPro 软件计算热力学性质、热-物理性能、机械性能和相变过程，试图研究力学冶金对钢板组织的影响规律，为风电用钢板性能提升，开发系列风电钢板提供理论指导。采用高温聚焦显微镜原位观察加热过程和降温的过程经相转变和晶粒尺寸情况，确定最佳的力学冶金参数。工业化试制采用厚度为 330 mm 的坯料进行生产，加热至 1240-1260℃后进行轧制，精轧过程终轧温度≤820℃，轧制钢板最终厚度为 90 mm，轧后在 500-600℃温度下进行回火。从轧制后的钢板头部和尾部不同位置的进行全厚度均匀性分析。在钢板 1/4 厚度处，平均屈服强度、抗拉强度和-20℃冲击功分别达到 464.4 MPa、577.5 MPa 和 222.9 J。在钢板 1/2 厚度处，屈服强度、抗拉强度和-20℃冲击功平均值达到 396.8 MPa、517.8 MPa 和 142.4 J，但是轧制钢板尾部的冲击功偏差较大。钢板的全厚度的硬度呈现由表至里梯度递减的趋势，表面的硬度在 180 HV 以上，心部的硬度在 160-170 HV 之间。

C13-P39

Cr 和 Ni 对高强度低合金钢临界裂纹尖端张开位移(CTOD)和耐超临界 CO₂ 腐蚀性能的影响

马启林*

钢铁研究总院工程用钢研究院

采用光学显微镜、扫描电镜、电子背散射衍射、透射电镜、电子探针 x 射线显微分析仪、临界裂纹尖端张开位移和超临界 CO₂ 腐蚀实验研究了 Cr 和 Ni 含量对高强度低合金钢低温韧性和耐超临界 CO₂ 腐蚀性能的影响。本研究对高强度低合金钢的复杂结构进行了识别和量化，并将其与临界裂纹尖端张开位移(CTOD)联系起来。进一步添加 Ni 和 Cr 促进颗粒贝氏体(GB)和马氏体-奥氏体(MA)的形成。高角度晶界在 GB 组织中所占比例较小，对裂纹扩展没有明显的阻碍作用，而 MA 经常导致裂纹的萌生和扩

展, 使材料的低温韧性恶化。超临界 CO₂ 腐蚀实验表明, 进一步添加 Cr 和 Ni 会提高腐蚀产物的密度和防护性, 且点坑中存在 Cr 元素明显富集, 提高了材料的耐点蚀的能力, 但 Cr、Ni 合金元素提高材料淬透性, 使其得到高密度位错组织, 而位错密集区也更易捕获杂质元素, 形成微电池效应, 加速局部腐蚀。而且高位错密度通常意味着有很多晶格失配和较多的原子间隙, 这为阳离子和阴离子的移动提供了通道, 容易形成腐蚀电池和加速腐蚀进程对耐蚀性有负面影响。

C13-P40

10CrNi9MoV 大型电渣重熔板坯表面裂纹成因与控制

李健*

钢铁研究总院有限公司

针对 10CrNi9MoV 大型电渣板坯出现的表面裂纹问题, 利用残余应力、低倍组织、裂纹形貌、微观组织及硬度测试等分析方法, 对电渣板坯表面裂纹特征及形成机理进行了研究。结果表明, 电渣板坯表面裂纹多沿粗大柱状晶晶界开裂, 呈典型的沿晶断裂特征; 裂纹处存在明显氧化现象, 表明裂纹主要产生于电渣板坯凝固冷却阶段。对电渣板坯表面裂纹形成机理进行了分析, 表层金属在结晶器较大的冷却强度作用下, 所形成的粗大马氏体柱状晶晶间结合力弱, 受马氏体相变瞬间产生的组织拉应力作用而开裂, 是试验电渣板坯产生表面沿晶裂纹的主要原因。基于表面裂纹形成机理, 提出了将结晶器冷却水流量由 130 m³·h⁻¹ 降低至 80 m³·h⁻¹ 的工艺优化措施并进行了工业验证, 验证电渣板坯主要由马贝混合组织组成, 平均硬度较优化前电渣板坯降低约 40 HV10, 表面未发现裂纹, 表明所采取的结晶器冷速优化措施合理有效。

C13-P41

基于脉冲处理的 6Mn2Al 钢高温力学性能研究

赵文皓, 宋仁伯*, 王永金, 赵帅

北京科技大学

本研究基于脉冲处理对 6Mn2Al 中锰钢铸态组织的高温力学性能进行研究。以拉伸温度为变量, 将 6Mn2Al 钢拉伸样分别在 600℃、650℃、700℃、800℃、900℃、1000℃ 下以 0.004s⁻¹ 的速率拉伸至失效; 再以脉冲处理时间为变量, 将拉伸样在 100A 电流、8% 占空比的脉冲电流下分别处理 10min、20min、30min, 而后将拉伸样在 700℃ 下以 0.04s⁻¹ 的速率拉伸至试样失效。拉伸后, 通过 SEM 对断口处和断口附近截面组织进行表征。

研究发现, 随着温度升高, 6Mn2Al 钢在 650℃~1000℃ 下拉伸的断后伸长率逐渐降低, 屈服行为减弱, 650℃~900℃ 下发生韧断, 而 600℃ 与 1000℃ 下发生脆断。600℃ 下回复和再结晶软化不显著, 残余奥氏体与形变强化共同作用使抗拉强度较高的同时保留部分塑性, 出现颈缩但发生脆断; 800℃ 下组织具有 600℃~1000℃ 中最高断面收缩率 (62.1%), 热塑性优良; 1000℃ 时组织晶粒粗大, 强度大幅降低 (41MPa), 发生晶间脆断, 裂纹沿晶界扩展, 导致沿晶断裂。700℃ 下铸态组织在强度与塑性上有较好的平衡, 具有优良的强塑性; 对 700℃ 下的组织提前施加脉冲处理时, 组织强度降低, 塑性显著上升, 30min 的脉冲处理能够使拉伸样的工程应变由 0.483 增加为 0.992, 原因为电脉冲作用促进晶粒在高温下的晶粒长大与再结晶行为。

C13-P43

FeCoCrNiMoC 基中熵合金的低温断裂行为研究

刘雨, 杜振航, 王长军, 王春旭*, 雷斯敏, 耿如明, 刘振宝, 梁剑雄

钢铁研究总院有限公司

本文研究了 Fe₅₅Co_{17.5}Cr_{12.5}Ni₁₀Mo₅-xCx 中熵合金体系在室温、77 K 和 4.2 K 下的拉伸变形机制, 重点关注了微观缺陷形成和马氏体转变对延迟低温断裂的影响。结果表明, Fe₅₅Co_{17.5}Cr_{12.5}Ni₁₀Mo₅-xCx 合金在低温条件下表现出优异的力学性能。在室温条件下, 应变硬化的主要贡献机制是孪生诱导塑性 (TWIP); 在 77K 和 4.2K 低温环境下, 马氏体相变诱导塑性 (TRIP) 激活成为低温拉伸变形过程中的主要强化机制。此外, 碳化物析出以及位错密度增加可以显著提高屈服强度和拉伸强度, 低温下层错能的显著降低可以促进孪生和马氏体相变等机制的形成, 这对于在极端条件下提升延展性至关重要。综合分析, Mo₄C₁ 合金在低温和室温下获得了最佳的强塑性匹配, 其在拉伸强度和伸

长率在室温下分别为 776 MPa 和 50.5%，在液氮 77K 温度下分别为 1418 MPa 和 71.2%，在液氮 4.2K 温度下分别为 1670 MPa 和 80.0%。

C13-P47

M50 轴承钢中碳化物断裂行为的原位 DIC 研究

赵亚峰^{1,2}, 马广财², 郭翼*², 陈星秋²

1. 东北大学

2. 中国科学院金属研究所

M50 轴承钢因其具有高强度，耐高温以及优异的耐磨性能而在航发轴承领域得到广泛的应用。M50 钢中的大量随机分布的碳化物会在变形过程中发生断裂或界面分离从而导致轴承失效。本实验首次采用纳米级(13.67nm)高分辨数字图像相关(HR-DIC)方法研究了原位拉伸过程中碳化物的尺寸、分布和长径比对 M50 轴承钢组织结构局部应变集中和失效行为的影响。通过对基体、碳化物和基体-碳化物界面的应变演化分析发现：由于滑移的不连续性，在不包含碳化物的基体上会形成剪切带而出现局部应变集中。在碳化物的长径比(AR)大于 2 的情况下，局部应变主要集中于碳化物内部，断裂应变随碳化物长径比的增大而减小。具有大长径比(AR>2)的长条状碳化物，常常伴随着尖角和缺口甚至预裂纹等缺陷的存在，会在低应变状态下从缺陷位置产生裂纹而导致材料失效。小长径比(AR<2)碳化物内缺陷较少，应变局域化则产生于基体。本研究统计了等效直径为 1.41 μm 到 15.50 μm 分布的碳化物(平均等效直径为 8.22 μm)局部断裂应变及碳化物断裂所对应的宏观拉伸应变，可能受到碳化物大长径比、局部缺陷、不规则形貌和团簇等因素的干扰，不同尺寸碳化物断裂应变无明显分布规律，其平均局部断裂等效切应变为 0.63%，宏观断裂应变为 14.94%。总体来说，相较于由碳化物内部应变集中所引发的开裂，由基体滑移导致碳化物断裂和基体-碳化物界面分离的失效形式在较大的局部应变集中下产生。研究结果显示，可通过减少 M50 轴承钢中碳化物的缺口和微裂纹等内部缺陷、降低碳化物的长径比的方法，提高材料的断裂性能。

C13-P48

铝含量对超高碳钢组织及性能的影响

时大方², 王辉¹, 张万里¹, 刘东², 杨军², 俞峰¹, 曹文全*¹

1. 钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院

2. 浙江天马轴承集团有限公司

为了明确铝含量对超高碳钢组织和性能的影响规律，分析了添加 2%-6%铝含量后 Fe-1.4C-1.5Cr-Alx 超高碳钢淬回后的微观组织结构演变和硬度变化规律。研究发现，Al 扩大了铁素体相区域，并使共析点 C 含量明显右移，减少了超高碳钢冷却过程中先共析碳化物的析出数量，有利于抑制超高碳钢晶界网状碳化物析出；添加 4%~6%Al 后超高碳钢在 200 $^{\circ}\text{C}$ ~400 $^{\circ}\text{C}$ 中高温回火硬度稳定在 63HRC-65HRC 之间，Al 元素的添加极大程度上抑制了纳米级 ϵ -碳化物向渗碳体转变的过程，导致马氏体未能脱碳形成铁素体，而且 Al 元素添加量越大，超高碳钢回火稳定性及耐温性越好。

C13-P49

多道次回火成形对马氏体组织和性能的影响

王鑫玮, 宋仁伯*, 陈星翰, 霍巍丰, 赵帅

北京科技大学

马氏体钢适用于形状复杂和强度较高的零部件，多年来一直应用于航空航天、汽车车身等领域。超高强度和良好的塑性之间的匹配对马氏体钢至关重要。马氏体钢零部件在淬火后残余应力较大，塑性较低并且成形性较差，需要进行回火处理以软化马氏体，以得到强度和塑性匹配的微观组织。本研究利用循环水浴处理，进行三道次回火成形，回火时间总长 6min，显著改善了马氏体钢中的分层结构，明显细化了马氏体分层的包-块-板条组织，三道次回火成形后的试样屈服强度为 1688MPa，抗拉强度为 2305MPa，断后伸长率为 8.3%，具有良好的强度-塑性平衡。相比之下，单次直接淬火的样品具有较高的位错密度，马氏体块粗大且成形性和塑性较差，断后伸长率仅有 3.2%。经过一道次直接回火 6min 的样品位错密度显著降低，强度损失严重，抗拉强度和屈服强度分别为 1969MPa 和 1323MPa。

C13-P50

碳含量对铌微合金化齿轮钢中[Nb][C]固溶度积的影响

闫永明*
钢铁研究总院有限公司

铌微合金化渗碳齿轮钢可以在钢中析出 NbC 析出相钉扎晶界，使钢在高温渗碳过程中仍保持细小的晶粒尺寸。已有研究报道，随着奥氏体中碳含量的增加，铌的固溶度随之增加，这意味着在渗碳过程中，可能无法在渗层中析出足够的 NbC 析出相钉扎晶界。因此，本文对含铌的 18CrNiMo7-6 齿轮钢进行了渗碳温度为 930 °C 和 980 °C 的低压渗碳，同时使用萃取相分析法研究了碳含量对铌微合金化齿轮钢中[Nb][C]固溶度积的影响。实验结果表明，渗碳温度从 930 °C 提高到 980 °C 时，渗层近表面和心部的平均奥氏体晶粒尺寸均大致相同，无异常晶粒长大。萃取相分析结果表明，相分析计算的 $\log[\text{Nb}][\text{C}]$ 值均小于 Ohtani 固溶度积公式计算结果，且随着碳含量增加，二者之间的差值越来越大。此外，随着碳含量的增加，萃取相分析和 Ohtani 固溶度积公式计算的奥氏体中铌的固溶度均呈先降低后增加的趋势，但萃取相分析结果的增加速度要远远小于文献报道的固溶度积公式所计算的增加速度。此外，根据萃取相分析和碳膜复型结果可知，不同渗碳温度下试样的渗层和心部的析出相的数量和平均尺寸大致相同，这说明在渗碳过程中，渗层和心部均是通过析出 NbC 析出相钉扎晶界抑制晶粒长大。

C13-P51

高强高韧贝氏体钢中合金元素种类及含量的优化

朱冉冉，龙晓燕*，张福成，杨志南，李艳国
燕山大学

目前，贝氏体钢的高合金化，使其在拥有优异的性能的同时也导致其生产的高成本、对资源的高度依赖和回收再利用困难等问题，不利于环保。本文以低碳钢为基础，设计了三种碳含量相同的试验钢，其中两种不添加贵金属且降低了合金含量。利用膨胀仪、SEM、XRD、TEM 和 EBSD 等表征手段，研究合金元素种类对微观组织演变和力学性能的影响。结果表明：通过调控合金元素配比，可以使不添加贵金属与添加贵金属的钢的性能相媲美。其中不添加贵金属的试验钢比添加贵金属的抗拉强度略高，冲击韧性高 40 J/cm² 左右，延伸率低 4 % 左右。因此，适当降低合金种类和合金量是绿色制造的可行途径。

C13-P52

超高强度钢低偏析真空自耗重熔工艺仿真优化

宁静*，王敖，雍兮，苏杰
钢铁研究总院有限公司

真空自耗过程在密闭设备中进行，熔池中反应和钢锭凝固过程处于黑匣状态。近年来，随着计算机仿真技术在材料和冶金领域的推广应用，通过有限元仿真对熔炼过程进行可视化和量化，并对大量可能的工艺参数组合进行系统研究和理性优化，避免“试错法”造成大量能源浪费。本研究针对二次硬化型超高强度钢Φ660mm 锭型真空自耗重熔过程中合金元素偏析带来的碳化物析出风险，采用软件仿真计算和试验表征相结合的方法，开展了真空自耗重熔关键工艺参数的系统研究。研究结果表明：元素偏析程度并非随熔速增大而单调增加，而与熔池能量流入、耗散的综合效果密切相关。本研究提出了基于熔池设计的熔速优化方案，并进行了工业化试制验证。

C13-P53

球墨铸铁中相变诱发塑性现象及其协同提升强塑性研究

王鑫，杜玉洲*，蒋百灵
西安理工大学

球墨铸铁因良好的可加工性、耐磨性及低成本等优势被广泛应用于汽车、农业等机械领域。石墨与金属基体界面因应力集中而在服役过程中易成为裂纹源，一旦裂纹萌生，将迅速沿最近石墨方向扩散，因此球墨铸铁其塑性远低于相近基体结构钢。本文拟通过 Ni 合金化至球墨铸铁以弱化经热处理后的奥氏体稳定性，使其在受力过程中可发生相变并通过 TRIP 效应而提高塑性。将含有一定量的 Ni 元素添加至球墨铸铁型材并进行均匀化及两相区回火处理得到双相（铁素体+奥氏体）球墨铸铁，其奥氏体含量近 30%。Ni 合金化促进奥氏体形核并降低其碳含量，结果，亚稳奥氏体在受力过程中可应力诱发马氏体相变松弛应力而提高其塑性。此外，因 TRIP 效应导致的高加工硬化率及细晶组织使其保持了高强度。本研究所制备的含 Ni 双相球墨铸铁强度可达 ADI 级（~900MPa），延伸率达铁素体级球墨铸铁（~21%），

强塑积近 19GPa%，远高于常规球墨铸铁的力学性能。该研究为球墨铸铁强塑性的协同提升提供了新途径。

C13-P55

高温渗碳对高铝氮齿轮钢组织和析出的影响

何肖飞*, 郭涛
钢铁研究总院有限公司

随着我国碳达峰、碳中和目标的提出和实施,以及汽车齿轮行业竞争的加剧,各齿轮制造企业为有效降低生产成本、提高生产效率,其正在不断地提升制造齿轮时的渗碳温度,高温渗碳正越来越受到关注。本文通过对 0.038%Al、0.019%N 的高铝氮齿轮钢不同高温伪渗碳 (980°C、1050°C 和 1100°C) 处理下的奥氏体晶粒长大、AIN 析出和组织特征变化规律研究,探究了高温伪渗碳时 AIN 析出相的溶解/析出规律及其对组织、晶粒度的影响。结果表明,随着温度的提高,AIN 析出相由多边形和近球形向长棒状转变,且尺寸不断变大,进而影响晶粒度和组织的控制。在 980°C、1050°C 保温 6h 时,高铝氮试验钢中 AIN 析出相平均尺寸仍可控制在 30nm 以内,晶粒度控制在 7 级以上,而当温度提高到 1100°C 并保温 6h 时,试验钢中 AIN 析出相平均尺寸增大到 35nm 以上,试验钢也明显出现了混晶现象。另外,高铝氮齿轮钢中 AIN 可在马氏体板条间形核并长大析出,从而会影响马氏体板条的生长,使板条取向更为复杂。

C13-P57

激光粉末床熔融 3D 打印 316L 不锈钢位错胞的强化及热机械稳定性

何西, 商雪坤, 何斌斌*
南方科技大学

激光粉末床熔融 (LPBF) 是一项快速发展的金属增材制造技术,它利用计算机辅助设计模型,通过逐层叠加材料来生产复杂或定制的构件,大大缩短了生产周期和设计自由度。现已在航空航天、生物医药等方面有了广泛的应用。采用 LPBF 制备的 316L 不锈钢具有超越传统加工 316L 的延展性和屈服强度组合。其高均匀伸长率与跨尺度非均质微观结构所调控的稳定加工硬化机制以及孪晶的形成有关,而高强度则与加工过程中形成的位错胞、小角度晶界和高密度位错等有关。然而目前位错胞对材料强度的具体贡献尚不完全明确,对此本报告设计了系列实验利用纳米压痕对位错胞的强度贡献进行了研究,并估算出 LPBF 316L 的位错胞对屈服强度的贡献约为 169 MPa,这大约占到相比传统加工 316L 屈服强度增加值的 54%。此外,针对位错胞的重要作用,其所在构件在一些严苛环境下的使用涉及高温变形等,其热机械稳定性是一个很重要的问题。对此,我们设计了系列预变形—热处理的实验对 LPBF 316L 位错胞的热机械稳定性进行了研究。研究表明:变形引入的位错可作为储存能,促进高温下的回复和再结晶。然而,由于位错胞的低能量结构以及溶质原子的固定作用,即使重度变形(轧制变形 50%)的 LPBF 316L 在 800°C 仍能保持一定的晶体结构及位错胞的完整性。

C13-P58

热等静压成形工艺对双相不锈钢 SAF2507 组织和性能的影响

刘加豪¹, 王炳伟¹, 李小兵¹, 居殿春^{*1,2}, 张鹏杰², 车立达², 李向阳², 吕周晋²
1. 江苏科技大学
2. 钢研昊普科技有限公司

本文采用热等静压粉末近净成形工艺制备了海洋工程用双相不锈钢 SAF2507。利用拉伸试验和电化学实验研究了 SAF2507 力学性能和耐腐蚀性能;采用扫描电镜、电子背散射衍射技术,研究了热等静压保温温度、压强以及后续固溶处理对其微观组织形貌、铁素体和奥氏体相变规律,以及第二相析出行为的影响。研究表明,热等静压保温温度的升高使材料的晶粒粗化;压强的变化对微观组织的影响较小,SAF2507 试样中存在着大量的脆性析出相 σ 相,且 σ 相优先沿双相界面析出; σ 相的生长以消耗铁素体 α 相为代价。此外, σ 相的存在是其塑韧性较差的主要原因;SAF2507 腐蚀主要发生在析出相周围的贫 Cr 区;固溶处理后,其耐腐蚀性能显著提升,腐蚀形式由选择性腐蚀转变为点蚀。

C13-P60

304 不锈钢焊管-碳钢复合钢筋热轧工艺试验研究

梁高震¹, 谭建平^{*1}, 向勇^{2,4}, 钱学海^{1,3}, 勾哲¹, 张斌斌³, 曾建岳^{2,4}, 周玉林³

1. 中南大学机电工程学院, 湖南 长沙
2. 湖南三泰新材料股份有限公司, 湖南 娄底
3. 广西柳州钢铁集团有限公司, 广西 柳州
4. 湖南省层状金属复合材料工程研究中心有限公司, 湖南 娄底

针对目前复合钢筋轧制工艺存在复合界面结合性差、成品“漏点”等技术问题, 本研究采用 304 不锈钢焊管+HRB400E 碳钢圆棒净界面组坯, 复合坯料无氧化密封后, 工业热轧成型制备 $\phi 16$ mm 复合钢筋, 随后对其力学性能进行了分析。对粗轧、中轧和成品试样横断面图像分析, 覆层厚度存在分布不均匀, 成品不锈钢覆层厚度最薄位置分别在横肋根部和纵肋处 (0.30, 0.21mm), 符合 GB/T 36707-2018 中要求 (0.18mm)。金相结果表明, 界面结合情况良好, 无微小孔洞。测定成品抗拉强度为 720MPa, 屈服强度为 570MPa, 最大力总伸长率 Agt 为 14.2%, 符合技术要求。该复合钢筋新工艺技术比金属熔覆、无缝钢管组坯等方法节约成本, 易大规模生产, 目前已在浙江玉环西沙门大桥工程应用。本研究将为复合钢筋轧制工艺优化提供理论参考和依据, 对工业大规模轧制生产意义重大。

304 Stainless Steel Welded tube-Carbon Steel Cald Rebar Hot Rolling Process Experimental Research

In-process of Stainless steel clad (SSC) rebars hot rolling, there are technical problems such as poor interfacial bonding and leakage points of finished products. In this study, cleaning surfaces of 304 SS welded tubes and HRB400E CS round bars, and preparing vacuum oxidation composite round billet, an industrial field hot rolling experiment was carried out to obtain $\phi 16$ mm SSC rebars, and mechanical properties were analysed. For the cross-section image analysis of rough rolling (6-7# mills), medium rolling (12-13# mills) and finished product samples, the cladding thickness existed uneven distribution. The thinnest cladding thickness of finished products appeared at the root of the transverse rib and longitudinal rib (0.30, 0.21mm), in line with the value in GB/T 36707-2018 (0.18mm). The metallographic results showed good interfacial bonding without tiny holes. The measured tensile strength, yield strength and total elongation of maximum force Agt of the finished products were 720MPa, 570MPa, and 14.2%, respectively, which met the technical requirements. This new process technology saves costs and is easy to mass produce than metal fusion, seamless pipe forming or other methods. Now, SSC rebars have been applied in Xishamen Bridge in Yuhuan, Zhejiang Province. This study will provide theoretical reference and basis for the optimisation of SSC rebars rolling process, which is of great significance to the industrial large-scale rolling production.

C13-P63

新型稀土螺纹钢在模拟湿热高盐海洋环境下的腐蚀行为

丁林海*, 王博

上海大学材料科学与工程学院

在苛刻海洋环境下, 如高温、高湿、高盐和高辐照环境, 用于沿海建筑钢材的腐蚀速率显著加快, 常规材料已无法满足应用。本研究基于稀土多相合金化理论设计开发了两种新型稀土螺纹钢, 通过电化学腐蚀、浸泡试验 (NSS) 和周浸试验 (CCT) 系统研究了材料的腐蚀行为, 结合金相、OES、XRD、EDS 等方法表征了螺纹钢氧化皮结构、腐蚀形貌及腐蚀产物类型。研究表明, 两种新型螺纹钢的耐蚀性明显优于普通螺纹钢 HRB400 和稀土普通螺纹钢 HRB400RE 材料, 尤其稀土添加起到明显的组织细化效果, 同时促进 Cr、Si、Sb 等元素在基体与氧化皮界面处的偏聚。在 5 wt% NaCl 溶液浸泡 24 h 发现, 含稀土新型螺纹钢开始生锈的时间较其它材料明显滞后, 由点蚀向局部腐蚀演变周期较长, 同时腐蚀失重速率最低。

仅发表论文

C13-PO01

Mn18Cr18 钢氮含量精准控制理论分析与热态实验

林腾昌*¹, 李龙飞¹, 杨勇¹, 姚同路¹, 贺庆¹, 孟华栋¹, 张曦东¹, 程挺²

1. 钢铁研究总院有限公司

2. 中国钢研科技集团有限公司

高氮不锈钢的氮含量精准控制是生产关键控制要素。本文以 Mn18Cr18N 高氮钢为例, 利用冶金反应方程、Factsage 热力学软件及热态实验与检测分析等方法, 对加压感应熔炼过程钢种成分、温度及氮气

压力与氮含量控制的关系进行研究。结果表明，基于理论数据的“成分-温度-压力”关系方程可信度高，3炉实验的氮气压力理论值、预测值与实际控制值吻合度良好。热态实验验证发现，Mn和Cr含量不变时，依靠提高氮分压可以提高钢锭中N含量，但是氮达到约1%时，通过提高氮分压增加氮含量的效果降低。Mn或Cr含量低时，可以通过提高氮分压达到提高氮含量的目的。降低钢中C和Si含量有利于钢中高氮含量的合金化及稳定控制。

C13-PO02

Microstructures and mechanical properties of TRIP steels under different heat treatment condition

Yinghua Jiang*, Huasai Liu

Research Institute of Technology, Shougang Group Co., Ltd

Effect of different heat treatment condition on the microstructures and mechanical properties of TRIP steels was investigated. The results showed the microstructure of the steels produced by the heat treatment process (II) was homogeneous and finer compared to that of the steels produced by the heat treatment process (I). This depends on the transformation sequence during heat treatment process. In the heat treatment process (II), the martensite transformation in advance generates a uniform lath-type mixture of constituent phases, the preceding bainite transformation leaves carbon-enriched blocky martensite. Compared with the steel produced by the heat treatment process (I), the steels tested with produced by the heat treatment process (II) display higher hole expansion property while maintaining good strength-elongation balance due to lath-type martensite by making martensite transformation in advance which resulted in low hardness deviation from the austempered bainite matrix.

C13-PO03

钛微合金化高强度大梁钢的高周疲劳性能研究

高智君*, 郎宇平, 陈海涛, 冯翰秋

钢铁研究总院有限公司

实现力学性能和疲劳性能的理想结合是钛微合金高强度钢在汽车领域应用的先决条件。本文系统地研究了不同钛含量的钛微合金高强度大梁钢的高周疲劳性能。结果表明，微合金元素钛的含量对实验钢的疲劳性能有显著影响，特别是在高钛含量情况下。对实验钢而言，夹杂物诱发疲劳裂纹是其主要的破坏模式。与含钛钢的一般疲劳断裂机制不同，在实验钢疲劳裂纹萌生区并没有发现TiN，而具有核壳结构的大尺寸TiN和氧化物的复合夹杂物是导致实验钢疲劳断裂的主要原因。通过EBSD实验观察发现，由于复合夹杂物与基体界面处存在强烈的局部变形，具有棱角的TiN严重恶化了实验钢的疲劳性能。此外，少量MnS对大尺寸夹杂物的改性作用不明显，对疲劳行为影响不大。采用实验外推法对试验钢的临界夹杂物尺寸进行了研究。随着抗拉强度的增加，夹杂物敏感性增加，实验钢临界夹杂物尺寸变小。

C13-PO04

回火温度对Cr-Co-Mo-Ni轴承钢组织与性能的影响

骈利平*¹, 李海宏², 庞学东³, 孙勇³, 迟宏宵¹, 谷金波¹

1. 钢铁研究总院有限公司 特殊钢研究院, 北京 100081

2. 中国航发哈尔滨东安发动机有限公司, 哈尔滨 150066

3. 抚顺特殊钢股份有限公司, 辽宁 抚顺 113001

为了系统地研究Cr-Co-Mo-Ni轴承钢不同回火温度下的微观组织演变并阐明不同热处理状态下的主要强化机制，采用X射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、电子背散射衍射(EBSD)、透射电镜(TEM)、拉伸及冲击实验等手段研究了回火温度对Cr-Co-Mo-Ni轴承钢的组织 and 力学性能的影响。结果表明：随着回火温度的升高，试验钢的强度逐渐提高，析出强化效果显著。试验钢在500℃回火，基体处于欠时效状态，仅析出少量的长条状M₂C碳化物。在540℃回火后基体中析出大量椭球形Laves相和富Cr α 相，实验钢的强度达到峰值。随回火温度由500℃升高至540℃时，试验钢的室温冲击韧性快速衰减，而在540~580℃回火后冲击韧性下降趋势平缓，马氏体基体中生成的逆转变奥氏体抑制了裂纹萌生并缓解其扩展。综合分析，试验钢在540℃回火力学性能最佳，抗拉强度达到1986MPa，屈服强度达到1617MPa，冲击功达到40.5J。优异的强韧性主要源于椭球形Laves相和富Cr α 相的析出强化效应和逆转变奥氏体韧化效应。

C13-PO05

Study on the stress rupture properties and microstructure evolution of 630 °C martensitic rotor steel rotor steel

Jiajia Qiu, Xikou He*, Zhengxin Tang
Central Iron and Steel Research Institute Co.,Ltd

The new martensitic heat-resistant steel C630R for 630 °C ultra-supercritical steam turbine rotor developed by Central Iron and Steel Research Institute was researched. The stress rupture properties and related microstructure evolution of the C630R rotor steel at 630 °C were studied by different stress rupture tests at 630 °C, scanning electron microscopy, electron backscatter diffraction and transmission electron microscopy. The results show that there is obvious plastic deformation along the stress direction, and the tempered martensite is stretched into fiber structure and fine grain structure when the stress is greater than 185 MPa and above. The content and the size of precipitates increase obviously with the extension of fracture time. The adjacent Laves phase have a tendency to merge and grow, and the size is obviously larger than that of M23C6 carbides. There are a large number of cavities near the fracture, gathering into cracks to induce the fracture of the C630R steel. The cavities caused by the oxide inclusions are smaller and shallower under low stress and the coarse Laves phase forms larger cavities, which is the main reason for the formation of cavities in the long-term creep process of the C630R steel.

C13-PO06

不同形变量低碳钢的热模拟组织与性能的研究

史杰杰*, 王昌, 王哲, 刘彦宁, 李继康
钢铁研究总院有限公司

在工业轧制过程中, 轧制形变量对低碳钢的微观组织与力学性能具有显著影响。通过适当控制轧制形变量, 可以实现低碳钢微观组织和力学性能的优化。为了模拟工业轧制过程, 本研究采用平面应变技术, 因其具有更好的相似性。利用 Thermo-Calc 热力学软件计算 Q235 低碳钢奥氏体相变温度, 从而初步确定了低碳钢的热轧温度。随后, 使用 Thermecmastor 热模拟实验机对 Q235 低碳钢进行了不同形变量的大试样 (30 mm×30 mm×140 mm) 平面应变压缩实验, 并对其各道应力应变曲线进行了分析。通过金相显微镜对原始与不同形变量下低碳钢的微观组织进行了测定与分析, 获得了 Q235 低碳钢的平面应变压缩组织的演变规律。接着, 利用电子背散射衍射 (EBSD) 技术对原始和形变量为 66.67% 的低碳钢晶粒尺寸进行了统计分析, 结果显示平面应变压缩后 Q235 低碳钢的晶粒得到了细化。通过对比原始态和平面应变压缩后低碳钢的力学性能, 发现形变量为 50% 和 66.67% 的低碳钢的抗拉强度和冲击韧性均比原始态高。本研究通过对低碳钢进行不同形变量的平面应变压缩实验, 探索出了优化商用 Q235 低碳钢力学性能的热模拟工艺, 为工业优化商业 Q235 低碳钢提供了理论指导与数据支撑。

C13-PO07

新型镍基高温合金的浇铸系统优化及开裂控制研究

贾雷¹, 何西扣^{*1}, 杨树峰², 李根¹, 曲敬龙³

1. 钢铁研究总院特殊钢研究院
2. 北京科技大学冶金与生态工程学院
3. 钢铁研究总院高温材料研究所

随着航空发动机推重比的不断提高, 对涡轮盘材料的高温力学性能提出了更为严格的要求。GH4151 合金可在 800 °C 以上服役, 具有良好的组织稳定性是先进航空发动机涡轮盘的重要备选材料。受高合金化程度影响, 在熔炼过程中极易产生裂纹问题。裂纹控制是制约我国高合金化难变形高温合金发展的关键技术难题之一。本文通过热力学计算、电镜表征和 ProCAST 数值模拟等手段对裂纹特征、凝固特性、元素偏析行为、析出相类型及铸造过程应力场分布进行了分析讨论, 明确了裂纹的控制方向。结果表明: 真空感应电极中心处偏析最为严重, 内部的裂纹属于热裂纹, 主要受低熔点相和热应力影响。GH4151 合金的固-液相温度范围较宽为 101 °C, 促使 MC 碳化物相、 η 相、 $(\gamma+\gamma')$ 共晶相、Laves 相以及少量 MB2 相依次析出。锭模预热是解决铸锭内部热应力分布不均的主要措施, 当锭模预热温度升高到 400 °C, 模冷 50 min 时, 铸锭整体应力处于最低水平。

C13-PO08

Numerical simulation of macrosegregation formation in steel casting using a three-Phase dendritic model

Chuanyao Tang, Weiwen Zhang*
South China University of Technology

A three-phase dendritic model was developed to predict the macrosegregation during solidification. In this three-phase dendritic model, some important factors, including dendritic structure for equiaxed crystals, melt convection, crystals sedimentation, nucleation and growth of solidified phases, were taken into consideration. Furthermore, using this three-phase dendritic model, the formation and distribution of macrosegregation of ingots are simulated successfully, and the causes and distribution of macrosegregation are analyzed and studied. The predicted macrosegregation pattern is in a good agreement with experimental results. The dendritic equiaxed grains also play an important role on the formation of segregation. The macroscopic segregation distribution of new heat-resistant steel castings is predicted by using 3D case simulation, and some schemes to reduce segregation are put forward after comparing with the actual situation

C13-PO09

Mg 处理对高 Ti 微合金钢力学性能的影响

段华, 王超, 郝俊杰, 袁国*

东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室

采用 Ti 微合金化替代 Nb、V 等微合金元素可有效降低成本, 但较高的 Ti 含量会促进钢中粗大液析 TiN 的生成从而严重影响钢材韧性。本文以 Mg 处理含钛 16Mn 钢为研究对象, 分析了在不同处理方式下, 钢中夹杂物的析出行为及其对实验钢力学性能的影响。通过热力学分析软件计算可知, MgO 和 MgS 具有较高的析出温度, 可作为先析出形核质点分散钢中液析 TiN。结果表明, 经 Mg 处理后, 实验钢中大尺寸 TiN 含量显著减少, 钢中典型夹杂物成分由 TiN 和 Al₂O₃ 分别转变为细小弥散的 Al-Mg-Ti-C-N-O 及 Ti-Mg-C-N-O-S 复合夹杂。实验钢冲击韧性得到显著提升, 在 -20℃、-40℃ 和 -60℃ 时 Mg 处理对韧性的提升分别为 50J、131J 和 135J。

C13-PO10

N 元素含量对 S32750 双相不锈钢中二次奥氏体析出行为的影响

吴晓涵, 宋志刚*, 何建国, 丰涵, 郑文杰, 朱玉亮

钢铁研究总院有限公司

随着行业对双相不锈钢品质及性能要求的提升, 近年来二次奥氏体已经成为影响 S32750 双相不锈钢应用的关键因素之一。二次奥氏体是“温度—冷却速率”共同作用的一种亚稳态产物, 与铁素体相呈近 K-S 或 N-W 位向关系, 且对 N 元素有富集作用, 可按形貌将其分为针状二次奥氏体和孤岛状二次奥氏体。研究了 N 元素含量对二次奥氏体析出行为的影响。通过制备 w[N] 为 0.02%、0.09% 和 0.17% 的试验钢, 并借助热模拟及 EBSD 可知, 随着 N 含量增加, 二次奥氏体由弯曲羽毛状向板条形针状转变, 且奥氏体相的整体比例增加。经计算可知, 奥氏体相的析出方式与本征吉布斯自由能相关, 即受成分与试验温度影响。

C13-PO11

预淬火温度对 Nb 微合金化 TRIP 钢组织性能的影响

黄家能^{*1,2}, 林昀晖^{1,2}, 杨进鑫^{1,2}, 乐光耀^{1,2}, 王江涛^{1,2}, 戴品强^{1,2}

1. 福建理工大学

2. 福建省新材料制备及成形技术重点实验室

采用扫描电镜 (SEM)、X 射线衍射 (XRD) 和拉伸实验等研究了预淬火温度 (825、850、875 和 900℃) 对 Nb 微合金化 TRIP 钢微观组织和力学性能的影响。结果表明: 通过不同温度预淬火+两阶段热处理可有效细化 Nb 微合金化 TRIP 钢的微观组织并提升其综合力学性能。未预淬火处理实验钢的铁素体平均晶粒尺寸为 3.7 μm, 其抗拉强度、延伸率和强塑积分别为 860.5 MPa、34.2% 和 29.4 GPa·%; 随着预淬火温度从 825℃ 升高至 875℃, 实验钢的抗拉强度略微增大, 从 870.2 MPa 增大至 876.4 MPa, 延伸率从 36.1% 增大至 39.2%, 强塑积从 31.4 GPa·% 增大至 34.3 GPa·%。当预淬火温度达到 900℃ 后, 实验钢的抗拉强度、延伸率和强塑积呈现减小趋势, 分别为 864.8 MPa、35.2% 和 30.4 GPa·%。实验钢最佳的预淬火温度为 875℃, 由于细晶强化和良好 TRIP 效应的共同作用, 使实验钢具有最优的综合力学性能, 其抗拉强度为 876.4 MPa, 延伸率为 39.2%, 强塑积为 34.3 GPa·%。

C13-PO12

通过人工神经网络模型构建 M50NiL 钢的热加工图

郎东, 文玉华*
四川大学

The processing map for M50NiL steel was established by hot compression tests at temperatures of 950 °C – 1150 °C and strain rates of 0.002 – 1.0 s⁻¹. Based on the experimental results of hot compression tests, the predictability in both reproducing experimental flow stresses and predicting flow stresses using the Arrhenius, physical-based, and artificial neural network (ANN) models was compared. The results showed that the average absolute relative errors of Arrhenius, physical-based, and ANN models in both reproducing and predicting flow stresses were 6.04% and 8.01%, 6.61% and 7.78%, and 1.91% and 4.74%, respectively. The ANN model had a considerably higher accuracy in reproducing and predicting flow stresses than the other two models. In addition, a processing map of M50NiL steel was established using the predicted flow stresses by the ANN model. This processing map indicated that the optimized processing parameters were 975 – 1050 °C/0.01 – 0.002 s⁻¹. Instability occurred during deformation at 950 – 975 °C at 1.0 s⁻¹ and 1075 – 1150 °C at 0.01 s⁻¹. The instability prediction was verified by the microstructure evolution.

C13-PO13

碳化物对超高强度不锈钢晶粒长大行为的影响研究

王晓辉, 刘振宝*
钢铁研究总院有限公司

在温度区间 950-1150°C 和保温时间 0-120min 的范围内研究了一种超高强度不锈钢的晶粒长大行为。在 900-950°C 的温度区间内, 钢的晶粒的生长速率缓慢, 在 1000-1150°C 的温度区间内晶粒的生长速率较快, 这是由于经锻造和退火处理后, 钢中析出大量的 M6C 型碳化物, 在 900-950°C 温度区间内, M6C 相的固溶量较少, 碳化物的钉扎作用阻碍了奥氏体晶粒的长大, 温度高于 950°C 后, 碳化物大量固溶, 对晶界的钉扎作用减小, 晶粒长大速率加快; 根据实验结果, 建立了一个基于 Arrhenius 方程的奥氏体晶粒生长预测数学模型, 阐述了加热温度、保温时间和初始晶粒尺寸对奥氏体晶粒生长的影响。分别在 900-950°C 和 1000-1150°C 两个温度区间内分别求得了最佳的晶粒长大指数 (n) 为 1.965 和 1.591, 进而求出了试验钢晶粒长大的激活能分别为 970.29KJ/mol 和 2005KJ/mol。

C13-PO14

不同厚度取向硅钢微观组织演化规律研究

徐宁, 郭函, 玄东坡, 王艺潼, 刘旭明*, 薛峰
鞍钢集团北京研究院

取向硅钢作为变压器铁芯最主要的原材料, 具有生产工序繁长、技术原理复杂的特点。本文以鞍钢集团开发的不同薄规格取向硅钢为研究对象, 利用扫描电子显微镜 (SEM)、电子背散射衍射 (EBSD) 等表征手段研究了不同薄规格取向硅钢经过热轧、常化、冷轧、脱碳退火等工序后微观组织演化及织构变化等演化规律。研究表明: 热轧组织沿厚度方向分布不均匀, 同时具有明显的织构梯度, 表层主要有铜型织构 {112}<111>, 黄铜织构 {110}<112>以及高斯 {110}<001>织构, 1/4 层和中心层都是以 {001}<110>为主的 α 织构; 常化处理后, 基体组织发生了部分再结晶, 但常化前后的织构类型没有太大差异; 冷轧后的等轴晶粒完全消失, 形变组织呈纤维状, 织构主要以旋转立方 {001}<110>取向和 {112}<110>取向为主的强 α 织构; 脱碳退火后组织为等轴晶粒组织, 织构以 {114}<418>为主的 α^* 织构、{100}<021>为主的旋转立方织构和 {111}<112>织构。

C13-PO15

时效处理的含铜银 304 不锈钢析出相机制

孙腾飞*
华北理工大学

添加适量的 Cu 和 Ag 制备了含 Cu/Ag304 抗菌不锈钢。采用 OM, SEM, XRD, EDS 以及 TEM 对时效处理后的含 Cu 和 Ag 元素的 304 不锈钢的微观结构及析出演变规律进行了研究。结果表明, 在 400-800°C 范围内, 不锈钢组织晶界和位错处均有 Cu 相析出, 700-800°C 范围内, 晶界处有 Ag 相析出; 随着时效温度的升高, 析出相逐渐粗化, 并有球形颗粒状转变为链条状, 由链条状转变为短棒状, 而后从亚稳态过渡到稳定相 ϵ -Cu 相。

C13-PO16**稀土 La 对 Y40Mn 易切削钢夹杂物的变质作用**霍普^{1,2}, 张芳*^{1,2}, 彭军^{1,2}, 常洪涛^{1,2}, 刘爽^{1,2}

1. 内蒙古科技大学稀土产业学院, 包头 014010

2. 轻稀土资源绿色提取与高效利用教育部重点实验室(内蒙古科技大学), 包头 014010

硫系易切削钢中 MnS 夹杂物的数量、大小、形貌及其分布对其性能有着重要影响。稀土对钢中夹杂物形貌、大小、分布以及数量的调节有着显著效果。本文利用 FactSage 热力学计算、扫描电镜-能谱分析、光学显微镜、电子探针等多种表征方法, 研究了不同稀土 La 含量 ($x=0, 50, 100, 150, 200\text{ppm}$) 对 Y40Mn 易切削钢中 MnS 夹杂物的形貌、大小、分布的变质效果。FactSage 热力学计算表明, 1420°C 未添加稀土 La 的 Y40Mn 易切削钢中, (Mn, Fe) S-liq 和 FeS-liq 开始析出; 1175°C 液相含量快速减少, 同时开始析出固相的 FeS 和 MnS 夹杂物; 温度冷却到在 975°C 时, 液相完全消失全部转变为固相夹杂物; 添加稀土 La 后, 钢中析出 La_2SO_2 , 温度在 1250°C-1300°C 范围内, La_2SO_2 转变为 La_2S_3 , 最终以 La_2S_3 存在于钢中。Y40Mn 易切削钢中 MnS 夹杂物以长条状存在于晶界, 稀土 La 会使夹杂物转变为椭圆形或者球形, 且对其大小有明显的细化效果。当稀土 La 含量在 32ppm 时, 夹杂物的尺寸最小 8.66 μm , 相比未添加 La 的 11.49 μm 来说细化率为 24.6%; 添加稀土 La 后, MnS 夹杂物转变为以稀土硫氧化物为形核核心 MnS 包裹在外围的复合稀土夹杂物。

C13-PO17**Enhancing microstructure and hydrogen embrittlement resistance with Nb-V microalloying in ultra-high strength hot stamping steel**Songyuan Ai, Xinhua Yang, Mujun Long*, Rundong Zhang, Jingjun Zhao, Dengfu Chen, Danbin Jia
Laboratory of Materials and Metallurgy, College of Materials Science and Engineering, Chongqing University.

As an important structural material for automotive lightweight, the higher hydrogen embrittlement sensitivity of ultra-high-strength hot stamping steel (UHS) is an important factor limiting the development. In this work, Nb-V microalloying of traditional 22MnB5 has been carried out with the aim of improving the microstructure and hydrogen embrittlement resistance of UHS. The effect of Nb-V microalloying on the precipitation thermodynamics of precipitates has been investigated by Jmatpro. Then, the distribution of precipitates and their influence on the microstructure have been explored by microstructural observation. Moreover, electrochemical hydrogen charging experiments and slow strain rate tests (SSRT) have been employed to evaluate the contribution of Nb-V microalloying on the hydrogen embrittlement resistance of UHS. The results show that the temperature regions of Nb and V precipitation are 1000-1300 °C and 700-1000 °C, respectively, indicating that the V-bearing carbides precipitate later; the precipitates in Nb-V alloyed UHS are almost complex carbides of (Nb, Ti, V)(C, N). The fine and diffuse precipitates refine the grain size, which reduces the average size of the primary austenite grains from 11.67 μm to 8.50 μm , and the number of small-angle grain boundaries is about 1.75 times that of traditional 22MnB5 steel. The fracture morphology of the SSRT specimen with H-charging shows a quasi-cleavage feature with secondary cracks for 22MnB5, whereas the fracture morphology is tiny dimples after Nb-V microalloying, which indicates that the resistance to hydrogen embrittlement has been considerably enhanced. The dispersed precipitates and refined microstructure resulting from the Nb-V microalloying are the key factors improving the hydrogen embrittlement resistance.

This work is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52274321) and the Science and Technology Innovation Key R&D Program of Chongqing (Project No. CSTB2023TIAD-STX0033).

C13-PO18**Precipitation and Dissolution Behavior of Ti(C_x,N_{1-x}) during the TSCR Process of Ti-Bearing 22MnB5 Steel**Haohao Zhang, Songyuan Ai, Mujun Long*, Danbin Jia, Dengfu Chen, Huamei Duan
Laboratory of Materials and Metallurgy, College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China.

The size, distribution, and precipitation amount of the second phase in the slab have a significant impact on the quality and performance of the slab and the final product. Ti(C_x,N_{1-x}) is the main precipitate in the Ti-bearing 22MnB5 steel. Clarifying the “precipitation-redissolution” evolution law of Ti(C_x,N_{1-x}) during TSCR process has important guiding significance for optimizing TSCR process parameters and improving slab quality. The “precipitation-redissolution” evolution behavior of Ti(C_x,N_{1-x}) in Ti-bearing 22MnB5 steel slab during TSCR

process and its effect on austenite grain boundary pinning force and the solid solution amount of Ti elements were investigated by thermal simulation experiments. The results indicate that $Ti(C_x,N_{1-x})$ begins to precipitate at the end of solidification and a large amount begins to precipitate at 1507K. At the end of TSCR casting process, the volume fraction of $Ti(C_x,N_{1-x})$ is 0.0256 %, and the average size of $Ti(C_x,N_{1-x})$ is 0.1560 μ m. The volume fraction of $Ti(C_x,N_{1-x})$ decreased by 15.96 % during the heating process. The average size of $Ti(C_x,N_{1-x})$ increased by 6.670 % during the holding process. The maximum particle size of $Ti(C_x,N_{1-x})$ before and after soaking decreased by 42.34 % in TSCR process, while increased by 8.020 % in traditional process. In addition, the pinning force of $Ti(C_x,N_{1-x})$ on austenite grain boundaries in TSCR process is always lower than that in traditional process, and the pinning force reaches the maximum at the end of continuous casting. The solid solution amount of Ti element in the slab before rolling of TSCR process is 1.260 times that of the traditional process, which has a significant solid solution advantage. The research results provide a theoretical basis for the high-quality and stable production of Ti-bearing 22MnB5 steel by TSCR process.

This work is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52274321) and the Science and Technology Innovation Key R&D Program of Chongqing (Project No. CSTB2023TIAD-STX0033).