

中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7月5-8日, 2025

福建 厦门

C13-先进钢铁材料

C13-Advanced Steels

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



C13.先进钢铁材料

分会主席：毛新平、张福成、赵栋梁、梁剑雄

报告

C13-01

碳中和背景下汽车钢发展的思考

汪水泽

北京科技大学

C13-02

高强钢滚动接触疲劳损伤机制研究

张鹏*、邵子恒、朱艳坤、王斌、张哲峰

中国科学院金属研究所

滚动构件服役时主要发生滚动接触疲劳（RCF）失效，影响其稳定运行。本研究以车轮和轴承两大典型 RCF 失效构件为对象，对损伤机制和优化策略展开研究。首先通过对车轮钢 RCF 损伤的系统表征，揭示了材料短板的塑性变形累积是导致 RCF 裂纹萌生和最终失效的原因；通过增加碳含量和钒微合金化，减少和强化了车轮钢的软相铁素体，有效缓解了短板的形变累积，实现了车轮钢 RCF 寿命的提升。其次，在传统安定理论的基础上，引入短板效应，首次提出了精确到轴承钢内部缺陷的微观安定分析模型，阐述了碳化物尺寸和类型对轴承钢 RCF 性能的影响规律；基于表面粗糙峰和内部碳化物周围形变累积诱导裂纹萌生的竞争关系，预测了碳化物导致轴承钢 RCF 开裂的临界尺寸。

C13-03

中频低损耗高磁极化强度超薄无取向硅钢研发进展

孟利*、涂杨、张宁

钢铁研究总院有限公司

本文讨论了采用具有特征初始组织的 0.30 mm 规格的无取向硅钢进行冷轧与退火处理获得 ≤ 0.08 mm 的超薄无取向硅钢。利用光学显微镜、电子背散射衍射（EBSD）和 x 射线衍射（XRD）对材料的微观组织和织构进行了表征，从取向的冷轧形变和再结晶行为角度阐述了超薄无取向硅钢制备过程中的组织与织构演化规律。在冷轧过程中，随着冷轧形变量的增加，冷轧织构最终主要为较强 α -线+ α^* + λ -线织构，其中 λ -线织构中的 Cube 织构主要来自 $\{115\}<161>$ 织构的转动；冷轧超薄带的再结晶形核位置主要为 $\{111\}<112>$ 和 $\{111\}<110>$ 的剪切带、晶内和晶界处形核，形核晶粒主要为 Cube、 $\{001\}<120>$ 、 $\{012\}<100>$ 、Goss、 $\{114\}<481>$ 、 $\{111\}<112>$ 等取向，其中的 $\{012\}<100>$ 、Goss 与 $\{114\}<481>$ 取向会发生明显的亚晶聚合粗化，而 $\{111\}<112>$ 取向的亚晶聚合粗化程度次之，Cube 与 $\{001\}<120>$ 取向的程度最小，亚晶聚合粗化会产生取向钉扎效应；Cube 与 $\{001\}<120>$ 取向由于相对较弱的钉扎效应在晶粒生长阶段表现出生长优势，在最终的再结晶织构中强度最强。再结晶织构中的 $\{001\}<120>$ 、 $\{012\}<100>$ 、 $\{114\}<481>$ 与 $\{111\}<112>$ 等织构与母材初始织构的遗传性有关，而 Cube 与 Goss 织构的出现则展现了冷轧工艺调控的重要性。再结晶织构与母材的初始织构和冷轧工艺的调控有关。

C13-04

一种兼具优异强韧性与热稳定性的新型高氮热作模具钢

冯浩*、王海建、李花兵、姜周华

东北大学

基于以“以氮代碳”为核心、多元素协同调控的设计理念，本文开发出一种兼具优异强度-韧性-热稳定性的新型高氮热作模具钢 3Cr5Mo2SiVN。在强化机制方面，与传统 H13 钢相比，3Cr5Mo2SiVN 钢通过产生更细小的有效晶粒尺寸发挥细晶强化作用，以及更多固溶 C、N 间隙原子产生固溶强化作用而提升强度。在韧化机制方面，更高比例的 V1/V2 变体、更弱选择性的 CP 组和 Bain 组分布显著提升了高角度晶界密度，从而提高了冲击裂纹偏转频率并吸收更高的冲击能量；同时，沿原始奥氏体晶界分布的未溶 M(C, N) 碳氮化物具有更小的尺寸和更低的数量密度，有效降低了晶界脆性。在热稳定性机制方面，3Cr5Mo2SiVN 钢具有更高的活化能，有效抑制了元素扩散，延缓了析出相粗化。钢中未溶 M(C, N) 比 MC 具有更高的固溶温度、更低的晶格错配度和界面能，M3(C, N) 则表现出更强的吸热能力，因而二者均具有较高的热稳定性；此外，稳定的晶格常数与间隙原子固溶量、细小碳氮化物及其低析出量有效抑制了位错的湮没和重排。上述机制使得 3Cr5Mo2SiVN 钢在保持高强韧性的同时，兼具优异的热稳定性，为开发新一代高性能热作模具钢提供了理论支撑。

C13-05

高氮 Ni-Fe-Cr 多主元耐蚀合金的热塑性研究

刘煜*¹、张晓慢¹、马天军¹、王俊²

1. 宝武特种冶金有限公司

氮(N)合金化可作为提升材料高温强度、耐腐蚀性能的有效手段，在不锈钢领域获得了广泛的应用。耐蚀合金相比不锈钢而言，其合金化程度更高，材料的热加工难度大。本文以 N08120 合金、一种典型高 N 含量的 Ni-Fe-Cr 多主元耐蚀合金为研究对象，利用热模拟试验机在不同变形条件下对其进行高温压缩和高温拉伸测试，通过压缩变形行为，构建了材料的本构方程并结合其变形组织绘制了热加工图，得出其最优热加工窗口为 1100°C/10 s-1、1200°C/10 s-1 和 1150~1200°C/0.01 s-1，利用 EBSD 等显微分析手段探究了材料的动态再结晶机制，并对高温拉伸断裂行为进行研究，旨在深入理解影响材料热塑性的关键因素，从而为材料的热加工工艺参数选择提供理论基础。

C13-06

显微原位 CT 在钢铁材料领域的研发与应用

李仁庚*¹、杨尚京²

1. 南京工业大学

2. 长三角先进材料研究院

随着先进钢铁材料在航空、航天、军工等关键领域的应用，在高温、低温和复杂应力等极端服役条件下对关键材料和构件的内部缺陷形成、演变和裂纹扩展进行可视化、定量化、数字化原位研究，成为评估部件服役可靠性和预测剩余寿命的重要实验手段。基于 X 射线强穿透能力和计算机断层扫描(CT)技术，结合亚微米级精密控制转台和机械控制，可实现毫米/厘米级试样的三维无损成像。通过配置超高温模块、低温模块、高载荷模块(拉伸/压缩/弯曲/疲劳)，构建热-力耦合系统，实现超高温变形、超低温变形以及热冲击、疲劳、蠕变等复杂工况下轻合金材料与部件的原位 CT 成像。极端服役环境 X 射线显微原位 CT 设备的成功研发，将极大提升关键钢铁材料在服役工况下的可靠性和安全性。

C13-07

稀土镧在 Crofer22 APU 不锈钢中抗氧化作用的新认识

张树才*¹、张彬彬²、任亭昱¹、李花兵¹、姜周华¹、李国平³

1. 东北大学冶金学院

2. 东北大学分析测试中心

3. 山西太钢不锈钢股份有限公司

稀土具有卓越的提升金属材料抗氧化性能的作用,已被广泛应用于耐热不锈钢和高温合金等领域。现有研究多聚焦于稀土改善氧化层保护性的作用,关于稀土改性夹杂物及其对抗氧化性能影响的研究较少。本文以稀土镧(La)合金化的 Crofer22 APU 不锈钢为研究对象,从固溶 La 和含 La 夹杂物的视角重新认识了 La 在钢中的抗氧化作用,旨在探索最佳 La 含量。研究发现,随着 La 含量(0、0.04%、0.08%、0.17%)提高,800°C的氧化增重量以 0.08La 钢为分界,呈先降低后升高的趋势,这取决于固溶 La 和含 La 夹杂物的共同作用。(1)随着 La 含量提高,钢中固溶 La 含量提高,从而发挥两方面作用:首先,固溶 La 优先氧化,形成 La₂O₃@Cr₂O₃ 结构,即为 Cr₂O₃ 提供形核核心,促进保护性 Cr₂O₃ 内层的形成;同时,La₃+易在氧化物晶界偏聚,阻碍阳离子向外扩散,降低 MnCr₂O₄ 外层的生长速度。因此,随着 La 含量提高,Cr₂O₃ 内层逐渐增厚,而 MnCr₂O₄ 外层先变薄,La 过量时又有所增厚。(2)随着 La 含量提高,钢中夹杂物被逐渐改性,对氧化行为也产生了显著影响:0La 钢中主要夹杂物为 MgAl₂O₄ 和 TiN, MgAl₂O₄ 性质稳定,对氧化层无明显影响,TiN 氧化后形成簇状 TiO₂ 和 N₂,体积膨胀,破坏氧化层;0.04La 和 0.08La 钢中,有害 TiN 逐渐减少至消失,主要夹杂物为小于 2 μm 的 La₂O₃ 和 LaP,此尺度的夹杂物能被氧化层完全覆盖,无明显破坏作用;然而,当 La 含量达到 0.17%时,钢中形成了大量大于 2 μm 的 La₂O₃ 和 LaP,无法被氧化层完全覆盖,La₂O₃ 内存在大量空位缺陷和纳米多晶结构,为氧的内扩散提供快速通道,LaP 氧化后形成易挥发 P₂O₅,体积膨胀,破坏氧化层。因此,随着 La 含量提高,夹杂物对氧化层的破坏作用先逐渐减弱,La 过量时又显著增强。综上,固溶 La 和含 La 夹杂物的综合作用共同决定了钢的抗氧化性能:当 La 含量≤0.08%时,固溶 La 对氧化层的有利作用大于夹杂物的不利作用,钢的抗氧化性能逐渐改善;当 La 含量>0.08%时,大尺寸 La₂O₃ 和 LaP 对氧化层的破坏作用占据主导,钢的抗氧化性能又有所下降;从提升抗氧化性能的角度考虑,Crofer22 APU 不锈钢中的 La 含量应控制在 0.04%~0.08%。本研究从固溶 La 和含 La 夹杂物的视角揭示了 La 对 Crofer22 APU 不锈钢高温氧化行为的影响机制,可为 SOFC 连接体用材的成分设计和稳定服役提供重要支撑。

C13-08

Mn 添加对 Fe-Cu 钢中析出演化的影响

汪林¹、沈琴^{*1,2}、李方杰¹、刘敏³

1. 上海工程技术大学
2. 上海交通大学四川研究院
3. 上海应用技术大学

将 Fe-Cu 和 Fe-Cu-Mn 两种钢 900 °C 固溶 2 h 后水淬,在 500 °C 时效不同时间,用原子探针层析技术(APT)和第一性原理计算研究 Mn 对钢中富 Cu 相析出过程的影响。研究发现,在时效初期,Fe-Cu 和 Fe-Cu-Mn 钢均出现富 Cu 相析出。随着时效时间的延长,Fe-Cu-Mn 钢中的富 Cu 相尺寸大于 Fe-Cu 钢,而数量密度低于 Fe-Cu 钢,这表明 Mn 的添加促进了富 Cu 相的生长。时效 16h 后,Fe-Cu-Mn 钢中的富 Cu 相转变为面心立方结构,且富 Cu 相呈现出富 Cu 区与富 Mn 区交替分布。第一性原理计算表明,Fe-Cu-Mn 钢中 Mn 的添加提高了富 Cu 相的形核速率;同时,富 Cu 相与基体界面处面心立方结构的 Mn 增加了富 Cu 相与基体之间的界面能,从而加速了富 Cu 相的生长。

C13-09

选区激光熔化成形马氏体沉淀硬化不锈钢组织和性能研究

张靖实*、王忠乐、韩英、冉旭

长春工业大学

采用选区激光熔化(SLM)技术制备了一种 Fe-12Cr-9.4Ni-1.6Al-1.5Mo 沉淀析出硬化不锈钢,并对样品进行固溶、直接时效和固溶时效热处理。系统研究了 SLM 工艺参数和热处理工艺对不锈钢致密度、组织演化与力学性能的影响。结果表明,打印后样品的密度达到 99.49 % (激光功率 260 W,扫描速度 1000 mm/s)。固溶处理后,奥氏体几乎完全转变为马氏体,同时伴随着组织粗化。时效处理后,微观结构无明显

显变化,并获得了纳米级的 NiAl 相析出物。直接时效试样和固溶时效试样的强度显著提高,表现出良好的综合力学性能。与晶界强化和位错强化相比,纳米级 NiAl 相引起的析出强化是性能提升的主要原因。

C13-10

卷取温度对 Nb-V-Mo-N 微合金钢显微组织、碳氮化物及力学性能的影响

张婧、辛文彬*、侯蹬云

内蒙古科技大学

在中试条件下,系统研究卷取温度对 Nb-V-Mo-N 微合金钢组织演变、MX (M=Nb、V、Mo; X=C、N) 碳氮化物析出行为及力学性能的影响。结果表明,当卷取温度从 700℃降低到 600℃时,显微组织中块状铁素体占比由 91.5%减少至 78.6%,而珠光体和针状铁素体占比分别由 8.5%和 0%增加至 18.8%和 2.6%,有效晶粒尺寸和大角度晶界占比分别由 8.8μm 和 85.6%减小至 5.0μm 和 73.4%,平均 KAM 值由 0.363°增大到 0.542°;此外,纳米级碳氮化物相间析出列间距由 49.1nm 减小到 26.9nm,颗粒尺寸由 7.3nm 细化至 4.4nm,数密度由 $1.0 \times 10^{15} \text{m}^{-2}$ 增大到 $8.7 \times 10^{15} \text{m}^{-2}$;屈服强度和抗拉强度分别由 673MPa 和 795MPa 增大至 955MPa 和 1083MPa,室温冲击功从 60J 减小至 8J。600℃卷取时实验钢的强度最高,且析出强化增量为 300.5MPa,对屈服强度的贡献量最大,700℃卷取对应的细晶强化增量(185.1MPa)最大,同时冲击韧性最优。

C13-11

原位研究焊缝金属区和热影响区缺陷演化行为的区别

黄继勇^{1,2}、曹子奇^{1,2}、于虎城^{1,2}、丁一帆^{1,2}、冉广*^{1,2}

1. 厦门大学能源学院

2. 福建省核能工程技术研究中心

为深入揭示焊缝金属区(WMZ)与热影响区(HAZ)在高温服役条件下的辐照缺陷演化及其对力学性能的影响,本研究选用 16MND5 钢焊缝试样,在透射电子显微镜(TEM)中开展了 450℃下的原位 Fe 离子辐照实验。试样分别取自焊缝金属区及其邻近的热影响区,采用 400 keV Fe 离子进行持续注入,并同步观察微观结构的实时演化行为。实验结果显示,在相同温度和剂量条件下,WMZ 中位错环的成核剂量显著低于 HAZ,成核位置主要分布于晶界、熔合线及多晶晶粒交界区域,位错环呈现出尺寸较小、密度较高的特征,并可形成具有一定排列方向性的局域有序结构。而 HAZ 中位错环成核相对滞后,尺寸较大但密度较低,分布形貌更为离散,局部区域可观察到片状或混合型缺陷,反映出两区域在点缺陷扩散、俘获和聚集机制方面存在明显差异。随着辐照剂量的增加,两区均经历了位错环的长大、合并及局部湮灭过程。其中,WMZ 中位错结构逐渐趋于稳定,缺陷形貌保持较高的有序性,而 HAZ 中则表现出缺陷形貌的持续演化与重组,呈现出更强的结构波动性。结合 Orowan 机制分析,这些位错结构差异将直接影响材料的辐照硬化行为:WMZ 因位错环密度高且缺陷排列紧密,对位错运动形成更强障碍,表现出更明显的辐照强化趋势;HAZ 中虽缺陷类型多样,但其形貌不稳定与缺陷再分布可能降低强化效应的持续性。综上所述,焊接热循环引起的组织结构梯度与合金元素分布差异,深刻影响了点缺陷的输运行为和位错结构的演化路径,导致 WMZ 与 HAZ 在辐照响应及硬化机制方面表现出本征差异。本研究从实验层面揭示了 16MND5 钢焊缝区域在高温辐照环境下的缺陷行为与力学性能演化规律,为核反应堆压力容器关键部位的辐照服役性能评估提供了理论支持与数据基础。

C13-12

新型 HB500 级晶粒细化耐磨钢的氢脆敏感性研究

朱嘉豪、尉文超*、吕万青、王毛球、时捷

钢铁研究总院有限公司

随着社会对节能减排要求的不断提高,机械车辆的轻量化已成为行业发展的必然趋势,这进一步推动了更高强度钢材的研发与应用需求。目前,马氏体钢在超高强度钢领域仍占据主导地位。然而,当马氏体钢的抗拉强度超过 1200 MPa 时,氢致断裂的问题逐渐显现。随着钢强度水平的提升,其氢脆敏感性显著增加,这种“强度-氢脆敏感性”的权衡关系严重限制了超高强钢在特定环境下的应用可靠性。当前广泛采用的策略包括设计捕氢析出相、细化晶粒以及控制钢材高洁净度,这些方法已被证明能够有效提升钢的抗氢脆能力。HB500 耐磨钢因其优异的强度-韧性平衡性能和耐磨特性,已成为矿山机械等耐磨损设备的首选材料。然而,其高强度特性也导致了严重的氢脆问题。在众多强化方法中,晶粒细化因其对马氏体钢的强度、韧性和抗氢脆性能均具有显著的正面影响而备受关注。然而,实现小于 5 微米的晶粒尺寸仍然面临较大的技术挑战。为此,本研究通过创新合金设计与工艺调控,开发出抗拉强度达 1700 MPa 级、原始奥氏体晶粒尺寸 4 μm 的 HB500 钢 30Mn2MoTi,并系统研究了其在电化学充氢条件下的失效行为与抗氢机制。

本研究采用转炉冶炼+连铸+控轧技术制备实验钢,其化学成分为 0.30C-2.0Mn-0.35Mo-0.06Ti-0.002S-0.009P (wt.%)。通过 900 $^{\circ}\text{C}$ 淬火+180 $^{\circ}\text{C}$ 回火处理后,使用光学显微镜 (OM)、扫描电子显微镜 (SEM)、透射电子显微镜 (TEM)、化学萃取相分析等技术对实验钢的微观组织与析出相状态进行了表征与测定,同时通过布氏硬度、室温拉伸与-40 $^{\circ}\text{C}$ 低温冲击实验测试了实验钢的力学性能。利用 0.1 mol/L NaOH 溶液进行电化学充氢 (电流密度 1 mA/cm², 时长 24/48/96 h) 后,利用热脱附光谱 (TDS) 定量分析了氢含量及氢陷阱类型。通过慢应变速率拉伸 (SSRT) 试验评价了实验钢的氢脆敏感性。

实验表明,30Mn2MoTi 钢经热处理后 HB 硬度达到 520,符合 HB500 级耐磨钢标准。微观组织由细小板条马氏体与高密度纳米 TiC 析出相 (95% 粒径 < 70 nm) 构成,原始奥氏体晶粒尺寸约为 4 μm 。实验钢在未充氢状态下具有优异的强韧平衡:抗拉强度 1760 MPa,屈服强度 1520 MPa,延伸率 12.5%,断面收缩率 44.5%, -40 $^{\circ}\text{C}$ 冲击功 26 J。经不同时长充氢后,TDS 测试显示钢中均存在两个位置的解吸峰,其中 Peak1 峰值温度始终维持在 145 $^{\circ}\text{C}$,对应的氢含量分别为 0.25 ppm (24 h), 0.28 ppm (48 h) 与 0.35 ppm (96 h)。随着充氢时间的增加,氢含量也逐渐增加。不同升温速率下的 TDS 结果表明 Peak1 的氢激活能 $E_a=18.6$ kJ/mol,对应于晶界位置的氢捕获。Peak2 峰值温度始终维持在 354 $^{\circ}\text{C}$,对应的氢含量始终保持在 0.03 ppm 的较低水平下,对应于 TiC 位置的氢捕获。SSRT 测试结果表明充氢 96 h 后材料仍保持超高强度 (1771 MPa) 与良好塑性 (延伸率 11.5%, 断面收缩率 42%), SEM 证实该充氢条件下,断裂模式仍为典型的微孔聚集型韧性断裂,未出现准解理或沿晶脆性特征,展现出优异的抗氢脆性能。这与文献报道形成鲜明对比:近似氢含量下,AISI 4135 钢强度下降 14%,表现为脆性断裂。机理分析认为,实验钢的优良抗氢脆性能源于微观层面的双重协同效应:一方面超细晶结构使单位体积内的晶界面积较传统高强钢 (如晶粒尺寸 11 μm 的 AISI 4135 钢) 显著提升,晶界作为主要氢陷阱可有效促进氢原子均匀分布,抑制局部富集;另一方面,超低硫磷含量显著降低杂质元素在晶界的偏聚,避免因氢-杂质交互作用引发的晶界弱化。

本研究的主要核心结论如下:为:通过 Ti 微合金化与控轧工艺协同作用,可实现 HB500 耐磨钢的晶粒稳定细化至 4 μm 级别,并在 1700 MPa 强度水平下,在氢含量下为 0.35 ppm 时实现“零强度损失+全韧性维持”。这一成果为耐磨钢抗氢脆设计提供了以下两点重要参考:(1) 晶界工程优先策略:相较于单纯追求钢中可扩散氢含量的降低,更应关注晶界密度对氢分布的调控作用;(2) 洁净度阈值控制:将 S、P 含量分别降至 0.002% 和 0.009%,能够显著降低氢致晶界脆化风险。

C13-13

基于化学异质调控高塑韧无碳化物贝氏体钢

张献光*、冯首力、张雅莉、管子航、韩浩然

北京科技大学

无碳化物贝氏体(CFB)钢,亦称为 TRIP 型贝氏体-铁素体钢 (TBF 钢),具有超高强度、优异的凸缘翻边和抗疲劳性能,适用于制造汽车板、轴承等,是新一代先进高强钢的典型代表。传统 CFB 钢因塑性偏低限制了其应用,如何提升 CFB 钢塑性是本领域的重点问题。本研究发现,基于奥氏体逆相变在单相奥氏体中引入了 Mn 异质性,所制备 CFB 钢塑性提升了近一倍。这不同于过去均质奥氏体的贝氏体相变行为,有

关 Mn 异质对 CFB 钢组织性能的影响及机制尚不清楚。本研究以低合金 CFB 钢为载体, 深入研究了逆相变合金元素富集行为及其遗传性, 从化学异质对贝氏体相变行为、残余奥氏体组织特征影响等角度解析其增塑机制, 为利用逆相变与贝氏体相变协同作用开发高强塑性 CFB 钢提供了重要理论依据与解决思路。

C13-14

首钢薄板坯连铸连轧工艺、产品及应用实践

肖宝亮*、李晓林、张大伟、梁江涛、吕博、李浩源

本报告详细介绍了国内外近终形轧制技术的发展, 对最近全球较为热门的短流程无头轧制模式进行详细分解, 阐述了首钢薄板坯连铸连轧产线结合前期设计、调试及正常运行过程中的相关问题开发的主要成套关键工艺技术及其降碳水平。在此基础上, 详细介绍了该产线在汽车、中高碳等高端领域所开发的高端产品情况, 其中包括 1500-1800MPa 级热成形钢、低合金钢、 $\geq 780\text{MPa}$ 级相变强化钢、GPa 级超高强马氏体钢、SK85 中高碳钢、耐火耐候楼承板、耐候光伏支架用钢等低碳绿色产品。

C13-15

高强塑韧耐蚀钢组织性能研究

王卫卫*¹、邢振环²、赵飞宇¹、吕小虎²、赵奕光¹

1. 钢铁研究总院有限公司

2. 河钢集团唐钢公司

通过对比研究不同 Cr (质量分数为 0.5%、2%、3%、4% 和 5%) 含量对高强耐蚀钢显微组织和力学性能的影响规律, 获得了不同的作用机理。结果表明, 当 Cr 含量从 2% 提高到 3% 时, 产生的贝氏体使得屈服强度和抗拉强度分别提高约 80 MPa 和 120 MPa。当 $\text{Cr} \geq 4\%$ 时, 大于 80% 的贝氏体使得的钢的断后伸长率小于 10%。耐蚀钢在 120 h 盐雾腐蚀后的相对腐蚀率与 Q345GNH 钢相比小于 70%, 其耐蚀性能提高归因于稳定的含 Cr 腐蚀产物的形成和 Ni 引起的自腐蚀电位正移。

C13-16

超高强度汽车钢冷冲压成形分析

常颖*¹、王存宇²、李晓东¹、余树洲¹

1. 大连理工大学

2. 钢铁研究总院有限公司

高强高塑性汽车钢的制造是改善汽车轻量化和安全性的关键技术, 但随着汽车钢强度水平的提高, 其面临冷冲压成形方面的问题也变得较为复杂, 其中, 钢板的剪切边开裂和回弹缺陷成为汽车钢零件冷冲压制造的技术瓶颈, 也成为制约先进汽车钢广泛应用的关键问题。

本报告从多尺度、多学科交叉的角度, 对于剪切边开裂问题, 进行了剪切边特性表征与开裂机理研究; 阐明汽车钢 (是否含奥氏体) 的微观组织对力学性能和扩孔性能的影响规律; 建立了考虑应变历史的全流程仿真模型, 并提出了剪切边成形性能评价的新方法; 对于回弹预测与抑制问题, 由于先进高强钢材料特性与传统汽车钢存在较大不同, 因此, 开展了考虑先进高强钢经历复杂加载过程中表现出的 Bauschinger 效应、瞬态效应和永久软化等 Bauschinger 行为的本构模型, 并且分析了影响回弹预测精度的关键因素, 建立了高阶本构模型所需的材料参数, 通过实验验证了本构模型回弹预测的准确性以及回弹控制方法的有效性, 为先进高强钢回弹缺陷的改善提供了重要的实用方法和理论指导。

C13-17

Fully restoring the damaged ductility of H-charged medium Mn steel via pulsed current**完全修复中锰钢氢致塑性损伤的电脉冲处理技术研究**

胡斌

北京科技大学

在 250℃ 下对充氢后的中锰钢 (MMnS) 进行电脉冲处理 (EPT) 可以去除马氏体和奥氏体中的氢, 完全恢复氢致塑性和强度损失。而在相同温度下, 采用常规热处理 (CHT) 脱氢只能去除马氏体中的 H, 但奥氏体中仍有 0.3wtppm 的 H 残留, 导致中锰钢的塑性损伤仅恢复 50% 左右。综合微观组织表征和 TDS 测试, 探讨了 EPT 修复氢致力学性能损伤的相关机理。

It was found that the electric pulsed treatment (EPT) performed at 250 °C on a medium Mn steel (MMnS) can remove all the H atoms preserved in martensite and austenite by the electrochemical H-charging; as a result, the severely deteriorated ductility and strength due to hydrogen embrittlement (HE) were both fully restored. In contrast, only the H-atoms in martensite were completely removed by the conventional heat treatment (CHT) at the same temperature, but 0.3 wt ppm H remained in austenite, resulting in the damaged ductility just restored by about 50 %. The relevant mechanism on releasing H-atoms by EPT is discussed on the basis of microstructural examinations and H-desorption kinetic measurements for explaining such an unexpected phenomenon.

C13-18

稀土夹杂物氢陷阱和晶界特征调控协同提升高强钢抗氢脆性能刘汉强^{1,2}、李星^{*1}、杨超云¹、栾义坤^{1,2}、李殿中^{1,2}

1. 中国科学院金属研究所

2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院

针对高强度马氏体钢 (>1200MPa) 在含氢介质服役环境下面临的氢脆失效难题, 本研究创新性提出利用稀土镧处理强化夹杂物氢陷阱作用与晶界特征调控的策略, 促进氢在钢中均匀弥散分布, 有效改善高强度马氏体钢的氢脆敏感性。通过真空感应熔炼制备了不同镧含量 (0、110、150ppm) 的 42CrMo 马氏体钢, 编号分别为 0La、110La 和 150La。采用电化学氢渗透测试、慢应变速率拉伸 (SSRT) 与氢微印技术 (HMT), 并结合扫描电镜 (SEM) 和电子背散射衍射 (EBSD) 分析, 系统探究了镧对 42CrMo 马氏体钢氢扩散行为、氢陷阱作用及氢脆敏感性的影响机理。

研究表明: 添加稀土镧后, 钢中形成大量细小弥散的类球形稀土夹杂物, 这些夹杂物作为高效不可逆氢陷阱, 其氢捕获能力显著优于 Al_2O_3 和 MnS 夹杂物。110La 的氢扩散系数较 0La 降低 14.2%。SSRT 过程中, 稀土夹杂物/基体界面处核平均取向差 (KAM) 的变化量是 Al_2O_3 和 MnS 夹杂物的 6 倍以上, 表明稀土夹杂物具有优异的协调变形能力。此外, 稀土镧处理将大角度晶界 (HAGBs) 数密度提升 16%, 有效阻碍氢致裂纹扩展。得益于上述微观结构的协同优化, 110La 的氢脆敏感性指数 δ_{loss} 从 0La 的 64.59% 降低至 55.91%, 其沿晶断裂面积相应减少 53.3%。

综上所述, 钢中添加稀土镧能够同时实现夹杂物改性、晶界特征调控与氢陷阱优化, 通过阻碍氢扩散和均匀化氢分布, 有效提升高强度马氏体钢抗氢脆性能。本研究为稀土微合金化设计抗氢脆高强钢提供了重要的理论依据与技术支撑。

本研究得到了国家自然科学基金的资助 (项目编号: 52404354、52101165、52031013)

C13-19

Rate-dependent ductile-brittle transition in a Medium Mn steel

Yuxuan Liu, Mingxin Huang*

The University of Hong Kong

Medium Mn steels (MMS) have received significant attention owing to their excellent tensile properties and rich deformation mechanisms. This work reports a strain rate-dependent ductile-brittle transition phenomenon in strain rate regime of 10^{-6} s $^{-1}$ to 101 s $^{-1}$, where uniform elongation dramatically increases from $\sim 10\%$ at 10^{-6} s $^{-1}$ to $\sim 50\%$ at 100 s $^{-1}$. In other words, this MMS exhibits brittleness at a low strain rate but becomes ductile at a high strain rate. To unveil the origin of this unusual phenomenon, comprehensive characterizations focusing on microstructural evolution, fracture behavior, and strain heterogeneity at various strain rates have been carried out. Despite similar microstructural evolutions, the fracture morphology transits from brittle fracture featuring quasi-cleavage and intergranular cracks at low strain rate to ductile fracture featuring dimples at high strain rate. Strong but brittle fresh martensite and soft austenite matrix lead to higher strain heterogeneity at low strain rate, while strain incompatibility is largely alleviated due to plastic deformation of fresh martensite at high strain rate. Further tensile tests on the same MMS with pre-introduced fresh martensite and tempered martensite highlight the critical role of interstitial carbon solutes in governing the rate-dependent ductile-brittle transition. As identified by atom probe tomography, the difference in carbon clusters in fresh martensite at different strain rates indicates the activation of carbon drag effect on dislocations. The carbon drag effect is inversely proportional to strain rate, which is believed to affect the deformability of fresh martensite, leading to the strain rate-dependent ductile-brittle transition phenomenon.

C13-20

冷拉拔珠光体钢丝显微组织与弯扭性能关系研究

王培*、杨朕聃、贾春妮、杨廉清、蔡蕊、桑晨昊、李殿中

中国科学院金属研究所

冷拉拔高强珠光体钢丝是钢丝绳的基本单元，其性能直接决定高性能钢丝绳的性能。由于在钢丝绳中的螺旋空间结构分布，钢丝在实际服役过程中承受复杂的拉伸、弯曲和扭转综合作用，同时由于冷拉拔变形导致的钢丝强各向异性而非均匀分布的残余应力，使得钢丝的失效机理和特征较为复杂。本文利用射线CT、SEM、EBSD以及中子衍射技术等分析手段，研究了冷拉拔珠光体钢丝拉伸、扭转和弯曲单一及复合变形下的失效规律，尤其对冷拉拔珠光体钢丝受热后发生扭转分层断裂的微观机制进行了研究。结果表明，受热后钢丝扭转分层裂纹起源于钢丝内部距离心部 $0.15R \sim 0.5R$ 的范围内，此处位置 $\{110\}<110>$ 周向织构占比最高，导致在扭转变形过程中易出现应力集中，同时该区域存在粗大的铁素体、碎化的渗碳体以及剪切带为特征的珠光体组织，使得裂纹优先在此区域萌生。分层微裂纹萌生之后，由于受热后钢丝轴向残余压应力降低，使得裂纹更易沿轴向扩展，从而形成分层断裂特征。

C13-21

电子束增材制造 M2 高速钢的组织及性能

李烨*

西北有色金属研究院

在本研究中，采用电子束熔化（EBM）技术制备了 M2 高碳合金钢。通过改变束流、扫描速度和扫描间距，系统地探索了最佳加工参数。通过扫描电子显微镜（SEM）、透射电子显微镜（TEM）、电子背散射衍射（EBSD）和压缩测试对制备的样品进行了全面表征，以评估其化学成分、密度、抗压强度、延展性、晶粒形态、织构和相组成。结果表明，线能量密度与表面形貌和微观结构演变密切相关。较高的线能量会导致表面鼓包，而较低的线能量会提高冷却速率，从而使晶粒和碳化物分布细化。然而，线能量过低会引发球化现象，并导致密度大幅降低。确定的最佳参数组合为束流 7.8 毫安、扫描速度 2.4 米/秒和扫描间距 0.1 毫米，可实现 99.6% 的相对密度、793 维氏硬度和 2860 兆帕的抗压强度。

电子束熔化加工具有独特的热历史，其特点是快速凝固，随后在热影响区内产生梯度“退火”效应，从而形成独特的“三明治”微观结构。这种分层结构在层厚方向上由细小的等轴晶、柱状枝晶和粗大的等

轴晶组成。观察到的微观结构梯度归因于粉末床熔融工艺固有的复杂热循环，在该工艺中，连续的熔池形成会导致下层的循环再加热。

C13-22

提高高强度热轧汽车钢的拉伸凸缘性：界面影响区在优化组织中的作用

杨明岳、汪水泽*

北京科技大学

汽车部件中使用的先进高强度钢要求优异的拉伸翻边性能，这通常是通过扩孔性能来量化。本研究探讨了在相似强度水平下，微观结构分别为铁素体+贝氏体、铁素体以及铁素体+珠光体对先进高强度钢的扩孔性能的影响。铁素体+贝氏体结构表现出比铁素体和铁素体+珠光体更优越的拉伸翻边性能，这归因于在铁素体和贝氏体的界面处具有一个称为界面影响区的梯度应变层。这种结构通过促进软相（铁素体）与硬相（贝氏体）之间的平滑硬度过渡，提升了拉伸翻边性能，从而改善了应力分布的均匀性。此外，550°C的低卷取温度细化了有效晶粒尺寸和晶界处纳米析出物的尺寸，从而进一步降低了应力集中。这些发现突显了引入梯度分布的界面影响区在先进高强度钢中提升拉伸翻边性能方面的潜力。

C13-23

低锰轻质钢的强塑性协同提升研究

刘磊^{1,2}、褚晓红^{1,2}、高永旭^{1,2}、王鹏程^{1,2}、赵征志^{*1,2}

1. 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心
2. 北京市交通与能源用特殊钢工程技术研究中心

低锰轻质钢由于奥氏体热稳定性低和 δ 铁素体的存在，强度-塑性权衡不可避免。本研究通过精确调控残余奥氏体、 δ 铁素体等多相组织，并充分调动位错、异质、析出等多种强塑性机制，显著提升了综合力学性能。首先，对Fe-0.3C-2.8Mn-3.5Al-0.5Cr-0.2V钢设计了适当压下率的高温温轧工艺（ $\geq 700^\circ\text{C}$ ），无需额外的再结晶退火即可构建多尺度非均质组织，保留了大量双峰残余奥氏体和位错堆积，并析出高密度应变诱导VC粒子。然后，进一步优化微合金成分（添加NbMo），相较于VC析出粒子，（Nb, V, Mo）C粒子对 δ 铁素体具有更明显的析出强化作用，使 δ 铁素体和基体相在应变过程中经历有效协调伸长，且其强细化效果不仅增加了残余奥氏体机械稳定性，还改善了基体相和应变均匀性，降低了应力集中对 δ 铁素体变形的阻碍，最终获得~1.2 GPa抗拉强度，~40%总伸长率的优异强塑性。另外，为获得更高强度，采用大变形温轧工艺极致细化微观组织，并通过随后的闪速退火工艺继承超细晶、位错、析出等优势，最终抗拉强度 > 1.4 GPa，总伸长率 $\geq 22\%$ ，在轻量化效果上远超同级别高强TRIP、QP、热成形钢等。还通过轧制工艺进一步优化，实现了马氏体、 $\delta+\alpha$ 铁素体和残余奥氏体的四相层状组织构建，使得试验钢屈服强度超过1.0 GPa，抗拉强度达到1.4~1.5 GPa，且总伸长率 $\geq 20\%$ 。

C13-24

4.2K 低温用高强高韧奥氏体不锈钢配套焊材及焊接工艺开发

原园*、王松涛、刘锟

杨庄大街 69 号首钢技术研究院

针对我国核聚变 BEST 装置 4.2K 低温用高强高韧 N50 奥氏体不锈钢焊接材料“卡脖子”难题，深入研究不同合金元素对焊缝强韧化作用，创新性构建适配核聚变特殊工况的焊材合金成分体系，成功攻破高端焊丝制备领域多项技术难题，实现精准固氮、严格管控杂质元素、有效解决热加工裂纹和焊丝表面质量缺陷，成功开发出高性能专用焊材，焊接接头 4.2K 强韧性合格，完成核聚变 BEST 线圈盒锻件用焊材和第一幅预紧件示范件的顺利交付。

C13-25

电子束粉末床熔融成形高性能 M2 高速钢研究

魏瑛康*、张玉锋、刘世锋

西安建筑科技大学

M2 高速钢是制备精密切削刀具的重要原材料之一。以电子束粉末床熔融 (EB-PBF) 为代表的增材制造技术可以实现复杂结构刀具的短流程、高效制备,同时可有效避免传统铸造组织粗大、碳化物偏析等问题。本文研究了 EB-PBF 成形参数对 M2 高速钢致密度及晶粒尺寸、碳化物等显微组织的影响:当粉末预热温度与热输入分别为 820°C 及 43.6 J/mm³ 时, M2 高速钢致密度达 99.7%, 平均晶粒尺寸仅 3~6 μm, 碳化物细小且分布较为均匀。洛氏硬度和摩擦磨损试验结果表明, 优化参数下成形 M2 高速钢的硬度可达 70 HRC, 且磨损率较淬回火锻造母材降低了 13.7%。模拟服役试验进一步发现 (500~600°C, 1~3 次循环, 每次持续 1 小时), 高温下 EB-PBF 成形 M2 高速钢的晶粒尺寸会细化到 <1.5 μm, 且晶内细小碳化物析出增加, 其硬度仍能保持在 61~66.1 HRC, 红硬性较淬回火锻造母材最大提高 14%。

C13-26

690MPa 级海洋工程特厚钢板 (210mm) TMCP 工艺生产及焊接热处理对 CTOD 值与断裂行为的影响

金东浩、武会宾*

北京科技大学

采用 TMCP 工艺成功制备出厚度达 210mm 的 690MPa 级海洋工程用高强度特厚钢板。随后, 通过调质处理有效改善了钢板中元素的偏聚现象, 使钢板沿厚度方向的微观组织与力学性能分布更为均匀。为评估钢板在不同焊接条件下的断裂韧性, 利用全厚度三点弯曲试样, 分别对母材、热输入为 10 kJ/cm、30 kJ/cm 的焊接钢板, 以及热输入 30 kJ/cm 后进行焊后热处理的钢板在 -10°C 环境下开展了 CTOD 值测试。测试结果分别为 1.37mm、0.12mm、0.09mm 和 0.39mm。研究表明, CTOD 值受到组织结构的显著影响, 主要包括原始奥氏体晶粒尺寸、大角度晶界密度以及 M-A 组元的平均间距等。其中, M-A 组元边界处的高浓度 C 原子通过破坏界面结合强度增加了裂纹形核的可能性。焊后热处理则通过分解与球化 M-A 组元来提高钢板的 CTOD 值。此外, 通过纳米压痕测试计算了 M-A 组元与基体组织的弹性模量 E 和加工硬化指数 n, 并基于 Crafft 模型和 Dewsnap 模型分别建立了韧性断裂与脆性断裂情况下 M-A 组元平均间距与断裂韧性 K_{ic} 之间的关联。

C13-27

Enhancing strength and toughness in a pearlitic rail steel via multi-alloying and accelerated cooling

Shaohua Li¹, Junheng Gao^{*1,2}, Zhenyu Han³, Haibo Feng¹, Chongmu Chen³, Haitao Zhao^{1,2}, Shuize Wang^{1,2}, Kexiao Wang¹, GuilinWu^{1,2}, Honghui Wu^{1,2}, Xinping Mao^{1,2}

1. University of Science and Technology Beijing

2. Institute of Steel Sustainable Technology, Liaoning Academy of Materials, Shenyang 110000, China

3. Pangang Group Panzhihua Iron and Steel Research Institute Co. Ltd., Panzhihua, 617000, China

The demand for higher speeds and heavier loads has emphasized the necessity to tackle the inherent trade-off between strength and toughness in pearlitic rail steels. Herein, the co-additions of Cr, Ni and Cu and accelerated cooling rate on the microstructure and mechanical properties of a medium carbon pearlitic steel were systematically investigated. In comparison with base alloy, the new steel exhibits smaller prior austenite grain size (PAGS) due to the drag effect of Cu and Ni solutes. The finer PAGS and lower C content increased the volume fraction of proeutectoid ferrite. The finer pearlitic nodule size (PNS) and pearlitic colony size (PCS) were attributed to the small PAGS and greater extent of undercooling due to the combined effect of multi-alloying and accelerated cooling. Additionally, the synergistic effects of multi-alloying and accelerated cooling rate decrease

the pearlitic phase transformation temperature, accountable for the finer interlamellar spacing (IS). Compared with the base steel, the yield strength and ultimate tensile strength of the new steel increased from 587 MPa and 1069 MPa to 740MPa and 1178MPa, respectively, with a simultaneous increase of ductility from 12.4% to 14.7%. The strength increments are mainly attributed to the finer IS in the new steel. Meanwhile, the new steel possesses a higher impact toughness compared to the base steel due to the increased volume fraction of proeutectoid ferrite, and finer PNS and IS.

墙报

C13-P01

基于 Al 合金化的高钒高速钢强韧化与耐磨性协同作用机制

陶稀鹏*、崔传勇、王新广、周亦胄、孙晓峰

中国科学院金属研究所

为应对冶金矿山设备对高强韧耐磨材料的迫切需求, 本工作以一种含不同 Al 含量(0%~2.4%, 质量分数)的高钒高速钢合金(NM168)为研究对象, 探究 Al 含量对微观组织演变及力学和耐磨性能的影响规律。结果表明:NM168-0.8Al 合金综合性能最佳, 室温抗压强度 2900MPa, 应变量 9%, 2h 磨损失重量仅为 0.25mg, 与 NM168-0Al 相比其抗压强度和压缩延伸率分别提高了 7.4%、12.5%, 且磨损失重量降低了 50%, 实现了强韧性和耐磨性的协同提升。微量 Al(0.8%)添加降低 C 原子活度, 改变初生碳化物 VC 和共晶碳化物 M7C3 的析出动力学, 实现碳化物的细小弥散分布; 细小碳化物诱发晶粒细化, 提升阻碍位错运动能力和避免应力集中; 同时促使回火过程中析出低层错能的共格纳米 VC 相, 提升位错运动阻力和协同变形能力。然而, 当 Al 含量为 1.6%时, 合金马氏体含量降低并破坏基体连续性, 降低了位错运动和磨损脱落抗力。当 Al 含量增加至 2.4%时, 粗大硬质碳化物聚集, 增加材料内部和表面的裂纹萌生和扩展能力, 同时 NM168-2.4Al 合金发生内氧化, 进一步加剧材料表面磨损脱落。本研究通过多尺度表征与计算模拟相结合, 阐明"Al 通过碳化物弥散化-晶粒细化-纳米 VC 共格析出"的微观机制, 建立了成分-组织-性能的定量关系模型, 为高强韧耐磨合金的微合金化设计和寿命预测提供了理论依据和新思路。

C13-P02

海洋腐蚀环境下 Q690 高强钢对接焊缝疲劳性能研究

魏欢欢*

东南大学

海洋环境具有湿度大、盐分高等特征, 海工构筑物面临浪花飞溅侵蚀损伤影响, 结构耐久性受到严峻挑战和考验。本文通过模拟海洋浪溅区环境, 进行了锈蚀 Q690 高强钢对接焊缝疲劳荷载试验, 对比不同周期 S-N 曲线, 分析了腐蚀损伤对高强钢对接焊缝疲劳性能影响, 基于损伤理论研究了试件的力学性能退化规律。结果表明: 随着腐蚀周期增加, 对接焊缝处分布较多锈蚀产物, 金属光泽逐渐变暗, 腐蚀 100d 的锈蚀率为 8.46%, 焊缝区和热影响区平均腐蚀深度速率分别为 1.34mm/a、1.46mm/a, 在高周循环加载时, 试件疲劳极限值降低了 32.7%。根据失效断口扫描结果可知, 焊缝缺陷与腐蚀损伤对于裂纹扩展影响较大。此外, 损伤曲线能够反映断口形成机理, 处于高应力水平下, 疲劳条带数量减少, 损伤累积量逐渐提高。研究结果对 Q690 高强钢材的实际工程应用具有重要意义。

C13-P03

奥氏体位错滑移与马氏体相变对 9Ni 钢微观应力应变分配的影响机理

张文祥^{*1,2}、陈豫增²、范国华^{1,3}

1. 南京工业大学

2. 西北工业大学

3. 苏州实验室

奥氏体是马氏体-奥氏体双相钢中显著影响力学性能的关键物相。在塑性变形过程中，奥氏体中可激活两种不同的变形机制，即位错滑移与马氏体相变。然而，这两种机制对相应力的贡献难以通过实验方法分离，导致奥氏体对马氏体-奥氏体双相钢微观力学行为的影响机制尚不明确。本研究以奥氏体与回火马氏体组成的 9Ni 钢为模型材料，采用晶体塑性有限元方法（CPFEM），系统探究了奥氏体中马氏体相变与位错滑移对其微观应力应变分布的影响。通过将新马氏体可能的形核位点与各相变系上分切应力产生的机械驱动力相关联，发展了晶体塑性框架下的马氏体相变动力学模型，实现马氏体相变速率的准确模拟。采用微柱压缩确定回火马氏体的材料参数；结合中子衍射、应力-应变曲线及奥氏体体积分数演化，分离并确定奥氏体位错滑移与马氏体相变相关的材料参数。结果表明：奥氏体中的位错滑移会加剧其等效塑性应变与应力三轴度的局部集中，而马氏体相变则显著降低奥氏体的等效塑性应变与应力三轴度。同时，马氏体相变对奥氏体最大主应力的局部集中具有显著增强作用。

C13-P04

配分工艺对一步法淬火配分钢强塑化机理研究

刘亚军^{1,2}、汪水泽¹、甘晓龙^{*2}

1. 北京科技大学

2. 武汉科技大学

研究配分温度和时间对一步法淬火配分（Q&P）钢强度和塑性的影响。结果表明，随着配分温度的降低，马氏体晶粒细化且位错密度增加；随着配分时间增加，位错密度和 RA 量逐渐减少。较低的配分温度和较短的配分时间有利于实现低碳一步法 Q&P 钢高达 1377 MPa 的极限抗拉强度和 12.3% 的总伸长率。同时，由马氏体引起的位错强化和固溶强化是一步法 Q&P 钢的主要强化机制。此外，建立了一个考虑 Si 元素影响的新马氏体相变动力学模型，改进后的 CCE 模型在预测高 Si Q&P 钢的 RA 分数时更为准确，尤其是在较低的淬火温度下。

C13-P05

基于铌微合金化的高碳铬轴承钢的组织细化与性能调控技术

吴咏锦^{1,2}、张朝磊^{*1,2}、董庚益²、汪水泽^{1,2}、高军恒^{1,2}、吴宏辉^{1,2}、赵海涛^{1,2}、卢军^{1,2}、黄禹赫^{1,2}、毛新平^{1,2}

1. 北京科技大学，碳中和研究院

2. 辽宁材料实验室，钢铁再生技术研究所

高碳铬轴承钢的一个常见问题是韧性不足，其中粗大的碳化物会导致脆化，限制了其质量的提高。这项研究引入了一种创新方法，即利用铌微合金化，该方法基于 GCr15 的工业试验，成功地通过调节碳化物来提高钢的韧性，同时保持硬度。铌微合金化钢在轧制后晶粒尺寸减少了 35.1%，这归因于铌的晶粒细化效果。此外，铌微合金化导致二次碳化物的厚度减少了 19%，强度-延伸比提高了 20%。这为改善过共析钢的冷加工性能提供了新的见解。然而，在调质过程中，并未观察到铌的细晶强化和沉淀硬化效果。铌微合金化钢在调质过程中通过控制未溶解碳化物的大小、圆度和均匀分布，改善了强塑积和 35% 的冲击韧性。此外，含 Nb 钢改变了轴承钢的疲劳裂纹起裂形貌，其中尖端形 TiN 裂纹源产生的应力场超过了球形氧化物夹杂物和椭圆形 Nb(C,N) 产生的应力场。通过铌微合金化有效操控碳化物的分布和尺寸是改善高碳铬轴承钢性能的有效方法。

C13-P06**通过锻造工艺调整变形梯度在渗碳齿轮中实现均匀细粒的新策略**孙万利^{1,2}、张朝磊^{*1,2}、董庚益^{1,2}、汪水泽^{1,2}、高军恒^{1,2}、吴宏辉^{1,2}、赵海涛^{1,2}、卢军^{1,2}、黄禹赫^{1,2}、毛新平^{1,2}

1. 北京科技大学
2. 辽宁材料实验室

渗碳齿轮已广泛应用于各种机械传动工程领域。然而，渗碳过程中容易产生的混晶缺陷制约着渗碳温度的进一步提高。晶粒分布不均匀会严重破坏齿轮的硬度、冲击韧性和疲劳强度等关键机械性能。新能源汽车领域的发展对于温锻等精密成型齿轮的要求越来越严格，但是温锻齿轮相较于传统热锻齿轮有着更大的混晶风险，这主要是与其特殊的生产过程密切相关。与传统的析出相控制方法不同，我们提出了一种基于变形参数优化的精密成形齿轮毛坯设计新方法。首先，我们构建了适用于完整奥氏体区和动态铁素体区的热变形构成方程。阐明了温锻条件下晶粒的动态变化。其次，通过改变坯料形状，精确定制变形梯度，实现温锻工艺的合理优化。最后，结合有限元模拟和工业试验，分析了整个过程的晶粒演变规律。结果表明，最终齿轮成品的晶粒度极差保持在 1.5 级以内。

C13-P07**通过锻造工艺调整变形梯度在渗碳齿轮中实现均匀细粒的新策略**孙万利^{1,2}、张朝磊^{*1,2}、董庚益^{1,2}、汪水泽^{1,2}、高军恒^{1,2}、吴宏辉^{1,2}、赵海涛^{1,2}、卢军^{1,2}、黄禹赫^{1,2}、毛新平^{1,2}

1. 北京科技大学
2. 辽宁材料实验室

渗碳齿轮已广泛应用于各种机械传动工程领域。然而，渗碳过程中容易产生的混晶缺陷制约着渗碳温度的进一步提高。晶粒分布不均匀会严重破坏齿轮的硬度、冲击韧性和疲劳强度等关键机械性能。新能源汽车领域的发展对于温锻等精密成型齿轮的要求越来越严格，但是温锻齿轮相较于传统热锻齿轮有着更大的混晶风险，这主要是与其特殊的生产过程密切相关。与传统的析出相控制方法不同，我们提出了一种基于变形参数优化的精密成形齿轮毛坯设计新方法。首先，我们构建了适用于完整奥氏体区和动态铁素体区的热变形构成方程。阐明了温锻条件下晶粒的动态变化。其次，通过改变坯料形状，精确定制变形梯度，实现温锻工艺的合理优化。最后，结合有限元模拟和工业试验，分析了整个过程的晶粒演变规律。结果表明，最终齿轮成品的晶粒度极差保持在 1.5 级以内。

C13-P08**通过调控轧制应变改善 Fe-Mn-Al-C 基奥氏体钢的强度-塑性平衡**

王浩、唐铁浩、安丰超*、张新宇、刘日平

燕山大学

本工作通过简单的冷轧处理制备出了一种具有典型异质结构的 Fe-Mn-Al-C 基奥氏体轻质钢。随着冷轧变形量的增加 (20%→80%)，试验钢中的位错密度和剪切带迅速增加，并伴随着软区 (低位错密度区域) 比例的下降。这表明试验钢的微观组织呈现出一种以位错密度为特征的异质结构，即在 20% 变形量下，高密度位错的硬区 (约占比 24%) 和低密度位错的软区 (约占比 76%) 呈现异质特征。这种异质特点诱发了额外的强化机制，从而提升了强度和塑性的协同效应，屈服强度达到 1266MPa，抗拉强度达到 1415MPa，断裂延伸率为 29%。这种冷轧变形诱导的异质结构为开发具备优异强塑平衡的 Fe-Mn-Al-C 轻质钢提供了一条经济高效的手段。

C13-P09

铁质文物的科技分析与腐蚀机制——以出土十六国时期铁镜为例

李冰冰*

西北工业大学

十六国时期（304—439 年）是中国历史上政权更迭频繁、民族融合加速的重要阶段。本研究选取西安机场二期考古工地出土的十六国时期铁镜为研究对象，系统研究铁镜的制作工艺及腐蚀机制，为管窥十六国时期的钢铁工艺发展提供科学依据。

首先，采用多尺度研究方法，对铁镜残块的金相组成和腐蚀结构进行了详细表征。具体通过宏观形貌观察、显微结构表征（SEM、EDS）及组成分析（XRD、Raman 等），揭示了该类文物的冶炼工艺特征及其腐蚀产物的组成。研究发现，铁镜基体为共晶白口铸铁，组织中存在多种相，同时伴随大量孔隙、裂纹和不均匀分布的夹杂物，生铁质量相对不高，这显示了社会动荡对冶铁发展的特殊作用。另外，这些冶金缺陷使文物在埋藏环境中易发生电化学腐蚀与局部点蚀。腐蚀产物主要包括针铁矿（ α -FeOOH）、纤铁矿（ γ -FeOOH）、赤铁矿（ α -Fe₂O₃）和磁铁矿（Fe₃O₄），部分样品表面检测到四方纤铁矿（ β -FeOOH），证实了氯化物诱导腐蚀的存在。

为进一步探讨该类文物的腐蚀演化路径，设计了铸铁片模拟实验，分别在去离子水、Na₂SO₄ 溶液和 NaCl 溶液中进行加速腐蚀处理，诱导形成不同锈蚀产物类型，以评估土壤阴离子（SO₄²⁻和 Cl⁻）对腐蚀过程的影响。通过测定金属基体及锈蚀层表面的接触角，并结合 XRD 分析其相组成，建立了接触角与腐蚀产物类型之间的关联关系。结果显示，在三种腐蚀环境中形成的锈层均显著降低了接触角，说明其表面润湿性增强，与锈层结构的多孔性和亲水性氧化物的形成密切相关。含 SO₄²⁻环境下形成的锈层接触角最低（小于 10°），其主要腐蚀产物为 γ -FeOOH，易吸湿；含 Cl⁻环境易形成 β -FeOOH，易引起循环腐蚀，即“氯循环”效应；而当 Cl⁻和 SO₄²⁻共存时，铁器的腐蚀产物以形成水膜，大大促进了电化学循环腐蚀效果，对铁器的长期保存带来严重危害。本研究不仅为铁质文物的腐蚀行为和保护策略提供了重要科学依据，也为理解古代铸铁器物的制造水平及其与埋藏环境的相互作用机制提供了新的视角和数据支撑。

C13-P10

通过控制析出相的演化改善 IN718/316LN 瞬态液相连接接头的蠕变性能

杨森、刘晨曦*

天津大学

为提升 IN718/BNi-2/316LN 瞬时液相扩散连接（Transient Liquid Phase, TLP）接头的蠕变性能，本文设计了一种连接后均匀化热处理（Post-Bonded Homogenization Treatment, PBHT）工艺。与传统 PBHT 工艺相比，该处理在 650 °C、150 MPa 条件下显著提高了接头的蠕变寿命，增幅超过十倍。通过微观组织分析及密度泛函理论（Density Functional Theory, DFT）计算发现，长期 PBHT 通过调控析出相的演化行为，有效抑制了蠕变空洞的形核与生长，从而延缓了蠕变断裂并降低了稳态应变速率。具体机制为：Nb、Mo 与 Si 在晶界处的偏聚行为，结合 Nb₃Si 相对较低的形核能垒，有助于 Nb₃Si 相的优先生核。该相不仅能改变空洞的形貌因子、提高形核能垒、降低空洞的形核速率，还能通过其与 Ni 基体间较高的空位形成能和界面结合功，进一步抑制空洞的形成。此外，本文基于析出相与空洞之间的协同演化关系，建立了蠕变空洞演化的动力学模型。该模型可定量描述蠕变空洞的生长与聚并过程，并能依据晶界析出相的动态变化精确预测蠕变断裂寿命。研究成果为提升接头及异质材料在蠕变环境下的服役性能提供了理论支持与设计指导，特别是在蠕变空洞倾向于围绕析出相形成的情形下。

C13-P11**The significant role of austenitization temperature on the bainite transformation kinetics and mechanical properties of Al-containing carbide-free bainitic steel**Feiyu Zhao¹, Weiwei Wang¹, Yuliang Zhao², Qian Yu³, Yiguang Zhao¹, Jun Hu^{*3}

1. Central Iron and Steel Research Institute Group

2. Dongguan University of Technology

3. Northeastern University

The high performance carbide-free bainitic (CFB) steels requires achieving a balance between formability and service safety while maintaining low-alloy costs. Therefore, tailoring inside microstructural characteristics and optimizing mechanical properties are crucial. However, the influence of austenite temperature on prior austenite grain size (PAGs), bainitic transformation kinetics as well as on mechanical properties remains inadequately understood. This study examines the effect of PAGs on the microstructure, bainitic transformation kinetics, strength and ductility of Al-containing CFB steel. As austenitization temperature rising from 850 °C to 950 °C, the PAGs grew from 17.2 to 46.3 μm and the bainitic ferrite size widened from 0.98 to 1.12 μm. The elevated austenitization temperature induced grain coarsening, thereby reducing nucleation sites and slowing the bainitic transformation rate. At austenitization temperatures of 900 °C and 950 °C, a significant amount of martensite and large-sized low-stability retained austenite were obtained, which deteriorated the mechanical properties. Conversely, a lower austenitization temperature of 850 °C facilitated the shape of finer bainitic ferrite and enhanced both quantity and stable of the retained austenite. A superior combination of mechanical properties was obtained, including the yield strength of 778 ± 16 MPa, the tensile strength of 1145 ± 17 MPa, and an elongation of $29.6\% \pm 0.9\%$. The straightforward processing method, characterized by a reduced austenite temperature followed by a single-step bainitic transformation treatment, combined with the low cost of alloying, makes the aluminum-containing CFB steel highly suitable for industrial applications.

C13-P12**超超临界机组用 9Cr3W3Co 耐热钢的持久性能及断裂机理**雷团英¹、商昭^{*1}、王芬玲^{2,3}、刘刚¹、邹军涛¹

1. 西安理工大学

2. 清洁高效透平动力装备全国重点实验室

3. 东方电气集团东方汽轮机有限公司

超超临界机组用 9Cr3W3Co 耐热钢需在高温和应力作用下长时间工作，研究其长期持久性能对设备的安全运行具有重要的意义。本研究首先在 620 °C~675 °C 温度和 80 MPa~200 MPa 应力下对 9Cr3W3Co 耐热钢进行持久拉伸试验，随后研究其微观组织演变和断裂机理。结果表明：随着温度和应力的升高，持久寿命逐渐缩短。高温下原子扩散速率加快，析出相逐渐长大、合并，进而发生粗化，减弱析出强化作用。同时 Laves 相的析出会消耗 W、Mo 等元素，降低固溶强化效果，从而降低持久性能。在高应力作用下，位错发生滑移，使位错密度下降，钉扎效应减弱，从而降低对马氏体界面迁移的阻碍作用，引发晶粒变形、回复与再结晶，生成大量亚晶结构，导致持久性能降低。在所有的温度和应力下，9Cr3W3Co 钢均表现出韧性断裂，裂纹主要在 Laves 相和 $M_{23}C_6$ 相处形核，并沿晶界扩展；相同温度下应力越高，颈缩越明显，韧窝数量减少但尺寸增大。此外，分别采用双对数法和 Larson-Miller 参数法预测了 650 °C 时 10^5 h 寿命对应的 9Cr3W3Co 钢的持久强度，结果分别为 73.96 MPa 和 87.1 MPa。

C13-P13

残余元素砷对高碳铬轴承钢高周疲劳性能和碳化物均匀性的影响

董帅君^{1,2}、张朝磊^{*1,2}、董庚益²、汪水泽^{1,2}、高军恒^{1,2}、吴宏辉^{1,2}、赵海涛^{1,2}、卢军^{1,2}、黄禹赫^{1,2}、毛新平^{1,2}

1. 北京科技大学碳中和研究院

为应对钢铁工业碳中和的发展要求，解决使用电炉短流程炼钢造成钢中残余元素富集问题，本文针对典型残余元素砷对高碳铬轴承钢的影响进行研究，其中砷含量分别为 30、40、120ppm。结果表明：As-40 钢的抗拉强度最高达到 2278MPa，As-120 钢的疲劳强度达到 1000MPa，相比其它钢高 50MPa。砷含量的持续增加降低了轴承钢的拉伸性能，但由于 As-120 钢的疲劳裂纹扩展速率较低，使其获得更好的疲劳性能。疲劳性能的提升主要是因为砷粗化了钢的原奥氏体晶粒，使 As-120 钢疲劳断裂前的裂纹扩展门槛值增大。淬火和回火之后，As-120 钢中出现更多未分解的细长碳化物，降低了钢的均匀性。对于长径比大于 2 的碳化物，它们不能通过自发迁移的 Oswald 机制生长，而是通过自裂实现球化。虽然砷元素并没有明显富集，但是未溶解的细长碳化物具有较低的化学势，这增加了砷在基体中的扩散趋势。本研究明确砷在钢中的容忍极限，为控制残余元素砷含量提供理论依据。

C13-P14

B、N 元素对新型盾构机刀盘刀具用高钒高速钢 耐磨合金显微组织、力学和耐磨性能的影响

王鼎辰、陶稀鹏*、王新广、周亦胃、孙晓峰、崔传勇

中国科学院金属研究所

近年来我国对高性能大型盾构机的需求越来越迫切，随着刀盘刀具用合金服役环境越来越苛刻，硬度 HRC65 以上的高钒高速钢耐磨合金被广泛研究。本研究系统阐述了 B、N 元素对高钒高速钢的显微组织、力学和磨损性能的影响。实验结果表明，该合金的相组成一般为马氏体+残余奥氏体+VC+M₇C₃ 型碳化物。其中 B、N 元素可以显著弥散球状 VC 强化相，促进纳米析出相析出，促进合金弥散强化、细晶强化以及第二相强化。其中 VC 与奥氏体基体的共格相界面和 M₇C₃ 型碳化物与奥氏体的半共格相界面有效保证位错运动的容纳和阻碍达到平衡，保证合金韧性的同时提升合金的硬度强度。随着 B、N 元素含量的增加，最优热处理工艺下的合金硬度略微增大（最高为 70HRC），其结果归因于 B、N 元素提升了合金淬透性，马氏体含量增加以及高硬度硼碳化物形成。同时细小弥散的碳化物保证了合金良好的冲击韧性，BN-3 样品表现出最佳的耐磨性能，其表现为最低的稳态摩擦系数 0.42，最小短时（120min）磨损量 0.12mg，以及损伤表面分析结论等。TEM 分析进一步发现，干滑动往复摩擦磨损运动导致了基体中位错塞积和 VC 中大量层错生成，这种高密度的位错网和层错锁，有效阻碍了位错开动，延缓了塑性变形、剥落和开裂的发生，有效提升了合金的耐磨性能。本研究通过成分设计-制备工艺-热处理调控的协同优化，成功开发出兼具高硬度、优异耐磨性和良好冲击韧性的新型高钒高速钢，为苛刻工况材料研发提供了理论支撑。

C13-P15

Cr、Mo、N 协同作用对超级奥氏体不锈钢耐腐蚀性能机制研究

李兵兵*、郎宇平、陈海涛、冯翰秋、高智君

钢铁研究总院有限公司

本研究聚焦超级奥氏体不锈钢，固定 PREN 值后调整 Cr、Mo、N 含量，结合实验数据与理论计算，从“宏观-介观-微观”多维度剖析其对耐点腐蚀的协同作用机制。使用 X 射线光电子能谱（XPS）、电化学测试、浸泡实验等多手段，系统分析钝化膜的成分结构、性能表现及材料的耐点腐蚀特性。结果表明，随着试验钢中 Cr/Mo、Mo/N、Cr/N 比值下降，钝化电流密度、临界电流密度与恒电位电流密度随之减小，材料耐腐蚀性显著增强。进一步研究发现，钝化膜活性点位的减少，从根源上降低点蚀萌生几率；而 NH₃ (NH₄⁺)对局部酸化的缓解作用，有效抑制点蚀扩展进程。此外，点蚀扩展速率的下降与再钝化动力学的加速协同作用，致使最大点蚀面积和深度均明显降低。基于第一性原理理论分析表明，Cr 通过削弱

材料对 Cl^- 的吸附能力提升耐腐蚀性；Mo、N 则通过降低相邻原子对 Cl^- 的吸附作用实现耐蚀性增强。值得关注的是，N 与相邻原子间 p-d 杂化作用的强化，形成的 N 化物显著提升了钝化膜的稳定性与耐蚀性能。通过对比单元素掺杂与多元素共掺杂发现，三者共同掺杂时 W 和吸附能得到额外提升，证实 Cr、Mo、N 在提升超级奥氏体不锈钢耐点腐蚀性过程中存在复杂的协同作用，而非简单的原子替换效应。

C13-P16

卷取温度对 V-N 微合金钢组织演变、V(C,N)析出及力学性能的影响

郑易、张婧*、辛文彬、陈宝华

内蒙古科技大学

在中试条件下对比研究热轧后采用 700、650 和 600℃卷取对 V-N 微合金钢显微组织、V(C,N)析出特征和力学性能的影响。结果表明：不同卷取条件下实验钢的显微组织均为块状铁素体和珠光体，随着卷取温度由 700℃降低到 600℃，铁素体含量由 68.9%减少至 48.8%，珠光体含量由 31.1%增加至 51.2%，平均晶粒尺寸和珠光体片层间距分别由 7.3 μm 和 380nm 细化至 4.3 μm 和 112nm；钢中 V(C,N)纳米粒子相间析出列间距从 55.2nm 减小到 28.9nm，平均颗粒尺寸由 11.6nm 细化到 7.6nm，数密度由 $1.9 \times 10^{14} \text{m}^{-2}$ 增加到 $8.0 \times 10^{14} \text{m}^{-2}$ ；实验钢的屈服强度和抗拉强度分别从 555 和 729MPa 提高到 806 和 930MPa，断后延伸率由 25.0%降低至 19.0%。综上，V-N 微合金钢 600℃卷取时可获得最佳的强度-塑性配合。

C13-P17

纳米孪晶对高碳纳米贝氏体轴承钢耐磨性的提升机制探究

贾德诚¹、苏瑛龙¹、杨志南^{*2,3}、张福成^{2,3}

1. 燕山大学

2. 华北理工大学

3. 燕赵钢铁实验室

世界上大约三分之一的一次能源消耗在摩擦过程中，80%的机械部件故障是由磨损引起的。对于轴承钢而言，磨损作为其主要失效形式之一，直接影响其使用寿命。日益严峻的服役条件对轴承钢的耐磨性提出了更高的要求，寻求优化材料的机械强度一直是解决磨损问题的传统方法。纳米孪晶作为一种典型的面缺陷，其为材料带来了前所未有的性能。本研究通过多级相变在纳米贝氏体钢中引入大量纳米孪晶。利用扫描电子显微镜、透射电子显微镜、EBSD、力学性能测试等系列研究方法，系统研究了纳米孪晶对纳米贝氏体轴承钢耐磨性能的影响。结果表明，引入纳米孪晶后轴承钢的硬度提高 5HRC，硬度的大幅提高使得实验钢耐磨性提升 31%。纳米孪晶的引入会改变轴承钢的磨损机制，其磨损表面具有更少黏着层，更浅的犁沟。相较于传统轴承钢的严重黏着磨损与磨粒磨损转变为较轻的磨粒磨损。引入纳米孪晶后轴承钢具有更优异的抗变形能力，因此其纵截面变形区尺寸仅为传统贝氏体钢的 45.1%。其纵截面裂纹在变形区形核后存在两种扩展路径，一种是偏转向表面完成剥落，一种是沿晶向基体偏转。纳米孪晶与堆叠层错对裂纹的阻碍作用是裂纹转向基体的主要原因。当裂纹被纳米孪晶界所捕获时，会在裂纹尖端产生严重的塑性变形，形成非晶区域纳米晶区。这种裂纹尖端处的多级结构可以有效钝化裂纹，消耗裂纹扩展能力，从而提高材料的耐磨性。

C13-P18

长期时效对马氏体耐热钢的组织稳定性及力学性能的影响

王爱¹、商昭*¹、王芬玲^{2,3}、刘刚¹、邹军涛¹

1. 西安理工大学

2. 清洁高效透平动力装备全国重点实验室

3. 东方电气集团东方汽轮机有限公司

9Cr3W3Co 耐热钢因其优异的高温强度、韧性和耐高温腐蚀性，成为先进超超临界火电机组关键部件的常用材料。本文首先在不同温度（620℃~650℃）和时效时间（10000 h~30000 h）下对 9Cr3W3Co 耐热钢进行了时效处理，随后利用 SEM、TEM、XRD 以及冲击试验、室温拉伸试验、硬度测试研究了 9Cr3W3Co 耐热钢组织和性能的变化。研究表明，长期时效后，在马氏体板条界及残余奥氏体晶界处产生了新的析出相 Laves 相。随着时效时间的延长，马氏体板条宽度和 $M_{23}C_6$ 碳化物尺寸均有所增大，Laves 相尺寸由 201.98 nm 增大至 351.02 nm，形状由规则短棒状逐渐变得不规则。Laves 相的粗化速率在 630℃时最快，随着温度升高至 650℃时，粗化速率反而减缓。此外，硬度随时效温度的升高和时间的延长略有下降。冲击性能受到材料的塑性、强度以及析出相的长大与聚集等因素的综合影响。在时效 20000 h 时，材料的塑性和强度处于较高水平，冲击功均大于 20 J。在时效 30000 h 时，析出相的粗化对冲击韧性影响更大，冲击功表现出较大的波动。总之，9Cr3W3Co 耐热钢在高温长时效后能够保持较高的组织和性能的稳定性的。

C13-P19

海洋用 X65MO 钢级直缝埋弧焊管焊接接头强韧性研究

张婷婷*

南京巨龙钢管有限公司

本文针对近年国外某海洋工程项目对 X65 MO 钢级直缝埋弧焊管的焊缝纵向拉伸和焊接接头冲击韧性提出的特殊要求，试验分析了钢管制造工艺的可行性和合理性，一方面通过研究不同焊丝匹配对 X65 钢级钢管焊缝纵向拉伸性能的影响规律，揭示出焊缝的纵向屈服强度降低至与母材屈服强度水平相当时，可能导致焊接接头在导向弯曲时开裂，对钢管的综合力学性能产生不利影响；另一方面通过母材化学成分设计、焊材杂质元素限定、焊剂碱度控制、以及焊接工艺优化等措施，解决了海洋用 X65MO $\Phi 711 \times 19.1$ mm 直缝埋弧焊管壁厚中心处的焊缝及焊接热影响区脆化问题，使得该规格钢管 0℃下焊缝的夏比冲击功均值达到 160 J，剪切面积率为 63%，焊接热影响区的夏比冲击功均值为 279 J，剪切面积率为 91%

C13-P20

锡和退火温度对 IF 钢的组织和力学性能的影响

姜英花*

Research Institute of Technology, Shougang Group Co., Ltd

本文研究了微量 Sn 元素添加及退火温度对 IF 钢再结晶组织演变及力学性能的影响。结果表明，含 Sn 钢在 810℃退火时，Sn 在晶界及 MnS 析出物处显著偏聚，抑制 (111)〈112〉取向再结晶晶核的形成，导致 γ 纤维组织峰值降低至 3.6，且 (111)〈110〉组分异常主导（与 (111)〈112〉强度差异高达 32%），同时残留强(001)〈110〉不利组织及弥散取向分布，致使平均塑性应变比（r 值）和平面各向异性指数（ Δr 值）显著降低。当退火温度升至 840℃时，热激活能克服 Sn 扩散势垒，促进 (111)〈112〉组分强度显著提升，并降低(001)〈110〉组织强度，使 γ 纤维组织分布恢复至近无 Sn 钢水平，r 值与 Δr 值得以提升。力学性能上，含 Sn 钢的抗拉强度与屈服强度低于无锡钢，而延伸率则更高。研究表明，Sn 通过晶界偏聚调控 (111)〈112〉与(111)〈110〉组织组分的竞争是影响 r 值的关键机制，优化退火温度可有效缓解 Sn 对组织和成形性能的不利影响。

C13-P21

超临界机组用 9Cr3W3Co 耐热钢的长期组织稳定性及其力学性能的研究

王爱¹、商昭*¹、王芬玲^{2,3}、刘刚¹、邹军涛¹

1. 西安理工大学

2. 清洁高效透平动力装备全国重点实验室

3. 东方电气集团东方汽轮机有限公司

9Cr3W3Co 耐热钢因其优异的高温强度、韧性和耐高温腐蚀性，成为先进超超临界火电机组关键部件的常用材料。本文首先在不同温度（620℃~650℃）和时效时间（10000 h~30000 h）下对 9Cr3W3Co 耐热钢进行了时效处理，随后利用 SEM、TEM、XRD 以及冲击试验、室温拉伸试验、硬度测试研究了 9Cr3W3Co 耐热钢组织和性能的变化。研究表明，长期时效后，在马氏体板条界及残余奥氏体晶界处产生了新的析出相 Laves 相。随着时效时间的延长，马氏体板条宽度和 $M_{23}C_6$ 碳化物尺寸均有所增大，Laves 相尺寸由 201.98 nm 增大至 351.02 nm，形状由规则短棒状逐渐变得不规则。Laves 相的粗化速率在 630℃时最快，随着温度升高至 650℃时，粗化速率反而减缓。此外，硬度随时效温度的升高和时间的延长略有下降。冲击性能受到材料的塑性、强度以及析出相的长大与聚集等因素的综合影响。在时效 20000 h 时，材料的塑性和强度处于较高水平，冲击功均大于 20 J。在时效 30000 h 时，析出相的粗化对冲击韧性影响更大，冲击功表现出较大的波动。总之，9Cr3W3Co 耐热钢在高温长时效后能够保持较高的组织和性能的稳定性。

C13-P22

剪切脆性金属间化合物提高钢的低温强度和塑性

王峰、王章维*、宋旻

中南大学

沉淀强化一直是提升钢铁材料强度的关键手段。本研究报道了一种轻质成分复杂钢在低温拉伸过程中，位错剪切硬脆 B2 相（通常被认为是不可剪切的金属间化合物）的强韧化新机制，该现象的成因主要归因于亚纳米级局部化学有序结构和多主元固溶强化引起的超高位错滑移阻力。这一机制不仅充分利用了本不可剪切的硬脆纳米析出相所提供的显著强化和硬化效果，还通过随变形进程的连续剪切作用实现了优异塑性。因此，新研发的成分复杂钢在低温下表现出高达 2GPa 的超高抗拉强度，同时实现 34%的卓越均匀延伸率。此项研究为设计高性能结构材料提供了全新策略。

C13-P23

基于平面流铸技术的 Fe-3 wt.%Si 超薄无取向硅钢组织织构及磁性能优化

张宁*、徐江杰、孟利

钢铁研究总院有限公司

采用平面流铸技术制备出~0.05 mm 厚的 Fe-3 wt.%Si 硅钢超薄带，在此基础上通过调整后处理工艺制度优化组织织构及磁性能。结果表明，平面流铸带因其较强的{001}织构而表现出磁感优势（ $B_{50} \sim 1.68T$ ），但因超细晶的组织特征使得铁损值 $P_{1.0/40}$ 高于 40W/kg，需通过后处理粗化晶粒组织从而大幅降低铁损以满足中高频电工设备应用。当对平面流铸带进行直接退火处理时，退火温度<1000℃时晶粒长大程度有限，退火温度>1000℃时部分晶粒的尺寸显著增加，而织构类型基本不变；当在退火前增加<10%压下率的冷轧变形后，晶粒长大能力显著增强，且这种增强随着冷轧压下率的增加得到进一步促进，8%压下率冷轧的样品在高于 1000℃退火时可获得尺寸全面显著增大的晶粒组织。冷轧后退火呈长大优势的晶粒多具有较低的 Taylor 因子值，其中包括{001}取向晶粒，体现了应变能差异对该过程的驱动作用。因此，合理的冷轧与退火参数匹配，可实现在晶粒尺寸增大的基础上，平面流铸带中{001}织构的优势得以保持。在本文实验条件下，平面流铸带的最佳后处理工艺为经 8%压下率冷轧后，在高于 1000℃及氢气气氛下退火 60min，可获得具有优良综合磁性能的无取向硅钢超薄带，其中 $B_{50} > 1.68T$ ， $P_{1.0/40} < 12W/kg$ 。

C13-P24**碳化物析出对 Fe-20Mn-2Al-0.4C-0.7V 钢的孪晶行为和加工硬化能力的影响**

岳弘谱、张新宇*、刘日平

燕山大学

本研究探讨了碳化物对 Fe - 20Mn - 2Al - 0.7V - 0.4C TWIP 钢中变形孪晶和加工硬化行为的影响。在初始变形阶段，碳化物析出的增加显著提升了钢的加工硬化速率。这种较高的加工硬化能力有助于达到发生孪晶行为所需的临界应力，从而激发了堆垛层错的运动。碳化物则作为障碍阻碍了堆垛层错的传播，进而直接影响了变形孪晶的形成与发展。随着塑性变形的持续进行，部分碳化物被堆垛层错剪切。这种剪切过程降低了后续堆垛层错继续穿过这些碳化物的阻力，最终引发了明显的加工软化现象。这些机制的协同作用导致了钢的总体加工硬化速率迅速下降。

C13-P25**基于纳米微结构调控协同提高中碳低合金钢强塑性**

李伟、谷月峰*、赵新宝、夏万顺、岳全召、张泽

浙江大学材料学院高温合金所

超高强度钢 (UHSS) 凭借其轻量化、经济高效特性，在提升汽车及航空航天领域安全性与燃油效率方面具有重要作用。本研究通过热机械控制加工 (TMCP)，结合不同精轧温度 (FRT) 及水淬工艺，开发了一种中碳 (0.34 wt%) 低合金钢 (Cr、Si、Mn、Ni、Mo 总量不超过 6 wt%)，其抗拉强度突破 2.4 GPa。基于系统的回火实验 (200 - 500° C) 研究，揭示了马氏体回复主导的微观组织演变规律：抗拉强度随回火温度升高呈单调下降趋势，而塑性保持稳定；在 200° C 回火获得最优性能组合 (抗拉强度达 2060 MPa，延伸率 7.76%)，其塑性较淬火态显著提升。该研究阐明了成分设计、TMCP 参数与回火响应的内在关联，为开发新一代超高强度钢开发提供了理论指导与工艺路径。

C13-P26**大型铁镍基合金铸锭的凝固组织及析出特性研究**

张晓慢、刘煜*、徐文亮

宝武特种冶金有限公司技术中心

随着新能源装备领域向大型化、高效化发展，对特种合金大型铸锭提出了新的需求。高合金材料大型铸锭的宏/微观偏析及第二相析出是影响其性能的重要因素。本文对 20 t 铁镍基合金 N08120 扁铸锭中部进行了横向解剖，对其进行全截面低倍组织分析，结果表明表面细晶粒区、柱状晶区和内部等轴晶区厚度分别约为 5 mm、116 mm 和 554 mm。元素在厚度方向上的宏观偏析指数均在有限范围内，而枝晶间的偏析则受取样位置影响较大，从表层向心部，随着凝固的进行，凝固枝晶的二次枝晶臂间距逐渐增大，枝晶组织逐渐变得粗大，铸锭心部的 SDAS 约为铸锭表层的 4 倍。通过对铸锭不同位置枝晶间的元素含量进行分析发现，Cr、Nb 和 Mo 元素偏析程度受冷却速率的影响较大，越靠近铸锭心部冷却速度越慢，凝固时间充足促使溶质元素向枝晶间区偏析。Cr、Nb 和 Mo 在枝晶处的元素偏析系数 k 小于 1，属于正偏析元素。C 为负偏析元素，Ni 和 Fe 元素的分布随凝固的进行无明显变化。铸锭内的析出相类型包括 Z 相、 σ 相、碳/氮化物，析出相形貌均以颗粒状或块状为主，部分 Z 相会包裹先析出的第二相形成复合析出。通过对大型合金铸锭的解剖分析，能够为工业生产评估冶炼质量、优化均匀化处理制度以及预测和改善合金的最终使用性能提供理论依据和工程指导。

C13-P27

基于微合金固氮的电炉短流程绿钢硬线低碳制备技术

闫建升^{1,2}、张朝磊^{*1,2}、董庚益²、汪水泽^{1,2}、高军恒^{1,2}、吴宏辉^{1,2}、赵海涛^{1,2}、卢军^{1,2}、黄禹赫^{1,2}、毛新平^{1,2}

1. 北京科技大学碳中和研究院
2. 辽宁材料实验室钢铁再生技术研究所

针对电炉短流程生产高碳硬线钢 82B 过程中,因氮元素富集导致的力学性能恶化及断丝率高等瓶颈问题,本研究提出了基于微合金化固氮调控的高碳硬线制备技术。明确了氮元素对高碳硬线珠光体球团尺寸、片层间距、索式体化率等显微组织及抗拉强度、断后伸长率、加工硬化率等力学性能的损伤机制,通过 Ti-Nb 复合微合金化设计,将固溶态氮元素转化为弥散分布的纳米级 (Ti, Nb)N 析出相,实现了氮元素赋存状态的有效调控,显著抑制了其对钢基体组织的损伤作用。采用该工艺制备的 82B 盘条,抗拉强度达 1245MPa,断后伸长率达到 12.2%,加工硬化率降低至 0.200;冷拉拔钢丝抗拉强度达 1443MPa,断后伸长率达到 8.2%,实现了高碳硬线热轧盘条及冷拉拔钢丝的高强韧性协同匹配。成功实现了再生钢铁原料的高效、高值化利用,为电炉短流程生产高品质“绿钢”提供了关键理论支撑与实践范例。

C13-P28

BZH700 新型高热强热作模具钢的组织 and 性能

夏云峰^{*1}、黄进峰²、路锐龙¹、张诚²、周世杰¹

1. 内蒙古北方重工业集团有限公司
2. 北京科技大学

对以 Cr-Mo-W-V 作为主要添加元素的新型高热强模具钢 BZH700 进行了退火显微组织、冲击韧性、热稳定性及耐磨性能检测,采用原位透射电镜、三维原子探针等表征手段对钢中特殊碳化物高温演变规律、长大动力学以及高温强化机理开展研究,经检测发现:BZH700 退火显微组织均匀,晶粒度 8.0-9.0 级,经调质处理后,BZH700 钢中存在大量由 V、Mo、Fe、Cr、W、Nb 多元素组成的特殊纳米碳化物,此类碳化物在室温至 750℃均能与基体保持良好共格关系,展现出良好的热稳定性。700℃时,BZH700 高温拉伸强度可达到 500MPa 以上,当硬度为 45±1HRC 时,BZH700 室温无缺口冲击可达到 450J,夏比 V 型缺口冲击 15J 左右,冲击韧性优良。

C13-P29

650℃/225MPa 下 Ce 对 316LN 奥氏体不锈钢蠕变损伤行为影响研究

谭重庆^{*}

中国科学院金属研究所

结合微观结构表征和第一性原理计算,系统研究了微量铈(Ce)元素添加对 316LN 奥氏体不锈钢(316LN)在 650 ° C/225 MPa 条件下蠕变损伤行为,并阐明了其影响机理。结果表明,添加 0.011 wt%铈可将 316LN 钢的蠕变断裂寿命从 175 小时延长至 253 小时,但蠕变断裂应变显著降低至 25%,而断裂模式由穿晶断裂转变为晶间断裂。晶间裂纹的形成被发现与分散的含铬 M₂₃C₆ 碳化物附近空洞的形核与生长行为密切相关。通过第一性原理计算,发现溶质铈原子沿晶界 (GB) 且独立于富铬碳化物分布,这有效抑制了晶界迁移并增强了晶界的蠕变抗力。然而,铈元素的富集会降低晶界界面的结合强度,使含有铈富集的横向晶界区域在高应力下更容易发生脱聚破坏,从而形成空洞。持续的空洞形核会削弱晶界的抗拉强度,随后铬碳化物的界面开裂促进了形核空洞之间的聚合,从而产生晶间微裂纹。这些微裂纹的传播最终引发晶间断裂并导致蠕变塑性降低。

C13-P30

通过等温淬火工艺优化和稀土微合金化来改善 DC53 冷作模具钢的强韧性

刘羽翔、汪志刚*

江西理工大学

本文研究了等温淬火热处理以及稀土添加对 DC53 冷作模具钢的硬度、冲击韧性和耐磨性的综合影响，探索了关键热处理参数（奥氏体化工艺与下贝氏体等温工艺）对材料显微组织与力学性能的影响，并针对下贝氏体对钢中强韧化机理作用以及稀土元素添加对钢等温淬火组织及性能影响机理进行了研究。结果表明，通过合适的等温淬火工艺优化，形成的下贝氏体/马氏体双相组织相比高温回火组织在耐磨性和冲击韧性性能均得到提升。稀土元素的加入能够有效细化原始奥氏体晶粒尺寸、同时能够净化杂质元素、对钢中碳化物改性、改变钢的关键相变点影响热处理工艺，最终实现强韧性统合提升。

C13-P31

沉淀硬化不锈钢 15-5PH 的成分设计与性能优化研究

李梦瑶、邹存磊*

大连交通大学

15-5PH 钢是在 17-4PH 钢的基础上，通过提高 Ni 元素含量和降低 Cr 元素含量发展而来的马氏体沉淀硬化不锈钢（牌号为 05Cr15Ni5Cu4Nb），该材料具有良好的强度、韧性、热加工特性和抗腐蚀性，因此常用来制作大截面尺寸、复杂结构的锻件。其热处理工艺简单、综合性能好等特点，在工程中主要用于精密部件和重要承力件等重要部位，现在越来越被广泛应用于航空航天、兵器工业等行业。主要特点有：①固溶处理后形成低碳马氏体，冷热工艺性能良好，容易成型和加工；②通过简单的热处理可获得高强度高韧性，例如，H900 状态 $\sigma_b \geq 1300\text{MPa}$ ， $\sigma_{0.2} \geq 1100\text{MPa}$ ， $\delta_4 \geq 10\%$ ， $\psi \geq 35\%$ ；③在耐腐蚀性能方面具有奥氏体不锈钢同样的抗蚀能力。研究人员基于董闯教授提出的团簇加连接原子模型，对 15-5PH 沉淀硬化不锈钢进行成分优化设计。该理论将合金分解为团簇结构单元（局域有序基元）与连接原子（置换固溶原子），建立成分通式。采用 16 原子团簇式 $\text{Fe}_{12}\text{Ni}_{1.25}\text{Cr}_{2.75}$ 作为 15-5PH 不锈钢的基体结构单元。该团簇式通过非整数原子表达（ $\text{Ni}_{1.25}$ 、 $\text{Cr}_{2.75}$ ）体现了合金成分的统计平均特征，其核心是构建以 Fe-Cr-Ni 为基的体心立方（BCC）或马氏体亚稳结构。其中，Cr 原子（ $\approx 17.2\text{at.}\%$ ）优先占据团簇局域有序位点，提升耐蚀性并抑制奥氏体稳定性；Ni 原子（ $\approx 7.8\text{at.}\%$ ）作为关键连接原子，调控马氏体相变临界温度（ M_s ），确保时效前具备完全相变能力。该模型定量关联成分-结构-性能关系，显著减少传统试错法的研发成本，为高强不锈钢设计提供新理论框架。

C13-P32

铬钼添加对低碳中锰钢强度 - 塑性 - 韧性匹配机制的影响

王泽民¹、师仲然²、柴锋²、罗小兵²

1. 上海应用技术大学 材料技术学部

2. 钢铁研究总院 结构用钢研究所

本研究对添加铬和钼（4MnCM）以及未添加（4Mn）低碳中锰钢进行了 860° C 保温 1h 水冷后 620° C 回火 2h 处理，利用 SEM、EBSD 和 TEM 表征其微观组织结构，并探讨了合金元素的添加对拉伸性能和低温冲击性能的影响。结果表明：与 4Mn 相比，4MnCM 在 -60° C 和 -84° C 时的低温冲击能量值（KV2）分别提高了 104 和 107 J。屈服强度和抗拉强度提高了 100 MPa。4MnCM 较高的低温韧性一方面归因于铬和钼的添加，这提高了逆变奥氏体（RA）的层错能（SFE），从而抑制了变形孪晶。另一方面，这是由于在裂纹扩展路径上不存在粗大的 ϵ -马氏体（ ϵ -m）。此外，在两种钢的冲击过程中，RA 的相变发生在裂纹萌生阶段，这有助于缓解应力集中，并增加了裂纹形成所需的能量。4MnCM 强度较高的主要原因在于通过 M6C、M23C6 的析出以及 Nb/TiC 与 M6C 共析出，显著增强了沉淀强化效果。

C13-P33**The Effect of Rare Earth Element Ce on the Low-Temperature Transverse Impact Toughness of 34CrMo4 Steel**

Xinning Yu, Yuhe Huang, Shuize Wang*, Xinping Mao
University of Science and Technology Beijing

The short-process steelmaking route using 100% scrap and electric arc furnace (EAF) technology has become one of the key pathways for achieving low-carbon transformation in the steel industry. However, residual elements introduced through recycled steel scrap can significantly deteriorate the low-temperature impact toughness of the material. Moreover, coarse tempered carbides in steel are also critical factors that negatively affect its low-temperature impact energy. The addition of rare earth element cerium (Ce) to steel can alter the state of residual elements and reduce their solid solution content in the matrix. Furthermore, Ce can inhibit the coarsening of tempered carbides, thereby improving the low-temperature impact toughness of the steel. In this study, 34CrMo4C steel produced via the short-process route using 100% scrap and EAF technology was investigated. A combination of scanning electron microscopy (SEM), electron backscatter diffraction (EBSD), and transmission electron microscopy (TEM) was employed to systematically study the microstructure and mechanical properties of both base steel and Ce-modified steel under different quenching and tempering conditions. The mechanisms by which Ce microalloying influences the microstructure and properties of the steel were comparatively analyzed. The Ce-alloyed steel exhibited a significant improvement in low-temperature impact toughness, with the absorbed energy at -50 °C in transverse Charpy impact tests increasing from 51.1 J to 94 J, representing an 84% enhancement, while maintaining comparable room-temperature tensile properties. After Ce addition, Ce-containing precipitates were found to cluster around tempered carbides at prior martensitic lath boundaries in the tempered sorbite matrix, suppressing the growth of these carbides. As a result, the morphology of the carbides changed from elongated strips to spherical or short rod-like shapes, and they were more finely dispersed within the matrix. The average carbide size was reduced from 96.33 μm to 70.93 μm . These uniformly dispersed spherical carbides significantly decreased the likelihood of crack initiation upon impact, thereby enhancing the steel's low-temperature impact toughness.

C13-P34**ECAP 法制备超细结构铁素体/马氏体钢的微结构与拉伸性能**

张广杰*¹、谢卓明²、王先平²

1. 合肥理工学院
2. 中国科学院固体物理研究所

细晶策略因其在力学、耐辐照和耐腐蚀等方面的特殊作用而受到关注。本工作通过 4 道次等通道转角挤压 (ECAP) 制备了平均层厚为 103.5 nm 的超细结构铁素体/马氏体钢。所制超细结构铁素体/马氏体钢在室温下的抗拉强度为 1420 MPa, 相比原始未挤压样品提高了 50%。定量计算表明, 位错强化和晶界强化是其主要强化机制, 其中位错强化起主导作用。然而, 这种钢在高温下 (约 550 °C) 的抗拉强度比原始未挤压样品的低, 使得其不再适合作为核聚变或裂变反应堆的结构材料。这些结果为设计适用于核聚变或裂变反应堆的超细/纳米结构铁素体/马氏体钢提供了重要参考。

C13-P35**微观组织对承压件用 F22M 钢耐应力腐蚀性能影响机制研究**

魏梦洁、胡小强*、江慧敏、李殿中

中国科学院金属研究所

随着超深井勘探开发的深入，防喷器等关键井控装备的承压部件面临着极端苛刻的高温（ $\sim 200^{\circ}\text{C}$ ）、高压（ $\sim 140\text{ MPa}$ ）及高浓度硫化氢（ H_2S ）环境的“三高”挑战。在此工况下，高温促进 H_2S 分解产生的氢原子，与拉伸应力及腐蚀环境协同作用，极易诱发应力腐蚀开裂（SCC），其裂纹扩展速率可达 10^{-6} mm/s 量级，严重威胁承压件的服役安全并可能导致井口溢流失控和井喷等灾难性事故。目前，广泛应用于常规环境的传统低合金钢（如 35CrMo、20CrMoV、25CrNiMo 等），在满足超深井大型厚壁防喷器承压部件所需的高温强度、优异耐 H_2S 腐蚀性能以及高强度-高韧性匹配方面存在显著不足。为应对这一挑战，开发了一种钒、硼及稀土元素共合金化的新型钢种——F22M，并已在试验超深井中应用。

本研究聚焦微观结构对应力腐蚀开裂行为的调控机制，系统考察了不同回火温度（ 610°C 至 670°C ）对 F22M 钢微观组织演变及其耐 SCC 性能的影响规律。综合运用慢应变速率拉伸（SSRT）实验、电化学测试、X 射线衍射（XRD）、扫描电镜（SEM）及透射电镜（TEM）等多尺度表征手段，分析表明，随回火温度升高，F22M 钢的位错密度显著降低，针状碳化物逐渐转变为细小弥散的球状颗粒，同时大角度晶界比例明显增加。微观结构的协同演变共同决定了材料的抗 SCC 性能，位错密度的降低和碳化物的球化有效减弱了局部氢富集和应力集中倾向，同时，晶界特征的优化（大角度晶界比例增加）协同促进了氢原子的分散分布，阻碍了 SCC 裂纹的形核与扩展。实验结果表明，当回火温度从 610°C 升高至 670°C 时，F22M 钢的应力腐蚀敏感性指数显著下降了 84%，其抗 SCC 性能显著提升。

本研究阐明了通过精准调控回火工艺优化位错、碳化物形态及晶界特征是提升 F22M 钢在超深井极端“三高”环境下抗应力腐蚀开裂性能的关键途径，为超深井苛刻工况下关键井控装备承压部件的选材设计与热处理工艺优化提供了重要的理论基础和实验依据。

C13-P36

梯度纳米金刚石强化钢铁：工艺设计与力学性能提升

韩俊刚、郑少川、王悦存*、单智伟

西安交通大学材料科学与工程学院，金属材料强度国家重点实验室，微纳尺度材料行为研究中心

高端制造业的快速发展对钢铁材料性能提出了更高要求，制备兼具高性能与低成本优势的钢材仍然具有挑战性。本研究基于纳米金刚石颗粒渗入技术，提出一种“快速深层渗入-短时热处理”工艺，在低碳钢中成功构建梯度纳米金刚石颗粒强化结构。结果表明，纳米金刚石颗粒的数量与尺寸在铁基体中呈梯度弥散分布，且单位时间（约 1 小时）渗入的有效硬化层深度可达约 1 毫米。通过温度、时间与压强等多参数协同优化，实现纳米金刚石颗粒的梯度分布与低碳钢硬化深度的定量调控。纳米金刚石颗粒通过钉扎晶界细化基体晶粒，协同渗碳固溶强化，自身颗粒弥散强化及碳化物析出强化，形成多尺度强化效应，显著提升低碳钢的表层硬度、强度与耐磨性。该多尺度设计通过梯度结构规避贵金属合金化，突破性能提升-成本增加的传统范式，为普通钢材强化提供了一种高效的新策略。

C13-P37

基板预热对 LPBF 制备 M50 轴承钢成形与硬度的影响研究

侯雨阳*、赵旺、陈超越、王江、任忠鸣

上海大学

针对激光粉末床熔融(LPBF)制备 M50 轴承钢成形性差、硬度分布不均匀的问题，本研究通过对比 150°C 基板预热与室温成形条件下的相组成、微观结构演变及硬度分布，系统揭示了裂纹抑制机制与预热调控机理。结果表明，基板室温条件下，试样成形的宏观裂纹主要由温度梯度导致的残余应力引起；基板 150°C 预热后，结合输入热控制降低温度梯度，抑制了裂纹生成，XRD 结果表明使试样中下部马氏体含量显著增加，马氏体板条尺寸从 $7.96\text{ }\mu\text{m}$ 增至 $11.3\text{ }\mu\text{m}$ 。显微组织分析表明，基板预热延长了材料在 M_s 温度以上的停留时间，促进了合金元素（Cr、Mo、V）的扩散，减缓了枝晶间偏析，促使亚稳态奥氏体分解为回火马氏体或下贝氏体。激光功率参数研究表明，相较低功率（250W），高功率（350W）会加剧热梯度，导致马氏体尺寸分布两极分化，同时使熔池上方位错胞壁厚度从 $0.147\text{ }\mu\text{m}$ 减至 $0.127\text{ }\mu\text{m}$ ，而位错胞平均直径从

0.86 μm 增加到 1.34 μm ; 而基板预热与高功率条件下, 试样中部区域表现出更充分的马氏体生长。室温打印试样表面硬度中部 654HV, 上部 757HV, 经过基板预热后, 试样表面硬度中部 753HV, 上部 767HV, 经过基板预热后样品中上部表现出更均匀的硬度分布, 体现了预热对微观结构均匀化的调控作用。本研究阐明了基板在 150℃ 预热条件下, 通过热力学条件优化实现缺陷抑制与组织调控的机理, 为 LPBF 成形 M50 轴承钢等高碳高合金钢提供了理论支撑。

仅发表论文

C13-PO01

含 Al 高强钢热轧碎边原因分析与工艺优化

王畅*

首钢技术研究院

含 Al 高强钢热轧碎边问题攻关初期发生率高达 80%, 造成设备损耗严重以及成材率降低, 成为制约高强钢稳定生产的主要瓶颈问题。本研究利用扫描电镜、热模拟、析出物理论计算等手段明确了碎边缺陷产生的主要原因。实验结果发现, 碎边缺陷裂纹附近存在大量氧化圆点和 AlN 析出, 板坯质量跟踪发现窄面小裂纹对碎边有明显的遗传性; 高温热塑性分析实验发现 850-700℃ 为钢种的塑性低谷区间, 形成原因主要奥氏体相变过程中晶界优先出现的先共析铁素体以及 AlN 的弥散析出。通过炼钢过程进行微 Ti 处理, 降低 N 元素含量; 连铸过程保护渣优化和水冷优化; 热轧过程温度调控等系列措施, 成功实现碎边缺陷发生率降低至 5% 以下。

C13-PO02

Study on the Surface Corrosion Defects Mechanism of 1500MPa Hot rolled Pickling Hot Forming Steel

Chang Wang*

Research Institute of Technology Shougang Group

In this paper, two typical corrosion defects on the surface of pickling plate were systematically studied. Through the microscopic analysis of samples and production line investigation, it was found that the mechanism of corrosion on the surface of steel plate was intergranular oxidation during hot coiling process. The formation mechanism of intergranular oxidation was studied systematically by thermogravimetric analysis and scanning electron microscopy. It was found that with the increase of holding time, the intergranular oxidation depth increases, and after oxidation for 30min, the intergranular oxidation tends to be stable. With the change of temperature, there is intergranular oxidation of steel at the tip temperature of 750℃. The mechanism of intergranular oxidation is revealed from the aspects of internal and external oxidation competition, diffusion difference between intergranular and transgranular, and selective oxidation of alloying elements.

C13-PO03

GH4169 合金真空感应熔炼过程中夹杂物演变及杂质元素迁移规律研究

王迪、朱勤天*、王磊、常玉彬、王浩然

钢研国际新材料创新中心(深圳)有限公司

GH4169 合金作为一种广泛应用的高温合金, 其纯净度直接影响其力学性能和使用寿命。为提升 GH4169 合金在极端服役环境下的可靠性与稳定性, 本文针对真空感应熔炼(VIM)过程中夹杂物演变行为与杂质元素迁移规律开展了系统研究。通过在全熔期、精炼末期和翻钢浇注期等不同阶段对合金液取样, 结合扫描电镜(SEM)、能谱分析(EDS)与 JMatPro 热力学计算, 分析夹杂物的类型、数量密度、尺寸分

布及其与 O、N 元素的关联变化特征。结果表明,熔炼过程中析出的夹杂物主要包括 MgO-Al₂O₃-Ti(C,N)-Nb、Ti(C,N)-Nb 等复合夹杂物,按照其形核核心可分为以 MgO-Al₂O₃ 或 TiN 为核心的两大类。夹杂物数量密度在完全熔化期达到最大值 $9638 \pm 50 \text{ N/mm}^3$;精炼末期降至 $6778 \pm 50 \text{ N/mm}^3$;翻钢浇注期略有回升至 $7623 \pm 50 \text{ N/mm}^3$;而平均尺寸则自 $1.33 \pm 0.05 \mu\text{m}$ 逐步增至 $2.62 \pm 0.05 \mu\text{m}$ 。杂质元素方面,O 元素含量从 117 ppm 经 56ppm 下降至 6 ppm,N 元素从 88 ppm 下降至 26 ppm,显示脱氧主要依赖于碳氧反应及 Al 的氧化作用,脱氮则受控于高温高真空下的扩散机制及气泡辅助传质。热力学计算结果进一步表明,Al₂O₃ 夹杂的析出量与 O 元素含量呈正比,而 TiN 夹杂的析出温度与析出量均随 N 元素含量增加显著上升。研究明确了冶炼过程中杂质元素控制与夹杂物形核—演变—聚集的协同机制,为 GH4169 合金 VIM 工艺参数优化及高纯净度控制提供了理论依据和实验支撑。

C13-PO04

超超临界 FB2 转子钢电渣中低氟渣系实验研究

王宁¹、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冶金工艺研究所
2. 中国钢研科技集团有限公司数字化研发中心

积极建设超超临界汽轮机组可为“双碳”目标做出贡献,FB2 钢是适用于 620°C 蒸汽参数的超超临界汽轮机组用转子材料,研发设计适用其电渣冶炼的渣系是关键一步。本文利用 FactSage 热力学软件、渣金平衡实验及工艺模拟等方法,设计验证了适合 FB2 钢电渣冶炼的新型渣系并与传统二元渣系 (70%CaF₂-30%Al₂O₃, 1#渣) 进行对比。结果表明,以低共晶点原则借助 FactSage 热力学软件计算的理论渣系为 40.2%CaF₂-34%Al₂O₃-22.3%CaO- 3%MgO-0.5%B₂O₃ (2#渣,质量分数)。渣金平衡实验发现,熔渣中 Al₂O₃ 和 B₂O₃ 活度比越大,平衡时钢中 B 烧损越严重,2#渣满足冶炼过程中对 B 元素的稳定控制。

C13-PO05

淬火回火工艺对大型盾构机用轴承钢组织性能的影响研究

童善康¹、刘坤¹、甘晓龙^{*1}、薛正良¹、李德胜²、徐光¹

1. 武汉科技大学材料学部
2. 大冶特殊钢有限公司技术中心

积极建设超超临界汽轮机组可为“双碳”目标做出贡献,FB2 钢是适用于 620°C 蒸汽参数的超超临界汽轮机组用转子材料,研发设计适用其电渣冶炼的渣系是关键一步。本文利用 FactSage 热力学软件、渣金平衡实验及工艺模拟等方法,设计验证了适合 FB2 钢电渣冶炼的新型渣系并与传统二元渣系 (70%CaF₂-30%Al₂O₃, 1#渣) 进行对比。结果表明,以低共晶点原则借助 FactSage 热力学软件计算的理论渣系为 40.2%CaF₂-34%Al₂O₃-22.3%CaO- 3%MgO-0.5%B₂O₃ (2#渣,质量分数)。渣金平衡实验发现,熔渣中 Al₂O₃ 和 B₂O₃ 活度比越大,平衡时钢中 B 烧损越严重,2#渣满足冶炼过程中对 B 元素的稳定控制。

C13-PO06

Effect of tempering and Cu addition on microstructures and mechanical properties of DP steels

Yinghua Jiang*

Research Institute of Technology, Shougang Group Co., Ltd

The effects of tempering process and Cu addition on the microstructures and mechanical properties of DP steels were investigated. Through multiscale characterization combining EBSD, TEM, EPMA, and mechanical testing, we demonstrate that Cu addition fundamentally modifies phase transformation kinetics and carbon

partitioning behavior, while tempering induces critical microstructural homogenization. In Cu-added DP steels, the austenite-stabilizing effect of Cu promotes a higher martensite volume fraction compared to Cu-free DP steels. Tempering transforms continuous martensite networks into triplex microstructures comprising ferrite, tempered martensite, and interface-localized residual martensite, reducing dislocation density and promoting carbide precipitation. These microstructural evolutions enable concurrent enhancement of yield strength and elongation through solid solution hardening from optimized carbon gradients and back stress hardening via strain partitioning between tempered martensite and ferrite. Notably, the hole expansion ratio (HER) increases by tempering, attributable to suppressed deformation incompatibility and crack initiation at homogenized phase boundaries. This revealed that a microstructure containing tempered martensite is advantageous to maximize the enhancement of the hole expansion property by tempering.

C13-PO07

Mg 处理对高 Ti 微合金钢力学性能的影响

段华、王超、袁国*、郝俊杰、阎竹

东北大学

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 16Mn 钢为研究对象，分析了在 Mg 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 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 分别转变为细小弥散的 Al-Mg-Ti-C-N-O 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-PO08

S32750 双相不锈钢疲劳断裂行为研究

吴晓涵、丰涵*、何建国、宋志刚、朱玉亮、顾洋

钢铁研究总院有限公司

随着近年来行业对双相不锈钢品质与性能要求的不断提升，双相不锈钢的疲劳性能也日益受到关注。由于双相不锈钢特殊的两相结构，其在疲劳变形过程中铁素体-奥氏体两相的变形机制，以及起裂行为的变化都值得关注。本文研究了 S32750 双相不锈钢的疲劳断裂行为。通过拉-拉疲劳试验，以升降法拟合 S-N 曲线，并计算疲劳极限。结合 OM、SEM、TEM 多尺度微观分析手段观察疲劳断口，确定疲劳起裂源种类与起裂频率，得出双相不锈钢疲劳起裂方式为高频率的夹杂物起裂及少数的铁素体相起裂。通过对疲劳实验前后铁素体-奥氏体的硬度对比，可知铁素体相疲劳起裂行为与疲劳变形过程中两相硬化程度差异导致的相界处大量应变堆积有关。借助 Aspex 统计 S32750 双相不锈钢中夹杂物的分布、尺寸及成分，可知均为非金属夹杂物。测量疲劳断口处的夹杂物尺寸，并与模拟计算所得的临界夹杂物理论计算值进行对比，二者结果高度吻合。

C13-PO09

二次回火温度对 X20CoRE 耐热钢高温蠕变性能的影响研究

张思敏、胡小强*、杨帆、李殿中

辽宁省沈阳市金属研究所

马氏体耐热钢由于具有优异的高温强度、抗氧化性能和抗热疲劳性能，近年来，在镁合金注射成型机的冲头、料壶等热作部件中不断得到应用。但是，现有材料，如 X20CoCrWMo10-9，在长期的高温服役过程中容易析出大量第二相，并发生粗化，导致组织不稳定和韧性降低，从而引起模具产生龟裂等缺陷，提前

失效。针对这一问题，通过合金成分优化设计，课题组开发出新型耐热钢种——X20CoRE，并且已经在镁合金注射成型机上开展了工程试验，取得了较好的试用效果。

本研究借助扫描电子显微镜（SEM）、能谱仪（EDS）、扫描透射电子显微镜（STEM）等手段，采用先低后高的二次回火制度，系统研究了不同的二次回火温度对 X20CoRE 高温蠕变性能的影响。结果表明，X20CoRE 经调质处理后，在 700℃ 进行二次回火后蠕变寿命最长。温度为 700℃、载荷为 150 MPa 时，X20CoRE 的蠕变断裂时间为 102.13h，相对于 680、720℃ 进行二次回火后的蠕变断裂时间分别提升 40.1% 和 52.6%。通过 650、700℃、750℃ 不同温度二次回火后的蠕变曲线对比，发现 X20CoRE 的高温蠕变性能对蠕变温度较为敏感，提高蠕变温度，导致蠕变试样的稳态蠕变速率大大增加，700℃ 二次回火样品的最小蠕变速率由 $7.84673 \times 10^{-4} \text{h}^{-1}$ 增加为 $1.747 \times 10^{-1} \text{h}^{-1}$ ；同时对蠕变断裂试样的断口形貌进行分析，不同回火温度的 X20CoRE 蠕变断裂过程均发生明显的颈缩，蠕变断口存在大量韧窝，蠕变断裂机制均为韧性穿晶断裂。

本研究阐明了回火工艺对 X20CoRE 高温蠕变性能的影响规律，能够为制定 X20CoRE 的合适热处理工艺提供理论指导和数据支撑。

C13-PO10

纳米颗粒对 310S 奥氏体耐热钢蠕变性能的影响研究

黄坤、胡小强*、马澍成

中国科学院金属研究所

310S 不锈钢（0Cr25Ni20）是一种高 Cr、Ni 奥氏体耐热钢，凭借其优异的抗氧化性、高温力学性能及组织稳定性，被广泛应用于超超临界机组过热器与再热器等高温服役部件。随着核能与工业的发展，310S 钢将面对更加严苛的服役环境，对材料的性能，尤其是高温下的抗蠕变性能，提出了更高的要求。为了进一步提高其服役温度与时间，本工作借助光学显微镜、扫描电镜、背散射电镜、透射电镜和蠕变试验机，对金相组织、断口形貌、元素分布和蠕变性能进行分析。结果表明：发现加入的中间合金 NMP 主要是 $\text{Al}_3\text{Nb}+\text{NbB}_2/\text{Al}$ 体系；为获得均匀化初始显微组织，通过系统调控锻造工艺及后续热处理制度，发现 1050℃/40min 固溶处理再结晶完全，形成平均晶粒尺寸 20 μm 的单相奥氏体组织，有效抑制混晶现象；在 1000℃、17MPa 的条件下，加入 0.15%NMP 的 310S 钢铸态蠕变寿命为 68.73h，比不添加 NMP 的蠕变寿命（50.28h）提高 36.69%，锻态蠕变寿命为 80.23h，比不添加 NMP 的蠕变寿命（55.10h）提高 45.61%，同时 NMP 的加入使得 310S 最小蠕变速率从 $3.25 \times 10^{-3} \text{h}^{-1}$ 降低至 $1.36 \times 10^{-3} \text{h}^{-1}$ ，NMP 的加入显著提高了 310S 钢的蠕变抗力。

C13-PO11

“中国首创”CHSN01 超低温高强韧钢托起“人造太阳”

王长军*、梁剑雄、杨志勇、张梦醒、刘雨、刘振宝、孙永庆、王民乐、褚韦涵、许帅

钢铁研究总院有限公司

2025 年 5 月 1 日，合肥聚变堆主机关键系统综合研究设施园区内，中国新一代“人造太阳”——紧凑型聚变能实验装置（BEST）工程总装正式启动，向 2027 年实现“全球首次聚变能发电”战略目标迈出最关键一步。而支撑未来这颗重达 6000 吨的聚变堆“心脏”强劲跳动的，正是由中国钢研集团所属钢研总院联合中科院等离子所等自主研发的 CHSN01 超低温高强韧无磁钢，其-269℃ 下屈服强度 $\geq 1500 \text{MPa}$ ，抗拉强度 $\geq 1800 \text{MPa}$ ，伸长率 $\geq 30\%$ ， $\text{KIC} \geq 180 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ，与 ITER 项目广泛使用的 316LN 不锈钢相比，其强度提升了约 40%，塑性却旗鼓相当。目前，CHSN01 超低温高强韧无磁钢已构建“冶炼—成型—应用”全产业链创新能力，并实现了在国家重大工程装备的批量应用。主要科研业绩如下：（1）冶炼精控方面，钢研总院联合攀长特创新采用“电炉+氩氧脱碳+炉外精炼+电渣重熔”的低成本冶炼工艺，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，精准实现了超低碳（ $\text{C} \leq 0.01\%$ ）、高氮（ $\text{N}: 0.28\% \sim 0.38\%$ ）、超低杂质控制（ $\text{P} \leq 0.01\%$ 、 $\text{S} \leq 0.005\%$ 、 $\text{Al} \leq 0.02\%$ 、 $\text{O} \leq 0.002\%$ ），且单炉组批能力达 40 吨，为 CHSN01 钢大规模批量供货奠定了坚实基础。（2）成型制造方面，钢研总院联合中科院等离子体所与久立特材，突破了 CHSN01

高精度内圆外方的铠甲轧制技术，铠甲精度误差不超过 ± 0.02 毫米，并通过真实服役工况下的性能考核；联合攀长特、上重铸锻与二重装备共同完成了厚 10~90mm 系列规格 CHSN01 热轧板材和 6 吨级大尺寸 CHSN01 锻件（厚 260mm $\times$ 560mm $\times$ 5000mm）研制，构建了“高/中温析出相调控理论 $\rightarrow$ 高精度铠甲/超大锻件极端制造 $\rightarrow$ 全工况验证”的完整创新链条，推动我国首次在核聚变材料领域实现从跟跑到领跑的历史性跨越。（3）应用拓展方面，自 2024 年 1 月首次批量供货 10 吨起，1 年内即实现向 BEST 装置的百吨级批量供货。其中，总重约 300 吨的 CHSN01 不锈钢铠甲已完成超 22588 米交付（总需求量约 52438 米），占总需求的 43%；总重约 200 吨的 CHSN01 线圈盒直线段部件完成交付 3 套（总需求量 17 套）。如今，其应用版图正从 BEST 装置核心部件，快速拓展至航天深低温贮箱、氢能储运装备等万亿元级市场，引起法国原子能委员会（CEA）、德国卡尔斯鲁厄理工学院（KIT）等国际顶尖机构的高度关注。