

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

E05-材料服役行为与结构安全
E05-Materials' Performance and
Structure Safety

Organized by

Chinese Materials Research Society

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

E05. 材料服役行为与结构安全

分会主席：冯耀荣、范志超、张显程、张哲峰、冯春

报告

E05-01

石油管和装备的失效分析及预防

冯耀荣

中国石油集团工程材料研究院，油气钻采输送装备全国重点实验室

论述了深入开展石油管和装备失效分析预测预防工作的重要意义，介绍了石油管和装备失效分析及预防的发展概况，对失效分析预测预防理论技术进行了探讨，提出了石油管和装备失效控制及预测预防的思路和措施。指出：失效分析预测预防，是研究系统、机械及其零部件失效诊断、失效预测、失效预防的理论、技术和方法及其工程应用的一门新兴交叉学科，对于提高产品质量和可靠性、确保使用安全，提高经济效益和社会效益，促进科技发展进步等具有重大意义；失效分析预测预防与完整性技术和管理、可靠性工程紧密结合，对推动失效分析预测预防理论技术发展和工程实践具有重要指导作用；针对我国石油工业安全和效益开发需求，继续深入开展石油管和装备失效分析预测预防、发展完整性和可靠性工程技术十分必要和迫切；石油管和装备失效分析预测预防与完整性评价及完整性管理、可靠性工程，其根本目的是一致的。完整性的本质和核心是全寿命周期的安全可靠，基于可靠性的设计、完整性理论技术及可靠性工程是石油管和装备技术发展的重要方向；失效分析、失效预测、失效预防是一个完整的理论技术体系，分析和预测是手段，预防是目的；失效分析预测预防理论技术已逐步由定性向定量发展，与完整性理论技术、可靠性工程的紧密结合，正在逐步纳入相关标准规范，运用于石油管和装备设计/选材/制造/使用/维护的全寿命周期；数字化、智能化、智慧化理论技术的引入，将进一步提升失效分析预测预防的理论技术水平，也是今后发展的重要方向。

E05-02

高通量力学及服役结构压入、小冲杆试验仪器与应用

蔡力勋

西南交通大学力学与航空航天学院

背负极难求解数理方程的连续介质力学，从一开始就吸引了历史上最伟大数理力学们络绎的孜孜求解，在线弹性问题解析求解中涌现了一大批贡献卓越的弹性理论学者，如提出本构理论的胡克，接触理论的赫兹，断裂力学的欧文，以及板壳理论的钱伟长、张维等；到了弹塑性问题，本构关系的非线性使得问题陡增难度，至今罕有实现解析求解的理论学者。由于非线性塑性问题带来了很大难度，且又出于现代材料与结构安全评价与各类小尺寸材料测试的需求，问题求解不得已转向到提出不同塑性变形程度、反映材料综合塑性能力的各类硬度与相关仪器，以及提出借助缺乏普适性的经验式或回归式方程与仪器。

面对普适性求解极为困难的弹塑性问题，自 2016 年，西南交通大学蔡力勋研究团队原创提出了均匀固体降维解析求解的能量密度等效理论，进而提出了材料高通量力学，其核心是：（1）不可压缩条件下，受载体中任意复杂应力 RVE（Representative Volume Element）必对应一个与其能量密度严格等效的简单应力 RVE；（2）根据能量守恒，对应中值能量密度必存在一个简单应力 RVEC，其能量密度等于受载体外力功与有效变形体积之比；（3）对幂律强化材料，受单向加载固体，其有效变形体积和 RVEC 的等效应变均与加载线上加载点位移之间呈幂律；（4）RVEC 的等效应力与单向载荷呈正比并与加载线上加载点位移之间呈幂律；（5）弹塑性力学指标（如载荷-位移关系、本构关系、材料强度、各类硬度、断裂力学 J 积分、裂尖场）均可由（1）~（4）基本方程获得。高通量力学历史性解决了非线性弹塑性问题解析求解难题，已在压入、小冲杆试验等弹塑性问题求解中实现了理论突破，在此基础上发展出了具有普适性的微试样试验方法和科学仪器，成都微力特科技公司生产的 IMTS 系列仪器，其压入和小冲杆试验具有高精度性和普适性，已实现了金属材料或结构表面的弹性模量、屈服强度、抗拉强度、应力应变曲线、布氏硬度、洛

氏硬度、维氏硬度和努氏硬度等高通性力学性能指标的高效率微损测试。

E05-03

小冲杆测试技术预测金属材料力学性能的新途径：表征应力应变法

余丰，张海燕，张佳茹，李英治

宁波工程学院

小冲杆试验（SPT）是一种评定金属材料结构完整性的新技术，目前开展以试验为基础的经验相关性研究和逆向有限元法为主，前者依赖于材料特性缺乏普适性，后者求解费时无法工程推广。本文提出基于表征应力应变法的 SPT 新方法，通过量纲分析、有限元仿真以及无量纲参数关系数据库的联合求解，得到了随挠度和应变硬化指数变化的三个无量纲通解的显式解析表达式，并最终通过表征应力应变法计算得到金属材料的拉伸力学性能。本方法求解采用解析公式，计算效率高、具有普适性，为小冲杆试验技术提供了新途径。不仅解决了传统理论中经验相关法所带来的误差及其关联公式和关联系数不尽相同的问题，还提高了预测金属材料的力学性能的效率 and 精度。为验证所提出 SPT 新方法的有效性，本文采用了 DC01，P92，3Cr1MoV，X70 等二十余种金属材料进行了实验验证。结果表明，所预测各类金属的拉伸力学性能与标准拉伸实验值的误差在 5% 左右。

E05-04

低碳低合金钢带状组织的形成机制和对冲击韧性各向异性的影响

程瑄，高古辉

北京交通大学

低碳合金钢具有较高的强度和优异的低温韧性，被广泛的应用在油气钻采输送装备。这种材料通过 TMCP 工艺和热处理相结合的方法，实现了细晶强化和纳米析出强化等，在力学性能、成本及轻量化等方面具有显著的优势。然而，由于存在冲击韧性各向异性的问题，钢板的横向冲击韧性偏低，影响了其服役安全。本文研究了自主开发的低合金钢板中带状组织的形成机制及其对钢的冲击韧性各向异性的影响规律。结果显示，淬火后钢板的纵向和横向冲击韧性差异较小，而与淬火钢相比，回火后钢板的纵向冲击韧性提高了 88%，但横向冲击韧性略有下降，表现出明显的各向异性。采用多尺度显微组织表征方法对比分析了基体和带状区域的组织形貌，发现基体组织表现为均匀细小的再结晶晶粒；带状区域的组织特征是混晶和 Mn 偏析条带；产生混晶的原因是热轧过程中局部应变不均匀导致未完全再结晶。回火后，基体组织析出细小、弥散的第二相，而带状区域中的粗大晶粒析出高密度粗大渗碳体。通过裂纹扩展路径分析和冲击试样微裂纹观察表明，带状区域中粗大晶粒和粗大渗碳体有利于解理裂纹沿轧制方向的萌生和扩展，显著降低了横向冲击韧性。这是实验钢回火后冲击韧性各向异性的主要原因。

E05-05

含 Si、Mn 的 30Cr2Ni4MoV 转子钢脆化机理的新认识

郑永峰，胡小锋

金属研究所

传统认为 CrMo 钢在高温下(>350°C)长期服役产生的时效脆化(沿晶开裂)现象是由于脆化元素(Si, Mn, P, Sn 等)在晶界偏析导致。然而，我们在含 0.3wt.%Si 和 0.7wt.%Mn 的 30Cr2Ni4MoV 钢中发现了一种新的时效脆化机制，晶界析出的 G 相(Ni₁₆Mn₆Si₇)是时效脆化的主因。本工作利用扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)和原子探针(APT)技术研究了 30Cr2Ni4MoV 钢在 300~600°C 时效 12~10000h 过程中 G 相的析出行为及其对力学性能的影响。时效过程中，G 相的析出行为如下：(1)回火态合金钢的晶界出现明显的 Ni, Mn 和 Si 元素偏析。(2)短期时效过程中，晶界元素偏析促进了 G 相在三叉晶界和晶界 M₂₃C₆ 周围析出。(3)随着时效时间增加，G 相沿晶界生长为长条状。(4)长条状 G 相生长受到 M₂₃C₆ 阻碍时，沿宽度方向粗

化。随着时效过程中板条界面上元素偏析程度增加, G 相在板条界面逐渐析出。TTP 曲线表明, G 相析出的鼻尖温度在 500~550°C(元素在基体具有低固溶度和高扩散速率)。由于 G 相仅在界面析出, 数量较少, 对合金钢的硬度影响较小。但在冲击过程中, G 相周围由于应力集中会产生微裂纹。随后, 在 G 相和晶界元素偏析的共同作用下, 裂纹沿晶界迅速扩展, 造成 30Cr2Ni4MoV 钢的冲击韧性显著降低。

E05-06

残余奥氏体分布对贝氏体钢超高周疲劳裂纹萌生行为的影响

王琨, 高古辉

北京交通大学

显微组织对无碳化物贝氏体钢的超高周疲劳失效模式具有决定性的影响。虽然残余奥氏体对钢塑韧性的影响机制已经达成共识, 但迄今, 残奥对贝氏体钢的裂纹萌生行为的影响规律仍存在争议, 其与残奥的含量、稳定性、形貌和分布等有关。本文采用超声疲劳实验机测试了一种 Mn-Si-Cr 系贝氏体钢的超高周疲劳性能, 选择了两种不同形貌的非夹杂起裂断口, 对裂纹萌生区的形貌与微观组织进行了详细的表征和分析。结果表明, 即使具备择优取向, 纳米尺寸残奥中位错也难以启动, 进而致使周围粗大贝氏体铁素体中具有较高施密特因子的滑移系率先启动, 并诱导“穿晶型”非夹杂起裂; 然而对于非择优取向的亚微米级残奥和贝氏体铁素体, 局部塑性变形率先在两者的相界面处发生。研究还发现, 微裂纹前沿的残奥在循环载荷作用下会发生局部马氏体相变, 可以抑制微裂纹扩展, 促进周围细晶区的形成。

E05-07

多相流环境中储油表面的失效机制及其动态修复行为研究

王茜茜, 王子明

厦门大学材料学院

管道安全是我国油气行业落实“低碳发展”和“深海开发”等国家环境和能源战略的重要保障。在二氧化碳驱油等新兴采油技术应用和深海油气资源开发等重大工程中, 油气输送管道面临较高腐蚀风险以及由此引发的安全和环保隐患。因此, 管道腐蚀控制是确保油气生产安全的核心技术。利用原油自身缓蚀作用降低油气管道腐蚀风险, 是一种极具应用前景的腐蚀管理策略。

为明晰水润湿诱发多相流腐蚀的微观过程, 我们系统探究了典型预润湿表面油膜失效与腐蚀诱发机制。基于管道运输中常见的两种工程表面: 油预润湿表面(oil pre-wetted surface, OPS)和水预润湿表面(water pre-wetted surface, WPS), 同步获取电化学信号与近壁流体行为, 近原位捕获表面残余液相分布状态, 直观反映油膜破裂的宏观过程, 揭示诱发腐蚀的微观机制: 水滴穿透油-水界面、聚并、移动至油-钢界面, 随后长大贯穿油膜导致破裂, 表面局域水润湿, 最终诱发电化学腐蚀。随后, 基于高耐蚀储油表面(oil impregnated steel surface-40°C, OISS-40°C)验证了油膜自修复行为与腐蚀抑制作用。研究发现, 随着电流的增加, 腐蚀痕迹加深、液滴状腐蚀圈扩大且相互连接、交叠, 甚至出现腐蚀坑及网格状结构。此外, 油水交替润湿不仅能够动态修复腐蚀表面, 且存在触发强自修复作用的临界电流条件(200 μA)。同时, 小电流多次交替处理能够提升触发强自修复的临界电流, 并增强同等电流下的动态修复能力, 从而实现材料的长期安全服役。通过深入揭示诱发储油表面腐蚀的微液滴致损机制, 并论证局部失效储油表面动态修复的可行性, 为多相流管道长效防腐提供新思路。

E05-08

Fe-Mn-Al-C 高锰钢 4K 下的力学性能及变形行为

任家宽¹, 李志红², 刘振宇³, 张龙⁴, 王鹏¹

1. 中石油集团工程材料研究院有限公司

2. 西北有色金属研究院

3. 东北大学

4. 中国科学院金属研究所

开发在 4K 下具有优异力学性能的结构材料存在迫切的需求, 一些高熵钢在极低温下具有良好的应用潜力, 但是它们在 4K 下的变形行为和力学性能却鲜有被研究。而且, 这些高熵钢的时效诱导脆性特性也严重地限制了它们的应用。在本研究中, 具有不同 Al 含量 (0、4、10 或 15at.%) 和晶粒尺寸的 Fe-Mn-Al-C 高熵钢被制备出来, 它们在 4K 下的变形行为和力学性能被系统地研究。研究发现随着 Al 含量的升高, 在 923K 下时效 10 天的 10%Al 高熵钢中的 (Fe, Mn)₂₃C₆ 碳化物的析出被有效地抑制。因此, 4K 下 10%Al 高熵钢的过早断裂得到避免, 获得了 4K 下高强度 (~1.5GPa) 和高断裂韧性 (255MPa·m^{1/2}) 的良好组合。高熵钢的变形机制由 0Al 钢中大量的孪晶和变形带转变为 10at.% 钢中少量的孪晶、泰勒晶格和变形带, 这促成了 10%Al 钢高的强度和塑性。此外, 具有大晶粒的 10%Al 钢在 4K 下展现出更高的断裂韧性, 极低温韧性的反晶粒尺寸效应得到了很好的阐释。

E05-09

油气与新能源管道服役安全评估与完整性技术分析

程玉峰

加拿大卡尔加里大学机械工程系

管道是高效、经济、安全的能源运输方式。长期以来, 通过管道输送化石燃料 (如石油、天然气等) 极大满足了国民经济发展的需求。近年来, 加速能源转型以促进净零排放目标的早日实现已成为各国共识, 通过管道实现“绿色”能源 (如氢气) 以及二氧化碳的高效运输, 被普遍认为是能源转型战略的重要一环。

安全是管道工程领域的首要问题。影响管道运行安全、导致管道失效的原因多种多样, 例如腐蚀、应力腐蚀开裂、机械损伤、地质活动、第三方因素等, 而管道内部与外部引发失效的环境以及机制也各不相同。当管道输送高压氢气时, 管线钢存在发生氢脆的潜在风险, 而钢的气相氢脆由于氢原子产生与吸附机理的独特性, 具有与金属液相氢脆不同的原因与特征。二氧化碳管道的运行环境处于超临界状态, 其内腐蚀, 尤其是局部腐蚀的模拟预测与控制, 还是尚未解决的技术难题。

对于不同介质管道产生的不同类型的影响管道安全的“缺陷”, 需要建立各自的评价方法与分析技术。本报告针对油气与新能源管道腐蚀、机械损伤与气相氢脆现象, 研究建立了它们发生发展的理论基础, 确定了各因素的影响, 发展了机理型的评价方法与定量预测模型, 满足管道完整性管理需求, 从而搭建了应用基础研究与工程实践应用的桥梁。

E05-10

油气管道环焊缝韧脆转变区韧性表征技术探讨

汪凤

国家管网集团工程技术创新有限公司

油气管道环焊缝韧性通常采用夏比冲击吸收功及断面剪切率进行表征, 主要用于防止环焊缝发生脆性开裂与含缺陷环焊缝启裂, 该表征方法具有简便经济、工程可操作性强的特点。研究表明铁素体型组织钢材在韧脆转变温区具有韧性离散的特征, 采用单次夏比冲击试验确定其韧性具有偶然性。为解决该问题, 国际核工业行业引入了概率统计方法, 提出了解理断裂的统计模型, 该方法称主曲线法。环焊缝的冲击试验温度一般位于韧脆转变温区, 因此, 其韧性离散属于一种本征特点, 本报告以 X80 管道自动焊环焊缝为研究对象, 采用大量的夏比冲击试验及其试验结果统计分析确定环焊缝夏比冲击韧性统计分布特征, 借助夏比冲击冲击与断裂韧性转换经验关系式获得环焊缝断裂韧性统计分布特征, 结合主曲线法确定环焊缝参考温度 T, 探讨采用主曲线法表征环焊缝韧性的可行性, 研究发现相比与单次夏比冲击试验, 主曲线法确定的参考温度 T 具有显著的稳定性和一致性, 为油气管道环焊缝韧性表征提出了一种新技术的参考。

E05-11

Study on Fatigue Crack Growth Rate of Martensitic Stainless Steel 17Cr16Ni2 for Petrochemical Industry

Yajun ZHANG^{1,2}, Xuefeng Li², Hengyao DANG², Xinyao ZHANG^{1,2}

1. National Key Laboratory of Marine Corrosion and Protection

2. Luoyang Ship Material Research Institute

Multiple parameters could be considered to drive and control fatigue crack growth rate da/dN in view of its relative independence. The martensitic stainless steel 17Cr16Ni2 has series of advantages such as anti-corrosion, high strength, thermo resistance and has been employed for equipments of pipes, containers, valves, boilers, heat-exchangers and pressure vessels in petrochemical industry. The previous study showed that da/dN of 17Cr16Ni2 stainless steel could not be considerably expressed by Paris power equation taking stress intensity factor range ΔK as the driving parameter in the total effective ΔK interval. In this paper, based on crack tip plastic zone variation Δr as the driving parameter, the relationship of Δr - da/dN was studied for martensitic stainless steel 17Cr16Ni2 by da/dN experiments. The results manifested that the distribution rule of Δr - da/dN experimental data could be better expressed by polynomial in the total effective Δr region with a range of 0.1mm-2.5mm as opposed to similar Paris power equation; what's more, it could be still fitted by similar Paris power equation at the early and middle periods, namely $\Delta r=0.1\text{mm}-1.70\text{mm}$; when $\Delta r>1.70\text{mm}$ at the later period of fatigue crack propagation, Δr - da/dN experimental data has a trend to deviate above similar Paris curve with the increase of Δr and this phenomenon was analyzed theoretically and verified microscopically.

E05-12

超超临界机组用磷微合金化 Ni-Fe 基合金低应力长时蠕变行为研究

吴云胜^{1,2}, 张享享¹, 王常帅³, 管现军^{1,2}, 侯介山^{1,2}, 秦学智⁴, 郭永安^{1,2}, 周兰章^{1,2}

1. 中国科学院金属研究所 师昌绪先进材料创新中心
2. 中国科学院金属研究所 中国科学院核用材料与安全评价重点实验室
3. 东方电气集团东方汽轮机有限公司
4. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

GH984G 合金是中国科学院金属研究所自主研发的镍铁基高温合金, 具有成本低、抗氧化腐蚀性能优异、成形性好等优势, 已成为我国 650°C~700°C 超超临界燃煤电站锅炉管道的候选材料。前期研究表明, 磷微合金化是改善镍铁基合金中温持久性能、突破持久强度不足这一瓶颈的重要途径。然而, 磷对镍铁基合金影响的研究主要集中于燃气轮机服役特点的中温、高应力、短时蠕变领域, 在超超临界电站服役特点的中温、低应力、超长时条件下, 磷对镍铁基合金蠕变性能的影响规律尚无认知。因此明确磷在超长时服役过程中的偏聚行为、揭示磷对 GH984G 合金中温、低应力、超长时蠕变行为的影响机理具有重要的工程意义, 能够为超长时服役的镍铁基合金成分设计提供实验依据和理论基础。

结果表明, 长期时效过程中磷发生动态偏聚, 其偏聚程度随时间延长而加剧。GH984G 合金 700°C 时效过程中磷首先偏聚于晶界、 γ/MC 及 $\gamma/\text{M}_{23}\text{C}_6$ 界面处, 随着时效时间的延长亦在孪晶界处偏聚, 甚至在晶内和晶界处析出针状 MNP 型磷化物。磷对蠕变性能的有益作用随着应力的降低而减弱。通过幂律蠕变 (BMD) 公式对不同磷含量合金 700°C/150MPa~400MPa 下的最小蠕变速率进行拟合计算, 明确了磷对蠕变性能的有益作用程度 (R) 与蠕变应力之间的双对数线性关系, 并外推出不同磷含量 (0.01wt.%, 0.02wt.% 和 0.04wt.%) 合金中, 磷对 700°C 蠕变性能有益作用消失时的临界蠕变应力分别为 93MPa、133MPa 和 140MPa。磷的动态偏聚行为导致磷的有益作用随应力的降低而减弱。蠕变可视为施加应力的时效过程, 磷同样发生动态偏聚, 高应力下蠕变寿命短, 适量磷偏聚于晶界, 提高晶界结合力, 优化晶界析出相形貌, 磷显示出有益作用; 低应力下蠕变寿命长, 蠕变后期磷过度偏聚于晶界, 降低晶界结合力, 从而弱化磷的有益作用。综合上述研究结果, 提出磷微合金化技术应用原则: 磷微合金化技术的应用需结合材料的服役状态, 对于高应力短时服役材料, 添加适量的磷可提升持久强度; 对于低应力超长时服役材料, 不宜添加磷元素。

E05-13

原位 CT 技术在极端环境下关键材料服役行为研究中的应用

杨尚京

微旷科技（苏州）有限公司/长三角先进材料研究院

材料在极端环境下的服役行为是现代工程技术领域的重要研究课题。本文利用高分辨率 X 射线原位 CT 成像技术,对关键结构材料在极端环境中的三维无损表征进行了深入研究。通过突破极端环境与 CT 耦合技术,实现了材料在超高温、超低温、复杂应力、应力腐蚀、热压烧结等服役条件下的三维原位表征。研究表明,高性能原位 X 射线 CT 技术能够精确监测材料内部结构和缺陷的演变,为高温合金、镁合金、铝合金、钛合金、碳纤维复合材料、陶瓷、混凝土、岩石等材料的服役行为提供了重要数据支持。具体应用案例包括高温合金在高温环境中的缺陷演变、复合材料在复杂应力条件下的行为分析,以及岩石和混凝土在自然环境中的劣化过程。本研究的成果不仅提高了材料科学基础理论的深度和广度,还为工程应用中的结构安全性评估提供了新的技术手段。未来,随着技术的进一步发展,高性能 X 射线 CT 设备将继续推动材料科学的进步,特别是在极端环境下材料的研究方面,将为新材料的开发和应用提供详尽的数据支持,助力解决航空航天、能源、建筑等领域中的复杂工程问题,提高材料的使用寿命和性能,确保结构的安全性和可靠性。

E05-14**增材修复钛合金疲劳损伤机理与性能评估**罗思海¹, 何卫锋¹, 庞智聪², 王凌峰¹

1. 空军工程大学
2. 西安交通大学

先进航空装备中大量采用钛合金,服役过程中,不可避免出现磨损、冲击等损伤,影响飞行安全。外场常用手段是结构件损伤立即更换,经济损失大,迫切需要修复。激光增材修复技术在恢复材料几何外形基础上,还能恢复部分疲劳性能,在损伤装备部件修理上有非常大的潜力。为此,团队主要围绕激光增材修复钛合金疲劳损伤机理、动态冲击动态响应以及疲劳强度评估等方面开展研究,提出了一种提升损伤修复钛合金疲劳强度的激光增材修复方法,增材修复后钛合金疲劳强度提升 11.94%,增材修复过程中 α 相中原位析出 α' 马氏体是疲劳强度提升主要原因;同时分析了不同应变率 (10-3、2400、3600/s) 下修复钛合金动态冲击失效行为,从绝热剪切带、动态再结晶、动态旋转再结晶等方面揭示了冲击失效机理;在此基础上,建立了考虑增材缺陷与残余应力的临界距离模型,增材修复前缘模拟叶片的高周疲劳强度预测误差不超过 23%;建立了考虑增材缺陷的疲劳断裂相场模型,增材修复钛合金试件的疲劳寿命预测结果在 2 倍分散带内。

E05-15**应力应变混合控制蠕变疲劳载荷下 GH4169 过载后的循环响应与剩余寿命预测**

王小威, 康子童, 巩建鸣

南京工业大学

镍基高温合金 GH4169 以其卓越的抗蠕变和抗疲劳特性,通常用作航空发动机涡轮盘的制造中。航空发动机涡轮盘作为整个推进系统的关键部件,其稳定运行至关重要。在常规工作状态下,涡轮盘不仅会受到由热应力和离心力变化引发的低周疲劳损伤,还会因恒定转速下的离心力的作用而产生蠕变损伤。特别是在单发失效的特殊工况下,另一台发动机的涡轮盘必须以最大连续功率运转,导致其转速和相应负载显著增加。这时,涡轮盘除了经受正常工况下的蠕变疲劳损伤之外必须承受更高的恒定应力所带来的蠕变损伤。因此,深入研究这种过载情况对 GH4169 蠕变疲劳性能的影响,对航空发动机的安全运行与结构完整性至关重要。

本文在 650°C 下进行的混合应力和应变控制蠕变-疲劳相互作用 (HCFI) 实验中,研究了不同寿命阶

段的恒定应力过载对后续循环变形、微观组织演化和剩余寿命的影响。首先,在 HCFI 试验的 10%、25%、50%、65%和 70%循环寿命下,施加 800 MPa 恒应力的过载并保持 180 min。过载结束后继续进行蠕变疲劳试验测试材料过载后的剩余寿命。然后,使用 SEM 对失效后试样的断口与微观组织进行了观察与分析。最后,提出了一种等效损伤来量化过载影响的蠕变疲劳损伤,从而得出准确的剩余寿命预测结果。试验结果表明:过载会显著降低了材料的剩余寿命而且会对后续的蠕变-疲劳变形行为产生显著影响。在 HCFI 试验的不同寿命阶段施加过载后对后续损伤演化速率的影响有明显差异并且在临近寿命末期时,过载会引损伤加速效应更为显著。此外,通过对过载后试样微观结构分析发现,过载会导致材料晶粒内部产生大量滑移,导致材料在后续蠕变疲劳过程中损伤速率加快。同时,过载后材料晶界上的蠕变孔洞增多,材料发生更为明显的沿晶断裂。

E05-16

Achieving low wear in a complex concentrated alloy CrFeNiNb with multi-phase hierarchical microstructure

Dingshan Liang,Fuzeng Ren

Southern University of Science and Technology

We propose a strategy to achieve low wear in a complex concentrated alloy (CCA) CrFeNiNb with multi-phase hierarchical microstructure. The CCA comprises a matrix of ultrafine-grained hexagonal close-packed (HCP) Laves phase (80.3 vol%), a secondary face-centered cubic (FCC) phase (18.3 vol%), a minor amount of (Nb,Cr)oxides and a trace amount of uniformly dispersed nanoscale precipitates. The CrFeNiNb CCA exhibits an ultrahigh hardness of 993 (± 22) HV and an extremely low wear rate of $7.4 (\pm 0.6) \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ when sliding against a silicon nitride (Si_3N_4) ball. To elucidate the wear mechanism, we characterized the morphology, chemical composition and cross-sectional microstructure of the wear track. The results indicate that the cracked oxide layer, subgrain formation in the FCC phase, and the Shockley partial and full dislocations-triggered intragranular prismatic slip in the C14 Laves phase synergically contribute to the exceptional wear resistance. Furthermore, we conducted a detailed analysis of the chemical composition and crystal structure of the cracked oxide layer, along with a compressive discussion of the subsurface deformation of HCP/FCC phases. These findings offer significant insights into designing wear-resistant alloy through the formation of multi-phase hierarchical microstructure.

E05-17

铺层方式对 CFRP-AI 单搭接接头胶接性能的影响

邹田春, 尹宇航

中国民航大学

室温下分别制备[45/-45]4s、[0/90]4s 和[0/45/-45/90]2s 三种铺层方式的 CFRP 层合板与 AI 胶接单搭接试样,使用电子万能试验机、数字图像相关法(DIC)和扫描电子显微镜(SEM)等手段测量胶接接头的拉伸载荷-位移曲线和应变分布并观察断口形貌。基于试验数据分析不同铺层方式下 CFRP-AI 单搭接接头的拉伸性能,研究了铺层方式对 CFRP-AI 单搭接接头胶接性能的影响和铺层方式胶接接头的破坏机制。结果表明,在拉伸过程中[45/-45]4s 试样出现塑性变形阶段其拉伸位移最大,而[0/45/-45/90]2s 和[0/90]4s 试样的拉伸位移较小且发生了脆性断裂。铺层方式从[45/-45]4s 到[0/45/-45/90]2s 再到[0/90]4s,试样的极限载荷和纤维束断裂数量增加、层间剪切力减小、应变集中程度和分层破坏程度降低。

E05-18

汽车构件失效分析与抗疲劳设计制造

张哲峰, 王斌, 刘睿, 付长明, 张振军, 张鹏, 屈伸

中国科学院金属研究所

报告总结过去 10 年汽车构件失效分析案例 60 项, 主要失效原因包括疲劳断裂、组织不当、脆性断裂、锻造裂纹、淬火开裂及磨损失效等原因。针对构件疲劳失效问题, 团队提出材料-构件疲劳性能预测与优化模型, 研发材料-构件疲劳性能预测软件, 指导汽车构件抗疲劳设计制造, 使汽车钢板弹簧台架疲劳寿命超过 100 万周次, 是国际某汽车同类钢板弹簧台架疲劳寿命的 3.5 倍; 指导汽车扭力轴国产材料替代进口材料, 使其台架疲劳寿命达到预期标准。

E05-19

X80 钢管关键性能稳定性控制技术

沙胜义

国家管网集团工程技术创新有限公司

自西气东输一线、二线以来, 我国开始大面积推广高钢级管线钢工程应用, 经过二十多年的发展, 管线钢技术体系基本趋于成熟, 未来很长一段时间段, 高钢级管线钢仍将是我国油气管道建设的主流管材。近些年几期高钢级管道事故的连续发生, 暴露了高钢级管道服役安全仍存在进一步提升的空间。国家管网针对高钢级管道服役安全性的问题, 组织开展了两轮较大规模的研究, 发现管线钢性能分散及由此导致的环焊缝强度匹配问题是高钢级管道断裂失效的要因。本报告以 X80 管线钢为研究对象, 通过工程数据统计分析与数据挖掘的方式, 分析了不同来源 X80 管线钢性能差异; 通过实验室微观及宏观测试分析相结合的方式, 揭示了 X80 管线钢性能分散对管道服役安全的影响, 并提出了 X80 钢级管线钢关键性能稳定性控制建议, 助力高钢级管道工程质量提升。

E05-20

摩擦诱导亚表面纳米层状结构提升单相多主元合金耐磨性能

杨璐, 任富增

南方科技大学

摩擦磨损是影响接触并相对运动的机械零部件服役性能和寿命的关键因素。减少金属构件在干滑动条件下的摩擦磨损一直是材料科学和摩擦学领域的研究热点。金属材料在干滑动磨损过程中摩擦表面附近会产生剧烈的塑性变形, 亚表面微观结构演变将显著影响摩擦学性能。本研究选择具有相似的初始微观结构但不同层错能的单相超细晶面心立方结构 CoCrFeMnNi 和 FeCoNi 多主元合金作为研究对象, 揭示摩擦诱导的亚表面梯度微观结构的形成机制及其对摩擦学行为的影响。结果发现, 在相同的干滑动摩擦条件下, 硬度更低的 FeCoNi 合金的摩擦系数比 CoCrFeMnNi 合金降低了 52%, 磨损率大幅降低了 3 个数量级。微观结构表征分析表明, 这种摩擦磨损行为的巨大差异归因于合金在滑动摩擦过程中亚表面变形结构的不同。低层错能 CoCrFeMnNi 合金通过激活纳米变形孪晶将初始的超细晶逐渐细化为等轴纳米晶, 而高层错能 FeCoNi 合金的摩擦表面形成了纳米层状结构。FeCoNi 合金在滑动磨损过程中形成的纳米层状结构具有优异的塑性变形和应变硬化能力, 这种纳米层状结构能够促使裂纹钝化并抑制裂纹扩展。然而, CoCrFeMnNi 合金形成的等轴纳米晶层虽具有较高的抗压强度, 但在屈服开始后, 将萌生微裂纹并快速纵向扩展, 表现出灾难性的断裂行为, 导致摩擦层的整体剥落, 降低材料的耐磨性。

E05-21

RPV 钢断裂韧性与温度、尺寸的相关性研究

李洋

西安科技大学

已有的传统方法很难建立反映温度、尺寸对 RPV 钢断裂韧性共同影响的量化关系, 给反应堆压力容器

器结构完整性评估带了巨大的挑战。本文以公开发表的 RPV 钢断裂韧性实验数据为对象,采用机器学习方法研究了温度、试样尺寸对断裂韧性的影响,并建立了基于失效概率分析、强度指标的断裂韧性预测模型。该模型不仅能量化分析温度、试样尺寸对断裂韧性的共同影响,并且可实现任意尺寸、温度下断裂韧性的准确预测。与主曲线法相比,预测断裂韧性时不依赖于大量的断裂韧性试验数据,仅需简单的材料强度性能,大大节约了开展断裂韧性试验所需的时间和资源成本。

E05-22

海工装备用铜镍合金管材使役条件下微生物诱导的腐蚀机制研究

蒲亚男, 陈守刚

中国海洋大学

焊接是应用最广泛、性价比最高的整体管道连接技术之一。但易产生非均质结构,影响材料的力学特性和耐腐蚀性。Cu-Ni 合金管材通常采用高效焊接技术焊接,由于其优越的机械特性和耐腐蚀性,在船舶、石油和天然气工程、核工业等各个行业中得到了广泛的应用。即使管道材料的强度、韧性和耐蚀性得到了显著提高,但在各种因素的综合影响下,海洋工程用 Cu-Ni 合金管材腐蚀穿孔问题仍屡见不鲜。海洋环境下异型合金结构(焊接部位等)由于其结构特殊导致结构件的局部不平整,其中焊接接头往往是海底管道工程中最薄弱的环节,其失效将危及整个工程的安全。鉴于此,我们进行了实际海洋工程用 Cu-Ni 合金管材焊接接头的微生物腐蚀特性及机制研究,揭示界面微观结构与焊接接头耐蚀性之间的关系,探索脱硫弧菌所致 Cu-Ni 合金焊接接头腐蚀行为及腐蚀机制。识别出 Cu-Ni 合金焊接接头的最薄弱焊接区域,为提高 Cu-Ni 合金焊接接头的安全性提供理论依据。

目前团队在 Corrosion Science 期刊上发表了文章题为“Unlocking the effect of interfacial microstructure and *Desulfovibrio vulgaris* on corrosion characteristics in copper-nickel alloy welded joint (Corrosion Science, 2024, 230: 111947)”,报道了实际海洋工程用 Cu-Ni 合金管材焊接接头的微生物腐蚀特性及机制研究。研究发现 Cu-Ni 合金焊接接头在 HAZ 的腐蚀行为与 BM 和 WZ 明显不同;*D. vulgaris* 显著加速了 Cu-Ni 合金焊接接头的电偶腐蚀,HAZ 一直作为阳极,加速了腐蚀,成为焊缝腐蚀的薄弱环节;异种金属焊接引起的 HAZ 不对称腐蚀导致 Cu-Ni 合金焊接接头存在腐蚀差异,HAZ/WZ 界面处的深度腐蚀扩展是电偶效应和 *D. vulgaris* 共同作用的结果。

E05-23

贝氏体/马氏体复相钢高周/超高周疲劳寿命预测

范玉松、高古辉

北京交通大学

贝氏体/马氏体复相高强钢具有出色的强韧性匹配,同时具备耐磨损、抗滚动接触疲劳等优势,在铁路辙叉、火车车轮、车轴等部件的应用有着广阔的前景。然而,工程部件中非金属夹杂物往往是部件疲劳失效、疲劳寿命离散的关键因素之一。为了更准确地评估材料的疲劳寿命,发展高精度、简便的高周、超高周疲劳寿命预测模型显得尤为重要。本研究通过统计高周/超高周疲劳失效断口的特征参数,分析了影响疲劳寿命的关键因素,定义了与非金属夹杂物位置相关的应力集中系数影响因子,并提出了新的疲劳寿命控制参数和疲劳寿命预测模型。研究结果表明:除加载应力、夹杂物尺寸、材料硬度外,夹杂物位置也是影响疲劳寿命的重要参数。新提出的疲劳寿命预测模型简化了疲劳寿命控制参数,能够准确预测由表面夹杂物和内部夹杂物导致的疲劳失效的疲劳寿命,且该模型无需对其进行分类。另外,该模型还具有较好的预测传统疲劳极限的能力。

E05-24

基于数字孪生的损伤连续油管剩余强度与安全评估

魏文澜, 刘超, 张睿, 程嘉瑞, 曹银萍

在连续油管全生命周期的服役过程中,由于工程作业的复杂性与随机性,使其疲劳损伤呈现沿管体轴线方向的分布呈现非均匀性,并且弯折过程管体截面的非均匀变形,导致管体材料的低周疲劳损伤在截面的不同部位呈现梯度软化特性,预测损伤后的连续油套管体材料强度是其安全评估一直以来的重要难题。本研究基于数字孪生架构,针对连续油管的作业特点,构建了适配连续油管作业过程以及全生命周期的结构变形追踪方法,使连续油管的低周疲劳损伤能够实现精准定位与持续累积。采用 Miner 线性损伤累积准则,建立了管体材料的剩余强度演化模型,进而建立了连续油管截面的梯度损伤累积模型,实现了随作业损伤连续油套管体剩余强度的高精度预测方法,为其作业安全的评估提供了有效的分析依据。

E05-25

塑性应变对管线钢应力应变行为影响及板管强度预测技术研究

陈小伟

中国石油集团渤海石油装备制造有限公司

管线钢在制管过程中的塑性应变,对材料的屈服强度会带来显著的影响,但传统的钢板屈服强度和钢管屈服强度之间的规律性较差,无法实现精准预测。本研究深入分析了影响管线钢材料屈服强度变化的因素以及制管过程中拉压塑性应变,系统研究并发现了塑性变后材料应力应变行为和其原始应力应变行为之间的关系,首次提出了基于制管应变的钢板应力表征参数以及板-管强度预测模型,大幅提高了板-管强度预测的精准度。

E05-26

316H 奥氏体不锈钢在超临界二氧化碳中的腐蚀行为研究

王志豪, 杨万欢, 钟巍华

中国原子能科学研究院

超临界二氧化碳(S-CO₂)动力转换系统具有效率高和结构紧凑的优势,在核能、火电等领域极具应用前景。材料在超临界二氧化碳中的腐蚀是影响 S-CO₂的安全运行重要原因。因此,有必要开展系统关键部位的金属材料腐蚀研究。

316H 奥氏体不锈钢是目前在核电系统中常用的金属材料之一,其在高温下具有较高的强度,是在高温高压系统中应用的理想材料,因此本文选择 316H 不锈钢作为主要研究对象,在 550℃、25MPa 的超临界二氧化碳环境开展腐蚀试验,研究了 316H 奥氏体不锈钢的长时腐蚀行为,并通过扫描电镜、透射电镜、X 射线衍射等测试手段对样品的腐蚀情况进行测试分析。结果表明,316H 奥氏体不锈钢在超临界二氧化碳中经过 3200h 腐蚀后,样品质量随着腐蚀时间增长明显增加,腐蚀 3200h 后样品的增重量为 0.34mg/cm²,对腐蚀后的样品进行表面形貌与成分分析,发现产生的腐蚀影响以氧化为主,未观察到明显的渗碳现象;样品表面发现有双层结构的氧化层,外层为形状规整且致密的氧化物质,其主要成分为富铁的氧化物,而内层富铬且有部分位置发现有镍元素的富集。

E05-27

钻井闸板防喷器腐蚀行为测试及可靠性评价

赵超杰

中石化安全工程研究院有限公司

川渝地区深层裂缝性气藏高温、高压、高含硫特征突出,开采过程中钻杆、采气树、防喷器闸板轴及

壳体等均出现过腐蚀失重、点蚀、断裂等情况，如何防腐蚀失重、防 SCC 和 SSC 断裂一直是困扰油田开发的难题。目前防喷器制造标准主要依据 API 16A 和 GB/T 20174 进行制造，但标准测试条件与川渝地区裂缝性气藏契合度不高（腐蚀分压低），且忽略了腐蚀失重（质量减少）或局部腐蚀造成的材料损坏。基于此，首次开展了适用川渝气藏环境的防喷器抗硫能力评价实验，覆盖 6 种材料、3 类失效模式（SSC、SCC、腐蚀失重）。高温高压 H₂S 腐蚀往往伴随极高的腐蚀速率，高温 H₂S 工况下存在反常的腐蚀动力学机制。基于实验结果，确定了 35CrMo 材质性能最佳，4130 材质最差的选用准则。进一步，结合 FMEA 分析方法，构建了防喷器腐蚀失效评价的数据库，为川渝工区钻井现场防喷器选型和设计提供依据。

E05-28

层流等离子体淬回火：一种改善钢轨服役性能的快速表面热处理技术

彭科铭

四川大学

等离子体选区淬火技术通过在表层制备离散分布的马氏体硬化区，可以提升钢轨的耐磨性，但硬化区在钢轨服役过程中会出现严重的裂纹和剥落，该现象可能与其组织和硬度相关。为了调控硬化区的组织和硬度，本研究提出了一种层流等离子体淬回火技术，该技术利用层流等离子体束依次完成淬火、回火热处理，以获得理想的硬化区组织和硬度。层流等离子体淬火首先被用于在钢轨表面制备出高硬度的马氏体硬化区，层流等离子体回火再对每个硬化区进行处理以进一步改变其组织和硬度。为了精准控制硬化区的回火温度，对层流等离子体回火过程开展了数值模拟，确定了层流等离子体回火的工艺参数，进而研究了回火温度对淬火区组织和硬度的影响。结果表明：随着回火温度从马氏体相变开始温度升高到奥氏体化温度，硬化区的针状马氏体析出碳化物并转变为回火马氏体，硬化区的硬度从 800 HV 降低到 450 HV。除此之外，层流等离子体淬回火技术处理每个硬化区的总时间通常不足 2 s。经层流等离子体淬回火处理后的钢轨钢，硬化区的严重裂纹和剥落现象得到消除，并且耐磨性仍然高于未处理钢轨钢。总体上，层流等离子体淬回火是一种用于快速调控钢轨表层组织和硬度的新型表面热处理技术，该技术在根据钢轨服役工况来平衡其耐磨性和滚动接触疲劳抗性方面具有良好的应用前景。

E05-29

GH3625 镍基高温合金在熔融太阳盐中的腐蚀行为研究

杨帅¹，阮晶晶¹，孙浩程¹，樊昱²，张增伟¹，张文彦¹，张华¹，杨艳²，周鑫¹，朱礼龙¹，程少逸²，江亮¹

1. 烟台大学精准材料高等研究院

2. 镍钴共伴生资源开发与综合利用全国重点实验室

太阳能是一种清洁、绿色的可再生能源。到 2025 年，太阳能预计将占总能源供给量的 45%。聚光太阳能电站的出现在一定程度上解决了太阳能大规模储存困难的问题。目前大多数运营中的聚光太阳能电站采用熔融盐进行储能，因此用于提供熔盐运输的金属管道难以避免的将面临熔盐热腐蚀的问题，这对金属材料的抗熔盐热腐蚀性能提出了极为严苛的要求。本研究对 GH3625 高温合金带材在 565 以及 600℃熔融太阳盐中的静态以及动态热腐蚀行为进行了详细的研究。同时本研究还制备了一套模拟动态熔盐腐蚀的特种设备，该设备为合金的动态熔盐腐蚀研究提供了可能。研究表明：（1）600℃时，样品的腐蚀速率高于 565℃，并且 600℃的腐蚀层较 565℃腐蚀样品厚；（2）不同温度熔盐热腐蚀后，腐蚀产物相同，均为氧化铬以及氧化镍，在 600℃形成的外层氧化镍呈现柱状晶形貌；（3）在腐蚀过程中，由于氧化铬以及氧化镍的形成，在基体与腐蚀层之间形成了贫化区；（4）由于在贫化区与基体侧发现了少量的氧化铬颗粒，并未见氧化镍颗粒，因此推断氧化铬会优先于氧化镍在合金中产生；（5）合金的最外层发现氧化镍而不是氧化铬，原因在于氧化铬在熔融太阳盐中具有较大的溶解度；（6）合金的腐蚀速率随着腐蚀时间的延长而逐渐降低，其中致密的氧化镍起了重要的保护作用。该研究为聚光太阳能电站用 GH3625 带材的进口替代提供了坚实的数据支撑。

E05-30**氢对管道力学性能的影响综述**

张航, 李汝江, 孙少卿, 江渊
华油钢管有限公司

在全球变暖和能源转型的背景下, 氢能作为公认的清洁能源, 被世界各国列入国家能源发展规划。管道输送被认为是大规模输氢的最优方式。然而, 钢管在氢气环境下易出现氢致开裂和力学性能下降等问题。本文结合氢损伤机理理论, 综述了国内外钢管在掺氢环境下的抗拉强度、延伸率、疲劳寿命、断裂韧度等力学性能变化的研究进展。在此基础上, 对输氢管道氢致裂纹的防治措施进行了总结与展望, 拟为输氢管道的研究方向和技术突破提供参考。

E05-31**输氢管道用钢管的评价方法综述**

孙宏^{1,2,3}, 韩秀林¹, 李建一^{1,2,3}

1. 中国石油集团渤海石油装备制造有限公司
2. 华油钢管有限公司
3. 河北省高压管线螺旋焊管技术创新中心

氢具有超强的渗透性, 氢的高渗透性通常会劣化与其接触的材料。国内外对于输氢用钢的氢损伤进行了大量的研究, 也制定了相关的检测和评价方法, 这些方法因为氢渗透方式、试样类型、试验条件及试验过程等差异得出的结果也存在差异, 甚至互相矛盾。本文对输氢管道用钢管的相关检测评价方法及检测数据进行了梳理。研究发现, 不同充氢条件、试样形式等对于慢应变速率拉伸试验评价结果有不可忽视的影响。建议氢环境下的慢应变速率拉伸试验根据服役工况明确试样的类型和尺寸, 或可以采用保留原始表面的试样, 并缩窄拉伸试验应变速率范围。氢气环境对与其接触的金属材料的塑性、疲劳裂纹扩展速率等有显著的影响, 宜根据材料的种类给出适当的断裂韧性指标, 对于低强度钢管宜选用 CTOD。对氢气长输管道运行时的疲劳特性进行测算, 并针对实际管道给出疲劳裂纹扩展速率及疲劳寿命等指标的验收标准。

E05-32**氢能政策、技术现状及油气公司氢能布局**

熊庆人
工程材料研究院

(1) 我国氢能政策经历了提出支持氢能产业发展、提出氢能发展路线图、首次写入《政府工作报告》、出台一系列相关政策、实施氢能产业孵化与加速计划、布局氢能产业等几个阶段, 支持氢能发展的政策力度不断加大, 并出台了全国性的氢能发展规划。(2) 论述了在氢能的制取、储存、运输和利用等环节不同技术路线的特点及技术发展; 分析了实现氢能规模化应用目前仍存在的问题, 如氢能终端消费成本高、技术成熟度不高, 部分材料、技术或部件尚未实现自给, 可再生能源电解制氢技术尚处于研发阶段, 大规模氢能储运技术不成熟, 配套设施不完善等。(3) 在绿色低碳发展取得全球共识的大背景下, 中国石油、中国石化、中国海油等油气公司在发展传统能源业务的基础上, 均结合自身的特点和优势制定了在氢能领域的发展战略、目标及布局, 并在氢气产能、加氢站、输氢管道、绿氢示范项目等方面取得了阶段性进展。(4) 油气公司应与油气主业及可再生能源的开发利用紧密结合, 在多能融合模式下加大氢能的开发利用, 加快进行氢能相关技术、材料、产品等的研究攻关, 降低产业链成本, 推动氢能产业的规模化发展, 积极推进低碳转型, 构建清洁能源体系。

E05-33**钛合金钻杆接头耐磨带试验与评价**

纪海涛, 李德伟, 左斌

中国石油集团渤海石油装备制造有限公司研究院

本文针对钛合金钻杆在应用过程中耐磨性能差的问题,开展钛合金钻杆接头覆焊耐磨带系列试验与评价的研究。对钢钻杆用非晶态耐磨带焊丝在多种工艺条件下进行敷焊耐磨带试验,并探究了 NI40 镍基合金粉末与 TiC 碳化钛粉末等粉末通过不同激光敷熔覆工艺的熔覆耐磨带试验。随后对耐磨带性能进行评价,并确定了一种适用于钛合金钻杆接头的耐磨带粉末及其加工工艺。

E05-34**超临界 CO₂ 输送用高频电阻焊管开发**

黄晓辉

宝鸡石油钢管有限责任公司

为了满足超临界 CO₂ 及含少量杂质条件下输送管材的低温高韧性,开发出低温性能优异的低碳中锰高铌热轧板卷,卷板微观组织为细长扁平的细小多边形铁素体 (PF)+少量珠光体 (P),控制 Mn/Si 比 5~7 以减少后期高频电阻焊管 (HFW) 制管时焊缝中高熔点 Mn、Si、O 夹杂物的数量和尺寸。经过适当增大 HFW 焊管机组挤压成型量到 5.5mm,优化高频焊接工艺,在生产线上开发出超临界输送用 L415M/L450M 钢级 $\phi 219.1/\phi 323.9 \times 10\text{mm}$ HFW 焊管。第三方检测表明,试制的所有 HFW 焊管新产品完全符合 API SPEC 5L PSL2 标准要求,其中管环压扁到平板相贴时候,焊接接头未见任何裂纹,表明母材和焊缝都具有高的强塑性。母材和焊接接头区域硬度均匀,最高硬度仅 224HV10。母材和焊缝在技术规格书要求的 -45°C 下 L415M 焊缝冲击功 292-351J, L450M 焊缝冲击功 177-414J,特别是管母、焊缝、热影响区的韧脆转变温度 FATT50% 都低于 -75°C,管材低温性能优异。管体和焊接接头的低温高韧性确保了 HFW 焊管具有高的抗裂纹启裂和抗延性扩展止裂能力,完全满足超临界 CO₂ 管安全输送服役要求,该 HFW 焊管也可以作为油气站场、严寒及极地区域油气输送用管得到大量应用。

E05-35**碳化物对镍基 625 合金氢致开裂行为的影响**

刘家兴, 李鉴霖, 赵明久

中国科学院金属研究所

镍基 625 合金由于具有较好的高温性能和疲劳性能被视为能够替代奥氏体不锈钢应用于复杂高压临氢环境的候选材料。但在 625 合金大规模应用之前,有必要充分了解其氢脆行为,以提高其服役过程中的稳定性。本研究通过气相热充氢方法研究了两种应变速率下碳化物对 625 合金氢致开裂行为的影响,结果表明: (1) 经过 950°C 固溶处理的试样(A1)碳化物含量比经过 1050°C 固溶处理的试样(A2)更多; (2) 充氢之后,合金均由韧性断裂转变为脆性断裂, A1 的氢脆敏感性大于 A2, 且充氢后 A1 更容易沿孪晶界开裂; (3) A1 中未溶解的碳化物降低了合金的层错能, 滑移带不容易通过孪晶界, 孪晶界应变局域化和氢浓度的增加, 导致合金更容易沿孪晶界开裂; (4) 应变速率越低, 合金氢脆敏感性越大, 但低应变速率会降低合金氢致沿孪晶界开裂的倾向。这些结果对于理解 625 合金的氢致开裂行为及其氢损伤评价具有重要意义。

E05-36**氢与钛表面的交互作用与氢脆**

王超明

中国石油集团工程材料研究院有限公司

海洋服役环境中钛合金发生应力腐蚀断裂的关键因素为氢原子与裂纹尖端相互作用而引起的氢脆。本工作利用第一原理的方法系统研究了氢和钛表面的相互作用, 包括近表面氢原子的吸附、脱附和扩散, 同

时计算了表面能随氢覆盖度的变化。结果表明,氢原子倾向于在钛表面吸附,并在近表面大量富集。氢原子脱附并形成氢气分子和扩散进入体相中的过程都消耗一定的能量。随着氢覆盖度的增加,表面能降低,解理断裂功降低,加速裂纹的扩展。氢原子在近表面的富集促进裂纹前端氢化物的形成,易导致氢化物氢脆。由于氢原子不易脱附形成氢气分子,氢气泡氢脆理论不适于钛合金。本工作为进一步研究合金原子-氢原子协同作用对表面能的影响,进而研究合金化对钛合金氢脆的影响提供了基础。

E05-37

氢化物对双相 Ti-6Al-4V 合金裂纹扩展机理的模拟研究

杨婷婷, 张川晖

北京科技大学

基于双相 Ti-6Al-4V (TC4) 合金在近海富氢环境中发生的氢致裂纹损伤问题, 本论文构建了包含氢化物、 α -Ti 相 (hcp) 和 β -Ti 相 (bcc) 的 TC4 合金的三维模型, 采用扩展有限元方法 (XFEM) 对体系内氢化物的演变规律及其对裂纹扩展的影响机理进行了研究。重点讨论氢化物的位置分布、体积分数、片层宽度与合金内部应力分布和断裂性能的关联性, 发现 TC4 合金裂纹扩展模拟高度依赖于氢化物的位置与形状。当氢化物集中分布在两相晶界或靠近晶粒边界时, 晶间的结合力被削弱, 使得合金在受到应力时裂纹容易沿晶界扩展, 诱发沿晶断裂。当氢化物存在于 α 相内部时, 氢化物会阻碍晶粒的塑性变形, 使得应力无法有效地在晶粒内部扩散, 从而造成应力集中并衍生出新的裂纹, 进而发生穿晶断裂现象。随着氢化物体积分数的增大, 较大的片层宽度导致合金内部形成连续的脆性区域, 从而使得 TC4 合金脆性升高, 此时应力会驱使裂纹跨越片层并在氢化物间扩展, 这也有利于穿晶断裂的发生。仿真结果与实验数据显示出良好的一致性, 因此为解析氢化物对 TC4 合金断裂性能的影响机制提供了重要的理论支撑。

E05-38

基于深度学习的管材失效影像数据智能化处理关键技术研究

朱丽娟, 冯春, 刘芯言, 王鹏, 吉楠, 白真权

油气钻采输送装备全国重点实验室, 中国石油集团工程材料研究院有限公司

针对石油管材失效事故多发、失效影像诊断难、效率低, 失效数据沉睡、离散, 其潜在价值未充分挖掘等痛点问题, 以油气钻采管材失效关键影像数据为基础, 开展基于深度学习的失效影像数据智能化处理技术研究, 建立典型宏观形貌、微观裂纹与微观断口等影像识别模型, 形成典型钻采管材失效影像智能化识别技术, 为引领我国油气钻采管材失效影像数据智能化高效处理、失效智能诊断等失效分析新技术发展, 实施石油管材及装备质量管控与油气资源安全高效钻采提供技术支撑。

E05-39

网格尺寸与材料性能对结构件失效预测、可靠性评估影响

王诗豪¹, 李钟尧¹, 吴雪龙¹, 苗以升², 侯清怀², 陈远路¹, 郎玉玲³, 孔德才³, 乔海波³, 马小英³, 王俊升^{2,4}

1. 北京理工大学机械与车辆学院
2. 北京理工大学材料学院
3. 中信戴卡股份有限公司
4. 北京理工大学前沿交叉科学研究院

有限元技术在结构件失效预测、可靠性评估领域的广泛应用, 缩短了产品开发周期, 降低了实验成本。但是, 仿真结果会受到材料性能不确定、几何模型构建不精确等影响, 导致方程在离散单元上的求解精度下降。因此, 应力、应变或位移这三个物理量之一并非完全受材料静力学性能参数控制, 而是一个数值仿真结果的动态累积, 而由于材料性能、网格精度原因导致的静力学分析结果的误差累积将直接影响动态性

能的预测, 比如: 失效、疲劳裂纹预测。因此, 本研究采用名义应力法对结构件进行了失效分析、疲劳寿命预测, 探究非均匀性材料力学参数、网格收敛指数(GCI)对结构件失效分析、疲劳寿命仿真的影响。通过与真实的实验结果对比, 发现低误差范围的失效预测、可靠性评估模拟方法。

E05-40

聚乙烯压力管材的非线性蠕变行为与本构模型

罗文波¹, 严竞择², 席军³

1. 长沙学院

2. 湘潭大学

3. 中国石油天然气股份有限公司独山子石化分公司

聚乙烯燃气管道在内压长期作用下的延迟破坏是聚乙烯材料的蠕变和耐慢速裂纹扩展的结果, 研究聚乙烯管材的蠕变性能具有重要意义。通过不同温度(0°C-80°C)和应力水平(2MPa-10MPa)下的2小时短期蠕变测试, 分析了高密度聚乙烯燃气管材的线性和非线性蠕变性能, 确定了线性蠕变向非线性蠕变转换的应力-温度条件, 结果表明, 线性-非线性转换应力随温度的升高而线性降低。基于单积分非线性黏弹性本构理论, 给出了两种形式的蠕变本构模型: 对数型蠕变本构模型和幂律型本构模型, 采用这两种本构模型分析了PE管材的短期蠕变性能, 并预测了长期蠕变行为, 预测结果与200小时长期蠕变实验吻合较好, 表明这两种黏弹性蠕变本构模型均能有效地描述和预测聚乙烯压力管材的蠕变行为。

E05-41

中熵合金氢致损伤与抗氢损伤设计

孙彬涵, 成慧杰, 周晶晶, 姚宁, 陆体文, 张显程, 涂善东

华东理工大学

The recently emerged multicomponent (or medium/high entropy) alloys have generated considerable excitement globally in the last 10 years because of their excellent mechanical and functional properties, particularly in terms of strength-ductility combinations that can surpass most other metallic materials. Unlike more conventional materials like high-strength steels, results become controversy pertaining to whether such type of materials is resistant to H embrittlement or not. Detailed studies on the H embrittlement mechanisms and microstructural designing methods to against H embrittlement in medium/high entropy alloys are also scarce. Here in this talk, we first demonstrate that similar to other metallic materials, typical FCC medium/high entropy alloys (e.g. equi-molar CrCoNi, VCoNi and FeMnCrCoNi alloys) are sensitive to H embrittlement particularly when their strength approaches ~1000 MPa. We then focus on the equi-molar CoCrNi alloy and unravel its H embrittlement mechanisms. It is found that H results in a more intensive dislocation planar slip (or stacking fault formation) in this alloy. The resulting stronger dislocation-grain boundary interactions give rise to H-induced cracking along grain boundaries. Based on this understanding, two microstructure design approaches are proposed and verified to mitigate H embrittlement of this alloy. These approaches include a) the introduction of coherent γ' (L12) ordered precipitates, which serve to trap H on one hand, and on the other hand, to hinder dislocation planar slip and decrease the number of pile-up dislocations at grain boundaries; b) the architecturing of the microstructure heterogeneity from specimen surface to the core, which serves to inhibit H-induced crack growth at the near surface layer. Although demonstrated in the CoCrNi alloy, these H embrittlement mitigating methods might also be extended to some mass-produced materials including austenite stainless steels and Ni-based alloys.

E05-42

Study on the mechanism of reducing casing deformation for low elastic modulus cement sheath and the evaluation of casing deformation under shear conditions

Xueli Guo, Hua Zhang, Yongjin Yu, Xiaobing Zhang, Shunping Zhang
CNPC Engineering Technology R&D Company Limited

Fracturing fluid is very likely to penetrate into faults through natural fractures existing in the formation in the process of large-scale fracturing operation. The mechanical properties of the fault plane are easily affected by fracturing fluid, resulting in casing deformation. In this context, the influence of the elastic modulus of cement on casing stress is studied to reveal the mechanism of casing deformation under the condition of formation slippage. Based on the principle of "high-elastic material reducing modulus + natural nanotube reinforcing cement strength + new fiber preventing crack", a low elastic modulus cement slurry was developed. The unconventional wellbore composite load loading test system was used to evaluate the ability of reducing casing deformation for the cement with low-elastic-modulus. The results showed that: (1) The low elastic modulus can significantly improve the stress environment of the casing, alleviate the deformation degree of the casing. Meanwhile, it can provide a certain buffer space for the deformation of the casing after the glass beads are broken, which further enhances the ability of alleviating the casing deformation. (2) The density of cement slurry ranges from 1.30 g/cm³ to 1.50g/cm³ with the elastic modulus ranging from 3.2 GPa to 4.8GPa under the condition of 140 °C. The cement strength can be more than 14MPa and the thickening time can be adjust linearly from 200 min to 500 min, which will meet the needs of cementing operation for shale gas well. (3)The casing deformation was 0.4% for the cement with the density of 1.30g/cm³, which verified that the cement slurry had a good casing mitigation ability. It can provide technical support for the safe service of casing in shale gas fracturing wells, and ensured the safe and efficient exploitation of shale gas.

E05-43

操作温度对管子与管板胀接接头性能的影响

张莹莹

辽宁石油化工大学

换热管与管板接头的强度影响换热器的性能和运行周期,为了验证接头在实际运行过程中频繁受热冷却的性能表现。对同种材质的 Q345R+10#和异种材质的 Q345R+S30403 的接头分别采用不同的方法进行胀接。通过理论计算胀接压力,使每组接头试件施加相同胀接压力及相近的胀度,对比同种材质 Q345R+10#接头在室温、100、200、300°C的拉脱应力以及 Q345R+10#和 Q345R+S30403 接头在热振前后的密封性及拉脱应力。本文主要介绍了换热器管与管板的接头之间的胀接工艺。采用机械、液压胀管机进行胀管实验,通过对接头试件进行热处理和热振处理,模拟设备运行温度。分析接头的胀接质量和胀接性能,以确定最佳胀接压力,检验接头的密封性能和抗拉脱性能,为类似换热器的换热管与管板的接头的加工制造提供参考依据。

E05-44

超高强度 X100 φ1219×17.8mm 厚壁螺旋埋弧焊管开发

牛爱军^{1,2}, 席敏敏^{1,2}, 韦奉^{1,2}, 王磊^{1,2}, 赵红波^{1,2}

1. 宝鸡石油钢管有限责任公司

2. 中油国家石油天然气管材工程技术研究中心有限公司

采用管道输送石油或天然气是最经济、最安全的运输方式。随着天然气用量的不断增加,世界各国的管道铺设量正在迅速增加。随着管线钢管强度级别的提高,在同样输气量的情况下,管材壁厚可以减小,从而可以节省用钢量,可减少管线建设的投资费用。通过技术创新及采用更高压力和更高强度的管道是降低天然气长距离输送成本最有效的途径。采用 X100 钢级及以上超高强度管线钢管能够以更高的压力传输天然气,提高管道输送效率,降低天然气输送的总成本。针对高压长距离油气输送管线的发展带来的对高强

度钢管的巨大需求,采用合理的低碳微合金化设计,通过 Nb、Mo、B 和 Ni 等合金元素的固溶强化和沉淀强化等作用,配合适当的控轧控冷工艺以及先进的超纯净冶炼等技术和措施,试制开发出强度和韧性兼备的 X100 17.8mm 厚壁管线钢板卷。通过优化设计螺旋焊管的成型工艺、焊接材料匹配及焊接工艺参数,试制开发出 X100 $\phi 1219 \times 17.8$ mm 厚壁螺旋埋弧焊接钢管,通过对试制钢管的化学成分、力学性能和环焊工艺适应性等进行性能评价,试验结果表明开发出的 X100 $\phi 1219 \times 17.8$ mm 厚壁螺旋埋弧焊管具有高的强度和优良的低温冲击韧性,对陆上管道敷设典型现场焊接工艺具有适应性,钢管综合性能优异。

墙报

E05-P01

石油钻杆 Ti-6Al-4V-0.5Mo-0.5Zr 钛合金管材微观组织调控及强韧化研究

彭书贤, 刘一夔, 刘会群

中南大学材料科学与工程学院

由于具有高比强度、低密度、耐腐蚀、抗疲劳等优异的综合性能,钛合金正逐渐取代传统的钢和镍基合金成为制备石油钻杆的重要材料。为了应对油气井下的复杂交变载荷作用,钛合金不仅需要良好的疲劳性能、高强度,还要具有一定的冲击韧性,以避免突然断裂。然而钛合金钻杆温轧成型后强度和冲击韧性较低,无法匹配服役要求。本文以石油钻杆 Ti-6Al-4V-0.5Mo-0.5Zr 合金管材为对象,通过改变热处理条件,设计了不同组织特征参数的双态组织。利用 SEM、EBSD 和 TEM,分析了双态组织分别在拉伸和冲击加载下的变形行为。研究发现,拉伸加载时等轴 α 相增多和小角度晶界减少都有利于增加钛合金的塑性。此外,针状二次 α 相(α_s)的宽度越小,其起到的强化作用越明显。在冲击过程中,等轴 α 相可以缓解应力集中,抑制裂纹萌生。同时, α_s 相越粗, β 转变组织(β_t)抵抗裂纹扩展能力越强。另外,拉伸孪晶的激活能够消耗更多的冲击能量,释放 α_p/β_t 界面处的应力集中,提高冲击功。最终采用“890℃/0.5h/空冷+500℃/8h/空冷”的热处理工艺得到“较多等轴 α 相+小角度晶界含量少+ α_s 相尺寸适中”的双态组织,协同提高了 Ti-6Al-4V-0.5Mo-0.5Zr 合金的强韧性。本文系统分析了钛合金微观组织中各相组分演变对强度和冲击韧性的影响,为提高石油钻杆用高强 $\alpha + \beta$ 钛合金管材的冲击功提供了可行的工业热处理方案和微观组织调控思路。

E05-P02

Nb 合金化对一种四代核电用镍铁基高温合金组织和持久性能的影响

王佳祺^{1,2}, 秦学智³, 伍金荣^{1,2}, 吴云胜¹, 管现军¹, 周兰章¹

1. 中国科学院金属研究所 中国科学院核用材料与安全评价重点实验室

2. 中国科学技术大学 材料科学与工程学院

3. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 中国科学院海洋关键材料重点实验室

镍铁基高温合金具有优异的力学性能、抗氧化腐蚀和抗辐照性能,成为四代核电堆堆内构件的候选材料。反应堆面临着高温、多重应力、强腐蚀介质和辐照等苛刻工况,一些构件在成形制造过程中还要经历高温长时的表面陶瓷化处理以提高抗服役损伤安全性,这对材料的高温组织及性能稳定性提出了更高要求。基于此,本工作提出 Nb 合金化策略,调控相析出行为,细化并稳定晶粒尺寸,提升力学性能。然而,基于热-力-腐蚀-辐照多场环境效应的镍铁基高温合金组分调控准则和高温稳定机制目前尚无认知。因此揭示 Nb 对相析出优化、晶粒尺寸热稳定性和强韧化机制的影响机理具有重要意义,能够为核用镍铁基合金成分设计提供理论基础。

以自主研发的镍铁基合金 GH1059 为研究对象,通过对不同 Nb 含量(0~1.0%,质量分数)的合金显微组织定量表征与 750℃/135 MPa 持久性能测试,研究了 Nb 对碳化物、晶粒特征及持久性能的影响。结果表明,Nb 合金化显著增加 MC 型碳化物含量和平均尺寸,强烈抑制 Cr、Mo 元素向晶界偏聚,进而优化相分布和晶界形貌;Nb 对晶粒特征产生双重作用,一方面,促使粒子促进形核机制发生细化晶粒尺寸,

通过形成 Nb 原子溶质拖拽和 NbC 钉扎效应提高晶粒热稳定性, 使晶粒长大激活能由 195.8 增加至 293.7 kJ/mol (Nb 的含量为 0 和 0.5%); 另一方面, Nb 添加使层错能增加阻碍孪晶形核, 同时抑制孪晶相关区域 (TRD) 演化, 降低孪晶含量。Nb 对持久性能的有益作用随着其含量的增加先增强后减弱, 添加适量的 Nb (含量为 0.5%) 显著提高持久寿命, 一方面 Nb 增加固溶强化效果, 另一方面 Nb 促进晶内纳米 NbC 析出和晶界 M23C6 颗粒化, 降低孔洞形核及长大速率; 此外通过延缓晶粒<111>取向旋转和硬取向晶粒产生进程, 改善变形协调能力。

综上所述, 本工作提出 Nb 合金化技术应用时的推荐 Nb 含量为 0.5%, 为堆内大型构件均匀组织结构和高性能稳定性一体化控制提供了新思路, 已助力核心机构实现国产化替代。

E05-P03

Ti/Al 异种金属 CMT 焊接接头腐蚀行为的研究

徐灏, 曹睿, 麻相龙

兰州理工大学

Ti/Al 异种金属复合结构在金属结构轻量化的应用中具有广泛的应用前景。采用 CMT 焊接技术使用 ER4047 填充金属实现了 Ti-6Al-4V 钛合金和 6061 铝合金的焊接, 并通过 XPS, LEIS 以及 SKPFM 等技术对焊接接头的腐蚀行为及机理进行了表征。结果表明: 由于微观组织不均匀, 接头发生了以点蚀为主的局部腐蚀。Ti/WM 界面具有较高的腐蚀敏感性, 形成了较深的腐蚀沟槽。这归因于界面上金属间化合物(IMC)与 WM 中 α -Al 之间的微观电偶效应以及 Ti-BM 和 WM 之间的宏观电偶效应的共同作用所致。

E05-P04

Failure analysis of sucker rod in heavy oil thermal recovery

王书明, 王梦圆, 郭小萍, 杨中元, 邓巧娟, 章程

中国有研集团

The failed sucker rod in heavy oil thermal recovery was analyzed systematically. The results showed that, the main reason of sucker could not be placed down into the barrel after well blockage was the diameter increasing as oxidizing and sulfurizing at the surface of Ni-Cr-Fe anti-corrosive coating. The outer corrosion layer consisted of Ni₃S₂, Ni₇S₆, and the inner layer consisted of FeCO₃ and NiCr₂O₄. The volume of corrosion expanded significantly compared with coating. Besides the water steam and oil with high pressure and temperature stuffed in the well, the reasons of severe corrosion still included poor ability of the anti-corrosive coating, which was hypoplastic, porous, flabby, incomplete fusing and elements segregating.

仅发表论文

E05-PO01

Effect of damage to the outer protective layer on the pressure resistance of flexible composite pipes

Mantong Gao^{1,2,3}, Miaomiao Zhao^{1,2,3}, Linyun Xian^{1,2,3}, Ayu Zhang^{1,2,3}, Hang Liang^{1,2,3}, Yaming Liu^{1,2,3}, Dejun Liu^{1,2,3}, Feng Chen^{1,2,3}

1. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods Co., Ltd

2. CNPC Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd

3. Shaanxi Province Key Laboratory of High Performance Coiled Tubing

The outer protective layer of flexible composite pipe is susceptible to external drag, ground friction, collision, shoveling and so on, which leads to breakage and cracking during field construction and use, thus affecting the pressure resistance performance of the pipe. In this work, DN50mm PN6.4MPa flexible composite pipe for oil

transmission and DN70mm PN25MPa flexible composite pipe for water transmission provided by an oilfield oil extraction plant are taken as the research object, and the design of damage to the outer protective layer and the 200h hydrostatic pressure test are carried out to analyze and study the pressure resistance. The results showed that the residual burst strength of DN50mm PN6.4MPa flexible composite pipe for oil transmission decreased from 28.72MPa to 23.96MPa, and the residual burst strength of DN70mm PN25MPa flexible composite pipe for water transmission decreased from 96.11MPa to 79.57MPa. The deeper the damage to the outer protective layer of the flexible composite pipe, the greater the deformation of the composite pipe, and the more obvious the attenuation of pressure resistance.

E05-PO02

L360MH OD610mmx14.3/15.9mm 输氢直缝埋弧焊管开发

赵志伟

中国石油集团渤海石油装备制造有限公司巨龙钢管公司

在国内外都大力发展氢能的大环境下，特别是我国提出“双碳”目标的时代背景下，输氢管道发展进入快车道，设计建设方兴未艾。由于高压氢气与管道内壁金属发生杂化效应解离为氢原子，氢原子随之吸附并进入金属内部与金属基体发生交互作用，导致纯氢/掺氢管道运行时会发生氢脆、氢致开裂、氢鼓泡、疲劳断裂等多种形式的氢损伤，所以对于输氢管线钢管控制其与氢环境的相容性至关重要。本文从原材料钢板组织成分设计、生产装备改进提升及制管工艺研究等三个方面介绍了一种 L360MH OD 610mm×14.3/15.9mm 输氢直缝埋弧焊管研发过程，对该种钢管的力学性能及氢环境相容性进行测试，并对输氢管道直缝埋弧焊管应关注的内容提出了建议。

E05-PO03

Research Progress on High Temperature Resistance of Titanium Alloy Material for Oil Drill Pipe

Weiwei Zhang^{1,2}, Chun Feng³, Kai Zhang², Lei Wang¹, Lijuan Zhu², Hangyu Yu^{1,2}

1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University

2. China National Petroleum Corporation Tubular Goods Research Institute

3. CNPC Bohai Equipment Manufacturing Co., Ltd

With the gradual depletion of shallow oil and gas resources, the number of ultra-deep wells and extra-deep wells will gradually increase, and the more and more demanding oil drilling environment puts forward new requirements for oil drilling rod materials, titanium alloy has unique advantages in oil drilling rods due to its high specific strength, corrosion resistance and anti-fatigue properties, etc. However, in the application of ultra-deep wells and extra-deep wells in high temperature environments, the titanium alloy's thermal stability is poor and the thermal strength is lower than that of steel. However, in the high temperature environment of ultra-deep wells and extra-deep wells, the thermal stability of titanium alloy is poor and its thermal strength is lower than that of steel drill pipe. Combining the research results of high temperature performance of titanium alloys at home and abroad, this paper summarises the research progress of high temperature performance of titanium alloys, starting from the working conditions and service performance requirements of titanium alloys used for oil drilling rods. Firstly, it analyses the influence of added alloying elements on the high temperature performance of titanium alloys, such as the influence of different α -phase, β -phase stabilizing elements, neutral elements and rare earth elements on the thermal strength and thermal stability of titanium alloys, secondly, it summarises the influence of different processing techniques on the thermal stability and thermal strength of titanium alloys. Secondly, the effects of different processing techniques on the high temperature resistance of titanium alloys and the research progress are summarised. Finally, the future development direction of improving the high temperature resistance of titanium alloys for oil drilling rods is expected.

E05-PO04**Safety Evaluation and Remaining Life Analysis of Underground Gas Storage String**Shasha Yang¹, haibo liu², Jiakun YANG², Yanwei ZHU², ping JIANG², Weiping JIAO², Jun HU²

1. CNPC Tubular Goods Research Institute

2. Zhongyuan gas Storage Co. Ltd.

Aiming at the safety service of injection and recovery well tubular string of gas storage, based on the requirements of relevant standard and measured inner diameter and wall thickness of string, etc. The residual strength safety evaluation and remaining life analysis on the injection and recovery wells in a gas storage were conducted. The safety analysis of string performance, internal pressure resistance, collapse resistance, tensile strength and compressive strength were included. At the same time, various extreme load conditions and actual operating conditions parameters were considered. The safe operation range of control parameters for the gas storage is established by adjusted annular pressure parameters and repeated calculation. The research not only makes suggestions of safe running of the gas storage, but also provides an example for the safety evaluation of other gas storages.

E05-PO05**Current Research Status on Corrosion Behavior of Titanium Alloy Materials For Energy Extraction**Hangyu Yu^{1,2}, Chun Feng³, Lijuan Zhu², Kai Zhang², Xiaoyong Zhang¹, Weiwei Zhang^{1,2}

1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University

2. China National Petroleum Corporation Tubular Goods Research Institute

3. CNPC Bohai Equipment Manufacturing Co., Ltd

For a long time, the corrosion of metal materials is one of the common failure forms of metals, so it is an important means to ensure production safety and reduce economic losses by clarifying the corrosion behavior of metal materials in different service environments. Due to its high strength, low density, excellent corrosion resistance and fatigue resistance, titanium alloy materials have attracted extensive attention in the energy extraction industry, and are expected to solve the corrosion failure problem under complex and harsh working conditions. This paper firstly describes the development process of titanium alloy materials used in energy development, and introduces various titanium alloy pipes and equipment used in energy development. Secondly, the corrosion mechanisms of hydrogen embrittlement corrosion, stress corrosion, crevice corrosion and galvanic corrosion of titanium alloy materials were summarized, and the effects of microstructure on hydrogen embrittlement, electrochemistry, alloy composition, hydrogen-induced cracking, microstructure (including texture in alloys) on stress corrosion, electrode potential, polarization, temperature and other effects on galvanic corrosion, and the effects of alloying elements, environment and geometric size on crevice corrosion were described. Finally, the failure analysis and further application of titanium alloy materials used in future energy development are prospected.

E05-PO06**某油田套管应力腐蚀开裂失效分析**

吉楠, 吴峰, 刘旭, 王鹏

中国石油集团工程材料研究院有限公司

某油田注气井取套过程中发生套管断裂失效事件, 通过宏观形貌分析、材料理化性能检测, 扫描电镜及能谱分析、射线衍射分析等方法查找了套管断裂失效原因。结果表面, 失效套管的材料理化性能试验结果满足标准要求, 套管断裂失效为应力腐蚀开裂, 失效原因主要为注入气中混入硫化氢气体, 在井下形成

了含硫腐蚀环境, 套管材质为碳钢, 与含硫腐蚀环境不匹配, 在拉应力与腐蚀介质的综合作用下发生应力腐蚀开裂。

E05-PO07

Risk analysis under different injection and production conditions in UGS well

zhaoxi Shen¹, CHAO ZHANG², Hong jie LI³, Shasha YANG¹

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Equipment, CNPC Tubular Goods Research Institute

2. The 1st Gas Plant of PetroChina Changqing Oilfield Company

3. Tianjin Gas Storage Branch, PetroChina Dagang Oilfield Company

The annular pressure of gas storage which located in north of China is gradually increases during UGS well shut-in and in the early stage of gas injection or production, especially gas production. It brings confusion and difficult to management. To explain the reason of annular pressure increase, 2D FEM axial-symmetry model was established. The temperature distribution field was analyzed at different flow rates when gas injection and production. different operating parameters in gas injection and production. The top temperature of wellbore increases, the bottom decreases when inject gas. While the whole temperature of wellbore always increases when produce gas, The closer to the top of wellbore, the greater the pressure rise. The faster the flows, the bigger the temperature changes. However, the change of flow rate will get stable finally. The altitude of the gas and the initial annulus pressure will also increase the existing pressure. The research provides technical support for annulus pressure management of UGS well and gas injection and reasonable production parameters setting.

E05-PO08

Φ73.02×5.51mm 非调质 N80 旧油管再制造过程 水压试验开裂失效原因分析

贾盼龙^{1,2}, 刘文红^{1,2}, 贾春龙³, 任世翔⁴, 李东风^{1,2}, 王蕊^{1,2}, 李京川^{1,2}, 杨力能^{1,2}

1. 中国石油集团工程材料研究院有限公司

2. 国家市场监督管理总局重点实验室(石油管及装备质量安全)

3. 陕西省天然气股份有限公司

4. 长庆油田第一采油厂

某批次非调质 N80 钢级 Φ73.02×5.51mm 油管进行修复再制造水压试验过程中发生多起开裂失效事件。选取其中具有共性特征的一根失效油管进行外观检测、无损检测、化学成分分析、力学性能和金相组织检测, 通过结果分析, 油管断口电镜分析判断此油管试压开裂为脆性断裂, 由于管体晶粒粗大且存在魏氏体, 使得钢的力学性能, 特别是冲击韧性和塑性显著降低, 提高钢的脆性, 使钢容易发生脆性断裂, 而在试验过程中, 加之夹持力存在应力集中, 使其承压能力明显下降, 在压力上升过程中发生脆性开裂失效, 最终结合非调质 N80 热处理及后期使用过程给出合理化建议。

E05-PO09

A Review of Research Progress in Image Segmentation Technology

Lijuan Zhu^{1,3}, Mingsong Wu², Hongyu Wang², Xinyan Liu^{1,3}, Chun Feng^{1,3}, Peng Wang^{1,3}

1. State Key Lab for Performance and Structure Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials, Tubular Goods Research Institute of China National Petroleum Corporation

2. Transportation Engineering College, Dalian Maritime University

3. Key Laboratory of Petroleum Tubular Goods and Equipment Quality Safety for State Market Regulation

During the services of engineering materials and structural components, all kinds of corrosion, fatigue, fracture, wear, and other failures will occur due to the inappropriate selection of materials and structures, the

external environment's corrosive medium and loading. Failure image diagnosis is the key basic technology of failure analysis. The current failure image intelligent diagnosis technology has become a research hotspot, and the development and application of high-precision image segmentation technology is a key path to enhance failure mechanism identification and failure analysis. In this paper, the research progress of image segmentation technology is mainly discussed. Both the working principles, technical characteristics, and deficiencies of traditional image segmentation technology and deep learning-based image segmentation technology are outlined. The important roles of deep learning models such as CNN, FCN, U-Net, etc. in improving the precision and accuracy of image segmentation are elaborated in detail. In the end, the prospects for the application of image segmentation technology in the field of engineering failure analysis are highlighted.

E05-PO10

不同道次热压缩对 TC18 合金微观组织的影响研究

范存铁, 孙熙尧, 李峰

南京工业大学 材料科学与工程学院/新材料研究院

TC18 钛合金是一种典型的 $\alpha+\beta$ 型钛合金, 名义成分为 Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe, 由于其高强度、高塑性和优良的耐蚀性, 在海洋工程设备结构件等具有广泛的应用。本文采用 Gleeble 热模拟试验机对 TC18 合金在 $\alpha+\beta$ 相区进行热压缩实验, 通过改变压缩过程中单道次的应变量, 研究了不同压缩道次(一道次、二道次、三道次和四道次)对 TC18 合金微观组织的影响规律。研究结果表明, TC18 合金的流变应力在较小的应变范围内急剧增加至峰值, 并随着应变量的增加, 应力逐渐下降最终趋于平缓。随着压缩道次的增加, 粗大的板条状 α 逐渐破碎, 球化率逐渐增加, 且 α 相的大角度晶界(HAGBs)含量增加, 位错密度降低。在四道次热变形过程中, 单道次应变量较小, 位错累积量较少, 道次间保温过程经历的静态回复过程消耗位错, 静态再结晶过程小角度晶(LAGBs)向 HAGBs 迁移。经过热压缩后, TC18 合金硬度降低, 且经过三道次压缩后 TC18 合金具有较高的硬度。

E05-PO11

基于图像识别技术的原油含水率精准测量方法

贾盼龙^{1,2}, 贾春龙³, 冯广军⁴, 李东风^{1,2}, 韩军^{1,2}, 王蕊^{1,2}, 刘文红^{1,2}

1. 中国石油集团工程材料研究院有限公司

2 国家市场监管重点实验室(石油管及装备质量安全) 陕西

3. 陕西省天然气股份有限公司

4. 长庆油田第一采油厂

现有的原油含水率在线测量技术和便携式井口含水测量技术均采用射频法等间接测量原理, 测量准确性不高, 目前油田原油含水测量仍需人工取样化验法完成。本文研究了原油分离后油水图像灰度差异特征, 证实了依据图像灰度计算原油含税率的可性, 并针对油田生产现状提出基于图像识别技术的原油含水率精准测量方法, 研制开发一种便携式井口含水精准测量装置, 参照人工含水分析流程, 采用间歇采样模式, 加热、搅拌、沉淀、数据读取、数据传送等功能自动实现, 彻底替代传统的人工采样、送样、人工化验, 结果记录等流程, 相比现有便携式测量装置和在线含水测量方法具有更高的准确性, 同时避免样品运送和人工检测分析, 解放劳动力, 避免人为因素造成的数据偏差, 且可大幅度提高采样分析频率, 提升数据可靠性。

E05-PO12

Ti-Al-V-Mo-Zr 合金中大尺寸 α 集束诱导疲劳裂纹扩展抗力

刘一夔, 彭书贤, 刘会群

中南大学 材料科学与工程学院

对于石油钻杆用钛合金，疲劳裂纹扩展抗力是油气开采行业关注的重要性能之一。在本工作中，我们系统的研究了双态、等轴、片层、魏氏组织钛合金的疲劳裂纹扩展行为并采用 SEM 和 EBSD 进行表征。结果表明，相比于双态、等轴、片层组织合金，含有大尺寸 α 集束的魏氏组织合金具有更高的屈服强度（877MPa）和适中的延伸率（9.3%）以及更高的疲劳裂纹扩展抗力。在裂纹扩展过程中，大尺寸的 α 集束能有效导致裂主裂纹的片层并产生大量长且多的二次裂纹消耗主裂纹扩展的能量。此外，在主裂纹路径上的一些大尺寸 α 集束中会偶尔出现 $\{10\cdot12\}<10\cdot1\cdot1>$ 拉伸孪晶，改善了裂纹尖端的塑性变形能力，导致疲劳裂纹扩展速率降低。

E05-PO13

服役环境下油气混输泵性能及其损伤行为研究

孙殿新

中国石油集团渤海石油装备公司

油气混输泵在实际输运过程中，常常受到各个因素的影响，导致混输泵性能降低、寿命缩短、甚至发生泄漏等风险。为了掌握各个因素对油气混输泵的影响规律，本文从砂砾对油气混输泵磨损的影响、混输泵密封性能以及含气率对油气混输泵性能的影响三个方面展开研究，通过研究发现：原油中砂砾的存在易引起混输泵叶轮和导叶出现较大磨损，且砂砾直径越大磨损越严重，砂砾的存在还易引起混输泵密封失效，导致介质泄漏；还发现含气率越大混输泵的增压性能越低，且稳定性也逐渐降低。研究结果对改善油气混输泵性能、提高其使用寿命具有一定的参考意义。

E05-PO14

服役环境下分流叶片设计对轴流式多相混输泵性能的影响

孙殿新

中国石油集团渤海石油装备公司

轴流式多相混输泵在气液工况下极易产生叶顶泄漏涡和气液分离，其现象直接导致泵的性能下降，从而影响输送效率。针对上述问题，特采用分流叶片设计法对其设计，并对分流叶片前缘进行几何形状改型，对比分析不同改型方案对叶轮做功性能及介质受力的影响。研究表明：三种分流叶片前缘形状下的模型扬程均高于原模型，其中以曲率连续方案的扬程最大为 10.85m，扬程和效率相比原模型分别提高 31.83%和 2.58%。当分流叶片厚度被削减，分流叶片前半部抑制介质分离的能力得到提升，液相在分流叶片吸力面的附着力被增强。受带状泄漏涡被抑制影响，曲率连续方案下叶轮内介质流动紊乱程度低，该抑制量化为叶轮进口液相减阻 5.07%和气相减阻 3.80%。研究结果为服役环境下后续多相混输泵的优化设计提供了重要的参考。

E05-PO15

Recent Progress on Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Alloys

Zhengyan Lai

University of Science and Technology of China

Titanium alloy (Ti-alloy) is characterized by low density, high strength, excellent temperature resistance, corrosion resistance, and fatigue resistance, and it is considered one of the most important metal structural materials, second only to steel and aluminum alloy. With the improvement of people's understanding of its application and advancement in material technology, titanium alloy has gradually expanded from military and aerospace fields to metallurgy, machinery, the medical field, and especially oil, chemical, and other energy production fields. However, the formation of microstructure under different conditions and the interdependent relationship between properties and microstructure still need to be studied.

Meanwhile, thanks to the excellent performance of machine learning in data classification, information mining, and other aspects, people have begun to use machine learning to evaluate the impact of various input parameters on material properties. This includes analyzing microstructure, predicting material performance, optimizing processing parameters, and exploring other related directions. These efforts can provide new tools for the development and application of new materials, accelerating research and development while reducing costs.

In this article, we review the theoretical research progress in the field of titanium alloy microstructure and mechanical properties over the past three years, including related areas of fatigue fracture and failure. We also summarize various research methods and optimization strategies, including the utilization of machine learning. This work can provide a reference for the development of new alloys.

E05-PO16

175MPa 套管头产品材料性能分析

国聪, 贾振宇, 王剑飞

渤海装备辽河热采机械公司

本文的研究背景是基于万米深井对特高压套管头产品的迫切需求, 针对适用于 175MPa 特高服役压力的套管头产品关键零件选材难题开展的。本文分析了 175MPa 套管头产品在高压力工况下的材料性能, 重点讨论了本体承压件(套管头四通本体)和控压件(芯轴式悬挂器)的服役表现。研究选用 4130 合金钢作为本体材料, 718 镍基合金作为控压件材料。通过设计校核及材料初选、材料性能试验、样机试制及样机承压、承载能力试验, 评估了这些材料在高压环境下的承压和承载能力。研究结果显示, 4130 合金钢具备良好的力学性能和足够的韧性, 适合用于套管头的承压件; 718 镍基合金则表现出卓越的强度和耐腐蚀性能, 适合用于控压件。样机试验进一步验证了两种材料在 175MPa 高压工况下的可靠性和稳定性。本文的研究为高压工况下的套管头设计和材料选择提供了理论基础和实验数据支持。

E05-PO17

复相化处理对钻杆钢的强韧性匹配的影响

王显林

中国石油渤海装备渤海能克钻杆有限公司

金属材料的强度和韧性通常是互为消长的关系, 为了保证钻杆保持高强度的同时提高材料的韧性和塑性, 充分发挥材料的潜力, 需要探索具有高强度、高塑性与高韧性的新型钻杆组织。本文通过现有高性能钻杆材料进行复相组织处理, 获得了良好的强韧性匹配。通过复相组织微观组织特征、力学性能、疲劳性能以及透射电镜原位拉伸试验结果分析, 对复相组织特征与微裂纹萌生、扩展等相关性进行了较为深入的研究, 从微观组织力学行为角度解释宏观的强韧性匹配性。分析结果表明: 马氏体/贝氏体复相组织中, 贝氏体的引入具有细化晶粒的作用, 贝氏体相优异的延性可以显著提高钻杆材料抗裂纹扩展能力。对石油钻杆材料进行马氏体/贝氏体复相化处理可以显著提高钻杆的冲击韧性, 实现更加合理的强韧性匹配和更高的抗疲劳性能, 是石油钻杆实现“先漏后破”的可行途径之一。

E05-PO18

A Review of Research Progress in Image identification Technology

Lijuan Zhu^{1,2}, Xinyan Liu^{1,2}, Chun Feng^{1,2}, Peng Wang^{1,2}

1. State Key Lab for Performance and Structure Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials, Tubular Goods Research Institute of China National Petroleum Corporation
2. Key Laboratory of Petroleum Tubular Goods and Equipment Quality Safety for State Market Regulation, Xi'an 710077, China

The accurate identification of failure images is a core step in failure analysis, with traditional methods heavily reliant on expert experience. These approaches often yield low-efficiency feature analysis and conclusions with high dispersion, significantly affecting the precision of failure diagnosis. This article delineates the transition from conventional methods to deep learning-based image recognition techniques, with a particular emphasis on the role of intelligent image recognition technology in enhancing both the accuracy and efficiency of image recognition. Its application prospects, especially in the failure analysis of petroleum pipes and equipment, are thoroughly discussed. The introduction of intelligent diagnostic technology for failure images is poised to provide a scientific basis and technical support for realizing intelligent failure diagnosis. It holds the promise of spearheading an innovation in the health management technology for oilfield equipment operations.

E05-PO19

外加电位与低应变速率双重作用下 X80 管线钢的应力腐蚀行为

韩燕

中国石油集团工程材料研究院有限公司

采用慢应变速率拉伸实验(SSRT)并结合断口形貌观察,开展了不同外加电位下 X80 管线钢母材和焊接接头在近中性模拟溶液(NS4)中的应力腐蚀开裂行为研究。随着外加电位的负移, X80 管线钢母材和焊接接头的应力腐蚀敏感性指标均呈现增加的趋势。同一条件下,焊接接头的断后延伸率损失较母材高 2%~6%,焊接接头的断面收缩率损失较母材高 10%~14%,焊接接头的 SCC 敏感性大于母材。当外加电位为-1300mV 时, X80 母材试样断口形貌为解理断裂,当外加电位为-1100mV 时, X80 焊接接头试样断口形貌为解理断裂。根据插值法计算,当极化电位在-970mV~1050mV 之间时, X80 母材存在开裂风险,当极化电位负于-1050mV 时, X80 母材发生氢脆的风险较高;当极化电位在-890mV~960mV 之间时, X80 焊接接头存在开裂风险,当极化电位负于-960mV 时, X80 焊接接头发生氢脆的风险较高。随着外加电位负移, X80 管线钢母材和焊接接头试样在 NS4 溶液中的应力腐蚀敏感性均呈增大趋势,且焊接接头的应力腐蚀敏感性大于母材,试样拉伸断口形貌由韧性断裂向脆性断裂转变;在本研究条件下, X80 管线钢的最负保护电位不应超过-960mV。

E05-PO20

退火温度对 Ti-Al-V-Mo-Zr 系钛合金钻杆材料强韧性的影响

张凯¹, 冯春², 朱丽娟¹, 马栋¹, 张维维¹

1. 中国石油集团工程材料研究院有限公司 油气钻采输送装备全国重点实验室
2. 中国石油集团渤海石油装备制造有限公司

本文针对已工业化应用的 Ti-Al-V-Mo-Zr 系钛合金钻杆材料,采用力学性能测试、显微组织观察等方法,研究了不同退火温度条件下的组织性能变化规律,探讨了不同组织参量钛合金的断裂机制和强韧机理。实验结果表明,低温下片层组织首先发生“拆解”,并随着温度升高进一步球化,在 920℃条件下保温获得了 α 等轴组织,等效直径 3.75 μm ;合金屈服强度随着退火温度升高呈先稳定后缓慢下降的趋势,870℃时达到最大值 842MPa;两相区内,冲击功与退火温度正线性相关,920℃时达到最大值 64J;裂纹长大过程中,等轴 α 通过孪生和破碎的方式吸收变形能,与次生 α 相协同作用,提高了钛合金钻杆材料的冲击韧性,同时满足较好的强度性能。

E05-PO21

Discussions of the Applicability for Steel Grade Sorting of used tubing/casing based on Instrumented Indentation Technique

Xiaojia Zhang, Wen-Hong Liu

CNPC Tubular Goods Research Institute (TGRI)

To sort different kinds of tubing/casing quickly and accurately in the Pipe stacking yard is one of the key technologies to ensure the quality of green remanufacturing. Usually, the steel grade of the new tubing/casing can be judged according to the color paint or inkjet marking, and the color paint of the used tubing/casing falls and the marking is worn, which makes it difficult to separate. How to use the instrument indentation method for mechanical testing of tubing/casing, so the measured yield strength and tensile strength can be used as the reference basis for steel grade classification, reduce the workloads, and quickly judge the steel grade to achieve reuse is the primary research goal of this paper. The research team of this project selected 7 different steel grades J55, L80, N80, 80S, P110, P110S and 125H for research, and selected instrumental indentation method and traditional mechanical tensile method to test the yield strength and tensile strength of the same material respectively. The test results show that: The yield strength error and tensile strength error of the two methods are 5% and 1% respectively, and the repeatability of multiple tests is high. The results of instrumented indentation method are consistent with those of conventional tensile test, that is, the higher the steel grade, the higher the strength; For the non-quantitative field judgment, the indentation method can be used to detect the inventory field efficiently and judge according to the personnel experience, which can achieve the purpose of rapid sorting.

E05-PO22

Discussions of CAL-IV tests and evaluation methods on the tubing/casing special thread joint

Xiaojia Zhang

CNPC Tubular Goods Research Institute (TGRI)

The CAL IV tests is the most rigorous evaluation test program in the special threaded connections of full-size casing & tubing. The test matrix enables the connections to withstand cyclic loads associated with various load paths at ambient temperature and elevated temperatures, including internal pressure, external pressure, tension, compression and bending. The CAL IV evaluation tests are mainly based on ISO 13679:2002 and API RP 5C5:2017. This paper compares the differences of sample processing tolerance fit, up-break test, composite load test (TS-A, TS-B, TS-C) and limit load tests in two sets of standards CAL IV. The results show that the new version (API RP 5C5:2017) has a wider torque range and is more inclusive in the make up and break up procedures. The number of composite load tests(TS-A、TS-B、TS-C) is not reduced, and the test conditions are more demanding. While the high temperature of A and B series tests are increased, the significance of C series tests is reduced.

E05-PO23

Research on an Intelligent Recognition Method for Microscopic Fracture Images of Oil Country Tubular Goods

Xinyan Liu^{1,2}, Lijuan Zhu^{1,2}, Chun Feng^{1,2}, Peng Wang^{1,2}

1. Tubular Goods Research Institute of CNPC

2. Key Laboratory of Petroleum Tubular Goods and Equipment Quality Safety for State Market Regulation,
Xi'an 710077, China

Identification of typical micro-failure modes in the microstructure of petroleum pipeline materials is an important aspect of intelligent diagnosis of petroleum pipeline failures. Based on deep learning, intelligent recognition of failure images in petroleum pipelines is currently a hot research topic. In this study, aiming at the problems of poor accuracy and poor generalization ability of traditional recognition networks, an intelligent recognition algorithm for micro-failure images of petroleum pipelines, based on the stacking of residual blocks and the fusion of attention and residual networks, is established. This algorithm uses residual neural networks as the basic framework, and incorporates attention mechanisms to focus on high-frequency components containing

rich structural information during feature extraction, reducing the proportion of low-frequency components and thus reducing information redundancy, thereby improving the model's classification recognition capabilities for micro-failure images. Fusion of spatial pyramid pooling is employed to extract spatial feature information of different output sizes, further enhancing the model's robustness to spatial layout and object deformation. Comparative experimental results show that the proposed ResSNet network achieves classification accuracies of 90.47%, 98.31%, 52.50%, and 93% for cleavage, dimple, intergranular, and fatigue, respectively, which are significantly better than those of currently classical convolutional neural network models. The ResSNet network shows promising potential in the field of intelligent diagnosis of petroleum pipeline failures.

E05-PO24

海洋油气装备用高强韧合金钢组织性能研究

李方坡¹, 路彩虹¹, 党宁¹, 王建军¹, 王斌²

1. 中国石油集团工程材料研究院有限公司
2. 东北大学

针对海洋油气装备材料发展需求, 结合高强度合金钢材料成分体系特征, 综合考虑强度、韧性、焊接性和经济性, 定性分析了主要合金元素及含量对合金钢材料性能的影响, 设计试制了 10 种不同成分合金钢材料。结合热力模拟试验系统研究了不同材料奥氏体相变及热压缩变形过程中温度-应力-应变关键参数, 建立高温压缩条件下高强钢的变形抗力模型和材料高温变形本构模型。依据合金钢高温变形工艺关键参数, 采用 880℃正火+870℃淬火的方式完成 10 种试验钢材端部淬透性测试, 结果表明, 设计材料均具有较好的淬硬性, 其中 CrMo 系材料淬硬性曲线较为平缓, 与预期设计性能要求符合性较好, 探索了端淬冷却过程中材料微观组织演变规律, 分析了实验钢的强化方式和强化效果, 实现针对目标性能的成分逆向分析。针对淬火与回火温度敏感性的不同, 设计了不同的热处理工艺路线, 试验研究热处理工艺条件对合金钢材料组织性能的影响规律。结果表明: Nb、V 微合金元素的加入发挥明显的细化晶粒效果, 材料屈服强度显著提升, 但相应的冲击吸收能有所下降, 回火温度提高至 690℃以后, 韧性显著提高。随着回火温度的升高, 实验钢大角度晶界的占比增加, 钢材的低温韧性受晶界的影响显著, 当晶向的取向差较大时, 裂纹扩展过程中会受到较大角度的改变, 有效增加了裂纹扩展的路径, 提高材料的冲击韧性。另外, 提高回火温度可以使发生回复的晶粒占比显著增加, 晶粒产生回复软化效应, 使得钢回火后韧性和塑性显著提高。

E05-PO25

Failure Analysis of G105 Drill Pipe

XIAO-LONG LI^{1,2}, LIANG-GUANG PENG³, YANG-QIN LIU^{1,2}, KE TONG^{1,2}, JIN-LAN ZHAO^{1,2}

1. CNPC Tubular Goods Research Institute
2. Key Laboratory of Petroleum Tubular Goods and Equipment Quality Safety for State Market Regulation
3. PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Safety Environment & Technology Supervision Research Institute

In order to analysis the cause of drill pipe joint leakage in a well, The failure causes of $\Phi 127.00\text{mm} \times 9.19\text{mm}$ G105 drill pipe body were investigated through chemical analysis, mechanical properties test, crack analysis, fracture analysis and finite element analysis method. The results show that the mechanical properties of the drill pipe body conform to API Spec 5DP-2009 standard. The crack of the failed drill pipe originated at the bottom of the slip bite-marks of the tongs on the outer surface in the run-out point section in the internal upset transition area. Under the effect of alternating stresses and corrosive medium containing S and Cl⁻, the crack grows through the wall thickness and lead to failure of drill pipe body.

E05-PO26

The influence of H₂S partial pressure and temperature on the stress corrosion cracking behavior of 2205 duplex stainless steel

Rui Cai

CNPC Tubular Goods Research Institute

By simulating the H₂S/CO₂ working environment in oil and gas fields, stress corrosion cracking tests were conducted under different temperature and H₂S partial pressure conditions using slow stretching method and four point bending method. The uniform corrosion rate was tested using weight loss method, and the microstructure and corrosion products were analyzed using SEM and EDS. The results indicate that when the H₂S partial pressure is 0.10MPa, 2205 duplex stainless steel is in the stress corrosion brittle fracture zone. As the temperature increases, the solubility of H₂S decreases, and the adsorption activity of hydrogen atoms decreases. Therefore, hydrogen atoms are difficult to aggregate on the surface of the material, resulting in stress corrosion sensitivity decreasing with temperature increasing. Under the same test conditions, the corrosion rate of stress corrosion test samples is much higher than that of samples without stress loading. The increase of temperature and loading stress can accelerate the anodic dissolution rate, thereby the electrochemical corrosion rate increases.

E05-PO27

气井采气树用闸阀刺漏失效分析

冯大成, 王超明

中国石油集团工程材料研究院有限公司

针对某气田采气树闸阀在运行期间出现刺漏行为展开失效分析, 采用室内评价实验与有限元数值模拟相结合的方法对阀门失效原因及影响因素进行分析。结果表明: 采气树闸阀的无损检测、化学成分分析、金相组织分析、力学性能分析结果均符合 API 6A 对平板闸阀的标准要求; 数值模拟分析结果表明介质流速的增加与阀门闸板开合程度的减小均使得闸板处的流速增加。闸板长期半闭合状态导致高速气流在闸板处的流速急剧增加, 同时导致高速气流的方向发生转变, 高速流体冲击引起阀体内表面金属基体脱落, 这是导致阀门下半部分刺漏的主要原因, 腐蚀产物分析可知, 气体介质中含有 CO₂, CO₂ 腐蚀加速了阀门失效过程。因此, 在阀门选材时尽可能选择高耐磨、高耐蚀材料。阀门运行过程中应根据采气井的产气量及时调整闸板的开合程度, 避免闸板长期处于固定的小的开合程度造成高速流体冲击阀体表面现象。

E05-PO28

某页岩气集输管线环焊缝开裂失效分析

黄居峰¹, 朱文旭², 陈浩², 陈学辉³, 潘弘⁴, 付安庆¹, 王超明¹

1. 中国石油集团工程材料研究院有限公司, 油气钻采输送装备全国重点实验室
2. 四川页岩气勘探开发有限责任公司
3. 中国石油玉门油田公司采油工艺研究院
4. 中国石油西南油气田公司川东北气矿

某页岩气集输管线环焊缝发生开裂失效事故, 为了确定该集输管线环焊缝开裂原因, 采用宏观检测、力学试验、扫描电子显微镜和电子能谱对失效管材的宏观形貌、理化性质、断口形貌和成分进行分析。结果表明, 集输管线环焊缝化学元素和金相组织未发现异常。环焊缝处存在不同程度的错边, 且不等壁厚焊接焊趾处存在应力集中。环焊缝断口发现裂纹起源于焊趾腐蚀坑处, 沿热影响区多方向扩展, 具有典型的脆性沿晶断裂特征, 裂纹内部存在较厚的腐蚀产物, 并检测到 S 元素存在。因此, 页岩气集输管线环焊缝开裂是由于酸性介质中硫元素引起管材应力腐蚀开裂。

E05-PO29

冷拔珠光体钢丝界面演化与断裂行为研究赵勇刚¹, 王鹏¹, 吉楠¹, 向嵩², 冯春³

1. 中国石油集团工程材料研究院有限公司, 油气钻采输送装备全国重点实验室
2. 贵州大学材料与冶金学院, 材料力学行为与微观结构贵州省重点实验室
3. 中国石油集团渤海石油装备制造有限公司

过共析冷拔珠光体钢丝最高抗拉强度超过 6 GPa, 是迄今强度最高的纳米结构材料之一。尽管珠光体钢在工程应用上有很大的潜力, 但其超高强度的微观结构特性尚未清楚。因此, 本文以不同应变量 SWRS82B 冷拔珠光体钢丝为研究对象, 采用扫描电镜原位拉伸测试等多种微观观测手段。探究了珠光体钢组织转变及断裂行为, 结论如下: 初始珠光体结构, 断裂过程可将珠光体团视为裂纹向前扩展的位移单元, 呈现珠光体团内剪切式断裂、沿团界断裂、沿铁素体和渗碳体片相界面断裂; 中等冷拔形变 ($\epsilon < 1.5$), 钢丝位错密度提升, 钢丝表面至中心形成梯度 $<110>$ 微织构。位错滑动并在渗碳体界面塞积, 拖拽多种强化元素钉扎团体, 并在渗碳体表面形成元素富集。这便不难理解, 在无变形时, 三种断裂方式机率相同, 裂纹扩展路径波折, 塑性较高; 小拉拔变形情况 ($\epsilon < 0.8$), 珠光体团形变状态决定裂纹走向, 片层垂直轴向的团体成为裂纹萌生点以及裂纹易扩展路径; 中等拉拔变形情况, 团体形变剧烈, 相界面强化效果明显, 渗碳体碎裂, 并在裂纹扩展路径上呈现多条微裂纹, 加速断裂。归根结底, 源于冷加工过程的界面结构演化, 并对不同应变冷拔珠光体钢丝断裂行为具有重要作用, 对冷拔珠光体钢丝后续的热处理设计具有指导意义。

E05-PO30**Fe 对超超临界汽轮机汽缸用镍基耐热合金组织性能的影响**

张丰之, 吴云胜, 侯介山, 管现军, 周兰章

中国科学院金属研究所

K325 合金为中国科学院金属研究所基于 IN625 合金研发的铸造镍基高温合金, 具有优异的持久强度、抗氧化腐蚀性能、铸造焊接性能等, 是我国 650~700°C 超超临界机组汽轮机汽缸大型铸件(12~20t 级)的主要候选材料。汽缸等铸件尺寸较大且形状复杂, 需采用非真空冶炼、砂型铸造, 不可避免的会导致 Fe 的引入, Fe 对 K325 合金的具体影响尚不明确, 需要系统研究 Fe 对 K325 合金组织及性能的影响机制。Fe 含量的增加能够显著降低大铸件成本, 通过 Fe 对 K325 合金的影响研究可进一步发展低成本 K325 合金。因此研究 Fe 对 K325 合金组织及性能的影响具有重要的工程意义。

通过差热分析 (DTA)、扫描电镜 (SEM)、透射电镜 (TEM)、电子探针 (EPMA) 等系统研究不同 Fe 含量 (0~20wt.%) 对 K325 合金凝固组织的影响, 及其对 700°C 下长期时效 10000h 过程中微观组织和力学性能的影响。结果表明, Fe 降低合金的固液相温度, 增大凝固区间, 促进枝晶间 Laves 相的析出; Fe 对长期时效过程中的组织稳定性具有双重影响: 一方面, Fe 能够稳定 γ'' 亚稳相, 降低 γ'' 相的粗化速率, 抑制晶界 δ 相的析出, 从而优化合金性能; 但另一方面, Fe 促进晶内 TCP 相的析出, 加速细小 γ'' 相的溶解, 并且增加 Mo 元素在晶界的偏聚倾向, 促进晶界 M_6C 和 TCP 相的析出, 不利于合金塑韧性。鉴于 Fe 对微观组织的双重影响, 随着 Fe 含量的增加, 时效过程中合金的屈服强度整体呈现先增加后降低的变化趋势。较小尺寸的 γ'' 相与小块状 TCP 相的共同作用使得 Fe 含量为 10wt.% 的合金在时效过程中能够保持较高的屈服强度; 而更高 Fe 含量的合金由于时效过程中 TCP 相析出严重, 合金强度和塑性显著降低。综合上述研究结果, K325 合金中的 Fe 质量分数不宜超过 10 wt.%。