

挺进深海与地心：极端环境下金属材料应用挑战

Venturing into Deep Sea and Deep Earth: Challenges in the Application of Key Metallic Materials for Service in Extreme Environments

供稿|韩洋 / HAN Yang

内容导读

随着我国深海、深地资源开发不断向更深处迈进，装备面临的服役环境愈发严苛：高压、腐蚀、低温、疲劳……多种极端条件交织叠加，对金属材料的综合性能提出了前所未有的高要求。为了支撑国家重大战略工程，科研人员正聚焦这些“极限工况”，攻克金属材料在深海浮动平台、采矿钻井、深地钻探等关键场景中的应用难题。本文深入分析了深海与深地极端环境对金属材料带来的独特挑战，并介绍了我国在采油平台浮动桩用钢、深海采矿钻井用钢、深地石油钻杆钢等领域的研发现状与突破。这些具备高强韧、耐腐蚀、抗疲劳等优异性能的专用钢材，正成为我国挺进深海、深地的坚实“筋骨”。

深海深地极端环境服役金属材料在我国深部资源开发与海洋强国建设过程中，占据着不可替代的核心战略地位。时至今日，深海深地用金属材料作为深部勘探开发的承压结构材料和抗蚀防护专用材料，依旧持续为我国地下海洋资源开采奠定了坚实的基础^[1-3]。深海油气勘探开发、深地矿产资源采掘、海底管网输送以及地下深部储能工程等重大项目正在规模化建设，其核心承压承重构件出现严重的性能失效将引发井下坍塌、海底管线破裂、平台倾覆等重大安全事故，从而造成惨重的资源损耗与巨额经济亏损^[4-6]。深海深地重大开发工程的承压主体设备和关键核心承重构件均由关键金属材料制成，

具有优异极端服役性能的深海和深地用金属材料的研发成为深部资源开发领域亟需解决的核心问题。

极端环境服役金属材料应用中面临的挑战

深海深地极端环境服役金属材料的性能要求及发展趋势如图 1 所示，服役环境要求相关材料需要具备耐高压冲击、抗腐蚀老化、耐低温脆化和抗疲劳损耗等特性。根据服役环境和承载防护需求，极端环境服役金属材料可以分为深部承压结构金属材料 and 深海深地专用功能金属材料：深部承压结构金属材料主要用于设备承重支护、压力承载传递和结构稳固防护，在深海深地作业场景中发挥其高强度

学性能与耐腐蚀性能^[7-8]；深海深地专用功能金属材料更侧重于复杂环境下的特殊防护和专项服役效能。根据合金基体成分，深海深地专用功能金属材料可以分为铁基特种合金、镍基耐蚀合金、钛基轻质合金和铜基高强合金等^[9]；根据极端工况需求程度，其可以分为常备工况金属、特种刚需金属、稀缺耐候金属等。在深海深地资源勘探开发领域，其

用材主要分为深海深地特种碳钢和深海深地高端特种合金 2 种。其中深海深地专用高强碳钢是深部工程建设的核心基材，也被称为“深部开发的筋骨”。随着深海深地勘探向超深层和超远海区域的延伸，各类复合防护涂层材料和新型非金属复合管材正被推广使用，因此高端特种碳钢的常规需求正逐步发生变化。

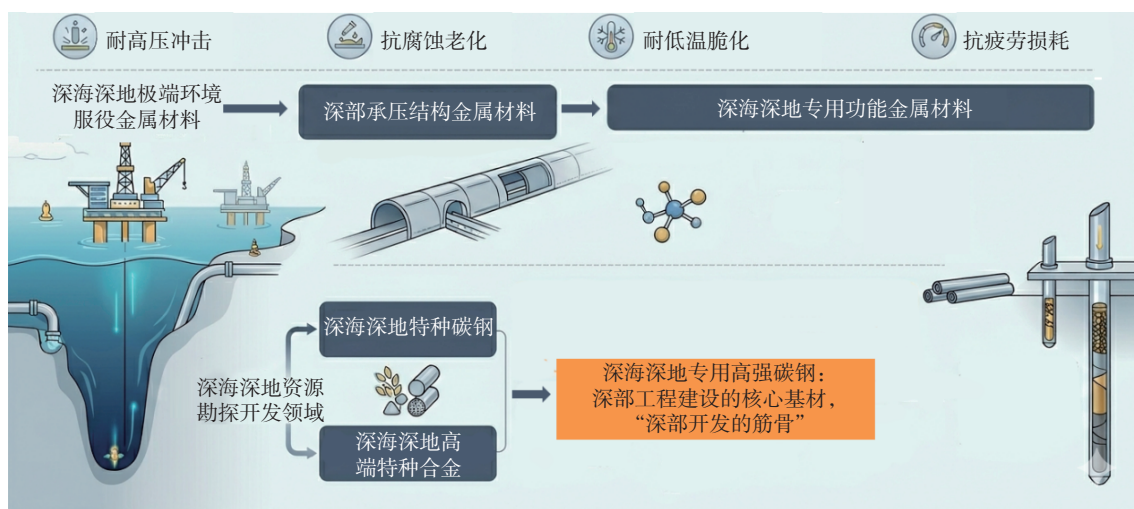


图1 深海深地极端环境服役金属材料的性能要求及发展趋势

深海极端环境的挑战

在深海强国战略背景下，超大型深海储卸油装置、海底油气集输管网、深海科考探测器和矿产资源开采成套装备等一大批深海工程设施服役运行，如图2所示。各类深海勘探装备的主体承载架、耐压密封构件和动力传输关键部件几乎全由深海特种金属材料制造而成。不难发现，构件规格巨型化、结构集成一体化、服役环境严苛化和失效机理复合化已成为深海材料应用亟待解决的难题^[10-11]。由于在深海装备制造领域，我国长期遵循“引进仿制—适配改良—吸收优化—自研升级”的产业发展模式，高端深海耐蚀耐压核心材料及特种构件的制备工艺长期依赖海外技术。随着我国多项深海重大工程的建设实施，专用核心材料成分工艺参数与全工况服役实测数据愈发难以通过国际技术合作渠道获取。同时，我国深海作业覆盖超深水、高硫化氢和强海流冲刷等特殊工况环境与复杂载荷条件，而海外并无同类材料应用成熟案例。特殊的服役条件要求我国

必须自主攻克深海特种材料研发的技术难题^[12]。聚焦深海装备核心构件研发的核心环节，我国深海金属材料设计仍主要沿用传统实验室小型标准试样，并以常温常压简单试验环境下的基础服役性能数据作为深海装备研发的核心依据。深海特种金属材料本身具备显著的力学各向异性，同时深海大型构件的综合服役性能存在明显的尺寸效应。尤其是深海真实服役场景属于高压、海水腐蚀、交变载荷和低温脆化多因素协同作用的复杂环境，大尺寸深海专用型材或全尺寸装备构件会呈现出与传统实验室标准试样完全不同的损伤演化与失效破坏规律。在深海实际工程中，深海特种金属材料及成型构件结构形式复杂多样。多数深海重型装备核心承压作业部件，需要将不同厚度规格、不同耐蚀强度性能的金属材料及构件连接组装，形成完整的深海承载作业结构^[13-15]。因此，深海金属材料的牌号品类、成型规格尺寸、核心构件的空间几何构型以及构件的焊接工艺，均会对深海金属材料实际服役效能和长期

使用周期产生关键性影响。深海装备产品从材料成分设计到规模化应用的全产业链研发生产环节存在诸多不确定因素，最终造成材料理论设计服役寿命

和深海实际工况使用寿命差距悬殊^[16]。基于全产业链服役条件研发金属材料是应对深海极端环境挑战的重要途径。

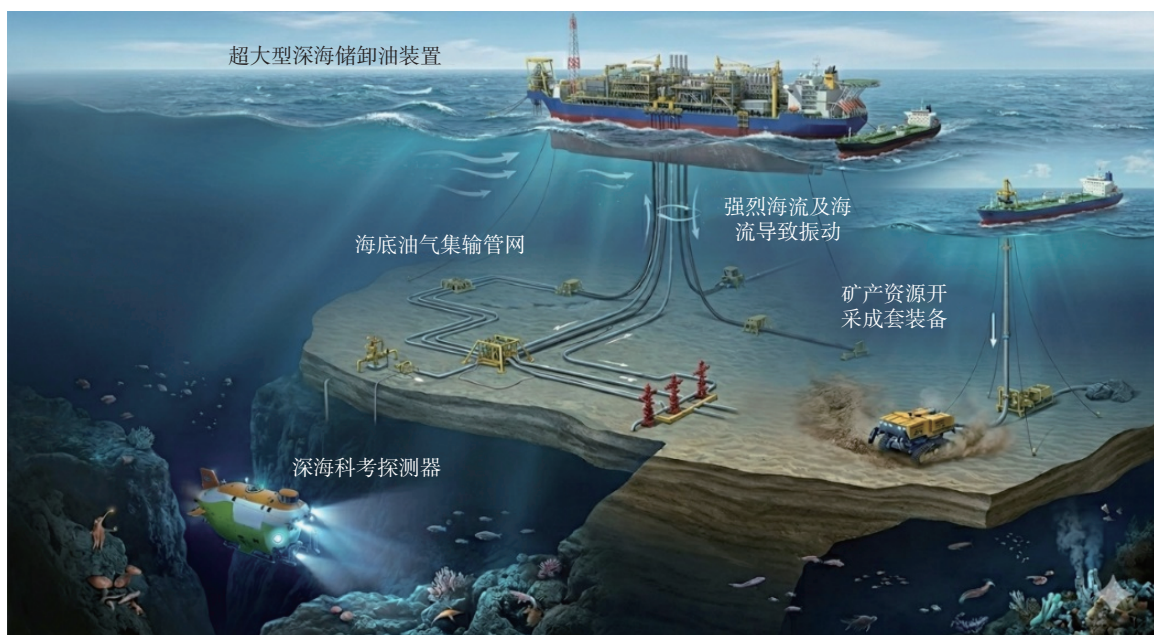


图2 深海极端环境的关键设备及产生的挑战

深地极端环境的挑战

在深地极端环境方面，超深层油气开发、矿产智能采掘成套装备、地下油气储集枢纽工程以及深地地质防灾支护巷道等装备与地下基础设施已陆续完成规划建设。各类深地勘探开发装备的承载结构和采掘传动关键承重部件，均以深地金属材料作为结构基材^[17-18]。类似于深海极端材料的研发，我国深地高端装备材料的研发也遵循“技术引进—适配改性—消化吸收—二次创新”的发展模式，部分关键深地耐高温和抗高压特种材料长期依赖海外供给。伴随我国深地产业技术自主化目标持续提升，深地专用核心材料成分设计参数已难以通过国际技术合作渠道获取。与此同时，我国深地作业面临超深、高含硫化介质和高应力扰动等特殊复杂服役工况，亟需攻克制约深地特种先进材料迭代研发的关键技术瓶颈^[19-21]。在深地实际工程中，深地特种金属结构材料及配套成型构件结构形式复杂，深地金属材料合金体系选择、构件成型几何尺寸、结构空间构型设计以及连接装配工艺方法，均对材料整体服役稳

定性与长期服役寿命具有关键性调控作用，如图3所示。深地装备从材料定制化研发到工程规模化应用的全链条周期中，受多重复杂因素影响，致使材料理论设计寿命与深地实际地层服役寿命存在显著偏差^[22-23]。因此，亟需基于全产业链服役条件研发金属材料，以满足工程要求并规模化应用于深部资源开发工程。

深海和深地用钢介绍

采油平台浮动桩用钢

采油平台浮动桩用钢凭借其优异的低温强韧匹配性、耐海水腐蚀特性及抗海浪交变疲劳性能，是深海采油平台承载锚的关键材料。在大型油气开发平台建造过程中，专用高强钢占平台水下主体承重结构总质量的40%~60%，其强韧性匹配与长期服役稳定性直接决定平台抗倾覆能力。基于服役条件研发的典型平台浮动桩用钢及其特点如表1所示。由表1可知，控轧耐候型EH36海工钢在-40℃常规海洋工况下具备优良的焊接适配性与抗层状撕裂性能；

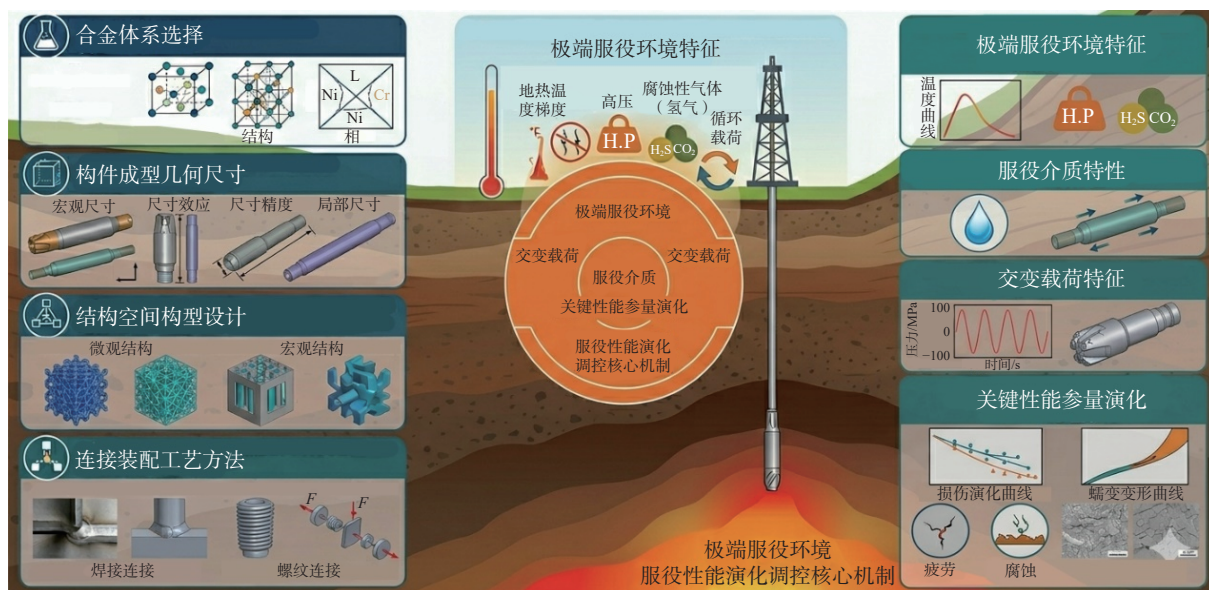


图3 深地极端环境下影响金属材料服役性能的关键性调控作用 (F 为外力, H.P. 为高压)

调质高强型 Q690HYD 钢具有更优的低温冲击韧性, 其屈服强度在厚壁结构用钢中处于先进水平^[24-25]。采用控轧控冷工艺制备的海工钢通过轧制温度调控细化晶粒组织, 使钢材强韧协同性能显著优于常规轧制钢材; 采用调质淬火回火工艺制备的 Q960 超高强桩基钢有效规避厚板截面性能偏析缺陷, 具备组织均匀和残余应力低的特点, 可达到最优抗拉强度 (980~1150 MPa), 已成为超大型深海浮动桩用钢

的主流材料。除了强度和低温韧性之外, 超深水大型采油平台建设对浮动桩基用钢抗疲劳性能提出严苛要求。基于服役条件研发的改良型 Q500HYE 耐蚀海工钢, 在海水交变荷载 20 MPa、应变幅值 0.8% 的工况条件下可稳定承受超 8000 次循环交变载荷作用, 展现出优异的海洋环境抗交变疲劳服役能力^[26-28], 为深海大型浮动采油平台桩安全选材与工程应用奠定了基础。

表1 典型采油平台浮动桩用钢及其特点

牌号	最小屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	低温冲击功/J	特点
EH36	≥355	490~630	≥21%	≥34	优异的低温韧性(-40℃)与极佳的焊接性, 技术成熟且经济性高。
Q690HYD	≥690	770~940	≥14%	≥47	强度与韧性的最佳平衡, 可实现15%~30%的显著减重, 性价比极高。
Q960	≥960	980~1150	≥12%	≥27	极致的超高强度, 实现结构“极限轻量化”, 材料利用效率最高。

深海采矿钻井用钢

深海采矿钻井用钢, 因具备优良的矿浆冲蚀抵抗能力、强韧性及钻井扭转疲劳性能, 被视作深海矿产资源开采的关键结构材料。在深海富钴等矿产

资源开采装备建造中, 钻井专用高强钢的强韧耐磨性与钻探服役稳定性, 对深海采矿钻井作业效率起着决定性作用。基于服役条件研发的典型深海采矿钻井用钢及其特点如表 2 所示。由表 2 可知, 采用

表2 典型深海采矿钻井用钢及其特点

牌号	最小屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	低温冲击功/J	特点
DH36	≥355	490~620	≥21%	≥34	工艺成熟成本低; 焊接性与成型性优良; 适用范围广泛
FH550	≥550	670~830	≥16%	≥42	超高强度实现显著轻量化; 卓越的-60℃超低温韧性; 结构效率高
AS110	≥1030	≥1100	≥17%	≥80	极低材料成本、极易加工制造、极高安全服役性。

正火轧制工艺生产的 DH36 深海钻井用钢属于低碳锰硅微合金化体系,具备良好的钻孔性能与交变撕裂抵抗能力;经淬火回火处理的 FH550 钻井钢在 -60°C 温度仍可服役^[29-30],具有优异的高压承压能力与磨损抗性。面向复杂的服役条件,离线调质热处理可获得强韧耐磨综合性能远优于常规控轧态钢的材料。基于服役性能要求,通过控轧控冷和热处理等复合工艺制备的 AS110 超高强钻井钢^[31-32],其晶粒尺寸均匀、焊接适配性能良好,已被广泛用作深海采矿钻井构件的重要材料。

深地石油钻杆钢

深地石油钻杆钢具有优异的硫化介质耐腐蚀性能及抗交变疲劳能力,该类材料的强韧化匹配特性与长期深部地层服役稳定性,直接决定超深

钻井工程钻进施工效能。基于服役条件研发的典型深地石油钻杆钢及其特点如表 3 所示。由表 3 可知,常规调质改性 G105 钢具有优异的塑性和韧性,兼具经济性和可靠性^[33-36];淬火回火强化型 S135 钻杆钢的抗扭承载性能与硫化氢应力腐蚀抗性优良。面向服役过程的高强度要求,调质热处理工艺制备的深地钻杆钢,其强韧性和抗蚀综合服役性能显著优于传统钻杆材料。经调质工艺制备的 V150 超高强深地钻杆钢抗拉强度可达 1103 MPa 及以上,适用于超深井和特殊工艺井^[37],具备显著的轻量化潜力。当油气钻探深度由数千米中浅层拓展至万米级超深地层时^[38],基于服役性能研发的新一代深地石油钻杆钢为深地油气钻探工程提供了可靠的材料支撑。

表 3 典型深地石油钻杆钢及其特点

牌号	最小屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	低温冲击功/J	特点
G105	≥ 724	≥ 793	$\geq 14\%$	≥ 110	经济性与可靠性平衡,塑性和韧性较好,对操作容忍度高。
S135	≥ 931	≥ 1000	$\geq 12\%$	≥ 95	高强度与综合性能主力选择,适用于深井、大位移水平井。
V150	≥ 1034	≥ 1103	$\geq 10\%$	≥ 85	极致的强度性能,用于超深井和特殊工艺井,可减轻钻柱重量。

结束语

极端环境专用金属结构钢作为深海采矿钻井、海上采油桩基、深地油气钻探钻杆等重大工程装备的核心用材,其服役性能及稳定性直接决定深部资源开发工程。现阶段面向深海深地服役要求,已通过优化合金成分设计、创新控制轧制与调质热处理制备工艺有效改善极端服役条件用钢的综合性能。未来需持续聚焦深海深地服役性能需求,构建适配深部资源开发专属工况的用钢研发与应用体系,支撑深海深地重大战略工程。

参考文献

- [1] 中国工程院化工、冶金与材料工程学部 中国材料研究学会. 中国新材料产业发展报告 2023. 北京: 化学工业出版社, 2024
- [2] Craig P, Serkan S, Hagan P, et al. Investigations into the corrosive environments contributing to premature failure of Australian coal mine rock bolts. *Int J Min Sci Technol*, 2016, 26(1): 59
- [3] Gamboa E, Atrens A. Environmental influence on the stress corrosion cracking of rock bolts. *Eng Fail Anal*, 2003, 10(5): 521

- [4] 邢少华. 深海环境低合金钢/双相不锈钢电偶腐蚀行为及其防护研究[学位论文]. 上海: 中国石油大学(华东), 2020
- [5] 陈玉涛. 工业强基: 中国制造大系统之成功砝码. 北京: 电子工业出版社, 2017
- [6] Zhou X L, Feng Z Q, Zhu L L, et al. High-pressure strengthening in ultrafine-grained metals. *Nature*, 2020, 579(7797): 67
- [7] 王猛, 朱斯陶, 范建国, 等. 深井巷道锚索腐蚀强度劣化机理及预测研究. *煤炭学报*, <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2026.0295>
- [8] 陈浩, 武亚利, 习林玉, 等. 适用于极寒工程的 Q355NF 低合金钢研发. *四川冶金*, 2026, 48(2): 46
- [9] 韩栋, 张永强, 雷文光, 等. 镍基合金板带加工技术及应用发展现状. *材料导报*, 2015, 29(5): 83
- [10] 李伟华, 朱建勇, 曹文凯, 等. 风沙冲蚀环境下钢结构涂层损伤机制与防护技术研究进展. *材料导报*, <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.TB.20260316.0945.002>
- [11] Marchebois H, Savall C, Bernard J, et al. Electrochemical behavior of zinc-rich powder coatings in artificial sea water. *Electrochim Acta*, 2004, 49(17/18): 2945
- [12] 杨雪. “十五五”造船用钢量增长逻辑与结构变迁. *冶金管理*, 2026(3): 14
- [13] 余陈, 郭春富. 海洋工程用 EH36 低温钢 SH-CCT 曲线的测定. *材料研究与应用*, 2026, 20(4): 380

- [14] González S, Mirza Rosca I C, Souto R M. Investigation of the corrosion resistance characteristics of pigments in alkyd coatings on steel. *Prog Org Coat*, 2001, 43(4): 282
- [15] 赵培林, 赵燕, 孙建卫, 等. 应变速率对海洋工程用型钢高温塑性的影响. *钢铁研究学报*, 2026, 38(3): 384
- [16] Zen K. Life cycle management of port structures. *Corros Eng Sci*, 2003, 52(11): 574
- [17] Patel D, Thakar V, Pandian S, et al. A review on casing while drilling technology for oil and gas production with well control model and economical analysis. *Petroleum*, 2019, 5(1): 1
- [18] Cirimello P G, Otegui J L, Carfi G, et al. Failure and integrity analysis of casings used for oil well drilling. *Eng Fail Anal*, 2017, 75: 1
- [19] 陈进, 许天早. 温度对超高强度套管钻井钢拉伸性能及断裂机理影响. *金属材料与冶金工程*, 2024, 52(2): 6
- [20] 许天早, 张焱, 毕柳涵. 回火和冲击试验温度对套管钻井钢冲击韧性及断裂机理的影响. *机械工程材料*, 2023, 47(4): 40
- [21] 蔡炎桥. 套管钻井钢加载速率敏感性及其组织演变的研究 [学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2021
- [22] 许天早, 冯耀荣, 王党会. 氢对套管钻井钢 I / III 复合型断裂韧性的影响. *钢铁研究学报*, 2017, 29(9): 749
- [23] Zhao Z X, Gao D L. Casing strength degradation due to torsion residual stress in casing drilling. *J Nat Gas Sci Eng*, 2009, 1(4/5): 154
- [24] 曹建宁, 韩文, 白冰, 等. 厚板生产技术的发展、现状及展望 (五). *轧钢*, 2025, 42(6): 1
- [25] 李鹏伟. Q690 高强钢相变行为及热处理工艺下组织性能研究 [学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2019
- [26] 潘越. Q500 钢中氢陷阱及氢脆敏感性研究 [学位论文]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2025
- [27] 左照坤, 鞠晓臣, 赵欣欣, 等. 基于宽板拉伸试验的 Q690qE 高性能桥梁钢断裂韧性研究. *桥梁建设*, 2022, 52(1): 56
- [28] Xu T H, Feng Y R, Jin Z H, et al. Determination of the maximum strain-hardening exponent. *Mater Sci Eng: A*, 2012, 550: 80
- [29] 周砚磊, 徐洋, 陈俊, 等. FH550 级海洋平台用钢冲击断裂行为实验研究. *金属学报*, 2011, 47(11): 1382
- [30] 韩鹏, 丛津功, 尚成嘉, 等. 550 级超高强度海洋平台用钢的开发. *钢铁研究学报*, 2011, 23(S1): 171
- [31] 刘宇茜. 三种海工钢在海洋环境中的腐蚀行为对比研究 [学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2023
- [32] Chen Y, Lambert S. Analysis of ductile tearing of pipeline-steel in single edge notch tension specimens. *Int J Fract*, 2003, 124(3/4): 179
- [33] 程时遐, 李德君, 师伟, 等. 某油井 G105 钻杆断裂失效分析. *焊管*, 2024, 47(7): 56
- [34] 余尚. P110 油管和 G105 钻杆的 CO₂ 腐蚀特征及缓蚀性能 [学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2022
- [35] Pan T, Yang C F, Ma Y, et al. Chemistry and process optimization of V-microalloyed N80-class seamless casing tube. *J Iron Steel Res, Int*, 2010, 17(3): 72
- [36] 罗睿, 杨晓峰, 余世杰, 等. G105 钢级钻杆刺漏原因分析. *理化检验 (物理分册)*, 2019, 55(3): 194
- [37] 李阳华, 李红英, 鲁晓超, 等. 奥氏体化工艺对 V150 油套管强韧性的影响. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2013, 44(9): 3625
- [38] 李阳华. 超深井用高强高韧 V150 油套管的研究与开发 [学位论文]. 长沙: 中南大学, 2013

作者简介: 韩洋 (1992—), 女, 河北省张家口人, 助理研究员。2016 年毕业于辽宁大学有机化学专业。主要研究方向: 大科学装置管理。通信地址: 北京市昌平区昆仑路 12 号; E-mail: yanghan@ustb.edu.cn。