套管-堆焊Stellite-6复合防护结构在高冲蚀磨损环境中的应用研究

曹海[1] 李家顺[1] 李旺根[2,3] 陶彦文[2,3] 朵元才[2,3] 丁通[2]
（1.国能（鄂尔多斯）能源化工有限公司 鄂尔多斯 017200；2.兰州兰石重型装备股份有限公司 兰州 730087；3.甘肃省压力容器特种材料焊接重点实验室培育基地 兰州 730087）

摘要：高冲蚀磨损环境常见于煤制油、化工、能源等领域，设备长期暴露于高压、高温、高固含量介质中，易因冲刷、磨蚀导致失效。传统防护手段如单一材料增强或表面涂层往往难以兼顾耐磨性与可维护性。本文以“高固高粘严苛工况油煤浆换热器”为研究对象，探讨了“套管-堆焊Stellite-6复合防护结构”在高压、高固、高粘介质环境中的应用效果。套管外表面堆焊Stellite-6合金，形成双层防护：①可拆卸套管：便于检修更换，降低维护成本；②堆焊层：提供高硬度、耐腐蚀的表面保护，厚度为3.5mm，粗糙度为Ra1.6，硬度≥40HRC，减少流体阻力与颗粒沉积。通过研究套管结构设计、堆焊Stellite-6合金的工艺参数、材料性能及实际应用效果，验证了该复合结构在防冲刷磨蚀方面的显著优势，为类似工况下的设备防护提供了技术参考。

关键词：套管-堆焊复合结构；等离子转移弧堆焊；Stellite-6合金；冲蚀磨损

Study on Application of Composite Protection Structure with Sleeve and Stellite-6 Surfacing Weld in High Erosion-Wear Environment

CAO Hai[1], LI Jiashun[1], LI Wanggen[2,3], TAO Yanwen[2,3], DUO Yuancai[2,3], DING Tong[2]
(1. Guoneng (Ordos) Energy Chemical Co., Ltd., Ordos 017200;2. Lanzhou Lanshi Heavy Equipment Co., Ltd., Lanzhou 730087;3. Key Laboratory Cultivation Base for Welding of Special Materials for Pressure Vessels, Lanzhou 730087)

Abstract: Severe erosion and wear environments are widely encountered in coal-to-liquids, chemical, energy and other industries. Equipment serving long-term under high-pressure, high-temperature and high-solid-content media is prone to failure induced by scouring and abrasion. Conventional protection methods such as single material reinforcement or surface coating hardly balance wear resistance and maintainability. Taking the oil-coal slurry heat exchanger operating under harsh working conditions with high solid content and high viscosity as the research object, this paper investigates the application performance of the composite protection structure consisting of a sleeve and Stellite-6 surfacing layer in high-pressure, high-solid and high-viscosity medium environments. Stellite-6 alloy is surfaced on the outer surface of the sleeve to form a double-layer protection system: ① The detachable sleeve facilitates inspection and replacement and reduces maintenance costs; ② The surfacing layer provides high-hardness and corrosion-resistant surface protection with a thickness of 3.5 mm, surface roughness Ra1.6 and hardness ≥40 HRC, which reduces fluid resistance and particle deposition. By analyzing the structural design of sleeves, surfacing process parameters of Stellite-6 alloy, material properties and practical service performance, the outstanding anti-scouring and anti-abrasion advantages of this composite structure are verified. This work provides technical references for equipment protection under similar harsh service conditions.

Keywords: Casing-overlay composite structures; plasma transferred arc surfacing; Stellite-6 alloy; erosion and wear

0　引言

冲蚀磨损是固体颗粒或液滴以一定速度冲击材料表面导致的材料流失现象，其机理涉及切削、疲劳和腐蚀等多重作用[1]。高冲蚀磨损环境是能源、化工、冶金等领域中常见的技术难题，尤其在煤制油、煤化

工等涉及高固含量、高粘度介质的工业过程中，设备的耐久性和可靠性面临严峻挑战[2]。例如，在煤直接液化工艺中，油煤浆作为一种高温、高压、高固含量（煤粉）及高粘度的复杂介质，对换热器等关键设备的冲蚀磨损问题尤为突出[3]。在油煤浆换热器中，介质流速高且含硬质煤粉颗粒，管箱、中心管等部位易因长期冲蚀而失效，进而引发泄漏、堵塞等安全隐患[4]。据统计，全球每年因冲蚀磨损导致的设备维修和更换成本高达数十亿美元[5]。目前，针对高冲蚀磨损环境的防护技术主要包括表面涂层、堆焊合金和结构优化三类。表面涂层（如热喷涂碳化钨）虽能提升硬度，但涂层与基体的结合强度不足，易剥落[6]；堆焊合金（如Stellite系列）具有优异的耐磨和耐腐蚀性能，但成本高且工艺复杂[7]；结构优化（如流体动力学设计）可减少局部冲蚀，但难以完全避免磨损[8]。单一技术往往无法兼顾耐磨性、经济性和可维护性，难以满足此类严苛工况的需求，限制了其大规模应用。因此，开发高效、可靠的新型复合防护技术，提升设备寿命和运行效率，具有重要的工程和经济意义。

本研究创新的使用“套管-堆焊Stellite-6复合防护结构”，通过将可拆卸套管与堆焊硬质合金结合，实现了防护性能与可维护性的统一。首先介绍了新型油煤浆换热器和中心管防冲刷结构的设计；然后介绍了抗冲刷磨损的Stellite-6堆焊层的等离子转移弧堆焊工艺，并介绍了“套管-堆焊Stellite-6复合防护结构”的质量控制措施；最后通过对Stellite-6堆焊层的化学成分和硬度等进行进行测试，并进行效果评价。

1　“套管-堆焊Stellite-6复合防护结构”的设计与工艺

1.1　套管结构设计

如图1所示，新型油煤浆换热器采用立式浮头中心管结构的管壳式换热器，油煤浆从管程入口处进料，在浮动封头内折返从中心管流出；壳程热高分气从顶部进入，从壳体底部出口流出。管箱及壳体均采用了12Cr2Mo1VR（H）+双层堆焊的结构，管箱考虑耐冲刷磨损余量堆焊层表层厚度6mm，换热管、中心管、浮动管板、浮动封头均采用了S32168不锈钢。油煤浆换热器设计压力、温度等参数见表1。

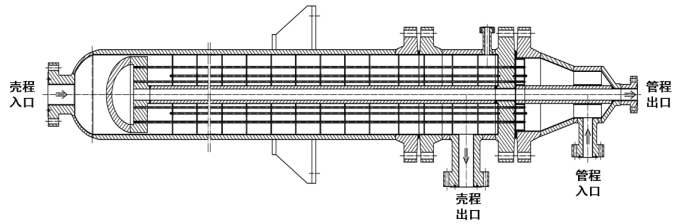


图1　设备简图

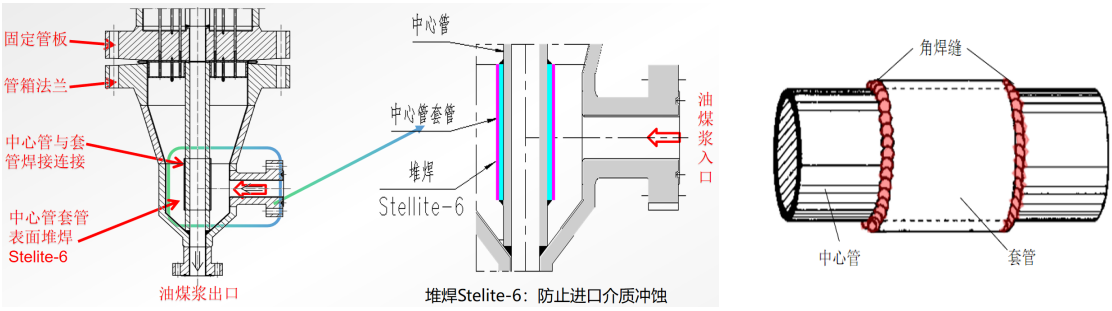
表1　设备结构参数

	壳程	管程
介质	热高分气	混氢油煤浆
工作压力	18.65MPa（G）	19.89MPa（G）
工作温度（进/出）	353.5/340℃	180.7/239.8℃
设计压力	20.36MPa（G）	22.20MPa（G）
设计温度	440℃	360℃
材质	12Cr2Mo1VR（H）+堆焊 12Cr2Mo1V（H）锻+堆焊	12Cr2Mo1V（H）锻+堆焊 换热管：S32168

油煤浆换热器的管程进料口采用锥斗形管箱结构，管箱入口处介质流速高且有夹杂固体煤粉，为减小介质对管箱中心管的冲刷，中心管外壁增设可拆卸套管保护结构，检修时便于更换，如图2(a)所示。套管为锻件，符合NB/T 47010的要求；材质为S32618 III固溶态供货，套管外壁堆Stellite-6 耐磨合金；尺寸：Φ262mm×Φ279mm×600mm；如图2(b)所示，套管在安装时采用钨极手工氩弧焊（GTAW）直接与中心管进行满焊，套管两端与中心管形成2个环形的角焊缝，防止套管与中心管之间缝隙油煤浆停滞沉积，发生缝隙腐蚀。

1.2　Stellite-6堆焊工艺

管箱套管外壁堆焊耐磨合金Stellite-6，堆焊层厚度为3.5mm，任何位置堆焊层最小厚度不小于3m，堆焊方法采用等离子转移弧堆焊PTA，如图3(a)所示，堆焊关键参数如表2所示。焊材：Stellite-6粉末（Co基合金，Cr含量28.6%，硬度40HRC），确保耐磨性与高温稳定性。堆焊时，套



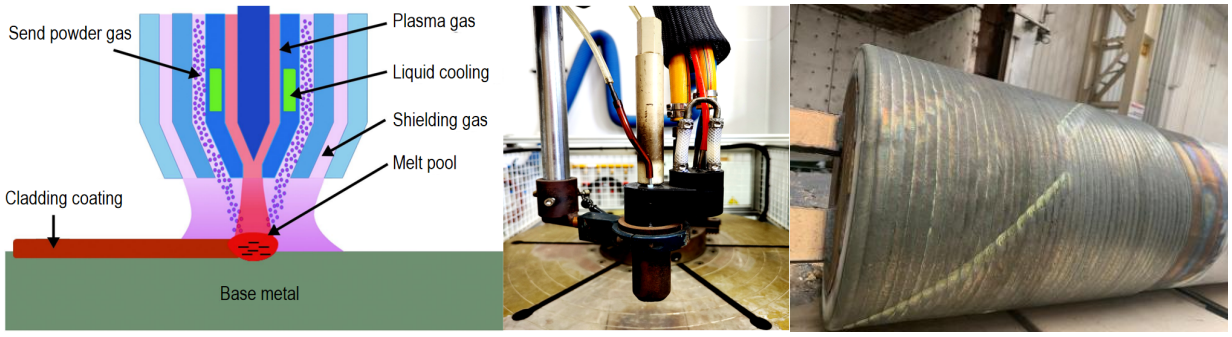
(a)防冲刷结构示意图　(b)套管与中心管焊接图示

图2　中心管防冲刷结构

管内壁加装防变形支撑，采用炉内加热管件的方式预热至≥380℃，保温2小时，出炉后在变位胎上固定并堆焊，堆焊过程中采用火焰加热的形式，保持整个管件的温度在280℃-427℃。堆焊完后管件进炉后热410℃×2h后，炉内冷却至室温出炉，可保证本设备套管硬质合金Stellite-6堆焊质量。堆焊完后套管如图3所示，套管无明显收缩变形，表面形貌为连续均匀的鱼鳞状焊道纹理，无可见裂纹、咬边、气孔等缺陷。堆焊层边缘过渡平滑，无未熔合或塌陷现象。

表2　Stellite-6等离子转移弧堆焊工艺参数

堆焊方法	填充金属	送粉速度(g/min)	粉末粒度(目)	电源极性	电流(A)	电压(V)	摆动速度(mm/min)	焊接速度(mm/min)	枪距(mm)
PTA堆焊(机械)	Stellite6	14	100/325	DCEN	40	0-24	800-1000	85-115	0±2



(a)　等离子转移弧堆焊(PTA)原理图　(b)　堆焊后套管实物图

图3　套管堆焊Stellite-6

1.3　套管及堆焊层质量控制

不锈钢锻件锻件应按NB/T 47013.3进行100%UT复验，I级合格；待堆焊面及所有及机加工表面按NB/T47013.5进行100%PT检测I级合格；Stellite-6耐磨合金堆焊后，对结合面进行100%UT检测，I级合格；堆焊层表表面进行按NB/T 47013.5进行100%PT检测I级合格。套管外表面的Stellite-6堆焊层经车床加工至3.5mm，表面粗糙度达到Ra1.6，满足Ra3.2及以上的要求。如图4所示，依据NB/T 47013《承压设备无损检测》标准对堆焊层进行100%PT检测和UT检测，经10分钟渗透及显像剂作用后，检测区域无线性或圆形缺陷指示，表面机加工痕迹产生的非相关显示，经酒精擦拭后消失，达到I级验收合格要求。



图4　套管堆焊层机加工后渗透检测(PT)

2　性能分析与效果评价

2.1　堆焊层表面形貌和宏观检查

在堆焊套管一段检测区域取金相分析试样，打磨抛光后腐蚀，观察分析套管与Stellite-6堆焊层截面的宏观形貌，如图5所示。可以看出各试样堆焊层与基层结合良好，未发现裂纹、夹杂和气孔等缺陷。

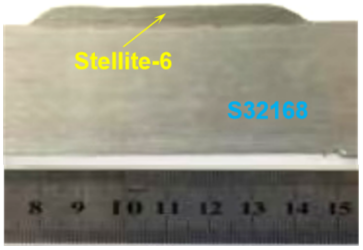


图5　套管堆焊层截面宏观形貌

2.2　堆焊层表面化学成分

Stellite-6堆焊层的表面化学成分数据见表3，主要参考Co、Cr、W、C四种元素的含量，同时考虑S30815基体中的Fe和Ni对堆焊层的稀释影响。总体来看，所有元素均在合格指标要求的范围。Co、Cr、W、C四种元素的含量分别为56.52%、28.60%、5.36%和1.21%：Cr形成硬质Cr23C6碳化物和致密氧化膜，显著提升耐磨性和抗氧化能力；W通过固溶强化和形成高硬度W2C相增强基体抗切削性能；C调控碳化物的类型和分布（如M7C3、M23C6），优化硬度与韧性的平衡。此外，Co基体提供良好的延展性，而Si、Mn等元素改善工艺性能，共同使Stellite-6在冲蚀环境下表现出卓越的耐磨性，其材料流失率可低至304不锈钢的1/5[9-10]。

表3　Stellite-6堆焊层表面化学成分（质量分数%）

化学成分	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	Fe	Co
样品	1.21	0.94	0.31	28.60	2.74	0.50	5.36	4.87	56.52
合格指标	0.9-1.4	≤2.0	≤1.0	25-32	≤3.0	≤1.0	3.0-6.0	≤5.0	Rem(≥50)

2.3　堆焊层硬度分布

将试样截面打磨后进行显微硬度测量，如图6所示为试样截面的显微硬度云图。从下向上，深蓝区域套管S32168侧硬度在14.8HRC-17.5HRC；绿色区域为堆焊层与基层的熔合线，硬度在23.0HRC-36.5HRC之间，由套管S32168侧向堆焊层Stellite-6侧硬度逐渐增加；越过熔合线，堆焊层的硬度在39.5HRC-43.6HRC。综上所述，堆焊层表面的硬度可以保证在40HRC以上，满足堆焊层表面硬度要求。

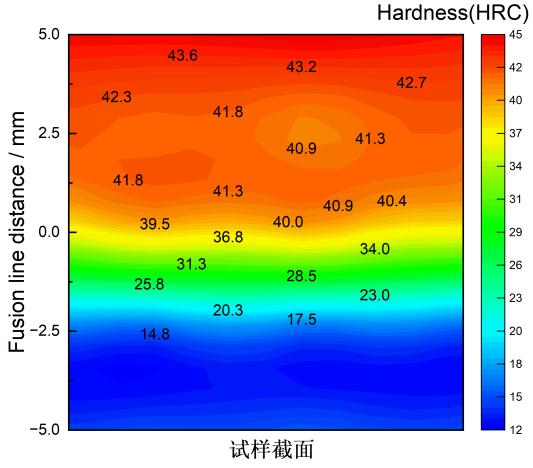


图6　截面显微硬度云图

2.4　可维护性与经济效益

“套管-堆焊Stellite-6复合防护结构”技术兼具耐磨性、可维护性与经济性，在油煤浆换热器样机中应用此结构后，成功解决了管箱入口的冲蚀问题，这一创新为高冲蚀磨损环境下的设备防护提供了新思路。Stellite-6合金的Co-Cr-W-C体系具有优异的抗冲蚀磨损性能，其硬度（40HRC以上）与低Fe含量（4.87%）显著降低了介质中煤粉的冲刷损伤。实际运行中，套管堆焊结构使管箱中心管的磨损率降低80%以上。可拆卸设计允许局部更换磨损套管，避免整体设备报废，延长使用寿命。对比传统整体堆焊结构，维护成本减少50%。复合结构虽初期成本较高，但通过减少停机时间和检修频率，预计设备全生命周期成本降低30%。检修时重点关注堆焊层Stellite-6的磨损情况，必要时更换。

3　研究总结与应用前景

3.1　研究总结

3.1.1　研究了“套管-堆焊Stellite-6复合防护结构”的结构设计，确定Stellite-6堆焊层的堆焊工艺，提出Stellite-6堆焊层的质量控制措施。

3.1.2　Stellite-6堆焊层与基层结合良好，未发现裂纹、夹杂和气孔等缺陷，堆焊层有效厚度为3.5mm，且表面化学成分满足合格指标要求，表面显微硬度大于40HRC，保证其抗冲蚀磨损性能。

3.1.3　可拆卸设计与高性能合金堆焊的结合，通过高硬度（>40HRC）Stellite-6合金降低80%磨损率，减少50%维护成本，使油煤浆换热器管箱寿命提升30%，为高冲蚀工况提供高效经济解决方案。

3.2　应用前景

套管-堆焊Stellite-6复合防护技术既利用了Stellite-6的高硬度和耐腐蚀性，又通过可拆卸设计便于检修更换，显著降低了维护成本。成功应用于油煤浆换热器样机，有效解决了高冲蚀磨损环境下的设备防护问题，为煤直接液化二代技术的节能减排提供了关键装备支持。

（下转第41页）

域，分区如图6所示，多区域交替焊接。换热管与管板焊接时，采用多道焊，为防止产生弧坑裂纹，焊道间起弧点位置相互错开90°，每一道焊完后均进行100%PT检测合格。管头焊接完毕后，根据GB/T 151中的贴胀要求进行胀管。

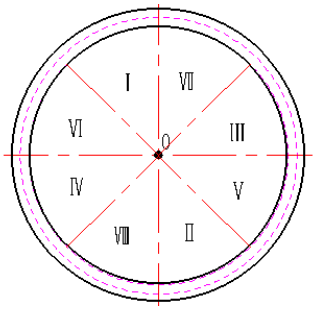


图6　换热管管头焊接分区

3　结论

通过对酯加氢反应器制造工艺难点的分析及相应控制措施的实施，掌握了一整套筒体圆度控制、管板堆焊、筒节组焊及装配等关键工艺技术，解决了筒节成型尺寸控制、管板堆焊变形量的控制等工艺难题，逐步完善并改进传统制造工艺，提高了超大直径酯加氢反应器的制造工艺水平，为同类产品的制造积累了丰富经验。

参考文献

[1] GB 151—2014，热交换器[S]

[2] 杜金涛，潘秀娟，王子伟，等．大直径管板堆焊变形模拟及控制[J]．石油化工设备，2016，45(6):4.

[3] 李文秀，等．一种换热器折流板挑装工装[P]．中国：CN202422008389.6，2025.05.30.

[4] NB/T 47013.1-47013.6—2015，承压设备无损检测[S].

作者简介：何亚楠（1992–），女，工程师，主要从事压力容器设备制造工艺工作，通讯地址：山东省青岛市经济技术开发区昆仑山北路601号青岛兰石重型机械设备有限公司，E-mail:thmssy@163.com。

(上接第37页)

该应用有以下几个方面的优点：

3.2.1 技术层面：通过复合结构优化，平衡耐磨性与经济性，为高固高粘介质设备提供可靠解决方案；

3.2.2 经济层面：延长设备寿命，减少非计划停机，助力煤化工行业降本增效；

3.2.3 环保层面：推动煤制油装置的节能减排，响应“双碳”目标。该技术具有广阔的应用潜力，可推广至其他高冲蚀领域，比如：①煤化工：高温气化炉进料系统；②石油炼化：高含硫原油换热设备；③航空航天：燃料输送管道防护。

参考文献

[1] HUTCHINGS I M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials[M]. London: Edward Arnold, 1992.

[2] 林振烈，成会朝，张馨，等．等离子粉末堆焊工艺研究现状与进展[J]．硬质合金，2023，40(3): 233-243.

[3] LIN Zhenlie, CHENG Huichao, ZHANG Xin, et al. Research status and progress of plasma powder cladding process[J]. Cemented Carbide, 2023, 40(3): 233-243.

[4] LI K Y, ZENG Y M. Corrosion of heat exchanger materials in co-combustion thermal power plants[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 161: 112328.

[5] WANG L, LIU J, et al. Failure analysis of erosion-induced leakage in coal slurry heat exchangers[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 120: 105074.

[6] MENG H, HU X, et al. Global economic loss assessment of erosion in industrial equipment[J]. Tribology International, 2020, 142: 106023.

[7] GANT A J, GEE M G, et al. Erosion resistance of thermal spray WC-Co coatings: Role of microstructure and binder phase[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 349: 1038-1047.

[8] KARAOGLANLI A C, et al. Comparison of tribological properties of HVOF sprayed and laser cladded Stellite 6 coatings[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(4): 980-986.

[9] CHEN X, MCLAURY B S, et al. Numerical and experimental investigation of elbow erosion mitigation by flow modification[J]. Wear, 2020, 450-451: 203267.

[10] CHEN H, XU C, ZHOU Q, et al. Erosion-corrosion behavior of laser-clad Stellite 6 alloy in simulated coal slurry environment[J]. Wear, 2019, 426-427: 412-423.

[11] 彭海涛，张树国，李文杰，等．Stellite 6合金增材修复技术性能调控应用瓶颈及未来发展趋势[J]．模具工业，2025，51(10):1-11.

[12] Peng Haitao, Zhang Shuguo, Li Wenjie, et al. Application Bottlenecks and Future Development Trends in Performance Regulation of Stellite 6 Alloy Additive Repair Technology [J]. Die & Mould Industry, 2025, 51(10): 1-11.

作者简介：曹海，（1988–）工程师 大学本科，主要从事煤直接液化设备管理，邮箱:10511983@ceic.com，电话:18747791011