

引用格式:肖腾,蒋寸才,孔祥夷,等.汽轮机阀体表面 Stellite 合金堆焊层失效分析[J].热加工工艺,2025,54(3):139-146.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20230496
<http://www.rjggy.net> rjggy@vip.163.com

汽轮机阀体表面 Stellite 合金堆焊层失效分析

肖腾¹, 蒋寸才², 孔祥夷¹, 王仲强¹, 郭俊杰², 王东²

(1. 河南省锅炉压力容器检验技术科学研究院, 河南 郑州 450041; 2. 河南工业大学机电工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:服役6年后,蒸汽轮机 COSTE 钢阀体上的 Stellite6 合金堆焊层发生了脱落。利用焊条电弧焊在 COSTE 钢上堆焊了 Stellite6 合金,研究 Stellite6 堆焊层失效的原因。结果显示:堆焊过程中,COSTE 钢对 Stellite6 合金产生稀释作用,Fe 元素在 Stellite6 近界面处发生了聚集;服役过程中,Fe 元素又从钢基体向 Stellite6 堆焊层进行了长程扩散。过高的 Fe 含量促使 Stellite6 堆焊层中 α -Co(Cr, Fe, W) 固溶体发生共析转变,生成脆性 α' -FeCo(Cr, W) 体心立方相和 σ -CrCo(Fe, W) 四方相。在长时间的工作载荷和热应力作用下,这种脆性组织最终导致了 Stellite6 堆焊层的失效。

关键词: Stellite6 合金; 铁扩散; 相转变; 显微硬度

中图分类号: TG174.44; TG441.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2025)03-0139-04

Failure Analysis of A Stellite Alloy Coating on Steam Turbine Valve

XIAO Teng¹, JIANG Cuncai², KONG Xiangyi¹, WANG Zhongqiang¹, GUO Junjie², WANG Dong²

(1. Henan Boiler and Pressure Vessel Inspection Technology Research Institute, Zhengzhou 450041, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The Stellite 6 alloy coating on COSTE steel valve in a steam turbine fell off after 6 years in service. Stellite6 alloy was deposited on COSTE steel by electrode arc welding, and the failure reason of Stellite6 coating was studied. The results show that COSTE steel has diluted Stellite 6 alloy during surfacing, and the Fe element gathers near the interface of the Stellite6. During service, the Fe element diffuses extensively from the steel substrate to the Stellite6 coating. Excessive Fe content promotes the α -Co(Cr, Fe, W) solid solution in Stellite6 coating to generate brittle BCC α' -FeCo(Cr, W) phase and σ -CrCo(Fe, W) tetragonal phase. The brittle phase structure eventually leads to the failure of Stellite6 coating under long-time working load and thermal stress action.

Key words: Stellite6 alloy; Fe diffusion; phase transition; microhardness

2022 年火电装机容量占我国总发电装机容量的 52%, 火电仍是我国最主要的发电方式。提高火电厂汽轮机组的进汽温度可以显著提升其发电效率, 进汽温度为 600 °C 的超超临界汽轮机组在火力发电厂已经被普遍应用^[1]。进汽温度的提高要求汽轮机组零部件应具备相应的高温使用性能, 在设计的寿命内稳定可靠。超超临界汽轮机组叶片、阀座和轴承等关键零部件的基体材料是耐热钢, 表面堆焊 Stellite 合

金是提高其高温使用性能的常用方法。该堆焊结构中耐热钢提供足够的强度和抗蠕变性能^[2], Stellite 合金提供耐磨、耐蚀和抗高温氧化性能^[3], 保证汽轮机组零部件能够在高温环境中工作。

然而, 耐热钢 /Stellite 合金堆焊结构应用在超超临界机组中遭遇到了长期稳定服役的瓶颈。工作在 600 °C 的机组服役 5 年左右普遍发生 Stellite 合金堆焊层脆化剥落事故, 剥落的堆焊层金属碎片被吸入到汽轮机组高速旋转的叶片中, 打坏叶片和缸体等部件, 导致机组发生不可逆损坏, 数量占到涡轮机叶片等零部件失效数量的一半, 成为发电设备“家族性”缺陷之一^[4-5]。但是, 目前还缺乏对服役过程中 Stellite 合金堆焊层脆化机制的研究。

Stellite 合金主要由 α -Co 和富 Cr 碳化物等组成, 堆焊在耐热钢表面的 Stellite 合金基体相仍保

收稿日期: 2023-03-04

基金项目: 河南省重点科技攻关资助项目(212102210350); 河南工业大学高层次人才科研启动基金项目(2019BS052)

作者简介: 肖腾(1987-), 男, 河南人, 工程师, 硕士, 主要从事高温合金熔覆研究; E-mail: 18637199766@163.com

通讯作者: 王东(1987-), 男, 河南人, 讲师, 博士, 主要从事高温合金材料制备; E-mail: wangdong23322@126.com

持不变,但界面处的合金体系发生了改变,由 Co-Cr 为主元的体系变成以 Co-Fe-Cr 为主元的新体系^[6]。Stellite 合金成分在新合金体系中被稀释,界面处出现一个宽度 30~200 μm 的亮色稀释区域^[7]。通过调整焊接工艺能够改变 Stellite 合金堆焊层的界面稀释率^[8],一定的界面稀释率保证了耐热钢和 Stellite 合金之间良好的冶金熔合,使得堆焊态下的拉伸断口发生在耐热钢的热影响区中^[9]。然而长时间高温退火后 Stellite 合金堆焊层稀释区域的硬度急剧增加,且出现大量裂纹,成为堆焊结构的薄弱部位^[10]。因此,研究 Stellite 堆焊层界面处的成分和组织变化是揭示其失效的关键。

本文的研究对象是某火电厂汽轮机阀体表面脱落的 Stellite6 钴基合金堆焊层以及相同工艺条件下的堆焊板。通过分析对比脱落件和堆焊板的成分、组织和性能,试图揭示 Stellite6 钴基合金堆焊层失效的原因。该研究结果可为预测和延长汽轮机阀体表面 Stellite 合金堆焊层的服役寿命提供重要的实验数据。

1 实验材料与方法

1.1 样品制备

某发电厂蒸汽轮机阀体(基体为 COSTE 钢)在 600 °C 下服役 6 年后,其表面 Stellite6 合金堆焊层出现了剥落,剥落的堆焊层如图 1(a)所示。

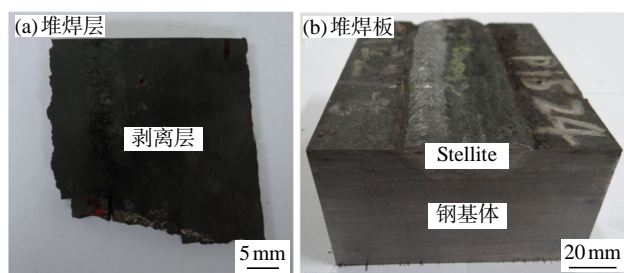


图 1 汽轮机阀体上剥落的堆焊层和 Stellite6 合金堆焊板
Fig.1 Surfacing layer peeled off from the steam turbine valve and Stellite 6 alloy coated plate

采用相同的材料和焊接工艺制备试焊板,即母材为 COSTE 钢,堆焊材料为 Stellite6 合金,其具体化学成分见表 1。焊接方法采用手工焊条电弧焊(SMAW),焊条直径为 3.0 mm,焊前预热至 260 °C。焊接过程中焊接电流为 120~180 A,电压为 16~20 V,焊接速度为 20 cm/min。采用多层多道焊,堆焊后的 COSTE 钢/Stellite6 合金堆焊板如图 1(b)所示,焊板空冷至 80~120 °C,然后在 710 °C 条件下保温 12 h,随炉冷却后备用。

表 1 COSTE 钢和 Stellite6 合金的化学成分
(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of COSTE steel and Stellite 6 alloy (wt%)

材料	C	Mn	Si	Ni	Fe	Cr	Mo	W	Co
COSTE	0.1	0.9	0.3	0.7	余量	10.5	1.0	1.0	-
Stellite6	1.2	1	1.2	3	3	29	0.3	4.5	余量

1.2 检验分析方法

堆焊板被切割成尺寸为 φ10 mm×10 mm 的试样,然后进行打磨和抛光,以备随后的组织分析和性能测试。经过抛光的样品在特制的腐蚀液(HCl:HNO₃=3vol%:1vol%)中腐蚀 3~5 s,利用光学显微镜和配备有 X 射线能谱分析仪(EDS)的场发射扫描电镜(SEM)表征其显微组织和化学成分。利用 X 射线衍射仪(XRD)表征剥落样和堆焊板样品的物相。利用纳米压痕硬度仪(1600~6406)测试样品的室温维氏硬度,测试过程中加载 50 g 的力,并保压 15 s,样品界面处的测试间距为 100 μm。

2 实验结果分析

图 2 展示了 COSTE 钢/Stellite6 合金堆焊板界面的 SEM 微观组织,COSTE 钢与 Stellite6 合金堆焊层之间有一条平直的熔合线,宽度为 10~20 μm。Stellite6 堆焊层中靠近界面的显微组织主要为树枝晶,树枝晶的宽度为 20~30 μm,其主轴方向垂直于熔合线(图 2(a))。图 2(b)局部放大图显示 Stellite6 近界面组织主要由枝晶相以及凸起的枝晶间析出物组成。表 2 中的 EDS 成分显示 Stellite6 近界面处的 Fe 元素含量在 20 at% 左右,这远高于 Stellite6 基体

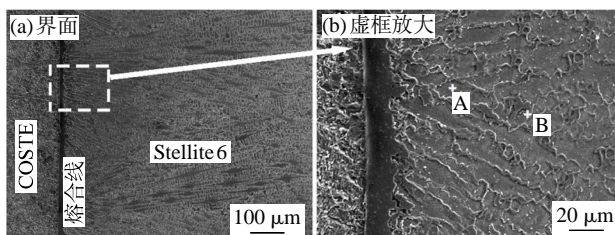


图 2 COSTE 钢/Stellite6 堆焊层界面的 SEM 微观组织
Fig.2 SEM microstructure of interface between COSTE steel and Stellite6 coating

表 2 图 2 中不同区域的 EDS 分析结果(原子分数,%)
Tab.2 EDS analysis results of different areas in Fig.2 (at%)

位置	Fe	Co	Cr	C	W	Mn	Si	Mo
A	24.2	35.5	18.2	17.1	3.4	0.8	0.6	0.2
B	19.7	25.5	28.1	20.2	4.8	0.7	0.6	0.4
C	36.9	26.3	10.2	21.1	3.6	0.9	0.7	0.3
D	21.4	19.4	34.8	16.8	5.1	0.7	1.5	0.3

中的 Fe 含量。Cr, Co 和 C 等合金元素在枝晶与枝晶间之间表现出了明显的差别, Co 元素主要集中在枝晶上(A 点), 而 Cr 和 C 元素主要集中在枝晶间 (B 点)。图 3 的 XRD 显示 Stellite6 近界面的组织主要由 FCC 结构的 α -Co 和碳化物 $\text{Cr}(\text{W})_{23}\text{C}_6$ 两相组

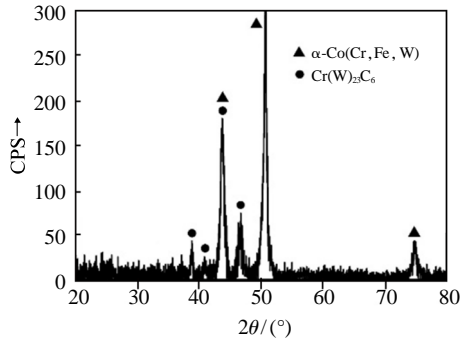


图 3 堆焊 Stellite 合金近界面区域的 XRD 分析
Fig.3 XRD analysis of the area near the interface of the surfaced Stellite alloy

成。结合 EDS 和 XRD 分析结果, 可以判断 Stellite6 合金近界面区的枝晶是 FCC 结构的 α -Co(Cr, Fe, W) 固溶体, 枝晶间析出物是 $\text{Cr}(\text{W})_{23}\text{C}_6$ 碳化物。

图 4 是剥落 Stellite6 堆焊层的 SEM 显微组织和 EDS 线扫图。远离剥落面的组织由枝晶及粗大的晶间析出物组成, 而近剥落面组织则由一种不规则的类共析相组成, 厚度为 $15\sim 25\mu\text{m}$ 。通过表 2 的 EDS 成分判断这种共析组织包括 Fe-Co 相(C 点)和凸起的富 Cr 化合物(D 点)。EDS 线扫成分显示在近剥落面约 $15\mu\text{m}$ 的区域内, Cr, Fe, Co 和 C 等主要合金元素含量出现了剧烈的震荡, 而在远剥落面区域内没有出现类似的情况(图 4(c)), 这表明在近剥落面区域出现了元素的聚集。局部区域的 EDS 成分表明凸起相富含 Cr 元素, 周围基体则富含 Fe 和 Co 元素(图 4(d))。根据图 5 的 XRD 结果, 结合 Cr-Co 与 Cr-Fe 相图, 可以判断凸起的不规则相是

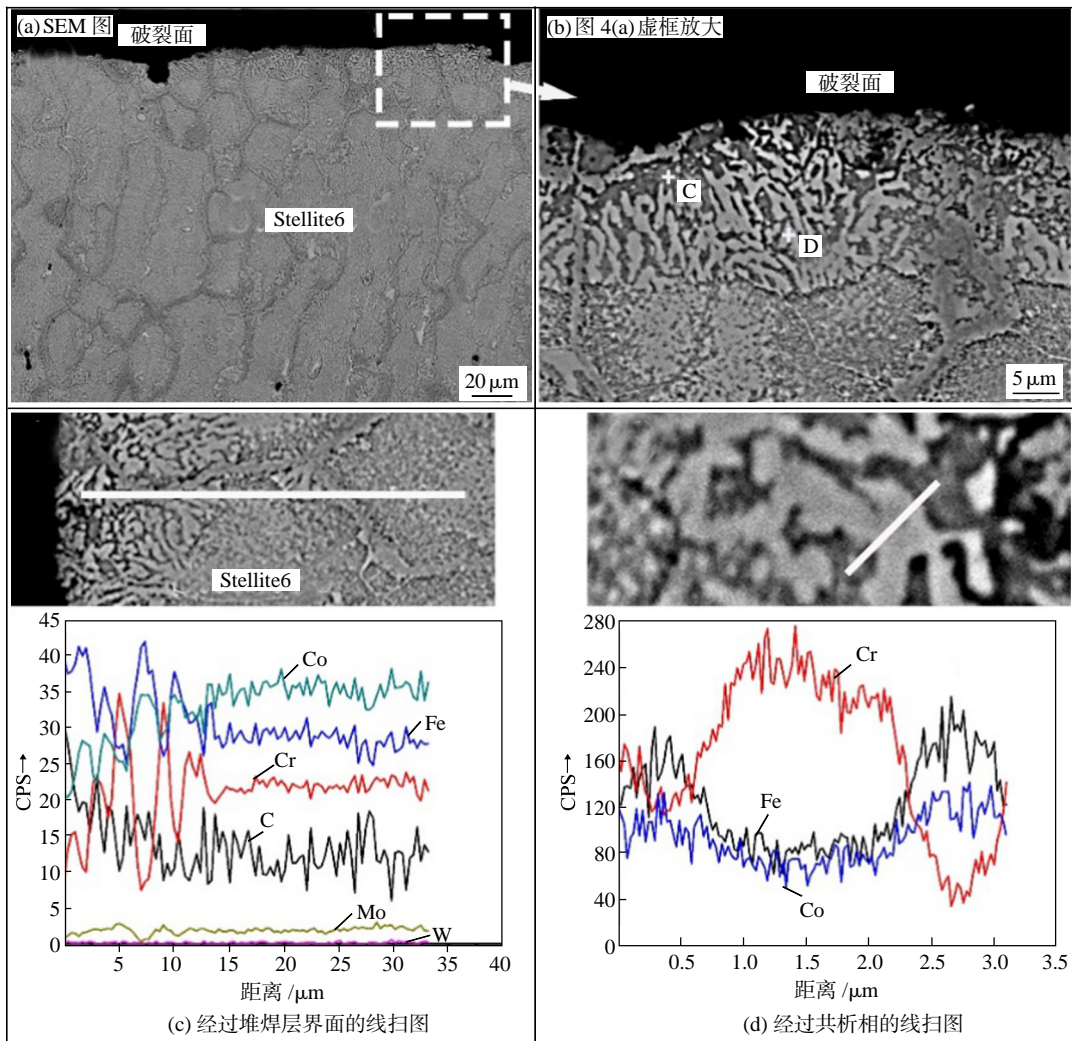


图 4 剥落堆焊层的 SEM 显微组织和 EDS 线扫图
Fig.4 SEM microstructure of the peeled coating and EDS line scan diagrams

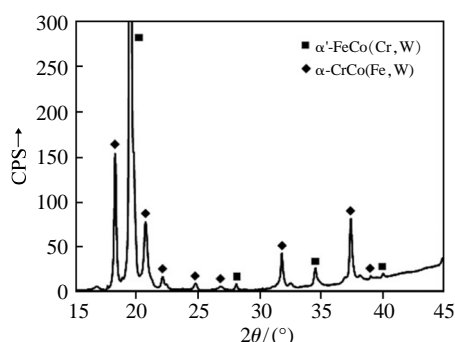


图5 剥落堆焊层界面区域的 XRD 分析
Fig.5 XRD analysis of interface area of the peeled coating

四方晶系的 σ -CrCo(Fe, W)相(P42/mmm 空间群),周围基体相是 α' -FeCo(Cr, W)相(Pm-3m 空间群)^[11],此空间结构也说明着这类共析组织具有脆性特征。

图6展示 COSTE 钢/Stellite6 堆焊层界面附近的硬度变化。在手工电弧焊制备的堆焊板中, COSTE 钢基体的维氏硬度值在 220HV 左右,逐渐过渡到 Stellite6 一侧的 430HV 左右。相比堆焊板,服役 6 年后 Stellite6 堆焊层的硬度大大增加,在远离熔合线区域的维氏硬度为 490HV 左右,在近熔合线区域维氏硬度值高达 730HV 左右。这种超高的硬度印证了服役 6 年后 Stellite6 堆焊层内的组织发生了转变。

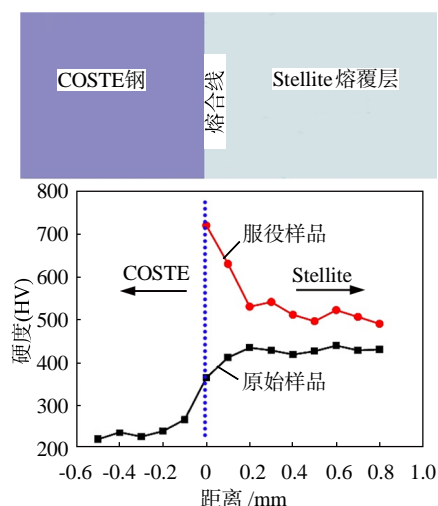


图6 COSTE 钢/Stellite 堆焊层界面附近的硬度变化
Fig.6 Hardness change of position near the interface of COSTE steel/Stellite coating

3 实验结果与讨论

采用 SMAW 方法在 COSTE 钢上堆焊了 Stellite6 合金, COSTE 钢基体散热效果较好,这使得 COSTE 钢/Stellite6 合金界面具有较大的温度梯度,有利于树枝晶在垂直于熔合线方向的生长。在堆焊

过程中,大量的热输入导致 COSTE 钢靠近界面附近的金属发生了熔化,对 Stellite6 堆焊层近界面区域产生稀释作用,这从近界面较高的 Fe 含量可以印证(图 4(c))。在常温下 Fe 和 Cr 都是体心立方结构,Co 是密排六方结构,但是在高温熔覆过程中,Co 晶体中由于混入了 Fe 元素而变成面心结构,熔覆后的快速冷却作用使得这种面心结构保留了下来。

服役 6 年后 Stellite 堆焊层中近界面的平均 Fe 含量超过 36at%,这要高于堆焊板中的 24at%(表 2)。在 COSTE 钢/Stellite6 合金堆焊层长期服役过程中,根据菲克第一定律,Fe 元素不断地从基体钢向 Stellite6 合金堆焊层发生长程扩散,这加剧了 Stellite6 堆焊层近界面区域的 Fe 的聚集程度(图 4(c))。一方面,根据 Cr-Fe 和 Cr-Co 相图,35%~45% Fe 很容易导致 FCC 结构的 α -Co(Cr, Fe, W)固溶体发生相分离,形成体心立方 α' -FeCo 固溶体和四方结构 σ -CrCo 相。另一方面,在近剥落面的相分离的区域,Fe 和 Cr 成分呈现大幅度的波动,这也再一次证实了 Fe 和 Cr 元素在这个区域发生了分离,正好对应于分别富 Fe 和富 Cr 的 α' / σ 类似共析相组织(图 3)。文献[12]表明,因为 α' 和 σ 相都表现出金属间化合物的特征,所以无论是简单立方 α' -FeCo(Cr, W)还是四方 σ -CrCo(Fe, W)都比面心 α -Co(Fe, Cr, W)更脆,界面区域的高硬度印证了这种变化(图 6)。在长时间的工作载荷和热应力作用下,这种脆性组织最终导致汽轮机阀体表面的 Stellite6 堆焊层的失效。

4 结论

(1) 在 COSTE 钢/Stellite6 合金堆焊板中, Stellite6 近界面区域出现了垂直于熔合线的树枝晶,并且发生了 Fe 元素的聚集。

(2) 服役过程中,在 COSTE 钢/Stellite6 堆焊层界面 Fe 元素发生长程扩散;Stellite6 堆焊层中过高的 Fe 含量导致 α -Co(Cr, Fe, W)固溶体分离为脆性 α' -FeCo(Cr, W)相和四方 σ -CrCo(Fe, W)相。在长时间的工作载荷和热应力作用下,这种脆性组织最终导致 Stellite6 堆焊层的失效。

参考文献:

- [1] Nomoto H. Development in materials for ultra-supercritical (USC) and advanced ultra-supercritical (A-USC) steam turbines [M]//Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017: 263-278.

(下转第 146 页)

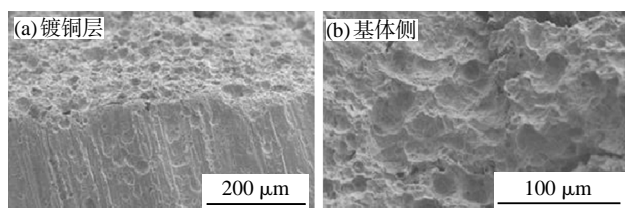


图5 铜镀层侧的断口形貌

Fig.5 Morphologies of the fracture at the copper plating side

3 分析与讨论

缸体主裂纹平行于轴向,表面缸体的开裂主要由周向的拉应力所导致。进一步分析其开裂原因,主要包括缸体使用过程中内腔的压力过大最终引起缸体开裂和产品自身材料强度不足。缸体存在外径尺寸的增大,裂纹末端存在分叉,断口呈韧性断口,表明缸体的开裂属于韧性断裂。韧性断裂一般是由超载引起的,所以不排除开裂是由缸体内部压力过大造成的。由于缸体在使用过程中的压力缺乏数据,所以以下仅从产品自身问题进行分析。

通过对开裂的中缸进行化学成分测试、光学金相组织观察、拉伸试验、冲击试验、SEM断口观察等分析发现,材料的成分符合要求。内壁堆焊会对材料的冲击韧性产生较大影响。激光熔覆层厚度均匀,未见异常缺陷。内孔铜镀层厚度不均匀,在堆焊层及焊接热影响区都有裂纹存在,基体表面组织为回火索氏体。随着距堆焊层/基体界面的距离增加,基体组织中铁素体含量增加。同时也存在堆焊熔体向基体中的渗入现象^[6]。通过扫描电子显微镜观察堆焊一


侧断口,发现基体表面存在二次裂纹。内孔堆焊层及其焊接热影响区微裂纹和焊接金属的渗入现象,是缸体裂纹的源头,是造成开裂的主要原因。另外,样件的基体力学性能指标未达到国标要求,强度指标偏低,会影响缸体安全使用裕度。但产品整体尺寸,特别是厚度较大,自身的力学性能存在不均匀性等情况,而生产企业目前对此还没有明确的指标要求。

4 结论

(1) 内孔堆焊层和其焊接热影响区存在微裂纹,以及焊接金属的渗入现象,是造成开裂的主要原因。应改善堆焊工艺,减少其对缸体的热影响。

(2) 材料的塑性较好,但强度未达到国家标准,会对缸体开裂产生不利影响。应明确调质后的力学性能标准,保证调质后的产品强度满足国家标准。

参考文献:

- [1] 赵永美. 煤矿液压支架立柱、千斤顶失效分析及解决方案[J]. 山东煤炭科技,2020(5):145-146.
- [2] 丁少华,付存银,贾春强. 液压支架双伸缩立柱胀缸问题及原因分析[J]. 煤矿机械,2016,37(12):118-119.
- [3] 潘鸿,周鹏飞,钱英豪,等. LNG应急调峰站弯头开裂失效分析[J]. 热加工工艺,2019,48(24):174-177.
- [4] 邢艳秋,武卫超,王会强,等. 45钢液压缸耳环断裂失效分析[J]. 热加工工艺,2019,48(6):255-258.
- [5] 徐萃萍,孙方红,齐秀飞. 材料成型技术基础[M]. 北京:清华大学出版社,2013.
- [6] 杨彦林,丁志鹏,石仁强. 表面堆焊引起集箱吊杆断裂失效分析[J]. 焊接技术,2021,50(S1):87-90. 

(上接第142页)

- [2] 彭志方,刘省,杨华春,等. Grade 91耐热钢的硬度与持久强度、许用应力和运行/剩余寿命的相关性研究[J]. 材料工程,2021,49(9):109-118.
- [3] 杨光磊,王东,李玉艳,等. ENiCrFe-3过渡层对钴基硬质层成分和性能的影响[J]. 热加工工艺,2019,48(4):131-137.
- [4] 刘永民. 西门子1000 MW汽轮机汽门常见故障分析与处理[J]. 电力安全技术,2019,21(1):60-63.
- [5] Wu Y, Bousser E, Schmitt T, et al. Thermal stability of a Stellite/steel hardfacing interface during long-term aging [J]. Materials Characterization,2019,154:181-192.
- [6] Karmakar D P, Muvvala G, Nath A K. High-temperature abrasive wear characteristics of H13 steel modified by laser remelting and clad with Stellite 6 and Stellite 6/30% WC [J]. Surface and Coatings Technology,2021,422:127498.
- [7] Hao K, Zhang C, Zeng X, et al. Effect of heat input on weld microstructure and toughness of laser-arc hybrid welding of martensitic stainless steel [J]. Journal of Materials Processing Technology,2017,245:7-14.
- [8] Henzler W, Sawa M, Trebicki P, et al. Influence of austenitic interlayer on the properties of stellite padding welds after impact-hardening [J]. Welding Technology Review,2021,93(2):13-20.
- [9] Rajeev G P, Kamaraj M, Bakshi S R. Hardfacing of AISI H13 tool steel with Stellite 21 alloy using cold metal transfer welding process [J]. Surface and Coatings Technology,2017,326:63-71.
- [10] Khorram A. Microstructural evolution of laser clad Stellite 31 powder on Inconel 713 LC superalloy [J]. Surface & Coatings Technology,2021,423:127633.
- [11] Brussk S, Schrey A, Barnikel J, et al. Steam turbine valve hard-facings:experience and latest developments [J]. Turbine Technical Conference and Exposition,2014,45585:1-10.
- [12] Nasser A M, Abadir M F, Nam K T, et al. Synthesis and film formation of iron-cobalt nanofibers encapsulated in graphite shell:magnetic,electric and optical properties study [J]. Journal of Materials Chemistry,2011,21:10957. 