

激光与光电子学进展

超(超)临界火电机组阀门用耐热钢激光熔覆
钴基合金修复研究刘福广¹, 李勇¹, 杨二娟¹, 米紫昊¹, 王博¹, 刘刚¹, 宋梦华^{2*}, 杨海欧^{3**}¹西安热工研究院电站材料焊接与修复技术研究所, 陕西 西安 710054;²西安航空学院材料工程学院, 陕西 西安 710077;³西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072

摘要 整体式阀门阀座是超(超)临界火电机组中的关键重要部件。实现阀门密封面的现场修复是火电装备制造领域的研究热点之一。本文针对火电机组阀门常用SA182 F91耐热钢开展了激光熔覆Stellite 6钴基合金修复试验研究,通过改变工艺参数制备了一系列熔覆厚尺寸修复试样,并开展了金相、硬度、三点弯曲、室温冲击等分析测试。结果表明:激光熔覆Stellite 6钴基合金组织具有典型的外延生长凝固特征,主要由面心立方 γ -Co固溶体组成;修复试样的硬度可达450~500 HV,抗弯强度可达1246~1582 MPa,室温冲击功可达40~60 J,修复层与基材的结合强度高。熔覆层内易出现气孔、熔合不良等缺陷,熔覆工艺参数的选择应遵循能量密度低、可靠性高的原则。

关键词 激光技术; 激光熔覆修复; Stellite 6钴基合金; 硬度; 三点弯曲试验; 室温冲击功

中图分类号 TG146

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0514007

A Research on Laser Cladding Co-Based Alloy to Repair Heat Resistant
Steel of the Valves Used in Ultra-Super Critical Thermal Power PlantsLiu Fuguang¹, Li Yong¹, Yang Erjuan¹, Mi Zihao¹, Wang Bo¹, Liu Gang¹,
Song Menghua^{2*}, Yang Haiou³¹*Institute of Welding and Repair Technology for Power Plant Materials, Xi'an Thermal Power
Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710054, China;*²*School of Materials Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an, Shaanxi 710077, China;*³*State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an,
Shaanxi 710072, China*

Abstract An integral valve seat is an essential component in ultra-super critical (USC) thermal power plants. Onsite remanufacturing of the valve-seat sealing face is a major focus of thermal power plant manufacturing. In this paper, a laser cladding Stellite 6 Co-based alloy repair study was carried out for the commonly used SA182 F91 heat resistant steel for nuclear valves. A series of cladding thick-size repair samples were prepared by changing the process parameters, and the metallographic observation, hardness testing, three-point bending testing, and impact testing at room temperature were performed. The cladding layers consisted of a face-centered-cubic γ -Co solid solution with epitaxial growth solidification characteristics. The hardness, bending strength, and impact energy of the repaired samples were 450–500 HV, 1246–1582 MPa, and 40–60 J, respectively. Bonding strength between the

收稿日期: 2020-04-20; 修回日期: 2020-08-21; 录用日期: 2020-09-15

基金项目: 西安热工研究院自立科研基金(TN-18-TYK14)、西安航空院校级科研基金(2019KY0201)

*E-mail: songmenghua@xaau.edu.cn; **E-mail: yanghaiou@nwpu.edu.cn

cladding layer and substrate was very high. The gas pore and bad bonding often exist in a cladding layer. The selection of cladding process parameters should follow the principles of low power density and high reliability.

Key words laser technique; laser cladding repair; Stellite 6 Co-based alloy; hardness; three-point bending test; impact energy at room temperature

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390; 350.3850

1 引言

阀门是火电发电机组中负责启停、运行、调整的重要部件,具有用量大、成本高、设计制造精密、工作条件恶劣、起闭频繁等特点,其使用可靠性是影响机组安全经济运行的关键因素之一^[1]。在超(超)临界火电机组中,阀门与阀座为整体式结构,阀门与阀座密封面一旦出现裂纹、损伤或脱落等问题,就只能采用割断阀门返厂维修的方式进行再制造,不仅工程难度大,而且工期长,风险大,费用高,严重影响了机组检修工作的顺利进行。因此,研发超(超)临界机组重要阀门阀座密封面损伤部位的现场修复技术具有极重要的工程意义和一定的需求紧迫性。

激光熔覆修复技术是一种利用高能激光束熔化熔覆材料以实现损伤部位再制造的修复技术,能够制备稀释率低、与基体呈良好冶金结合的高性能修复层^[2-3]。激光熔覆修复技术采用的是数字化控制方式,其本质是激光增材制造技术在修复领域的应用,能够实现复杂损伤部位的现场采集与自动化修复,已在诸多领域实现了应用^[4-7],是实现超(超)临界火电机组阀门阀座现场修复最具潜力的修复技术。

Stellite 6 钴基合金是一种应用广泛的 Co-Cr-W 系合金,具有优异的耐磨、抗氧化、耐腐蚀与耐高温性能,已被广泛应用于高温装备的制造领域,特别是表面增强与修复领域^[8]。诸多学者就 Stellite 6 钴基合金涂层的制备、组织、性能与改性增强等展开了研究,如:Sun 等^[9]研究了脉冲能量、频率、脉宽、送粉率、搭接率等工艺参数对激光熔覆 Stellite 6 钴基合金熔覆层温度与几何形貌的影响,并构建了它们之间的关系;任超等^[10]等发现在 17-4PH 不锈钢表面熔覆的 Stellite 6 钴基合金涂层主要由面心立方 γ -Co 及碳化物构成,其耐水蚀性能较 17-4PH 不锈钢显著提升;余廷等^[11]研究了激光熔覆 Stellite 6 涂层的高温摩擦行为,结果表明,该涂层具有优异的耐磨损性能,但在 900 °C 时会软化,因此建议其适宜的工作温度区间为 700~800 °C;Lima 等^[12]研究了超音速火焰喷涂与热丝钨极氩弧焊 Stellite 6 涂层的耐

磨与耐蚀性能,结果发现,氩弧焊涂层具有非常优异的耐冲蚀与耐腐蚀性能;易伟等^[13]利用混合粉末法在激光熔覆 Stellite 6 钴基合金涂层中原位生成了 NbC 增强相,该相能显著增强涂层的硬度与耐磨损性能,当 NbC 的质量分数为 10% 时,涂层的硬度与耐磨性达到最佳;徐家乐等^[14]利用超声辅助激光熔覆的方法制备了钴基合金涂层,结果发现,超声能促进细小均匀等轴晶的形成,从而改善了涂层的抗高温氧化性能;Yan 等^[15]利用激光毛化-熔覆两步法制备了 WS₂/NbC/Stellite 6 复合涂层,该复合涂层的摩擦因数和磨损量较 Stellite 6 涂层显著降低。

SA182 F91 是 91 型(Cr9Mo1)耐热钢的一种,已被广泛应用于超(超)临界火电机组阀门、阀座类零件的制造。该类阀门、阀座密封面通常堆焊 Stellite 6 钴基合金,以满足其耐高温、冲击、腐蚀、磨损等要求^[16]。所查资料显示,目前利用激光熔覆 Stellite 6 钴基合金涂层来修复磨损失效零件的报道还很少,鉴于此,本文针对超(超)临界火电机组阀门常用 SA182 F91 耐热钢进行了激光熔覆 Stellite 6 钴基合金的修复试验研究。本文通过调整光斑尺寸与激光功率,制备了一系列修复试样,然后对试样进行了金相组织、硬度、三点弯曲、室温冲击等分析测试,以研究激光熔覆 Stellite 6 钴基合金修复 SA182 F91 耐热钢的性能、工艺特性,为超(超)临界火电机组阀门现场修复技术的研发提供参考。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

SA182 F91 耐热钢的化学成分如表 1 所示。将 F91 耐热钢切割成尺寸为 200 mm × 30 mm × 25 mm 的块体作为待修复基材。熔覆材料采用商用 Stellite 6 钴基合金粉末,其粒径为 44~150 μm ,其成分如表 2 所示。试验前,先将金属粉末在 110 °C 真空干燥箱内进行 4 h 烘干处理;同时利用角磨机打磨基材表面,并用酒精进行清洗,以去除基材表面的氧化层及油污。

2.2 试验方法

激光熔覆修复试验在送粉式激光增材制造成

表1 SA182 F91耐热钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of SA182 F91 heat resistant steel

Element	Mass fraction/%
C	0.08—0.12
Cr	8.00—9.50
Mo	0.85—1.05
Si	0.20—0.50
Mn	0.30—0.50
V	0.18—0.25
Nb	0.06—0.10
N	0.03—0.07
Fe	Bal.

表2 试验用Stellite 6钴基合金粉末的化学成分

Table 2 Chemical composition of Stellite 6 Co-based alloy powder

Element	Mass fraction/%
C	1.15
Si	1.10
Cr	29.00
Mo	1.00
W	4.00
Fe	3.00
Ni	3.00
Mn	0.50
Co	Bal.

形设备上完成,如图1所示。该设备由4 kW 光纤激光器、五轴数控机床、高精度送粉器、同轴送粉熔覆头组成。

在前期工艺参数探索试验的基础上,确定了本次试验的工艺参数,如表3所示。本次试验重点考查光斑尺寸、激光功率对修复的影响。采用十字光栅式沉积路径。为模拟现场修复条件,修复试验在

表3 激光熔覆修复试验工艺参数

Table 3 Parameters used in laser cladding repair experiment

No.	Spot size/ mm	Power/ W	Scanning speed/ (mm·min ⁻¹)	Feeding rate / (g·min ⁻¹)	Lateral offset / mm	Vertical offset/ mm
1	3	1000	600	10.24	2	0.70
2	3	1500	720	10.24	2	0.70
3	3	2000	840	8.96	2	0.50
4	4	1000	720	8.96	2.2	0.45
5	4	1500	840	8.96	2.2	0.45
6	4	2000	600	8.96	2.2	0.60
7	5	1000	840	8.96	2.5	0.40
8	5	1500	600	8.96	2.5	0.60
9	5	2000	720	8.96	2.5	0.60



图1 试验用激光增材制造设备

Fig. 1 Laser additive manufacturing system used in the experiment

大气环境条件下进行,修复层尺寸为190 mm × 30 mm × 5 mm,如图2所示。

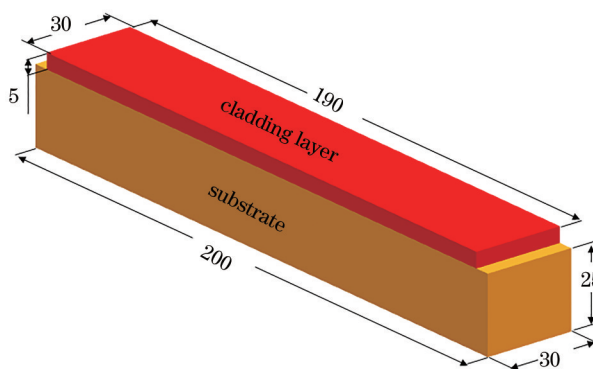


图2 激光熔覆修复试样示意图

Fig. 2 Schematic of laser cladding repair sample

修复结束后,在修复试样上分别截取金相试样、三点弯曲试样与冲击试样。金相试样经打磨、抛光后采用Tmvs-1型维氏硬度计进行显微硬度测试,测试沿平行于结合面(水平)与垂直于结合面(竖直)两

个方向进行,测量间隔为 0.5~1 mm,加载载荷为 4.9 N,加载时间为 20 s。硬度测试结束后,利用王水对试样进行腐蚀,然后采用 Olympus GX51 型金相显微镜进行金相观察。在熔覆层内,沿水平方向截取尺寸为 10 mm × 10 mm × 5 mm 的试样,打磨后,利用 X 射线衍射仪(XRD)进行物相分析。对于每一组修复试样,分别取 3 个三点弯曲与室温冲击试样。三点弯曲试样的尺寸为 80 mm × 4 mm × 10 mm,在高度方向上,熔覆层与基材各占一半。测试时,熔覆层一侧朝下。冲击试样采用尺寸为 55 mm × 5 mm × 10 mm 的 U 型缺口标准试样,在高度方向上,基材与熔覆层各占一半,缺口开在熔覆层一侧。按标准程序,分别进行三点弯曲与室温冲击测试,以评价修复试样的强度、结合强度^[17-18]与耐冲击性能。

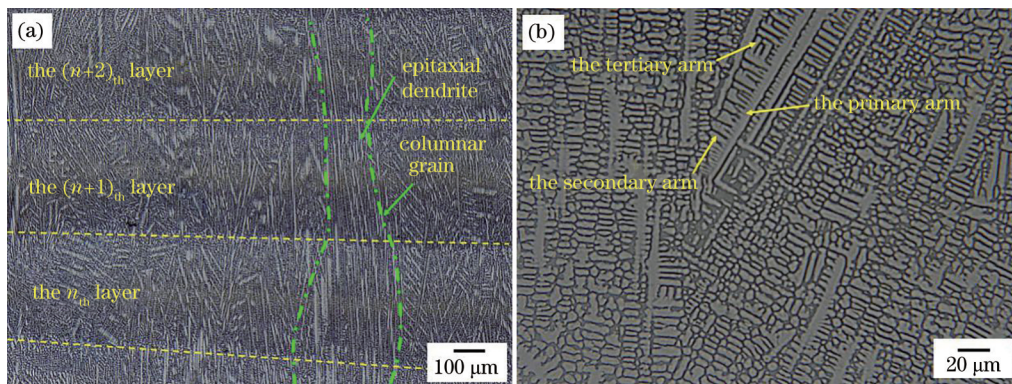


图3 激光熔覆 Stellite 6 钴基合金的典型金相组织。(a)宏观组织;(b)微观组织

Fig. 3 Typical microstructures of laser cladding Stellite 6 Co-based alloy. (a) Macrostructure; (b) microstructure

对熔覆修复试样进行 XRD 物相分析,结果如图 4 所示。由图 4 可知,9 个试样的 XRD 衍射图谱中有 3 个较显著的衍射峰,个别试样能够分辨出 4 个衍射峰(如 1、2、4、8 号试样)。与纯 Co 的 PDF 卡片进行对比后发现,衍射图谱中的 3 个显著衍射峰与之相符(如图 4 中虚线框所示),由此可鉴定这

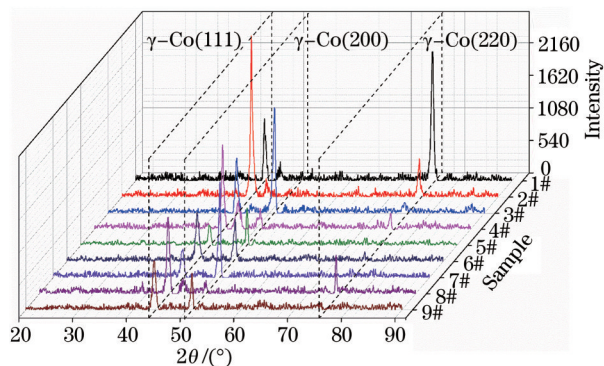


图4 9 个试样的 XRD 谱

Fig. 4 XRD patterns of nine samples

3 结果与讨论

3.1 激光熔覆 Stellite 6 钴基合金修复试样的组织

激光熔覆层内的典型金相组织如图 3 所示。激光熔覆 Stellite 6 钴基合金呈现出显著的外延生长特点,柱状晶以及柱状枝晶均比较明显,且柱状晶粒能够跨越若干个熔覆层,如图 3(a)所示。在熔池底部,枝晶沿熔池底部法线方向外延生长,当靠近熔池中心时,外延生长的枝晶逐渐向激光扫描方向靠近,从而呈现出颗粒状形态。激光熔覆 Stellite 6 合金的枝晶比较发达,通常具有发达的二次枝晶臂,也可见三次分枝[如图 3(b)所示],一次枝晶间距在 6~14 μm 范围内。由金相组织可知,熔覆层主要由单一相组成。

3 个衍射峰对应面心立方结构的 γ -Co 相。与标准衍射峰相比,实际衍射峰整体向左偏移,这是由 Cr、W 等合金元素固溶导致晶格常数变大引起的。同时可以发现,各试样三强峰的强度不一致,与标准衍射峰强度也不一致。这是由于熔覆层内的凝固过程为枝晶外延生长,晶体的取向性较强,不同试样的 XRD 测试面内不同取向的晶粒比例有所差异,与标准衍射峰测试所用粉末样品的随机晶体取向也不同。

3.2 激光熔覆 Stellite 6 钴基合金修复试样的硬度

激光熔覆 Stellite 6 钴基合金修复试样的硬度分布如图 5 所示。熔覆层内的硬度较高,平均可达 450~500 HV,显著高于 SA182 F91 基材的硬度(200~250 HV)。在各熔覆层内,水平方向的硬度分布比较均匀,说明该方向上熔覆层的组织、性能较均匀,如图 5(a)、(c)、(e)所示;在竖直方向上,从熔覆层顶部到底部,硬度略有下降,但下降的趋势

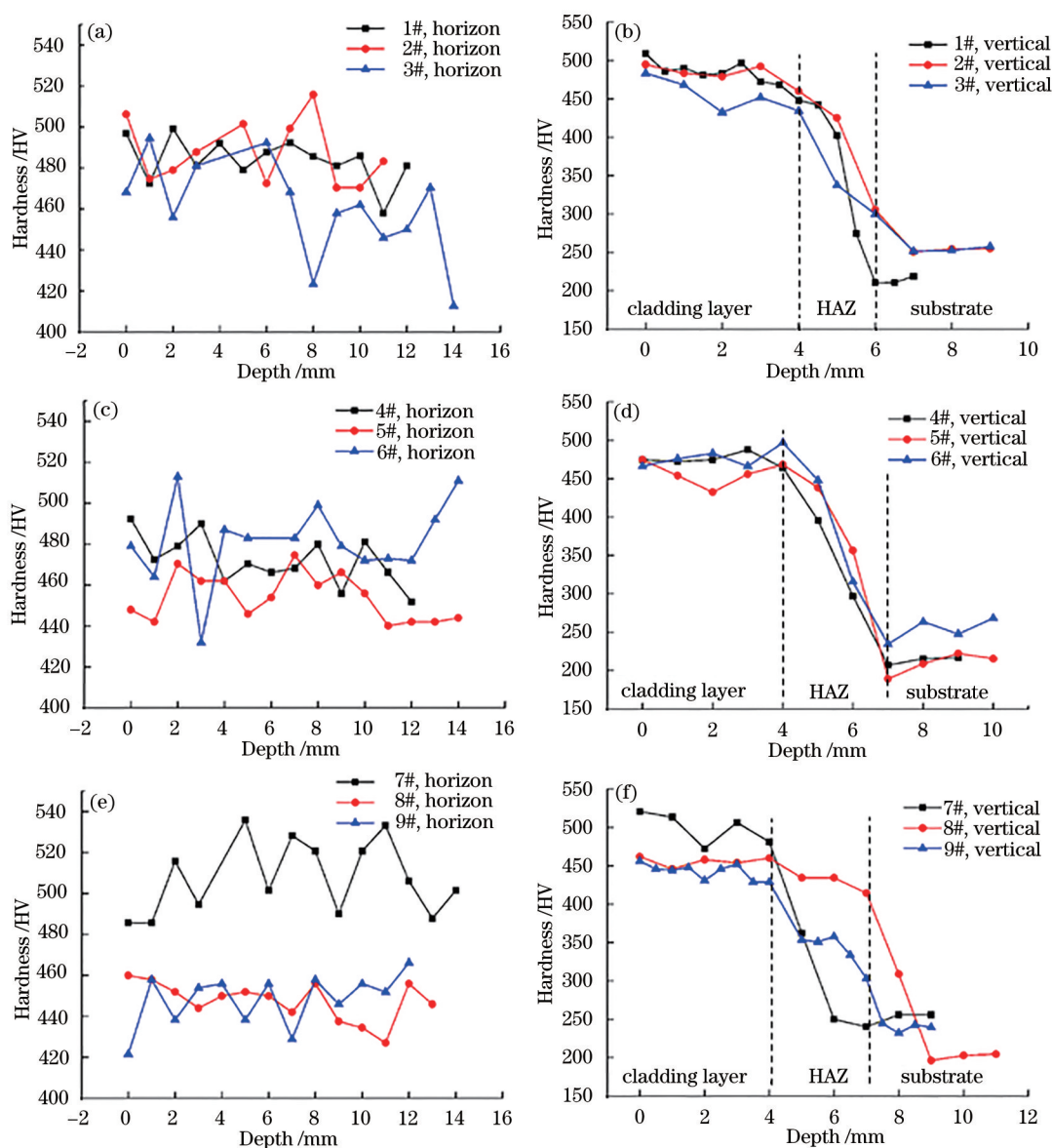


图5 激光熔覆修复试样的硬度分布。(a) 1#~3#试样,水平方向;(b) 1#~3#试样,竖直方向;(c) 4#~6#试样,水平方向;(d) 4#~6#试样,竖直方向;(e) 7#~9#试样,水平方向;(f) 7#~9#试样,竖直方向

Fig. 5 Hardness profile of laser cladding repair samples. (a) 1#, 2# and 3# samples, parallel to the interface; (b) 1#, 2# and 3# samples, along the deposition direction; (c) 4#, 5# and 6# samples, parallel to the interface; (d) 4#, 5# and 6# samples, along the deposition direction; (e) 7#, 8# and 9# samples, parallel to the interface; (f) 7#, 8# and 9#, along the deposition direction

不明显[如图5(b)、(d)、(f)所示],说明整个熔覆层内组织、性能的均匀性比较好。但值得注意的是,在相同的光斑直径下,随着激光功率增大,硬度沿垂直方向的下降趋势逐渐增大,硬度值也从500 HV下降到450 HV。激光熔覆过程中的冷却速度较大($10^4 \sim 10^6$ K/s)^[19-20],使得熔覆层材料的激冷效应比较明显,固溶程度较大,从而有利于发挥Stellite 6钴基合金固溶强化的特点,因此熔覆层的硬度高。但

是在激光熔覆过程中,随着沉积高度增加,热积累效应逐渐增大,会对下部已沉积熔覆层产生回火作用^[21],因此熔覆层硬度从顶部到底部会有下降的趋势;随着激光功率增大,热积累造成的回火效应加重,从而导致硬度下降。

3.3 激光熔覆 Stellite 6 钴基合金修复试样的三点弯曲性能与结合强度

修复试样的三点弯曲测试结果如图6所示,可

可以看出,激光熔覆修复试样均表现出了较高的抗弯强度,抗弯强度可达1246~1582 MPa,这与熔覆层硬度测量结果相符,其主要原因是激光熔覆层高的固溶程度使得Stellite 6钴基合金的固溶强化效果显著。此外,对于不同直径的光斑,功率越小,抗弯强度就越大,特别是直径越大的光斑,这种趋势越明显,这也与热积累效应的回火作用有关。热积累回火效应越明显,碳化物析出越多,固溶强化效果越弱,强度和硬度越低。

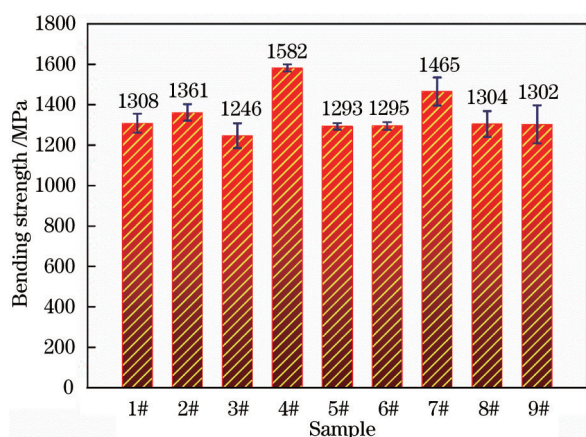


图6 激光熔覆修复试样的抗弯强度

Fig. 6 Bending strength of laser cladding repair samples

图7为各修复试样在三点弯曲测试过程中的载荷-位移曲线,可以看出:在弯曲初期(位移约小于0.5 mm)为弹性变形阶段,载荷随位移线性增加;之后,载荷-位移曲线呈类抛物线型变化(位移约为

0.5~0.75 mm),说明试样开始屈服;此后,随着位移增加,载荷缓慢增加,说明试样进入塑性变形阶段,并存在一定程度的加工硬化;当塑性变形发生到一定程度时,载荷出现断崖式下降,此后载荷随位移增大而有所回升,并直至测量结束。

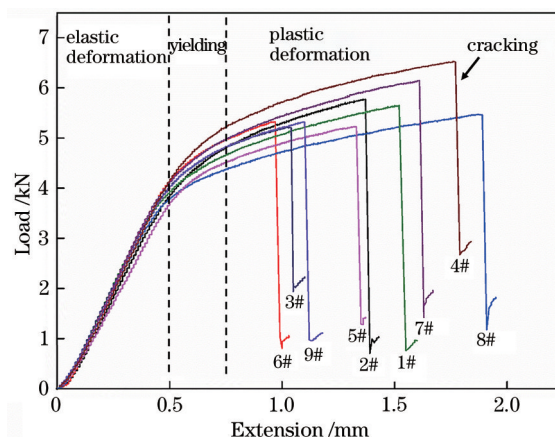


图7 激光熔覆修复试样在三点弯曲测试过程中的载荷-位移曲线

Fig. 7 Load-extension curves of laser cladding repair samples in three points bending testing

图8为三点弯曲测试后的试样。由图可知,测试试样中的开裂裂纹均在熔覆层内,且近乎垂直于结合面,未见沿熔覆层与基材结合面的横向裂纹。结合图7-8可知,载荷的断崖式下降是由于熔覆层的开裂,之后基材部分继续发生弯曲,由于基材部分在塑性变形过程中发生加工硬化而使得载荷-位移曲线有所回升。

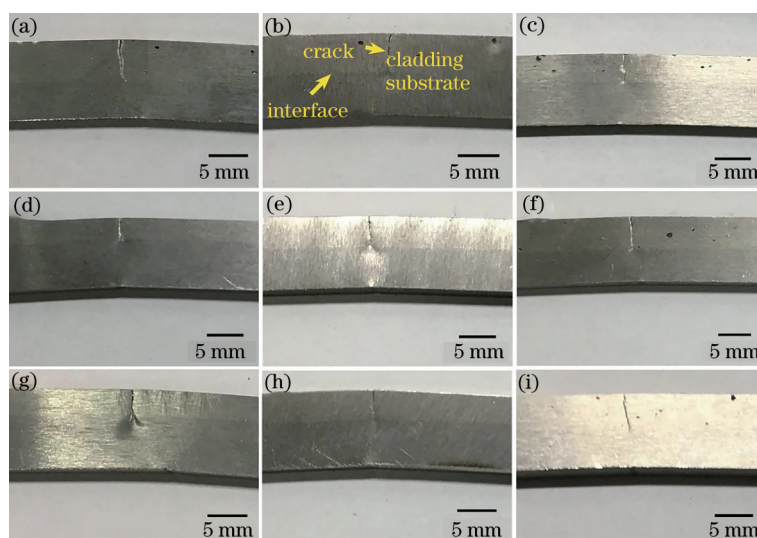


图8 三点弯曲测试后的试样。(a) 1#试样;(b) 2#试样;(c) 3#试样;(d) 4#试样;(e) 5#试样;(f) 6#试样;(g) 7#试样;(h) 8#试样;(i) 9#试样

Fig. 8 Samples after three-point bending testing. (a) 1# sample; (b) 2# sample; (c) 3# sample; (d) 4# sample; (e) 5# sample; (f) 6# sample; (g) 7# sample; (h) 8# sample; (i) 9# sample

在三点弯曲过程,沿下压方向向下的一侧受拉应力作用,向上的一侧受压应力作用,且越靠近上下表面应力越大。在测量过程中,熔覆层一侧朝下,在弯曲过程中主要受拉应力作用。在经历弹性变形、屈服、塑性变形后,熔覆层在拉应力作用下发生开裂,因此裂纹位于熔覆层内且垂直于结合面。随着熔覆层开裂,应力最大位置会逐渐过渡到结合面处,但直至测量结束未见结合面处有横向裂纹,说明在弯曲变形过程中,结合面始终保持牢固结合而未发生开裂。这也说明激光熔覆 Stellite 6 钴基合金修复试样具有很高的结合强度,变形过程中不会优先开裂。

3.4 激光熔覆 Stellite 6 钴基合金修复试样的室温冲击性能

图9展示了激光熔覆 Stellite 6 钴基合金修复试样的室温冲击性能,可以看出,修复试样的冲击性能波动较大,除2#、7#试样的冲击韧性较差外,其余修复试样均具有较高的冲击韧性(冲击功可达40~60 J)。在光斑直径相同的条件下,2#、4#、7#试样的冲击韧性最差,这与其各自强度最高相对应,这也说明高强度是引起韧性降低的原因之一。虽然4#试样的抗弯强度最高,但其依然具有较高的冲击韧性,这说明还存在影响激光熔覆 Stellite 6 钴基合金修复试样冲击性能的其他原因。

采用金相显微镜对2#、4#、7#试样进行仔细观

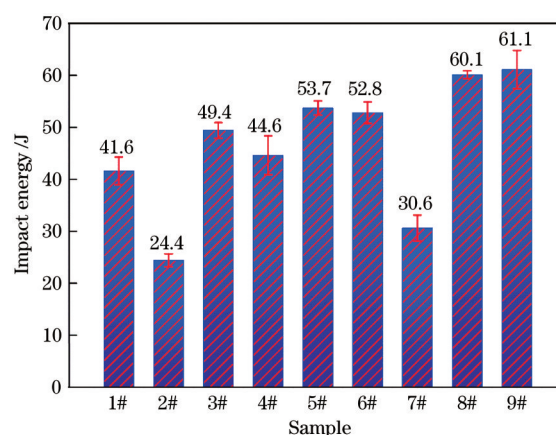


图9 激光熔覆修复试样的冲击性能

Fig. 9 Impact properties of laser cladding repair samples

察后发现,三者均存在明显的孔洞缺陷,如图10所示。其中:一类缺陷表现为细小而分散的倒三角形,且多分布在熔池边缘处,可判断为熔合不良缺陷^[22];另一类缺陷为光滑的圆形孔洞,位置不固定,可判断为气孔缺陷。值得注意的是,2#试样中的气孔尺寸非常大,直径可达近500 μm,且数量可观,如图10(a)所示;而4#、7#试样中的气孔尺寸较小,且数量较少。由此可知,孔洞缺陷,特别是熔合不良缺陷的尖角位置处会产生显著的应力集中,从而严重损害试样的冲击性能。2#试样内不但孔洞数量多,还存在大尺寸的气孔,因此冲击韧性最低;4#试样内的孔洞缺陷相对较少,因此冲击韧性降低得较少。

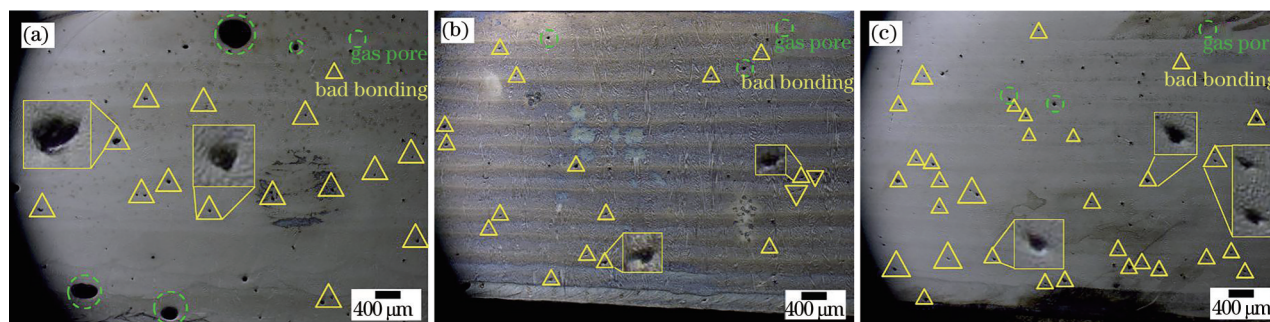


图10 修复试样中的孔洞缺陷。(a) 2#试样;(b) 4#试样;(c) 7#试样

Fig. 10 Porosity defects in laser cladding repair samples. (a) 2# sample; (b) 4# sample; (c) 7# sample

熔覆层中的气孔主要有两个来源,一是外来气体(粉末内的水蒸气或熔覆过程中卷入的送粉气等),二是熔池内生成的气体。分析试验过程及工艺参数可知,粉末经过充分烘干处理,可以排除粉末水分含量高的原因。Stellite 6 硬质合金中的C元素含量较高,在大气环境中熔覆时C元素易被氧化生成CO或CO₂气体;同时,高温熔池内金属元素的挥发也很明显,这些应该是熔覆层内气孔的主要来

源。2#试样对应的光斑直径最小,激光能量密度最高,因此熔池内的温度最高,碳的氧化与金属元素的挥发也最强烈,因此气孔缺陷突出。熔合不良缺陷是由抬升量与搭接率的不匹配造成的,当激光束无法完全重熔道间凹陷时就会形成倒三角形的熔合不良缺陷^[22]。当光斑直径为3 mm时,能量集中,此种情况下,送进的粉末能被充分熔化,此时扫描速度越大,熔覆层的高度就越小,从而导致2#试样

比1#、3#试样更易出现熔合不良。当光斑直径为4 mm和5 mm时,能量密度较低,此时功率成为影响熔覆层高度的主要因素。4#、7#试样在同组内的功率最小,且扫描速度偏大,导致熔覆层的实际高度低于抬升量,易出现熔合不良缺陷。在本文试验中,熔覆层内的熔合不良缺陷小而随机分散,说明缺陷的产生多是由工艺参数的局部波动造成的,也说明本次试验选用的工艺参数的安全系数较小,无法很好地适应成形过程中的参数波动。

综上所述,激光熔覆Stellite 6钴基合金修复试样具有良好的冲击性能,但需要控制熔覆层内的气孔、熔合等孔洞缺陷。熔覆工艺应该选择能量密度较低、熔覆层宽高比较大、抬升量较小的参数,并辅有良好的气氛保护措施,以确保获得致密的熔覆层。

4 结 论

本文针对超(超)临界火电机组整体式阀门现场修复问题,开展了激光熔覆Stellite 6钴基合金修复SA182 F91耐热钢的试验研究,取得了以下主要结论:

- 1) 激光熔覆能够制备出冶金质量良好、结合强度高、厚度较大的修复层;
- 2) 熔覆层组织明显的外延生长的柱状晶特征,主要由 γ -Co固溶体组成;
- 3) 熔覆层具有优良的强度与韧性,硬度可达450~500 HV,抗弯强度可达1246~1582 MPa,室温冲击功可达40~60 J。
- 4) 气孔、熔合不良等孔洞缺陷对修复试样的韧性有显著的损害作用,熔覆工艺参数选择应该遵循能量密度低、可靠性高的原则。

参 考 文 献

- [1] Zhang Q M. Nuclear power valve parts design method[J]. Valve, 2013(1): 23-26.
张清明. 核电阀门主要零件设计要求[J]. 阀门, 2013(1): 23-26.
- [2] Zhang J, Wu W N, Zhao L Z. Research progress and development trend of laser cladding [J]. Hot Working Technology, 2013, 42(6): 131-134, 139.
张坚, 吴文妮, 赵龙志. 激光熔覆研究现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2013, 42(6): 131-134, 139.
- [3] Hu X Y. The surface modification research of laser cladding and N^+ injection after cladding on nuclear valve sealing surface of Stellite 6 alloy [D]. Hengyang: University of South China, 2015.
- [4] 胡西云. 核阀密封面Stellite 6合金激光熔覆及覆层注 N^+ 表面改性研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2015.
- [4] Wei G Z, Wen S T, Li B Z, et al. Study on microstructure and properties of repaired laser cladding on high-temperature forging mould for aeroengine pieces [J]. Hot Working Technology, 2008, 37(17): 29-31, 34.
卫广智, 温书涛, 李宝增, 等. 航空发动机制件热锻模激光熔覆修复层组织性能研究[J]. 热加工工艺, 2008, 37(17): 29-31, 34.
- [5] Liu S, Liu X B, Fu G Y, et al. Development of laser cladding and application on nuclear valve sealing surfaces [J]. Materials Review, 2009, 23 (S1): 203-205.
刘双, 刘秀波, 傅戈雁, 等. 激光熔覆技术及其在核阀门中的研究进展[J]. 材料导报, 2009, 23 (S1): 203-205.
- [6] Li Y N, Li Z G, Wang X X, et al. Fe-based wear-resistant coating on railroad switch prepared using laser cladding technology and its properties [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0402009.
李英男, 李铸国, 王晓翔, 等. 道岔尖轨表面的激光熔覆铁基耐磨涂层及其性能[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0402009.
- [7] Wang J S, Shu L S. Laser cladding remanufacturing and repair of agricultural tractor spindle [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071404.
王家胜, 舒林森. 农业拖拉机主轴激光熔覆再制造修复研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071404.
- [8] Wu Y, Liu Y, Chen H, et al. Developing the ductility and thermal fatigue cracking property of laser-deposited Stellite 6 coatings by adding titanium and nickel [J]. Materials & Design, 2019, 162: 271-284.
- [9] Sun S, Durandet Y, Brandt M. Melt pool temperature and its effect on clad formation in pulsed Nd:yttrium-aluminum-garnet laser cladding of Stellite 6 [J]. Journal of Laser Applications, 2007, 19(1): 32-40.
- [10] Ren C, Li Z G, Shu D, et al. Microstructure and water erosion resistance property of Stellite 6 coating by laser cladding on 17-4PH stainless steel surface [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (4): 0402010.
任超, 李铸国, 疏达, 等. 17-4PH不锈钢表面激光熔覆Stellite 6涂层组织及耐水蚀性能[J]. 中国激

- 光, 2017, 44(4): 0402010.
- [11] Yu T, Zhang Z X, Rao X X, et al. High-temperature wear behavior of laser-cladding Stellite 6 coating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(14): 141403.
余廷, 张子翔, 饶锡新, 等. 激光熔覆 Stellite 6 涂层的高温摩擦行为[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 141403.
- [12] Lima C R C, Belém M J X, Fals H D C, et al. Wear and corrosion performance of Stellite 6® coatings applied by HVOF spraying and GTAW hotwire cladding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 284: 116734.
- [13] Yi W, Chen H, Wu Y, et al. Effect of *in situ* NbC on microstructure and wear properties of laser cladding Co-based coatings [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0302010.
易伟, 陈辉, 吴影, 等. 原位 NbC 对激光熔覆 Co 基涂层组织和磨损性能的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0302010.
- [14] Xu J L, Zhou J Z, Tan W S, et al. High-temperature oxidation resistance of Co-based alloy coatings by ultrasonic vibration assisted laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102006
徐家乐, 周建忠, 谭文胜, 等. 超声振动辅助激光熔覆钴基合金涂层的抗高温氧化性能[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102006.
- [15] Yan H, Chen Z F, Zhao J, et al. Enhancing tribological properties of WS₂/NbC/Co-based self-lubricating coating via laser texturing and laser cladding two-step process [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 9907-9919.
- [16] Tang D, Wang J X. The application of cobalt base alloy on valve sealing face [J]. Valve, 2012 (5) : 19-22.
汤丹, 王建新. 钴基合金在阀门密封面上的应用 [J]. 阀门, 2012(5): 19-22.
- [17] Zhang L J. Evaluation of bond characteristics between porcelain and titanium fabricated by laser rapid forming [D]. Xi'an: The Fourth Military Medical University, 2009.
张丽君. 激光快速成形纯钛的烤瓷性能研究[D]. 西安: 第四军医大学, 2009.
- [18] Wang X S, Yang G R, Song W M, et al. Microstructure and bending behavior of Ni-Co/WC composite coatings on ZG45 steel deposited by vacuum sintering cladding [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37 (10) : 172-178.
王旭升, 杨贵荣, 宋文明, 等. 表面 Ni-Co/WC 复合熔覆层的组织与三点弯曲性能[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(10): 172-178.
- [19] Griffith M L, Ensz M T, Puskar J D, et al. Understanding the microstructure and properties of components fabricated by laser engineered net shaping (LENS) [J]. MRS Online Proceedings Library, 2000, 625(1): 9-20.
- [20] Wang L, Felicelli S D, Craig J E. Experimental and numerical study of the LENS rapid fabrication process [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009, 131(4): 041019.
- [21] Li L, Sun F, Zhang Y C. Effect of solution treatment on the performance of laser cladding of Stellite 6 alloy coating [J]. Surface Technology, 2017, 46(1): 78-81.
李丽, 孙峰, 张尧成. 固溶处理对激光熔覆 Stellite 6 合金涂层性能的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 78-81.
- [22] Li Y M, Yang H O, Lin X, et al. The influences of processing parameters on forming characterizations during laser rapid forming [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 360(1/2): 18-25.