

超高速激光熔覆镍基合金涂层组织性能及抗高温冲蚀性能

李 勇¹, 刘福广¹, 常 哲¹, 杨二娟¹, 许有海²,
刘国刚³, 刘冠红⁴, 姜提会⁴, 韩天鹏¹, 坚永鑫⁵

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西西安 710054; 2. 内蒙古蒙电华能热电股份有限公司乌海发电厂, 内蒙古乌海 016000; 3. 华能国际电力股份有限公司德州电厂, 山东德州 253001;
4. 中煤哈密发电有限公司, 新疆哈密 839000; 5. 西安交通大学 材料科学与工程学院, 金属材料强度国家重点实验室, 陕西西安 710049)

摘要: 针对火电锅炉受热面飞灰冲蚀损伤, 利用超高速激光熔覆在15CrMo钢管表面制备了具有优异抗高温冲蚀性能的镍基合金涂层。利用SEM、EDS、EBSD等对涂层显微组织进行分析, 进而评价了超镍基合金涂层的力学和抗高温冲蚀磨损性能。研究表明: 超高速激光熔覆镍基合金涂层具有较薄的厚度(约为215 μm)和低表面粗糙度(14.56 μm), 且涂层内部与界面处无明显裂纹。涂层主要由 γ -Ni枝晶和晶间Laves相组成, γ -Ni晶粒逐渐由涂层界面的平面晶转变为表面的等轴晶形态。涂层平均硬度为HV 328.07, 约为15CrMo钢基体的1.8倍, 且其与基材界面剪切强度为414.26 MPa, 证明其强界面结合。在600 $^{\circ}\text{C}$ 下涂层表现出优异的抗固态颗粒冲蚀性能, 冲蚀体积损失比基体降低约63%, 主要源于其高硬度和抗高温氧化性能。

关键词: 超高速激光熔覆; 镍基合金涂层; 显微组织; 力学性能; 高温冲蚀性能

作者简介:

李 勇(1982-), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为电站关键设备焊接修复与表面防护技术。

E-mail: liyong@tpri.com.cn

通信作者:

坚永鑫, 男, 副教授, 博导, 博士。E-mail: yxjian@xjtu.edu.cn

中图分类号: TG17

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

03-0335-09

基金项目:

中国华能集团总部科技项目(HNKJ21-H77); 陕西省重点研发计划项目(2023-YBGY-360)。

收稿日期:

2024-01-29 收到初稿,

2024-03-12 收到修订稿。

电力是国民经济发展的必要能源, 目前我国的发电形式包括火力发电、水力发电、风能发电、核能发电等。火力发电作为我国最主要的发电形式, 截至2023年底, 火力发电累计发电装机容量约为13.32亿千瓦, 占总发电装机容量的52%^[1]。在火力发电过程中, 煤炭、生物质等固体燃料燃烧时, 高温烟气携带颗粒状的不可燃及未燃尽物质如 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 ^[2]等, 流经受热面时, 会造成受热面出现冲蚀磨损^[3]。近年来, 由于电厂燃烧煤质下降等原因, 锅炉受热面的飞灰冲蚀现象愈加明显, 导致受热面管材不断快速减薄, 最终造成爆管问题^[4]。因此, 如何提高锅炉受热面管的抗高温冲蚀磨损性能是当前电厂亟须解决的问题。

由于飞灰冲蚀是从受热面管表面发生, 通过在管材表面制备防护涂层的防护可有效降低其冲蚀磨损速率。C. T. Kang等人^[5]对纯镍在氮气和空气中的抗高温冲蚀性能进行研究, 结果表明, 空气中纯镍的冲蚀速率远大于氮气, 主要因为高温氧化行为加速了纯镍的冲蚀速率。Sanhita Pal等^[6]的研究表明较高的屈服强度及抗拉强度对涂层的抗冲蚀性能可起到积极作用。基于当前的研究可以发现, 良好的综合力学性能和优异的抗高温氧化性能是提高材料抗高温冲蚀性能的关键因素。镍基高温合金含量较高的Ni、Cr等元素, 一方面使其在高温下具有良好的综合力学性能, 且其抗高温氧化性能较为优异, 有望作为涂层材料以提高锅炉受热面管的抗高温冲蚀磨损性能。

激光熔覆技术是一种常用的表面涂层制备技术, 与热喷涂等技术相比, 其制备的涂层具有致密、涂层与基材界面呈强冶金结合等优势^[7]。然而, 传统激光熔覆技术的制备效率较低, 涂层稀释率高, 熔覆过程对基体的热影响较大。相比之下, 超高

速激光熔覆技术具有涂层组织细密、稀释率低和对基材热影响小等优势^[8-9]。通过优化粉末与激光间的耦合作用,超高速激光熔覆优化了激光能量在粉末和基材的分配,使得更多的能量用以熔化粉末,在粉末到达基材表面前即发生熔化,从而保证高速熔覆过程中涂层的致密性;此外,基材表面的低能量输入有利于降低涂层的稀释率和基材热影响,适用于在锅炉受热面制备抗高温冲蚀防护涂层^[10]。然而,当前国内关于超高速激光熔覆技术研究较少,对于涂层的显微组织和性能控制技术尚不成熟,因此鲜有公开报道研究超高速激光熔覆技术在锅炉受热面防护涂层制备方面的适用性。

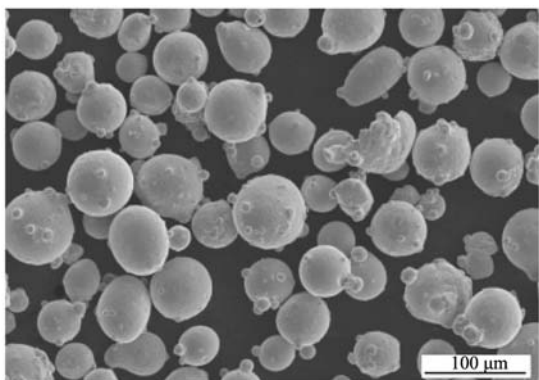
为此,本研究以电厂水冷壁用15CrMo钢为基材,采用超高速激光熔覆技术在其表面制备镍基高温合金

涂层,进而研究涂层的显微组织和力学性能特征,评价其在高温冲蚀磨损工况下的服役性能,研究结果有望为火电锅炉受热面防护涂层设计与超高速激光熔覆制备技术发展提供依据。

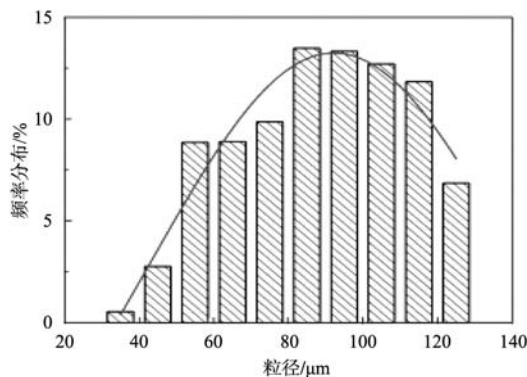
1 试样制备与方法

1.1 超高速激光熔覆镍基合金涂层制备

本试验中利用超高速激光熔覆技术制备镍基合金涂层,原料粉末为雾化球形粉末,粉末粒径为45~105 μm ,如图1所示。基体材料选用直径为50 mm的15CrMo钢管。表1为所用镍基合金粉末与基体材料的化学成分表。相比于基体,镍基合金粉末中Ni、Cr、Mo、Nb等元素的含量更高,从而保证涂层在高温环境下优异的力学和抗氧化性能^[11]。



(a) 雾化球形粉末



(b) 粉末粒径分布

图1 镍基合金原料粉末微观形貌与粒度分布

Fig. 1 Microscopic morphology and particle size distribution of the Ni-based alloy raw powder

表1 镍基合金粉末与基材化学成分

Tab. 1 Chemical compositions of the Ni-based alloy powder and the substrate

$w_B/\%$

类别	C	Si	Fe	Mn	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Ni
镍基粉末	0.05	0.13	18.92	0.12	18.86	5.18	2.90	0.91	0.47	余量
15CrMo钢	0.15	0.30	余量	0.56	0.98		0.48			

借助ZKZM-4kW中心送粉高速激光熔覆设备开展超高速激光熔覆镍基涂层制备,基于前期工艺优化,本试验中激光功率设置为1.8 kW,激光扫描速率为2.4 m/min,送粉量为0.4 r/min,离焦量为1 mm。为了获得较好的表面涂层质量,选取熔覆涂层的搭接率为80%。在熔覆过程中,采用高纯氩气作为保护气和送粉气,气体流量分别为14 L/min和5 L/min。在熔覆前,将15CrMo钢管进行表面喷砂处理,以除去其表面的氧化物及污垢,获得洁净的金属表面。原料粉末在真空干燥箱中进行烘烤处理,烘烤温度为120 $^{\circ}\text{C}$,保温时间为

4 h,以除去粉末中的水分,从而保证较好的流动性。

1.2 涂层显微组织观察分析

采用电火花线切割的方法,从熔覆后的管材上切取显微组织分析试样,并将涂层试样的横截面制备成金相试样,并利用配制的王水作为腐蚀剂,以显示涂层的显微组织。利用日立SU3500扫描电子显微镜和牛津能谱仪,观察涂层的显微组织和元素分布特征。利用蔡司Gemini SEM 500场发射扫描电子显微镜和背散射衍射仪,对涂层中晶粒的取向特征进行观察分析。

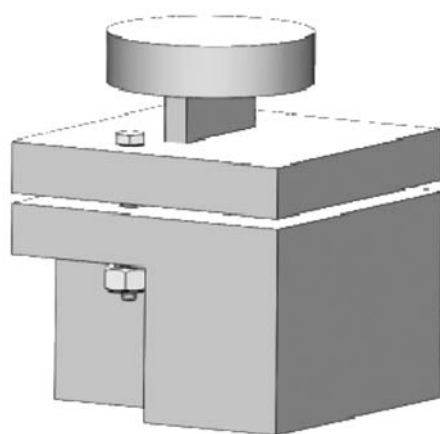
1.3 涂层力学性能表征

利用蔚仪HV100-TPTA显微维氏硬度计,测试超高速激光熔覆镍基合金涂层的显微硬度,加载载荷为198 g,保压时间为10 s。涂层与基材间的结合强度是影响涂层可靠性和安全服役寿命的关键性能。为此,本项目参考GB/T 6396—2008《复合钢板力学及工艺性能试验方法》,对涂层与基材间的界面结合强度进行了表征,测试装置及原理如图2所示。将安装好试样的测试模具置于SANS-CMT5305万能电子力学试验机上,控制试验机压头以0.24 mm/min的速度进行剪切试验,

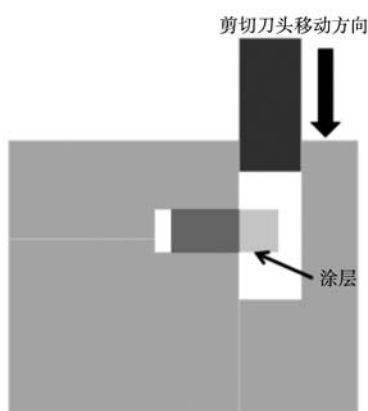
直至涂层从基体脱落停止试验。为此,涂层与基材间的界面剪切强度可以利用公式(1)进行计算。为了保证试验结果的准确性,每组测试需设置3次重复试验,取3次试验的平均值作为最终的结合强度测试结果。

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (1)$$

式中: τ 为剪切强度, MPa; F 为剪切过程试样所受的最大剪切力, kN; S 为试样的初始剪切面积, mm^2 。



(a) 界面结合强度测试模具



(b) 测试原理示意图

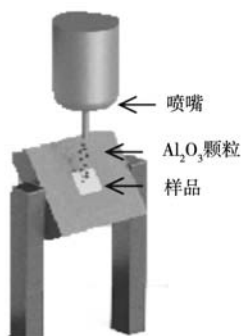
图2 涂层与基材间结合强度测试模具示意图

Fig. 2 The schematic diagram of the device to test the shear bonding strength between coating and substrate

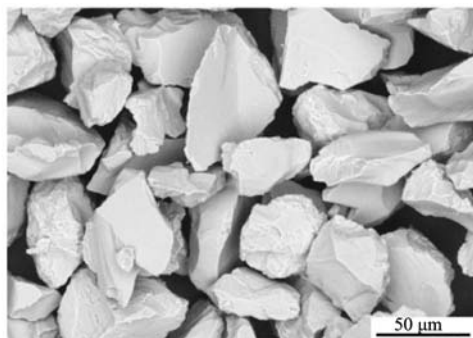
1.4 抗高温冲蚀磨损性能测试方法

本试验采用DUCOM TR-471-1000高温空气射流冲蚀试验机(图3),测试了超高速激光熔覆镍基合金涂层及15CrMo基体的抗高温冲蚀磨损性能。在冲蚀磨损测试中,冲蚀温度设定为600℃,冲蚀角度为30°^[12],

冲蚀颗粒速度为80 m/s,冲蚀时间为5 min,选用平均粒径为200目的 Al_2O_3 颗粒作为冲蚀介质。在冲蚀磨损后,采用3D激光扫描共聚焦显微镜(LSCM, Leica DCM 8)观察冲蚀表面形貌,并测量冲蚀坑的体积以表征试样表面的冲蚀磨损体积损伤值。利用SEM对冲蚀磨损



(a) 高温冲蚀设备示意图



(b) Al_2O_3 颗粒微观形貌图

图3 高温冲蚀磨损测试装置示意图及 Al_2O_3 磨料微观形貌

Fig. 3 The schematic diagram of the high temperature erosion tester and the micro morphology of the Al_2O_3 grinding material

表面显微形貌进行观察,以分析超高速激光熔覆镍基合金涂层抗高温颗粒冲蚀磨损过程。

2 试验结果与分析

2.1 超高速激光熔覆镍基合金涂层显微组织分析

图4为超高速激光熔覆镍基合金涂层的表面三维形貌图,从图中可以看出涂层表面粗糙度约为 $14.56\text{ }\mu\text{m}$,较传统激光熔覆涂层降低约90%,说明超高速激光熔覆涂层具有更好的表面质量。此外,由于熔覆速率较高,在涂层表面残余少量未熔粉末,且不同道次搭接区域存在一定的波动。通过提高激光熔覆涂层的表面质量,可有效减少后期加工过程中的涂层表面的材料

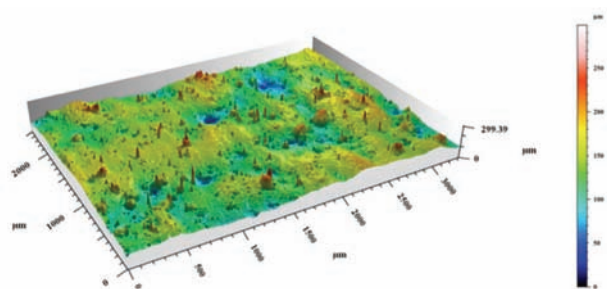
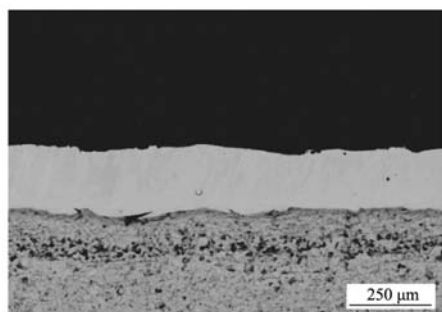


图4 超高速激光熔覆镍基合金涂层表面3D形貌
Fig. 4 3D surface morphology of the ultra-high speed laser cladding Ni-based alloy coating

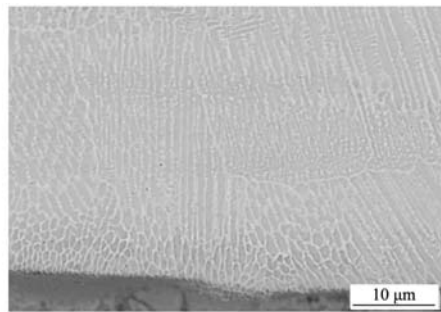
去除量而降低成本。

为了探究超高速激光熔覆镍基合金涂层的显微组织,采用SEM扫描了涂层截面。图5(a)为超高速激光熔覆涂层截面的低倍显微组织,从图中可以看出超高速激光熔覆镍基合金涂层厚度约为 $215\text{ }\mu\text{m}$,且涂层内部无明显的气孔和裂纹缺陷,说明本工作设置的熔覆工艺参数较为合理。通过测试计算可知,涂层的致密度高达99.8%,可以有效保证涂层的服役性能。图5(b)到图5(d)为超高速激光熔覆镍基合金涂层的高倍显微组织图片。从图中可以看出,涂层底部为平面晶和胞状晶组成,涂层中部呈现明显的定向树枝晶,而涂层顶部主要为等轴晶。在激光熔覆过程中,由涂层底部到顶部,其温度梯度和凝固速率的比值 G/R 逐渐减小,因此涂层内部的晶粒形态逐渐由平面晶、胞状晶向定向枝晶和等轴晶转变。

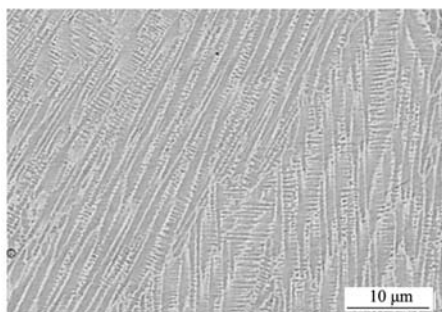
为了进一步分析涂层中晶粒取向与尺寸,对超高速激光熔覆镍基合金涂层中部进行了EBSD分析,结果图6所示。由图6(a)可见,涂层中部晶粒为拉长晶粒形貌,且晶粒延伸方向与涂层沉积方向一致。在激光熔覆过程中,涂层凝固时其热量垂直于涂层/基材界面传导,因此晶粒的生长方向呈现相应的取向性。进一步地,涂层中晶粒表现出一定的择优取向特征,从图6(b)可见涂层中 $\gamma\text{-Ni}$ 具有较强的 $\langle 100 \rangle$ 取向倾向。本研究利用Channel5软件对涂层中晶粒尺寸进行统计,结



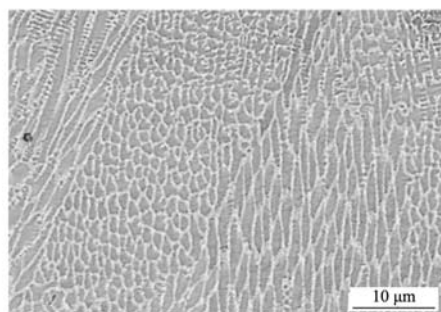
(a) 涂层横截面宏观



(b) 涂层底部显微组织



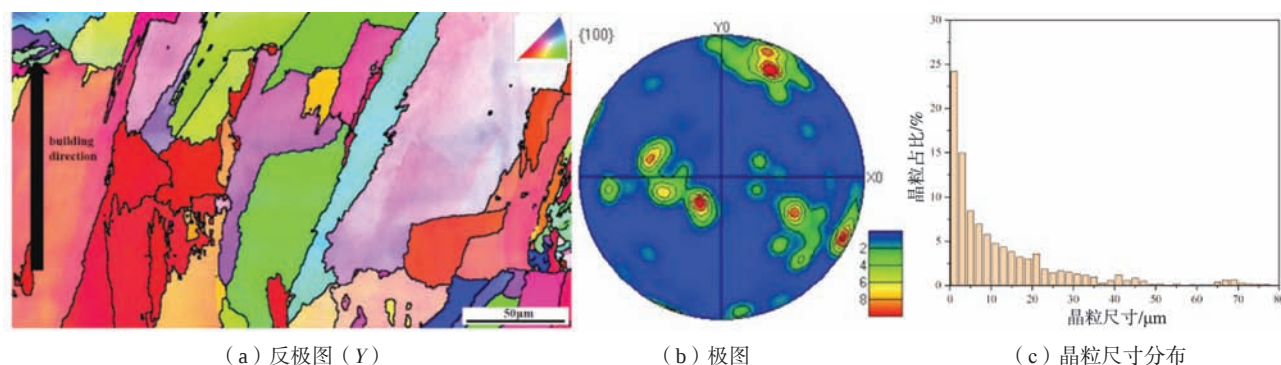
(c) 涂层中部显微组织



(d) 涂层顶部显微组织

图5 超高速激光熔覆镍基合金涂层显微组织图像

Fig. 5 Microstructure images of the ultra-high speed laser cladding Ni-based alloy coating



(a) 反极图 (Y)

(b) 极图

(c) 晶粒尺寸分布

图6 超高速激光熔覆镍基合金涂层EBSD分析结果

Fig. 6 EBSD analysis results of the ultra-high speed laser cladding Ni-based alloy coating

果如图6(c)所示。通过计算可得,涂层中的平均晶粒尺寸为 $11.95\text{ }\mu\text{m}$,晶粒相对较为细小,有利于提高涂层的力学性能。

在高倍下观察涂层内部显微组织,可以发现,涂层内除 γ -Ni晶粒外还分布着明亮的晶间组织,其

内部存在大量明亮的颗粒或短棒相,如图7所示。Knorovsky等^[13]人研究发现,Inconel718镍基合金在激光熔覆过程中优先析出 γ -Ni相,随后发生共晶反应形成 γ -Ni和Laves的混合组织。通过能谱分析可见,本研究制备的涂层枝晶间组织中的Nb、Mo元素含量较

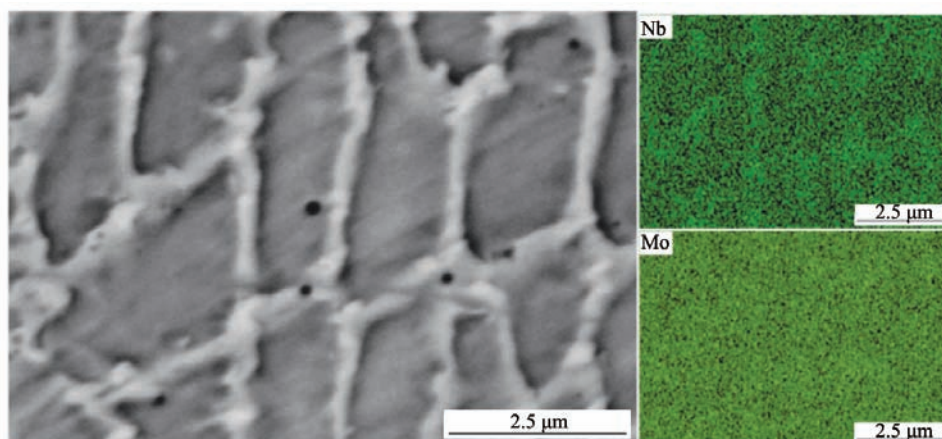


图7 超高速激光熔覆镍基合金涂层EDS面扫描结果

Fig. 7 EDS surface scanning results of the ultra-high speed laser cladding Ni-based alloy coating

高,同样证实了枝晶间Laves相的存在。涂层内部的元素分布对其力学性能和抗高温腐蚀性能具有重要的影响。

2.2 涂层力学性能表征

涂层硬度是影响其抗冲蚀磨损性能的关键指标,较高的硬度有利于抵抗外部冲蚀磨料的损伤^[14]。因此,测试了涂层截面与基材的显微硬度值,结果如图8所示。相比之下,本研究所制备的超高速激光熔覆镍基合金涂层的显微硬度约为HV 328.07,明显高于基体硬度(HV 180.20),约提高1.8倍。进一步地,超高速激光熔覆涂层内部的硬度分布较为均匀,主要由于超高熔覆速率下涂层内部的组织和元素具有较好的均

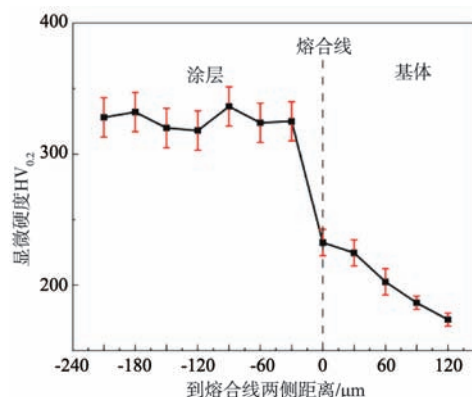


图8 超高速激光熔覆镍基合金涂层截面硬度分布

Fig. 8 Hardness distribution of the ultra-high speed laser cladding Ni-based alloy coating cross section

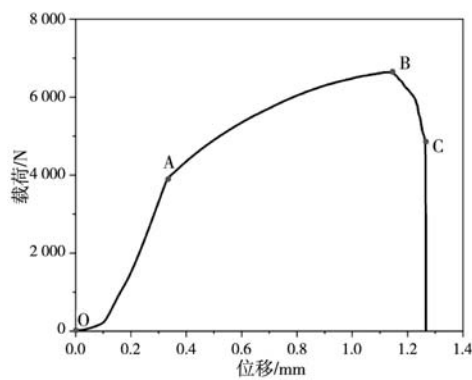
匀性。另一方面,涂层与基材界面处出现明显的硬度下降过渡区域,这主要由于在涂层沉积过程中发生了元素的稀释扩散作用。15CrMo基材的硬度由涂层/基材界面向基材内部逐渐降低,说明激光熔覆过程对基材表面产生热影响。由于快速加热和冷却作用,基材内部会发生马氏体转变,从而提高了其近涂层区域的硬度。总而言之,超高速激光熔覆镍基合金涂层硬度明显高于基体,有望表现出更好的抗冲蚀性能。

基于自制的剪切强度测试模具,测试了超高速激光熔覆镍基合金涂层的界面结合强度。表2为涂层的剪切强度测试结果,可以看出超高速激光熔覆镍基合金涂层的平均剪切强度为414.26 MPa,说明涂层与基材间形成了良好的冶金结合界面。图9为剪切过程中的载荷-位移曲线与断口显微形貌图片。从载荷-位移曲线图中可以推断,在剪切过程中,涂层与基材界面发生弹性

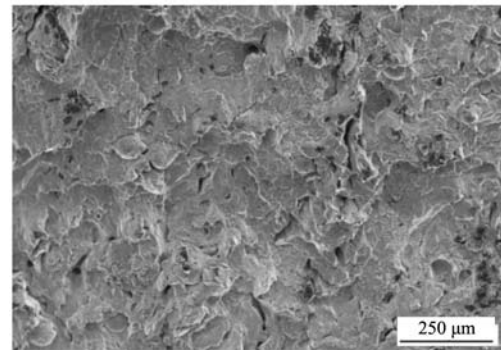
变形、塑性变形和颈缩过程。其中,OA段为属于弹性变形阶段,曲线的斜率较大;AB段为塑性变形阶段,剪切载荷非线性增大,由于内部应力集中不断增大,斜率不断减小;BC段为颈缩阶段,剪切载荷达到最大值后,涂层内部应力集中超过了涂层的抗剪能力,试样出现裂纹失稳扩展现象及断裂,剪切载荷急剧降低。

表2 超高速激光熔覆镍基合金涂层剪切强度测试结果
Tab. 2 Shear strength test results of the ultra-high speed laser cladding Ni-based alloy coating

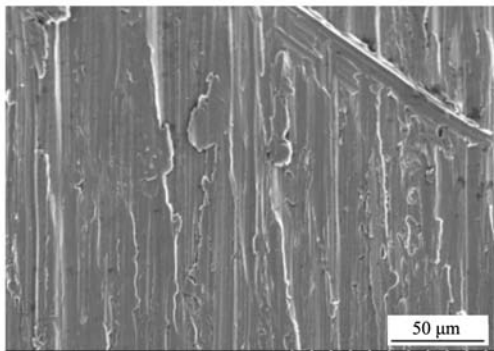
试样组	剪切强度/MPa
试样1	422.79
试样2	416.2
试样3	403.78
平均值	414.26



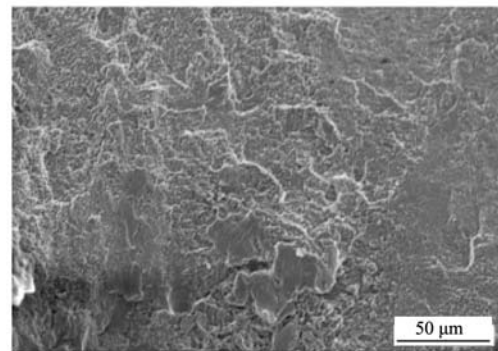
(a) 载荷-位移曲线



(b) 断口纤维区



(c) 断口放射区



(d) 断口剪切唇

图9 超高速激光熔覆镍基合金涂层/基材界面剪切载荷-位移曲线与涂层断口形貌

Fig. 9 Shearing load-displacement curve of ultra-high speed laser cladding Ni-based alloy coating/substrate interface and coating fracture morphology

从涂层与基材界面剪切断口微观形貌可以看出,断裂发生在涂层和基体界面处,涂层断口形貌表现出典型的韧性断裂特征。在断口纤维区中存在大量的韧窝状形貌,且韧窝形貌沿着剪切方向被拉长抛物线形状;在放射区中可以观察到明显的取向性裂纹扩展特

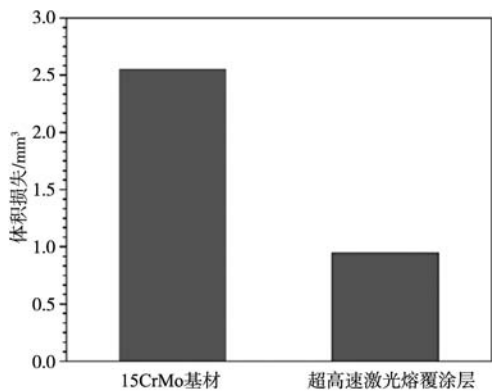
征,扩展方向与剪切方向一致;在剪切唇中,可观察到细小的韧窝和撕裂痕迹。在剪切过程中,塑性较好的 γ -Ni相易发生塑性变形而形成大量位错,位错在运动过程中受到晶间Laves相的阻碍发生聚集,最终发生撕裂而产生裂纹^[15]。由此可以推断,本研究制备的

超高速激光熔覆镍基合金涂层具有良好的冶金结合界面，且界面处未形成薄弱的热影响区域。

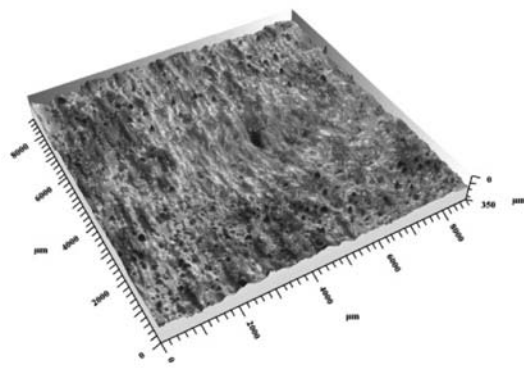
2.3 超高速激光熔覆镍基合金涂层抗高温冲蚀性能

图10为超高速激光熔覆镍基合金涂层高温冲蚀磨损测试结果。从图10(a)可以看出，超高速激光熔覆镍基合金涂层的冲蚀体积损失明显低于15CrMo钢基材，冲蚀体积损失下降约63%。由此可见，本研究所制

备的超高速激光熔覆镍基合金涂层表现出较好的抗高温固态颗粒冲蚀磨损性能。由图10(b)可以看出，在高温固态颗粒冲蚀过程中，受固态颗粒的冲刷磨损作用，试样表面产生明显的冲蚀坑。在固态颗粒冲蚀过程中，材料的硬度是影响其抗冲蚀磨损性能的关键指标^[16]。根据图8中结果可知，镍基合金涂层的硬度明显优于15CrMo基材，这是其抗高温冲蚀性能优异的关键因素。



(a) 磨损体积损失



(b) 冲蚀表面3D激光扫描图像

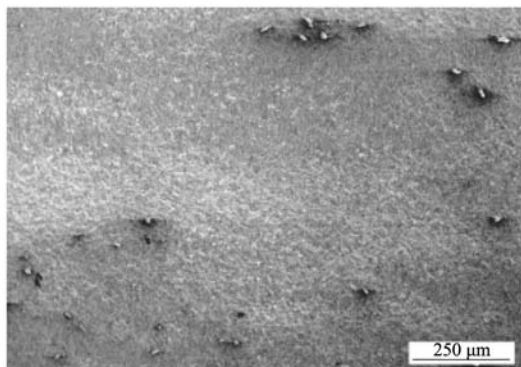
图10 超高速激光熔覆镍基合金涂层高温固相颗粒冲蚀测试结果

Fig. 10 High-temperature solid particle erosion testing results of the ultra-high speed laser cladding Ni-based alloy coating

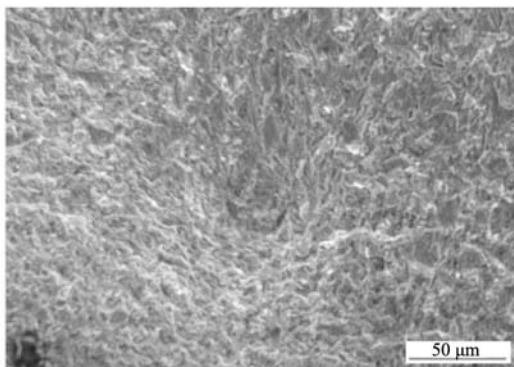
为了更好地分析超高速激光熔覆镍基涂层的高温冲蚀磨损失效机理，对试样表面的冲蚀坑进行了SEM观察，结果如图11所示。在高温固态颗粒冲蚀过程中，由于 Al_2O_3 颗粒的冲蚀角度为 30° ，磨料颗粒不仅对涂层表面产生反复撞击作用，还会造成严重的切削作用^[17]。在反复撞击作用下，试样表面会发生碾压疲劳进而剥落；在磨料颗粒切削作用下，涂层表面被不断切削损失。从涂层冲蚀表面中，可以观察到明显的冲

击坑和部分微切削形貌。另一方面，在高温下，试样表面除冲蚀作用外还会发生氧化损伤，因此氧化作用和冲蚀作用共存加剧了冲蚀损伤。超高温镍基合金涂层较好的抗高温氧化性能有利于降低其高温冲蚀失重^[18]。

综上所述，利用超高速激光熔覆技术制备了无缺陷的镍基合金涂层，涂层与基材界面形成较强的冶金结合。相比于15CrMo基材，超高速激光熔覆镍基合金



(a) 低倍



(b) 高倍

图11 超高速激光熔覆镍基合金涂层高温冲蚀后表面形貌SEM图像

Fig. 11 SEM images of the ultra-high speed laser cladding Ni-based alloy coating surface morphologies after high-temperature erosion

涂层具有更高的硬度和抗氧化性能,从而表现出优异的抗高温固态颗粒冲蚀磨损性能,是一种极具潜力的火电锅炉受热面飞灰冲蚀防护涂层。

3 结论

(1) 超高速激光熔覆镍基合金涂层内部及涂层/基材界面处无明显缺陷,涂层内部晶粒尺寸明显低于传统激光熔覆涂层。涂层主要由 γ -Ni枝晶相和晶间相组成,由涂层/基材界面到涂层表面,其晶粒形态呈现平面晶 $\rightarrow$ 胞状晶 $\rightarrow$ 柱状晶 $\rightarrow$ 等轴晶变化。

(2) 超高速激光熔覆镍基合金涂层的平均硬度为HV 328.07,约为15CrMo基体的1.8倍;涂层/基材界面平均剪切强度为414.26 MPa,说明涂层与基材间形成了良好的冶金结合界面形式。

(3) 在600 $^{\circ}$ C高温下冲蚀后,镍基合金涂层的冲蚀体积损失明显低于15CrMo基材,降低约63%,表现出良好的抗冲蚀性能。在冲蚀过程中,涂层表面发生冲击疲劳、显微切削和氧化腐蚀作用,其较好的硬度和抗高温氧化性是其抗冲蚀性能较好的关键因素。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布2022年全国电力工业统计数据 [EB/OL]. 北京: 国家能源局, 2023. https://www.nea.gov.cn/2023-01/18/c_1310691509.htm.
- [2] 单雪媛. 粉煤灰中有价元素分布规律及浸出行为研究 [D]. 太原: 山西大学, 2019.
- [3] HIDALGO V H, VARELA F J B, MENÉNDEZ A C, et al. A comparative study of high-temperature erosion wear of plasma-sprayed NiCrBSiFe and WC-NiCrBSiFe coatings under simulated coal-fired boiler conditions [J]. Tribology International, 2001, 34 (3): 161–169.
- [4] 赵宪萍, 孙坚荣, 邹辉荣. 20碳钢热态飞灰冲刷磨损性能的试验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (6): 91–94.
- [5] KANG C T, PETTIT F S, BIRKS N. Mechanisms in the simultaneous erosion-oxidation attack of nickel and cobalt at high temperature [J]. Metallurgical Transactions A, 1987, 18: 1785–1803.
- [6] SANHITA P, BHASKARAN R N, ANDRÉ M. Effect of tungsten and vanadium additions on the dry abrasive wear and solid particle erosion of flame-sprayed AlCoCrFeMo high entropy alloy coatings [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 114: 106245.
- [7] 高珊珊, 李刚, 都志强. 公路建筑用铝合金表面激光熔覆FeCoNiCr高熵合金涂层的组织与抗腐蚀性 [J]. 铸造, 2022, 71 (7): 839–844.
- [8] 齐泓钧, 坚永鑫, 陈子哈, 等. 超高速激光熔覆技术及其耐磨涂层材料研究进展 [J/OL]. 热加工工艺: 1–8[2024-01-27]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20222730>.
- [9] LIU J, LI J, CHENG X, et al. Effect of dilution and macrosegregation on corrosion resistance of laser clad AerMet100 steel coating on 300M steel substrate [J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 325: 352–359.
- [10] JIAN Y X, LIU Y K, QI H J, et al. Effects of scanning speed on the microstructure, hardness and corrosion properties of high-speed laser cladding Fe-based stainless coatings [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 29: 3380–3392.
- [11] LI X C, LIANG H, ZHAO Y Z, et al. Microstructure and wear resistance of AlCrFeNiMo_{0.5}Si_x high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding [J]. China Foundry, 2022, 19 (6): 473–480.
- [12] ZHANG S, HAN B, LI M, et al. Microstructure and high temperature erosion behavior of laser clad CoCrFeNiSi high entropy alloy coating [J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 417: 127218.
- [13] KNOROVSKY G A, CIESLAK M J, HEADLEY T J, et al. INCONEL718: a solidification diagram [J]. Metallurgical Transactions A, 1989, 20 (10): 2149–2158.
- [14] YANG Z Y, JIAN Y X, CHEN Z H, et al. Microstructure, hardness and slurry erosion-wear behaviors of high-speed laser cladding stellite 6 coatings prepared by the inside-beam powder feeding method [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 2596–2610.
- [15] 张杰. 激光增材再制造Inconel 718合金的组织与性能研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
- [16] 潘牧, 罗志平. 材料的冲蚀问题 [J]. 材料科学与工程, 1999, 17 (3): 92–96.

- [17] 新巴雅尔, 文波, 曲敬龙, 等. 先进变形高温合金的固体颗粒冲蚀磨损的实验分析与数值模拟 [J]. 稀有金属, 2019, 43 (9): 911-919.
- [18] 赵鑫圻, 肖旋, 刘梓童. 镍基高温合金Inconel 600高温氧化行为 [J]. 铸造, 2022, 71 (7): 827-832.

Microstructure, Mechanical Properties and High-Temperature Erosion Resistant Performance of Ni-Based Alloy Coating Prepared by Ultra-High Speed Laser Cladding

LI Yong¹, LIU Fu-guang¹, CHANG Zhe¹, YANG Er-juan¹, XU You-hai², LIU Guo-gang³, LIU Guan-hong⁴, JIANG Ti-hui⁴, HAN Tian-peng¹, JIAN Yong-xin⁵

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Wuhai Thermal Power Plant, Inner Mongolia Mengdian Huaneng Thermal Power Co., Ltd., Wuhai 016000, Inner Mongolia, China; 3. Dezhou Thermal Power Plant, Huaneng International Power Co., Ltd., Dezhou 253001, Shandong, China; 4. China Coal Hamei Power Generation Co., Ltd., Hamei 839000, Xinjiang, China; 5. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract:

To solve the fly-ash erosion damage of the heating surface in thermal power boiler, nickel-based alloy coating with excellent high temperature erosion resistance was prepared on the surface of 15CrMo steel pipe by ultra-high speed laser cladding technology. The microstructures of the coating were analyzed by SEM, EDS, EBSD and so on, and the mechanical properties and high temperature erosion resistance of the coating were further studied. The results show that the coating have thinner thickness (215 μm) and low surface roughness (14.56 μm), and there is no obvious crack inside the coating and at the interface. The coating is mainly composed of γ -Ni dendrites and intergranular Laves phases, and from the coating interface to the surface, γ -Ni grains gradually transform from the planar crystal morphologies near the interface of the coating to the equiaxed crystal morphologies near the surface of the coating. The average hardness of the coating is about 328.07HV, which is about 1.8 times that of 15CrMo steel. The average shear strength at the interface between the coating and the substrate is 414.26 MPa, which proves that the coating has good metallurgical bonding characteristics. The coating showed better resistance to solid particle erosion at 600 $^{\circ}\text{C}$, and the volume loss of erosion was about 63% less than that of substrate. This is mainly attributed to its high hardness and high temperature oxidation resistance.

Key words:

ultra-high speed laser cladding; Ni-based alloy coating; microstructure; mechanical property; high-temperature erosion performance