

激光熔覆 Hastelloy C276 涂层 组织及抗热震性能研究

马旭峰^{1,2}, 孙耀宁^{1*}, 马文有², 王岳亮²,
卢冰文², 种振曾¹, 李福海², 陈兴驰²

(1.新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830017; 2.广东省科学院新材料研究所 现代材料
表面工程技术国家工程实验室 广东省现代表面工程技术重点实验室, 广州 510651)

摘要: 目的 针对微晶玻璃压延辊在服役过程中因表面频繁承受较大的温度梯度而开裂的问题, 研究一种抗冷热疲劳性能突出的高性能防护涂层来延长压延辊服役寿命。方法 采用激光熔覆技术, 以扫描速度为 800 mm/min、送粉量为 26 g/min、光斑直径为 4 mm、搭接率为 50%、激光功率为 2 200 W 的工艺参数, 在 2Cr13 基体上熔覆 Hastelloy C276 镍基合金涂层。采用扫描电镜 (SEM)、能谱仪 (EDS)、X 射线衍射仪 (XRD) 研究熔覆涂层的微观组织和热震失效裂纹微观形貌、元素分布以及涂层相组成。利用箱式电阻炉对 Hastelloy C276 熔覆涂层与 2Cr13 基体进行热震试验。结果 Hastelloy C276 熔覆涂层表面无裂纹、成形良好, 涂层与基体之间为冶金结合。涂层由 γ -Ni、 M_6C 和 $M_{23}C_6$ 相组成。熔覆涂层从基体结合处至表面依次形成了平面晶、胞状组织、柱状树枝晶以及等轴树枝晶, 碳化物相均在树枝晶间析出。Hastelloy C276 熔覆涂层抗热震失效次数约为 2Cr13 基体的 3 倍, 最高抗热震次数可达到 202, Hastelloy C276 熔覆涂层具有良好的抗热震性能。结论 由于 Hastelloy C276 涂层与 2Cr13 基体结合紧密且存在热膨胀系数差异, 热震时在熔覆结合界面产生了较大热应力, 因此裂纹最先在熔覆结合界面处萌生, 然后逐渐扩展至涂层表面最终失效。Hastelloy C276 涂层的裂纹萌生扩展机制使裂纹在涂层表面出现较晚, 有效延长了 2Cr13 微晶玻璃压延辊抗冷热疲劳寿命。

关键词: 压延辊; Hastelloy C276 合金; 激光熔覆; 热应力; 抗热震性能; 热震失效

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)11-0457-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.11.040

Microstructure and Thermal Shock Resistance of Laser Cladding Hastelloy C276 Coating

MA Xu-feng^{1,2}, SUN Yao-ning^{1*}, MA Wen-you², WANG Yue-liang²,
LU Bing-wen², CHONG Zhen-zeng¹, LI Fu-hai², CHEN Xing-chi²

收稿日期: 2022-11-21; 修订日期: 2023-02-14

Received: 2022-11-21; Revised: 2023-02-14

基金项目: 广东省重点领域研发计划 (2020B090923002); 自治区科技支撑项目计划 (2020E0264); 广东省特支计划 (2019BT02C629); 广州市科技计划 (202007020008, 202102020327); 广东省科学院发展专项资金项目 (2022GDASZH-2022010107, 2022GDASZH-2022010203-003)

Fund: The Key R&D Program of Guangdong Province (2020B090923002); Xinjiang Science and Technology Project Plan of Autonomous Region (2020E0264); Guangdong Special Support Program (2019BT02C629); Guangzhou Project of Science & Technology (202007020008, 202102020327); Sciences Platform Environment and Capacity Building Projects of GDAS (2022GDASZH-2022010107, 2022GDASZH-2022010203-003)

引文格式: 马旭峰, 孙耀宁, 马文有, 等. 激光熔覆 Hastelloy C276 涂层组织及抗热震性能研究[J]. 表面技术, 2023, 52(11): 457-465.

MA Xu-feng, SUN Yao-ning, MA Wen-you, et al. Microstructure and Thermal Shock Resistance of Laser Cladding Hastelloy C276 Coating[J]. Surface Technology, 2023, 52(11): 457-465.

*通信作者 (Corresponding author)

(1. School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Modern Surface Engineering Technology, National Engineering Laboratory of Modern Materials Surface Engineering Technology, Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510651, China)

ABSTRACT: The surface of the glass-ceramics calender roll is frequently subject to steep temperature gradient, causing cracks. It is expected to obtain a high-performance protective coating with outstanding thermal fatigue resistance to prolong the service life of glass-ceramics calender roll. In this study, Hastelloy C276 nickel base alloy coating was prepared on martensitic stainless steel 2Cr13 substrate by laser cladding technology. The thermal shock resistance of Hastelloy C276 coating was compared with that of 2Cr13, a commonly used material for glass-ceramics calendar roll. The Hastelloy C276 coating was prepared by laser cladding technology with a scanning speed of 800 mm/min, a powder feeding rate of 26 g/min, a spot size of 4 mm, an overlap ratio of 50% and a laser power of 2 200 W. The microstructure, elemental distribution and phase compositions of the cladding coating were analyzed by scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-Ray spectroscopy (EDS) and X-Ray diffraction (XRD). SEM and EDS were also used to study the microstructure and element distribution at the crack due to thermal shock failure. The thermal shock tests of Hastelloy C276 coating and 2Cr13 substrate were carried out by a box-type resistance furnace. The test results showed no crack on the Hastelloy C276 coating, and the good forming indicated that the coating and the substrate maintained metallurgical bonding. The coating was composed of γ -Ni, M_6C and $M_{23}C_6$ phases. The planar, cellular, columnar dendrites and equiaxed dendrites were formed in the cladding coating from the base joint to the surface, and the carbide phases were precipitated in the dendrites. The thermal shock resistance of Hastelloy C276 coating was superior to that of 2Cr13 substrate based on the thermal shock test results. The thermal shock failure cycles of Hastelloy C276 coating were about 3 times of that of 2Cr13 substrate, and the maximum thermal shock failure cycles of Hastelloy C276 coating could reach 202. After the cross-sectional morphology of the crack of Hastelloy C276 coating was observed, it could be inferred that, in the process of thermal shock, the crack initiated at the bonding interface of the cladding, then gradually propagated to the coating surface and finally failed. By scanning the elemental distribution near the cracks, the enrichment of oxygen was detected. It was supposed that crack propagation was also affected by oxidation during the thermal shock tests. According to the analysis, because Hastelloy C276 coating was tightly bonded to 2Cr13 substrate and there was a difference in thermal expansion coefficient between the coating and substrate, large thermal stress was generated at the cladding interface during thermal shock. The crack initiated at the cladding interface. At the same time, the cracks gradually propagated to the coating surface and finally failed. The crack initiation and propagation mechanisms of Hastelloy C276 coating make the crack appear late on the coating surface, which effectively prolongs the thermal fatigue life of 2Cr13 glass-ceramics calender roll. This study has significance for the improvement of thermal fatigue resistance of glass-ceramics calender roll to some extent.

KEY WORDS: calender roll; Hastelloy C276 alloy; laser cladding; thermal stress; thermal shock resistance; thermal shock failure

微晶玻璃因具备优良的介电性能而被广泛应用在光伏发电和燃料电池等绿色新能源领域^[1-4]。在微晶玻璃生产的压延工序中,压延辊是生产线最核心的部件,它在工作时会有部分与高温熔融玻璃液浸润接触,承受高温腐蚀;当压延辊旋转至远离玻璃液一侧时,由于辊中通有四路冷却水而会迅速降温,短时间内表面反复承受巨大的温度梯度。由于长期在冷热疲劳的恶劣工况下服役,压延辊表面易萌生裂纹并逐步扩展,导致压延辊的寿命缩短,如目前 2Cr13 材质的压延辊,使用 20 h 左右表面就会出现龟裂裂纹,不仅造成巨大的材料损失,还直接影响了微晶玻璃板的表面质量。目前很难依靠基体材料提高压延辊表面抗腐蚀、抗冷热疲劳性能,采用表面防护技术有望解决这一问题。

在众多表面工程技术中,适合压延辊的表面技术

包含热喷涂、堆焊及激光熔覆等^[5]。但由于热喷涂层结合力弱且易脱落^[6]、堆焊热输入大易使压延辊产生很大变形^[7]等缺点,相关应用都受到一定限制。而激光熔覆技术利用高能激光束将粉末颗粒与基体熔凝进而形成紧密的冶金结合,对基体材料影响较小,具有成形效率高和涂层质量优良等优点^[8-10],适合于微晶玻璃压延辊表面防护应用。

目前,对激光熔覆抗热震性能涂层材料的研究较少,期望找到一种抗冷热疲劳性能良好的熔覆材料来解决微晶玻璃压延辊表面开裂的问题。Hastelloy C276 合金是在镍基合金的基础上添加了 Cr、Mo、W 等元素而得到的固溶强化面心立方合金^[11-12],不仅具有良好的抗氧化、抗腐蚀性能^[13-14],还具有一定的高温强度和抗疲劳性能^[15-16],可以满足压延辊长期在冷热疲劳工况下服役的要求。

本文选取 Hastelloy C276 合金为熔覆材料, 以压延辊常用的 2Cr13 马氏体不锈钢为基体, 研究了激光熔覆 Hastelloy C276 涂层的抗热震性能, 揭示了裂纹萌生扩展机理, 以为微晶玻璃压延辊的表面防护提供理论参考和技术支持。

1 试验

1.1 材料

为了避免熔覆过程中试样由于激光热量输入过高而产生变形, 选用尺寸为 100 mm×200 mm×30 mm 的 2Cr13 钢作为基体。熔覆前对表面进行喷丸除锈处理, 再通过超声清洗去除表面污垢。熔覆材料 Hastelloy C276 粉末由赫格纳斯厂商提供, 其粒度分布、形貌和成分如图 1 及表 1 所示。由图 1a 可知, 粉末粒径总体保持在 40~50 μm。在图 1b 中可见粉末带有局部卫星粉, 球形度较高, 粉末流动性较好, 可用于同步送粉激光熔覆工艺。熔覆前将粉末放置在真空烘箱中, 在 80 ℃ 下干燥 5 h, 确保烘干水分。

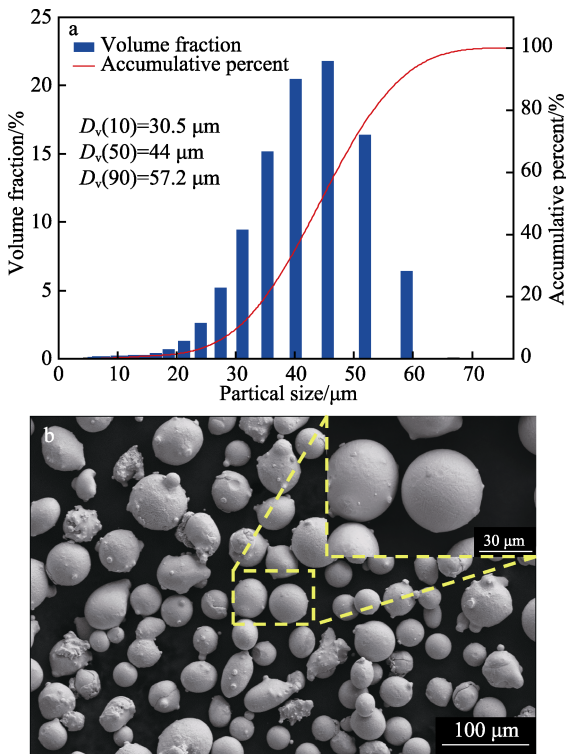


图 1 Hastelloy C276 粉末粒度分布 (a) 与微观形貌 (b)
Fig.1 Particle size distribution (a) and morphology (b) of Hastelloy C276 powder

表 1 Hastelloy C276 粉末主要成分含量
Tab.1 Major component content of Hastelloy C276 powder

wt. %						
Mo	Cr	W	Fe	Mn	C	Ni
18.21	16.08	5.39	3.00	1.31	0.01	Bal.

1.2 方法

激光加工系统由 TruDisk6006 (TRUMPF) 型碟片式激光器、6+2 轴机械臂 (KUKA) 以及 3 路同轴送粉器组成; 在氩气保护气氛下, 采用同步送粉方式以激光功率 2 200 W、扫描速度 800 mm/min、送粉量 26 g/min、搭接率 50%、光斑直径 4 mm 的工艺参数制备了 Hastelloy C276 激光熔覆涂层。在涂层熔覆过程中未出现异响, 熔覆后涂层探伤也未出现开裂现象。为了消除几何形状在热震过程中对涂层所受应力的影响, 将熔覆后的试样用线切割加工成 $\phi 25\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 的圆形薄片, 其中涂层厚 1 mm, 基体厚 2 mm。先在涂层表面用 600[#]~2000[#]砂纸打磨, 再经粒度为 W2.5 的金刚石研磨膏抛光, 同时将 2Cr13 基体制成相同规格的试样, 与熔覆涂层试样一同为热震试样备用, 如图 2 所示。

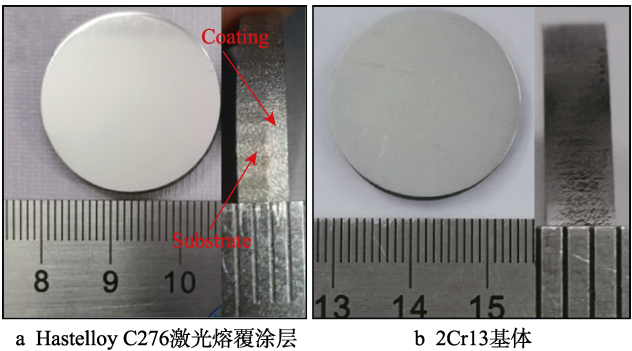


图 2 制备完成的涂层及基体热震试样
Fig.2 Prepared thermal shock samples of coating and substrate: a) Hastelloy C276 laser cladding coating; b) 2Cr13 substrate

使用日本理学 RIGAKU 生产的 Smartlab 9 kW 高分辨 X 射线衍射仪对熔覆涂层热震试样表面和 Hastelloy C276 粉末进行物相分析, 物相分析扫描结果由 Jade6.0 软件进行 PDF 比对。在衍射仪扫描时, 以 Cu 靶 (波长为 $1.540\text{ }\times 10^{-10}\text{ m}$) 为放射源, 电压为 40 kV, 电流为 100 mA, 扫描速度为 5 (°)/min, 步长为 0.01°, 扫描角度为 20°~150°。为观察涂层内部的微观组织, 将涂层沿截面切开后, 进行镶嵌、打磨以及抛光, 在王水 (HCl 和 HNO₃ 的体积比为 3 : 1) 中腐蚀 30 s 后进行微观形貌观察。采用 Carl Zeiss Gemini 300 扫描电子显微镜 (SEM) 观察涂层不同部位以及热震后裂纹截面区域的微观形貌, 由其搭载的 Ultim Max energy dispersive X-ray spectroscopy 能谱扫描 (EDS) 仪来对微观表面进行元素分析。

热震试验使用 KSL 1200X 箱式电阻炉对试样进行加热与保温。参考微晶玻璃压延辊服役环境, 将热震试样在 900 ℃ 下保温 10 min 后水冷至室温, 再用压缩空气吹干表面, 以此为 1 次热震。经过一定次数的热震循环后, 在试样水冷过程中, 水会渗透到刚出现的细小裂纹中。在压缩空气干燥试样表面时, 裂纹

中的水会留到最后被吹干,形成肉眼可以观察到的裂纹形貌。因此,可在试样被吹干的过程中观察涂层表面开裂情况。记录每个试样首次出现裂纹(通过肉眼观察)的热震循环次数来评价该涂层抗热震性能的好坏。

2 结果与分析

2.1 Hastelloy C276 粉末与激光熔覆涂层的物相组成

激光熔覆涂层和 Hastelloy C276 粉末的物相分析结果如图 3 所示。粉末态的 Hastelloy C276 只由单一的 γ -Ni 相构成,在图 3 中可以看到,涂层中出现了新相的衍射峰。通过 PDF 比对发现,形成了 2 种物相结构为 $M_{23}C_6$ 和 M_6C 碳化物。说明在高能量激光作用下, Hastelloy C276 在形成涂层过程中析出了碳化物。

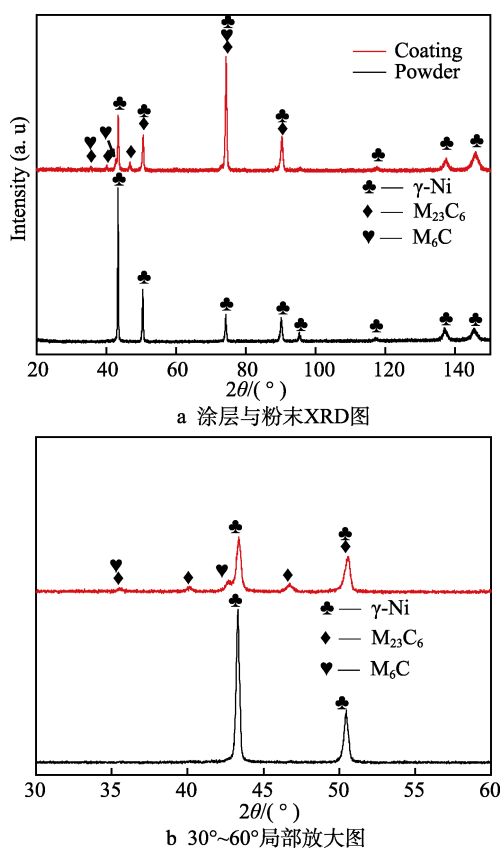


图 3 激光熔覆涂层及 Hastelloy C276 粉末 XRD 图
Fig.3 XRD pattern of laser cladding coating and Hastelloy C276 powder: a) XRD pattern of coating and powder; b) partial enlarged detail of 30°-60°

2.2 激光熔覆 Hastelloy C276 涂层显微组织

激光熔覆 Hastelloy C276 涂层截面微观组织如图 4 所示。图 4a 为涂层底部微观形貌,可以看到,在涂层与基体结合界面处生成了平面晶,向上生长出胞

状组织。在涂层中部逐渐转变成柱状树枝晶,在树枝晶间能够观察到析出了大量白色共晶层片状的 M_6C 碳化物,如图 4c 和图 4d 所示。在涂层顶部形成了细小等轴树枝晶,如图 4e 所示,在树枝晶间分布着灰色 $M_{23}C_6$ 碳化物,如图 4f 所示。

由于在激光与基体作用形成熔池时,温度梯度较大,故 G/\sqrt{R} 的值(G 为温度梯度, R 为凝固速率)较大,此时在涂层与基体结合界面易生成平面晶。对结合界面处进行 EDS 线扫描可以看到, Fe 元素与 Ni 元素的交换最为显著,如图 4b 所示。说明在基体与涂层材料中存在元素相互扩散的现象,冶金结合优良。随着熔池上方涂层的凝固,由于涂层中部温度较高,温度梯度变小, G/\sqrt{R} 的值逐渐减小,涂层底部平面晶向上生长出胞状组织。此时易形成负温度梯度,沿散热方向逐渐转变成柱状树枝晶,如图 4c 所示。因涂层顶部散热较快,凝固速率较大, G/\sqrt{R} 的值继续减小,故在涂层顶部形成细小等轴树枝晶。

对 2 种碳化物进行 EDS 面扫描,可看到它们在树枝晶间的元素分布情况,如图 5 所示。图 5a 为 M_6C 的 EDS 扫描图谱,可以看到, Ni 元素主要富集在树枝晶内部,而 Mo 元素富集在树枝晶间。Fe 元素在树枝晶内相对富集, Cr、W 元素的分布则相对平均。 M_6C 这种具有共晶片层组织的复杂碳化物,包含 Fe_3W_3C 、 Ni_3Mo_3C 和 Ni_2W_4C ,通常是在 Mo 和 W 等难熔元素且基体富含 Ni、Fe 和 Cr 等元素时形成^[17]。在图 5b 中, Ni、Mo、Cr、Fe 元素的分布情况与 M_6C 类似,而 W 元素则相对富集于树枝晶间,在 $M_{23}C_6$ 中不仅含有 $Cr_{23}C_6$,还会生成 $Cr_{23}(Mo,W)_2C_6$ 等复杂碳化物^[17-18]。

2.3 激光熔覆 Hastelloy C276 涂层抗热震性能

在相同的热震试验条件下对激光熔覆 Hastelloy C276 涂层和 2Cr13 两种试样同时进行热震性能试验以及抗热震性能对比。热震时,每种试样选 3 个样品进行试验以避免试验结果的偶然性,待热震试验结束后,用 3 个样品热震次数的平均值来表征每种试样的抗热震性能,结果如图 6 所示。可以看到,激光熔覆 Hastelloy C276 涂层抗热震次数显然高于 2Cr13 基体的,承受热震次数平均值约为 2Cr13 基体的 3 倍, Hastelloy C276 涂层试样中最高抗热震次数可达到 202。

由文献[19-21]可知,采用热喷涂、电火花沉积以及激光重熔处理等方法制备的 YSZ、Co 基等复合涂层,在 900 °C 附近的热震失效次数分别只有 30、19、50。不难看出,在相似的热震试验条件下,本研究中激光熔覆 Hastelloy C276 涂层承受热震循环的能力突出,在温度梯度较大的服役工况中具备优良的抗冷热疲劳性能。

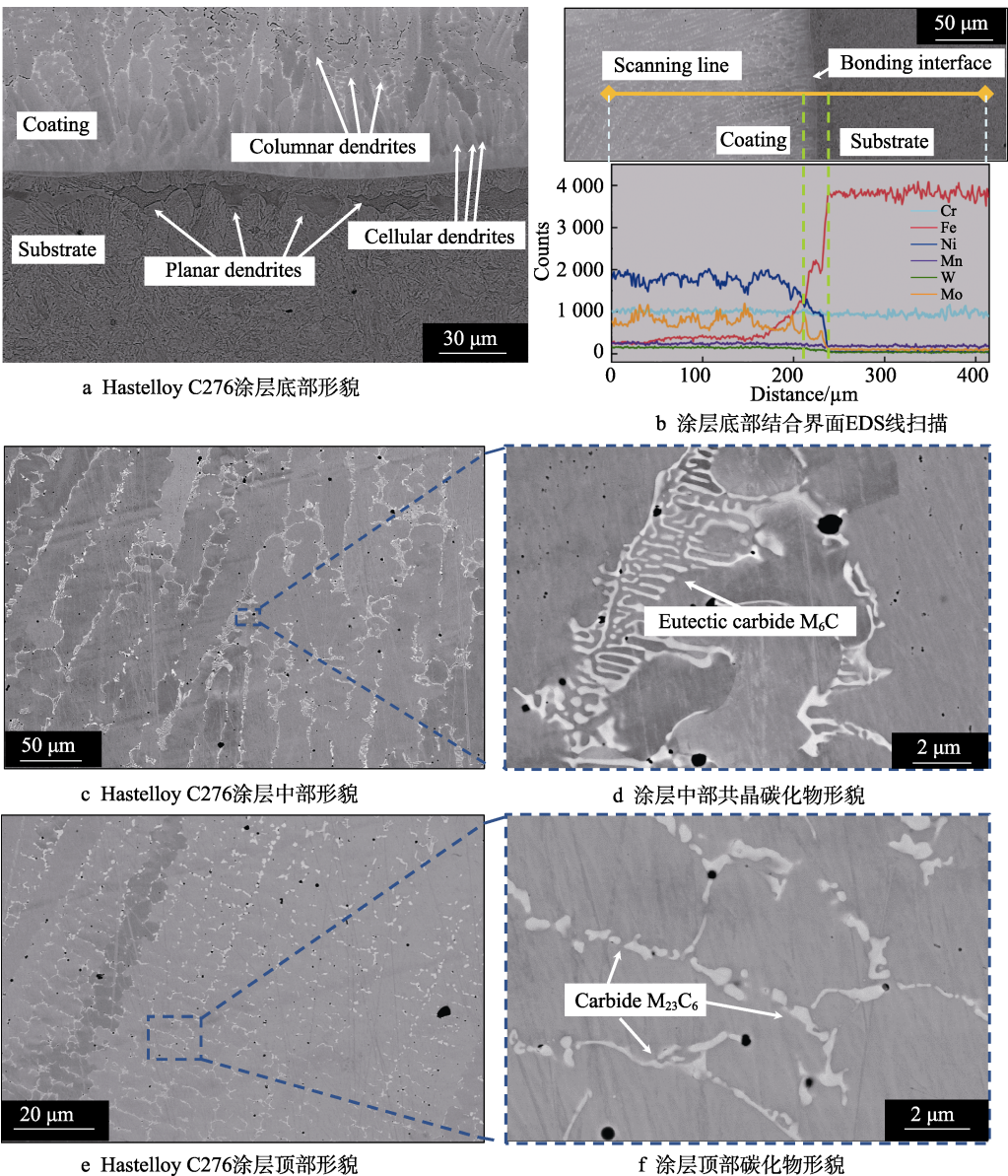


图 4 激光熔覆 Hastelloy C276 涂层微观组织

Fig.4 Microstructure of Hastelloy C276 coating by laser cladding: a) bottom morphology of Hastelloy C276 coating; b) EDS line scanning at the interface between coating and substrate; c) middle morphology of Hastelloy C276 coating; d) morphology of eutectic carbide in the middle of the coating; e) top morphology of Hastelloy C276 coating; f) morphology of carbide in the top of the coating

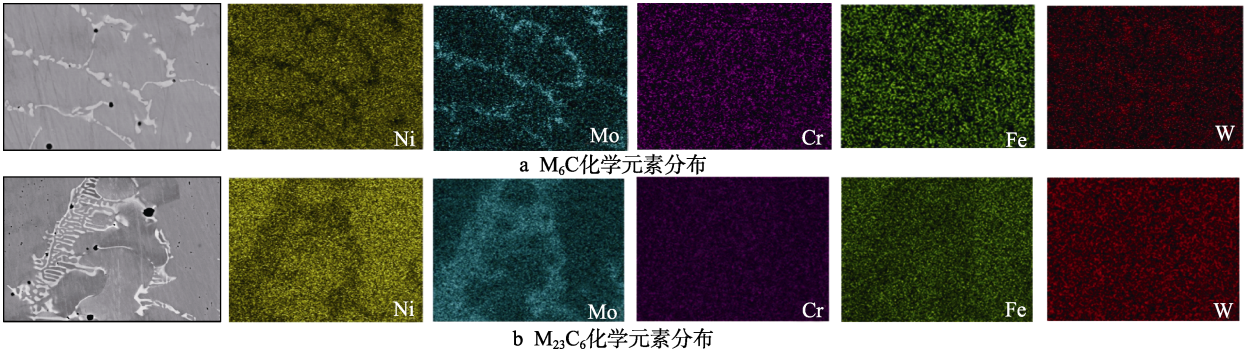


图 5 涂层中两种碳化物化学元素分布图

Fig.5 Chemical element distribution maps of two carbides in the coating: a) chemical element distribution of M_6C ; b) chemical element distribution of $M_{23}C_6$

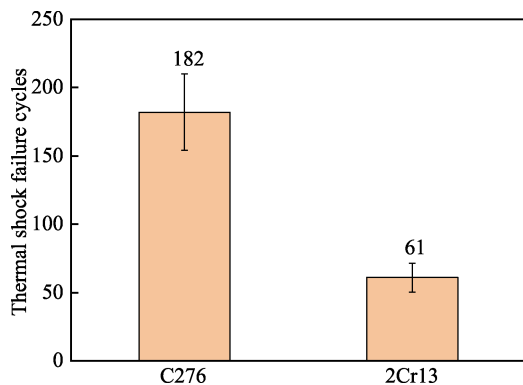


图 6 激光熔覆 Hastelloy C276 涂层试样与 2Cr13 基体试样热震试验结果

Fig.6 Thermal shock results of Hastelloy C276 laser cladding coating samples and 2Cr13 substrate samples

2.4 激光熔覆 Hastelloy C276 涂层热震失效分析

试样热震试验结束后初次出现裂纹时(涂层热震 194 次、基体热震 71 次)2 种试样的宏观形貌如图 7 所示。从图 7a 可以看到, 2Cr13 试样热震后表面氧

化锈蚀较为严重, 试样开裂明显, 裂纹位于试样表面中间位置。沿垂直裂纹方向将试样切开如图 7a 右上角所示, 能够发现试样表面中间隆起变形, 裂纹萌生于隆起位置处。这是因为隆起凸出的位置存在应力集中, 在热震水冷收缩时成为承受应力最薄弱的区域; 同时试样氧化严重, 降低了表面的强度。因此, 在试样表面凸出隆起的区域最先萌生裂纹。

图 7b 右上角为试样的热震裂纹着色探伤结果, 红色渗透剂显现出的轮廓就是涂层裂纹的形貌。可以看到, 裂纹出现在 Hastelloy C276 涂层试样的边缘处。从热震试样的宏观形貌中可以看到, 黄色虚线表示涂层与基体的结合界面, 试样发生了翘曲变形, 热震后基体虽未出现裂纹, 但边缘表面粗糙, 氧化侵蚀严重, 而涂层表面相对平滑。

为进一步研究激光熔覆 Hastelloy C276 涂层热震失效机理, 对 Hastelloy C276 涂层试样热震后出现的裂纹区域截面进行形貌观察, 如图 8 所示。图 8 中裂纹处 EDS 点扫描结果如表 2 所示。在图 8a 中可以清楚看到, 裂纹在涂层与基体结合处较宽, 而靠近涂层表面的部分狭窄且细小, 大致沿垂直于结合界面方向扩展生长; 在裂纹两端, 涂层与基体结合界面也发生

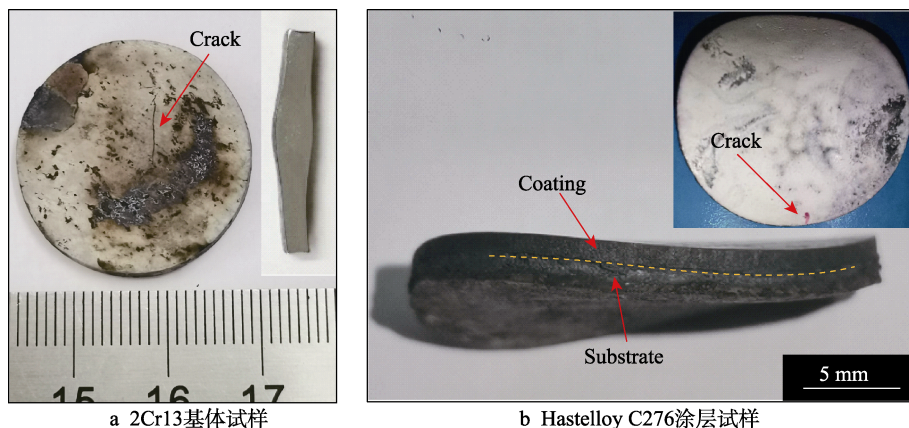


图 7 2Cr13 基体与 Hastelloy C276 涂层试样热震后初次出现裂纹时的形貌
Fig.7 Morphology of initial crack after thermal shock of samples with different laser power: a) 2Cr13 substrate sample; b) Hastelloy C276 coating sample

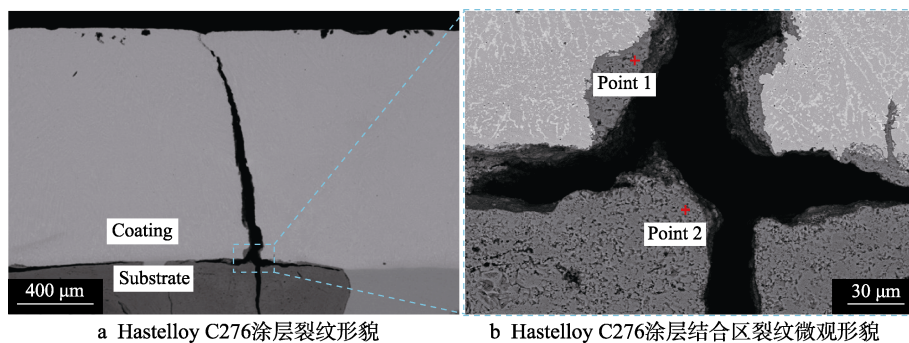


图 8 Hastelloy C276 涂层试样热震后初始裂纹形貌
Fig.8 Initial crack morphology of laser cladding Hastelloy C276 coating sample after thermal shock: a) crack morphology of Hastelloy C276 coating; b) crack micro morphology of Hastelloy C276 coating bonding zone

了裂纹扩展,使涂层与基体之间存在开裂剥离倾向。在图 8b 中,点 1 和点 2 分别位于涂层和基体结合界面的开裂处,结合 EDS 点扫描结果发现,裂纹边缘已经被氧化,裂纹于结合界面处萌生后在热震过程中受到氧化。由此可推测,裂纹在后续的向上扩展过程中可能也受到了氧化作用的影响。

表 2 图 8b 中点 1 与点 2 处的 EDS 扫描结果
Tab.2 EDS results at points 1 and 2 in Fig.8b

Position	wt. %		
	O	Ni	Fe
Point 1	24.32	43.73	3.12
Point 2	25.04	3.72	67.56

在反复的热胀冷缩过程中,由于涂层与基体保持紧密的冶金结合,且基体材料和涂层材料的热膨胀系数存在一定差异,基体对涂层的收缩起到阻碍作用,使涂层与基体结合界面区域产生因热膨胀系数不匹配而引起的热应力。热应力计算如式(1)^[22]所示。

$$\sigma_{\Delta T} = \Delta T \cdot \Delta \alpha \cdot \frac{E}{1 - \mu}$$

(1)

式中: $\sigma_{\Delta T}$ 为涂层受热时内部产生的热应力; ΔT 为加热温度与无应力参考温度之差; E 为涂层材料的弹性模量; μ 为涂层材料的泊松比; $\Delta \alpha$ 为基体与涂层材料的热膨胀系数之差, $\Delta \alpha$ 与基体和涂层的材料有关。据文献[23–25]报道,Hastelloy C276 镍基合金的热膨胀系数为 $16 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,2Cr13 不锈钢的热膨胀系数则为 $11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;Hastelloy C276 的弹性模量 E 与泊松比 μ 分别为 $2 \times 10^5 \text{ MPa}$ 和 0.3;试验中以室温 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 为无应力参考温度, ΔT 为 $1\,148.15 \text{ K}$ 。计算得到热震试验中涂层内部产生的热应力 $\sigma_{\Delta T}$ 为 $1.64 \times 10^3 \text{ MPa}$ 。经过多次热震循环,当结合界面某处抗拉强度低于 $1.64 \times 10^3 \text{ MPa}$ 时,此处的涂层材料会以断裂的形式来释放热应力,由此便萌生了微裂纹。

图 9 为涂层的热震失效过程演化示意图。随着热震循环次数的不断累积,在涂层与基体结合界面产生了应力集中,当某处薄弱位置的强度不足以抵抗热应力时,会导致材料失效断裂,由此产生了微裂纹;随着热震的继续进行,这种微裂纹不断扩展,为氧气进入提供了通道,在高温下更容易发生氧化而进一步加剧了裂纹的扩展生长^[26]。

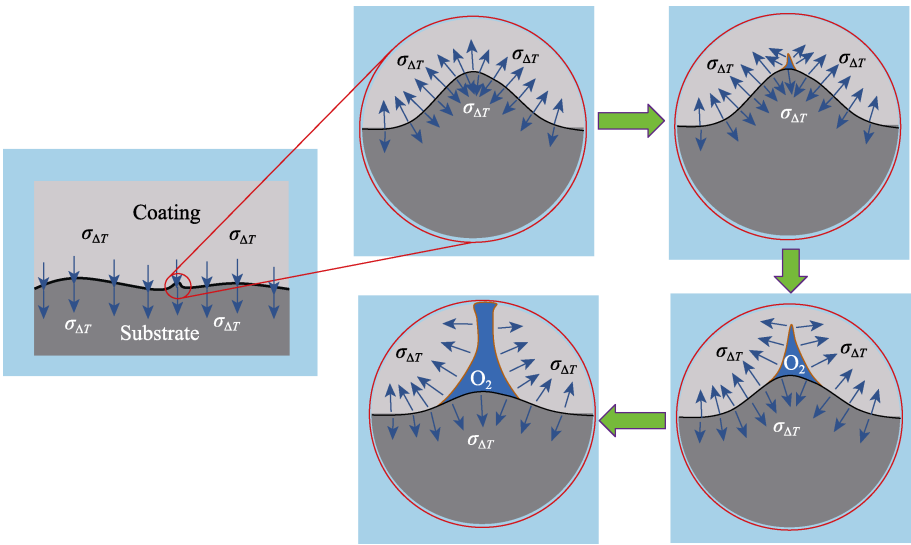


图 9 激光熔覆 Hastelloy C276 涂层热震失效演化示意图
Fig.9 Schematic diagram of destructive evolution of laser cladding
Hastelloy C276 coatings subject to thermal shock failure

由于热震时激光熔覆 Hastelloy C276 涂层的裂纹在涂层与基体的结合处萌生,并向上逐渐扩展至表面,相较于 2Cr13 试样,涂层试样的表面开裂处于热震失效末期,能起到延长试样抗冷热疲劳寿命的效果,因此对微晶玻璃压延辊表面抗冷热疲劳防护涂层进行研究具有一定意义。

3 结论

1) Hastelloy C276 熔覆涂层成形质量良好,表面无裂纹,与基体呈冶金结合。涂层由 $\gamma\text{-Ni}$ 相、 M_6C

相和 M_{23}C_6 相构成。涂层微观组织从结合处至表面分别为平面晶、胞状组织、柱状树枝晶以及等轴树枝晶,均在树枝晶间析出了 M_6C 和 M_{23}C_6 等碳化物相。

2) Hastelloy C276 涂层的抗热震性能显著优于 2Cr13 基体的,热震次数平均值约为基体的 3 倍,最高达到 202;热震后,2Cr13 试样表面有裂纹,Hastelloy C276 涂层试样在试样边缘处出现了细小裂纹。

3) 在 Hastelloy C276 热震时,裂纹在涂层与基体结合界面处萌生并向涂层表面扩展,涂层表面出现裂纹较晚,相较于 2Cr13,抗冷热疲劳寿命得到了延长。

参考文献:

- [1] 刘俊祺, 石旭海, 李志鹏, 等. 微晶玻璃储能应用研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2022, 43(2): 75-91.
LIU Jun-qi, SHI Xu-hai, LI Zhi-peng, et al. Research Progress of Glass-Ceramics for Energy Storage Applications[J]. Advanced Ceramics, 2022, 43(2): 75-91.
- [2] 王坤, 苏钰. 玻璃和微晶玻璃在固体氧化物燃料电池中的研究进展[J]. 上海工程技术大学学报, 2021, 35(3): 201-207.
WANG Kun, SU Yu. Application of Glass and Glass-ceramics in Solid Oxide Fuel Cell[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2021, 35(3): 201-207.
- [3] 罗顺, 游玉萍, 林义民, 等. 我国工业固废的产业规模和处理技术现状[J]. 材料研究与应用, 2018, 12(3): 178-182.
LUO Shun, YOU Yu-ping, LIN Yi-min, et al. Industrial Scale and Processing Technology Status of Industrial Solid Waste in China[J]. Materials Research and Application, 2018, 12(3): 178-182.
- [4] 罗凌虹, 黄祖志, 吴也凡, 等. BaO-CaO-Al₂O₃-B₂O₃-SiO₂ 微晶玻璃对大面积平板式 IT-SOFC 的封接性能[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(1): 101-107.
LUO Ling-hong, HUANG Zhu-zhi, WU Ye-fan, et al. Sealing Properties of BaO-CaO-Al₂O₃-B₂O₃-SiO₂ Glass-Ceramics to Large Size Planar IT-SOFC[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(1): 101-107.
- [5] 李金桂. 十论现代表面工程[J]. 表面技术, 2016, 45(6): 1-6.
LI Jin-gui. Ten on Modern Surface Engineering[J]. Surface Technology, 2016, 45(6): 1-6.
- [6] 韩冰源, 楚佳杰, 周克兵, 等. 基于重熔技术的热喷涂涂层质量调控与性能优化现状研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(6): 727-739.
HAN Bing-yuan, CHU Jia-jie, ZHOU Ke-bing, et al. Research on Present Situation of Quality Control and Performance Optimization of Thermal Spraying Coating Based on Remelting Technology[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(6): 727-739.
- [7] 韩彬, 马光兴, 刘振洪. 端部激光熔覆复合管焊接接头组织与性能分析[J]. 中国石油大学学报, 2021, 45(4): 139-145.
HAN Bin, MA Guang-xing, LIU Zhen-hong, et al. Microstructures and Properties of Welded Joints of Bimetal-composite Pipe with Laser Cladding at the End[J]. Journal of China University of Petroleum, 2021, 45(4): 139-145.
- [8] 马清, 张艳梅, 卢冰文, 等. 激光熔覆硬质颗粒增强高熵合金复合涂层研究进展[J]. 材料研究与应用, 2021, 15(5): 583-592.
MA Qing, ZHANG Yan-mei, LU Bing-wen, et al. Research Progress of Hard Particle Reinforced High Entropy Alloy Composite Coatings Fabricated by Laser Cladding[J]. Materials Research and Application, 2021, 15(5): 583-592.
- [9] 张津超, 石世宏, 龚燕琪, 等. 激光熔覆技术研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 1-11.
ZHANG Jin-chao, SHI Shi-hong, GONG Yan-qi, et al. Research Progress of Laser Cladding Technology[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 1-11.
- [10] 王豫跃, 牛强, 杨冠军, 等. 超高速激光熔覆技术绿色制造耐蚀抗磨涂层[J]. 材料研究与应用, 2019, 13(3): 165-172.
WANG Yu-yue, NIU Qiang, YANG Guan-jun, et al. Investigations on Corrosion-resistant and Wear-resistant Coatings Environmentally-friendly Manufactured by a Novel Super-High Efficient Laser Cladding[J]. Materials Research and Application, 2019, 13(3): 165-172.
- [11] 嵇爽, 李会林, 赵秀娟, 等. 镍基耐蚀合金 Hastelloy C-276 锻造开裂原因分析[J]. 金属热处理, 2021, 46(6): 240-244.
JI Shuang, LI Hui-lin, ZHAO Xiu-juan, et al. Forging Cracking Cause Analysis of Ni-based Corrosion-resistant Alloy Hastelloy C-276[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(6): 240-244.
- [12] 刘翊安, 张晓宇, 孙欢迎, 等. 冷拉伸预变形及热处理对 Hastelloy C-276 合金晶界特征的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(7): 13-18.
LIU Yi-an, ZHANG Xiao-yu, SUN Huan-ying, et al. Influence of Cold Tensile Pre-Deformation and Heat Treatment on Grain Boundary Characteristics of Hastelloy C-276 Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(7): 13-18.
- [13] 张晓宇, 钟军, 赵军, 等. Hastelloy C-276 合金多道次退火晶粒团簇组织的演变[J]. 稀有金属, 2021, 45(9): 1053-1061.
ZHANG Xiao-yu, ZHONG Jun, ZHAO Jun, et al. Microstructure Evolution of Grain Cluster in Hastelloy C-276 Alloy during Multi-Path Annealing[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45(9): 1053-1061.
- [14] 孔永华, 石慧婕, 周江龙, 等. 高温长期时效对 Hastelloy C-276 合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(18): 183-186.
KONG Yong-hua, SHI Hui-jie, ZHOU Jiang-long, et al. Effect of High-temperature Long-term Aging on Microstructure and Mechanical Properties of Hastelloy C-276 Alloy[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(18): 183-186.
- [15] 于京令, 刘大为, 宋丹, 等. 哈氏合金薄板激光填丝焊接接头高周疲劳性能[J]. 电焊机, 2019, 49(4): 37-42.
YU Jing-ling, LIU Da-wei, SONG Dan, et al. High Cycle Fatigue Strength of Laser Welding Hastelloy C-276 with Filler Wire[J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(4): 37-42.
- [16] 刘爽, 徐长征, 丰涵, 等. 铸态 C-276 镍基高温合金的热变形行为及加工图[J]. 热加工工艺, 2017, 46(23): 105-110.
LIU Shuang, XU Chang-zheng, FENG Han, et al. Hot Deformation Behavior and Processing Map of As-cast Nickel-based C-276 Superalloy[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(23): 105-110.
- [17] FERREIRA L, GRAF K, SCHEID A. Microstructure and Properties of Nickel-based C276 Alloy Coatings by PTA on AISI 316L and API 5L X70 Steel Substrates[J]. Materials Research, 2015, 18(1): 212-221.
- [18] TIAN De-li, LIU Xue, HU Li-wei, et al. Microstructure Evolution and Wear Resistance of Laser-Clad M2 High-Speed Steel Coatings[J]. JOM, 2021, 73(12): 4279-

- 4288.
- [19] 顾振杰, 雷剑波, 窦俊雅, 等. 等离子喷涂-激光熔覆 CoCrTaAlY/YSZ 热障涂层的抗高温氧化机理及热震性能[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 126-132.
- GU Zhen-jie, LEI Jian-bo, DOU Jun-ya, et al. High-Temperature Oxidation Resistance Mechanism and Thermal Shock Performance of CoCrTaAlY/YSZ Thermal Barrier Coatings Fabricated Using Plasma Spraying and Laser Cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 126-132.
- [20] 王令双, 曹国剑, 唐光泽, 等. 热障涂层的制备及热震性能[J]. 航空材料学报, 2017, 37(2): 44-48.
- WANG Ling-shuang, CAO Guo-jian, TANG Guang-ze, et al. Preparation and Thermal Shock Performance of ZrO₂/NiCrAlY Thermal Barrier Coating[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(2): 44-48.
- [21] 李彦甫. 穿孔顶头钢表面热喷涂 Stellite X-40 涂层的组织与性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- LI Yan-fu. Study on Microstructure and Properties of Thermal spray Stellite X-40 Coating on Piercing Plug Steel[D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.
- [22] MILLER R A. Failure Mechanisms of Thermal Barrier Coatings Exposed to Elevated Temperatures[J]. Thin Solid Films, 1982, 95(3): 265-273.
- [23] 李少伯. 石化行业用安全阀 2Cr13/1Cr18Ni9Ti 材质阀瓣失效机理分析[D]. 西安: 陕西科技大学, 2012.
- LI Shao-bo. The Failure Mechanism Analysis of 2Cr13/1Cr18Ni9Ti Safety Valve Used in Petrochemical Industry[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2012.
- [24] 柴东升. 哈氏合金 C-276 薄板脉冲激光填丝焊接成形机理及空蚀性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- CHAI Dong-sheng. Weld Formation Mechanism and Cavitation Erosion Property of Pulsed Laser Welding Hastelloy C-276 Thin Sheets with Filler Wire[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [25] 周号. 熔盐堆含缺陷镍基合金模拟容器焊接结构的安全性评估[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- ZHOU Hao. Safety Assessment for Defective Welded Structure of a Nickel-Base Alloy Simulant Vessel of Molten Salt Reactor[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015.
- [26] 刘佳, 路程, 刘江文. 310S 不锈钢表面激光熔覆镍基球形碳化钨复合涂层的抗热震性能[J]. 电镀与涂饰, 2018, 37(8): 334-337.
- LIU Jia, LU Cheng, LIU Jiang-wen. Thermal Shock Resistance of Nickel-Based Spherical Tungsten Carbide Composite Coating Prepared by Laser Cladding on the Surface of 310S Stainless Steel[J]. Electroplating & Finishing, 2018, 37(8): 334-337.

责任编辑: 蒋红晨

(上接第 405 页)

- [19] 沈浩, 蔡杰, 吕鹏, 等. 激光工艺参数对 NiCoCrAlYSi 熔覆层微观组织及性能的影响[J]. 兵工学报, 2021, 42(7): 1524-1534.
- SHEN Hao, CAI Jie, LYU Peng, et al. Effect of Laser Process Parameters on Microstructures and Properties of NiCoCrAlYSi Laser Cladding Coating[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(7): 1524-1534.
- [20] 曹强, 练国富, 肖石洪, 等. 基于灰色关联分析激光熔覆 Ni60A 工艺参数优化[J]. 精密成形工程, 2022, 14(1): 173-181.
- CAO Qiang, LIAN Guo-fu, XIAO Shi-hong, et al. Optimization of Process Parameters of Laser Cladding Ni60A Based on Gray Relational Analysis[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(1): 173-181.
- [21] ZHANG Zhe, KOVACEVIC R. Multiresponse Optimization of Laser Cladding Steel + VC Using Grey Relational Analysis in the Taguchi Method[J]. JOM, 2016, 68(7): 1762-1773.
- [22] FARAYIBI P K, ABIOYE T E, CLARE A T. A Parametric Study on Laser Cladding of Ti-6Al-4V Wire and WC/W₂C Powder[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(9): 3349-3358.
- [23] WANG Qian-ting, ZENG Xian-bin, CHEN Chang-rong, et al. An Integrated Method for Multi-Objective Optimization of Multi-Pass Fe50/TiC Laser Cladding on AISI 1045 Steel Based on Grey Relational Analysis and Principal Component Analysis[J]. Coatings, 2020, 10(2): 151.
- [24] MONDAL S, PAUL C P, KUKREJA L M, et al. Application of Taguchi-Based Gray Relational Analysis for Evaluating the Optimal Laser Cladding Parameters for AISI1040 Steel Plane Surface[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(1): 91-96.
- [25] WOJCIECHOWSKI S, MARUDA R W, KROLCHYK G M, et al. Application of Signal to Noise Ratio and Grey Relational Analysis to Minimize Forces and Vibrations during Precise Ball End Milling[J]. Precision Engineering, 2018, 51: 582-596.
- [26] YU Tian-biao, YANG Lin, ZHAO Yu, et al. Experimental Research and Multi-Response Multi-Parameter Optimization of Laser Cladding Fe₃₁₃[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 108: 321-332.
- [27] 刘喜明. 镍基合金+WC 激光熔覆层的显微组织形成机理及控制[J]. 应用激光, 2006, 26(5): 299-302.
- LIU Xi-ming. Mechanism and Control of the Nick Based Alloy+WC Laser Cladded Layer Microstructure[J]. Applied Laser, 2006, 26(5): 299-302.
- [28] HUANG Yong-jun, ZENG Xiao-yan, HU Qian-wu, et al. Microstructure and Interface Interaction in Laser Induction Hybrid Cladding of Ni-Based Coating[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(7): 3940-3945.

责任编辑: 刘世忠