

激光熔覆 Ni 基合金裂纹的形成机理及敏感性

张磊^{1,2*}, 陈小明^{1,2}, 刘伟¹, 姜志鹏¹, 赵鹏¹, 刘德有^{1,2}

¹水利部产品质量标准研究所浙江省水利水电装备表面工程技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310012;

²水利部杭州机械设计研究所水利机械及其再制造技术浙江省工程实验室, 浙江 杭州 310012

摘要 采用同轴送粉激光熔覆技术,在 45 钢表面制备了 Ni 基合金熔覆层。通过断口分析推断裂纹类型和断裂方式,并结合能谱分析研究了裂纹的萌生和扩展机理。同时,研究了激光熔覆主要工艺参数对开裂敏感性的影响。结果表明,激光熔覆 Ni 基合金的裂纹断面特征为准解理断裂,属于脆性断裂;熔覆层中的热残余应力导致裂纹在界面处萌生并向涂层表面扩展,硼化物、碳化物等硬质相不良分布以及脆性共晶组织提高了开裂敏感性;工艺参数对熔覆层的开裂敏感性具有较大影响。最终提出了激光熔覆 Ni 基合金涂层裂纹控制的基本策略。

关键词 激光技术; 激光熔覆; Ni 基合金; 裂纹; 机理; 敏感性

中图分类号 TG156.199; TG132.32

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.111401

Formation Mechanism and Sensitivity of Cracks in Laser-Cladded Ni-Based-Alloy Coatings

Zhang Lei^{1,2*}, Chen Xiaoming^{1,2}, Liu Wei¹, Jiang Zhipeng¹, Zhao Peng¹, Liu Deyou^{1,2}

¹Key Laboratory of Surface Engineering of Equipment for Hydraulic Engineering of Zhejiang Province, Standard & Quality Control Research Institute, Ministry of Water Resources, Hangzhou, Zhejiang 310012, China;

²Water Machinery and Remanufacturing Technology Engineering Laboratory of Zhejiang Province, Hangzhou Mechanical Research Institute, Ministry of Water Resources, Hangzhou, Zhejiang 310012, China

Abstract In this study, the Ni-based-alloy coatings are prepared on 45 steel substrates by laser cladding with coaxial powder feeding. The fracture morphology analysis is conducted to evaluate the fracture mode and types of cracks. In addition, the energy-disperse spectroscopy is used to further investigate the mechanisms of crack initiation and propagation. Furthermore, the effects of the laser-cladding-process parameters on the cracking sensitivity are studied. The results show that the cracks in the Ni-based-alloy coatings are due to the quasi-cleavage fractures, which are a type of brittle fracture. Moreover, it is shown that the thermal residual stress causes the crack initiation at the interface and the subsequent crack propagation to the coating surface. It is further shown that the process parameters have significant impacts on the cracking sensitivity of the coating because the uneven distribution of the hard phase (including boride and carbide) and the brittle eutectic organization result in a high cracking sensitivity. Finally, the basic strategies for controlling cracks during laser cladding of Ni-based-alloy coatings are proposed.

Key words laser technique; laser cladding; Ni-based-alloy; crack; mechanism; sensitivity

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引言

Ni 基合金具有抗磨损、耐腐蚀、耐冲击、湿润性

好等优良性能,被广泛用于航空航天、精密机械、海洋工程等领域^[1]。激光熔覆是一种先进、高效的表面技术,通过该技术可在工件表面获得致密性高且

收稿日期: 2018-11-30; 修回日期: 2018-12-03; 录用日期: 2019-01-02

基金项目: 水利部“948”项目(201218)、浙江省公益性技术应用研究计划(2016C37091, 2017C37048, 2018C37029)、杭州市科技发展计划(20120433B35)

* E-mail: qingyi22@163.com

与基材呈冶金结合的 Ni 基合金涂层,可有效提高工件表面的防护性能。然而,激光熔覆过程中的骤热和骤冷作用易导致涂层产生裂纹缺陷^[2]。当前,激光熔覆的开裂问题已成为阻碍其应用的重要因素,也是激光熔覆的研究难点之一^[3-4]。近年来,国内外学者已对激光熔覆 Ni 基合金开裂问题开展一系列研究。曹亚男等^[5]的研究表明 Ni 基合金熔覆层裂纹属于热裂纹,并采用超声振动和稀土 Y_2O_3 改性的方法抑制了裂纹的形成。Zhou 等^[6]采用激光感应复合快速熔覆技术实时加热基体,降低温度梯度,从而抑制 Ni 基合金熔覆层的开裂。Yu 等^[7]利用金属 Ta 抑制了 Ni 基激光熔覆层中粗大碳化物 $M_{23}C_6$ 和 M_7C_3 的形成,从而降低了裂纹敏感性。皮政清等^[8]在激光熔覆的同时对熔覆层进行高频微锻造,使熔覆层产生塑性变形从而得以控制其开裂行为。上述研究多侧重于裂纹的控制方法,而有关裂纹类型、形成机理及开裂敏感性等基础性问题的研究报

道甚少。

本文基于同轴送粉和多道搭接工艺的激光熔覆技术,从材料研究方法入手,研究了激光熔覆层的断口形貌、开裂方式、裂纹萌生和扩展机理,并在此基础上探究了熔覆工艺参数对开裂敏感性的影响,以为激光熔覆 Ni 基合金裂纹缺陷的控制提供参考依据。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料

熔覆粉末材料选用 Ni 基合金 1550-00,粒度为 $53\sim 150\ \mu\text{m}$ 。基体采用 45 号钢,尺寸为 $80\ \text{mm}\times 60\ \text{mm}\times 20\ \text{mm}$,粉末和基材主要化学成分如表 1 所示。将基体待熔覆表面磨削加工至粗糙度为 $0.2\ \mu\text{m}$,并将基体浸泡在乙醇溶液中,使用超声波清洗 15 min 以去除污垢。激光熔覆前将粉末和基材置于马弗炉中进行预热处理。

表 1 合金粉末和基材成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of alloy powder and base material (mass fraction, %)

Material	C	Si	Mn	B	Fe	Cr	Ni	Cu	P	S
1550-00	0.45	3.90	—	2.30	2.90	11.00	Bal.	—	—	—
45 steel	0.42-0.50	0.17-0.37	0.50-0.80	—	Bal.	≤ 0.25	≤ 0.25	≤ 0.25	≤ 0.035	≤ 0.035

2.2 实验方法

激光熔覆实验使用德国 LASERLINE 公司的 LDF4000 型光纤耦合半导体激光器,采用同轴送粉和多道搭接的工艺进行熔覆。在进行裂纹形成机理研究时,试样制备参数如下:预热温度为 $100\ ^\circ\text{C}$,光斑直径为 $5\ \text{mm}$,搭接率为 50% ,扫描速度为 $10\ \text{mm/s}$,送粉速率为 $25.9\ \text{g/min}$,激光功率分别为 $2.8, 3.2, 3.6, 4.0\ \text{kW}$ 。在进行开裂敏感性研究时,调节激光功率、送粉速率、扫描速度、预热温度等工艺参数以制备不同裂纹的试样,通过着色渗透探伤法观测熔覆试样表面的宏观裂纹的密度及其分布。

熔覆层表面经过磨抛后,采用荷兰帕纳科公司的 X'Pert Powder 型 X 射线粉末衍射仪测定其物相成分。采用 HCl 与 HNO_3 体积比为 $3:1$ 的溶液(俗称王水)对经过抛光后的涂层横截面进行腐蚀。之后,采用德国 ZEISS 公司的 SUPRA55 型场发射扫描电子显微镜(SEM)观察熔覆层截面和裂纹微观形貌,并采用附带的能谱仪(EDS)对其进行微区成分分析。将试样沿裂纹剥开露出断面,用酒精超声波清洗后吹干,采用 SEM 对其进行断口形貌和分析。采用上海泰明光学有限公司的 HXD-1000TMC/LCD 型显微硬度计测定不同激光功率下

的熔覆层截面在厚度方向上的硬度分布,检测过程中设置峰值载荷为 $200\ \text{g}$,加载时间为 $15\ \text{s}$ 。

3 实验结果与分析

3.1 熔覆层物相成分及显微硬度

图 1 为不同激光功率下的熔覆层的 X 射线衍射(XRD)谱图,其中 θ 为衍射角。当激光功率较低时,熔覆层主要物相成分为 $\gamma\text{-Ni}$ 、 $Ni_{1.12}Cr_{2.88}$ 、 $FeNi_3$ 、硼化物相(CrB 、 Ni_3B)和碳化物相($Cr_{23}C_6$ 、 NiC)等,其中 $Ni_{1.12}Cr_{2.88}$ 、 $FeNi_3$ 、 NiC 等物相的存在表明 $\gamma\text{-Ni}$ 相中固溶了一定量的 Cr、Fe 和 C。随着激光功率逐渐提高,熔覆层物相成分逐渐发生细微

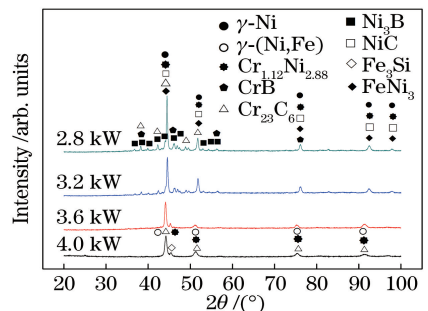


图 1 激光熔覆 Ni 基合金涂层的 XRD 谱图

Fig. 1 XRD patterns of laser clad Ni-based-alloy coatings

的变化。当激光功率为 4.0 kW 时,硼化物(CrB、Ni₃B)和碳化物(NiC)全部消失,同时含 Ni 物相转变为以 γ -(Ni, Fe) 物相为主,并产生了 Fe₃Si 相。上述现象的主要原因有:1) 在高激光功率的条件下熔池熔融较为充分,有利于脱氧造渣和熔渣浮溢,降低了硼化物和碳化物的含量^[9-10];2) 基材对熔覆层的稀释作用增强,熔覆层中 Fe 含量和含 Fe 物相有所增加。由此可见,激光功率的变化对熔覆层的主要物相成分具有一定的影响。

在不同激光功率下,熔覆层在厚度方向上显微硬度的分布如图 2 所示。由图 2 可见,熔覆层整体的硬度随着激光功率的升高而下降。涂层的硬度与其物相成分密切相关,结合图 1 及物相分析推测,熔覆层硬度的降低是由熔覆层中硼化物、碳化物等硬质相含量随激光功率升高而降低引起的。熔覆层从表面向基材方向上的硬度分布规律总体相似:在表层处,硬度最高;随着距离表面的厚度逐渐变大,硬度逐渐降低,但仍保持较高的硬度值;在界面处,硬度逐渐下降至基材硬度。当激光功率较低时,熔覆层的硬度在表层至界面阶段波动较大,这可能是由硬质相的偏聚和不良分布所造成的。

3.2 熔覆层表面裂纹宏观特征及截面裂纹微观形貌

在不同激光功率下,激光熔覆层表面宏观裂纹

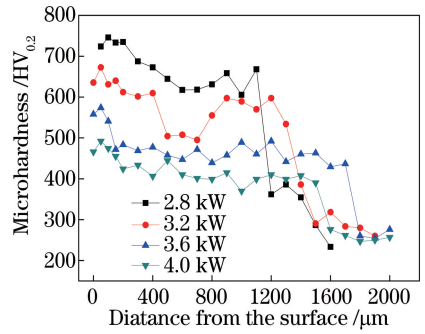


图 2 熔覆层截面硬度分布

Fig. 2 Microhardness distribution in cross section of Ni-based-alloy coating

的特征如图 3 所示。可以看出,在较低激光功率下,裂纹敏感性较高。首条熔道上的裂纹多数沿着扫描速度的垂直方向开裂,随着熔道的逐道搭接,裂纹向前扩展并频繁发生交叉,最终呈密集网状,布满熔覆层表面。随着激光功率的升高,熔覆层每条熔道上的裂纹密度逐渐降低,裂纹整体沿垂直于扫描方向向前扩展,交叉现象减少,裂纹彼此之间趋于平行。

由图 3 可以看出,熔覆层裂纹敏感性整体上随激光功率的增高而降低,结合图 1 和图 2 可知,裂纹的敏感性与物相成分、硬度的变化趋势总体保持一致,可推测裂纹形成机理与物相成分、硬度密切相关。

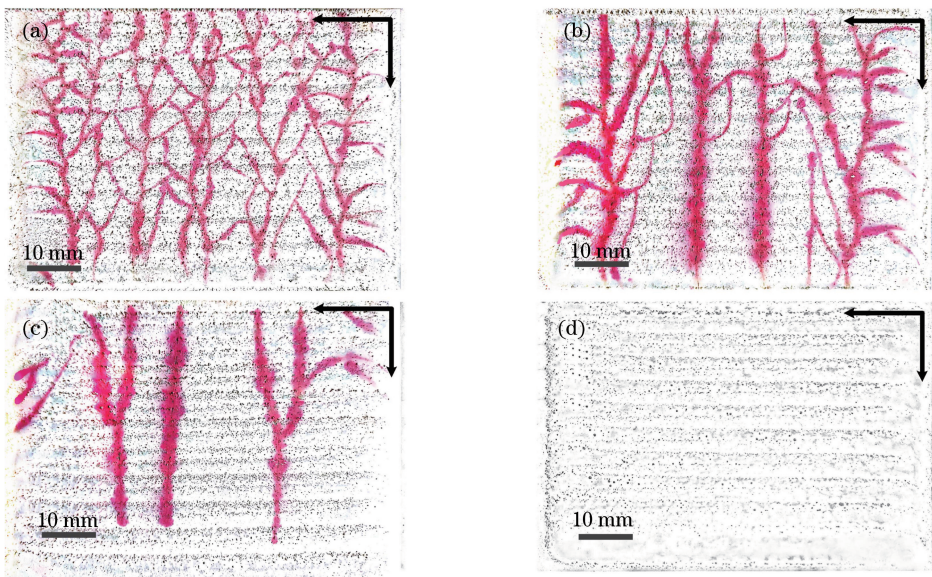


图 3 激光熔覆 Ni 基金属涂层表面裂纹宏观特征。(a) 2.8 kW;(b) 3.2 kW;(c) 3.6 kW;(d) 4.0 kW

Fig. 3 Macro-morphologies of cracks in laser clad Ni-based-alloy coatings.

(a) 2.8 kW; (b) 3.2 kW; (c) 3.6 kW; (d) 4.0 kW

选取上述试样中高裂纹敏感性的试样(2.8 kW),对其截面上的裂纹微观形貌进行表征分

析,结果如图 4 所示。由图 4(a)可见,熔覆层中裂纹主要包括贯穿粗裂纹、未贯穿粗裂纹、少量微裂纹

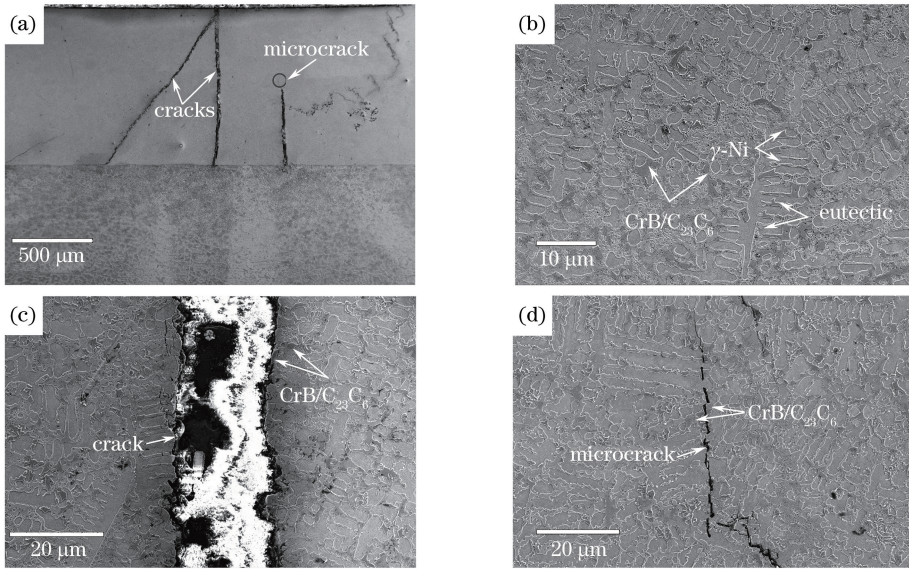


图 4 熔覆层截面显微组织及裂纹微观形貌。(a)整体形貌;(b)微观组织和形貌;(c)粗裂纹;(d)微裂纹

Fig. 4 Microstructure of cross-section of Ni-based-alloy coating and crack micro-morphology. (a) Overall morpholog;
(b) morphology and microstructure of cross-section; (c) coarse crack; (d) microcrack

和若干不规则孔隙缺陷。粗裂纹起源于熔覆层与基体的界面处,并向熔覆层表面扩展。部分粗裂纹扩展贯穿整个熔覆层,部分中止于熔覆层中。在高倍放大后观察粗裂纹末端,可见其向表面方向延伸的微裂纹。此外,还可见不规则孔隙分布于熔覆层中。图 4(b)为熔覆层的微观组织,可以看出熔覆层组织主要包含 γ -Ni 枝晶、枝晶间共晶组织以及形态不规则的沉积物。图 4(c)和(d)分别为高倍放大后的粗

裂纹和微裂纹的微观形貌,二者呈现出明显的穿晶断裂特征。同时,在图 4(c)和(d)中可见裂纹周围弥散大量的沉积物,根据 XRD 分析及相关研究^[11],可以推知该物相为 CrB 和 Cr_{23}C_6 硬质相。

3.3 熔覆层裂纹断口的微观形貌

利用 SEM 对熔覆层裂纹断口形貌进行观察分析。图 5(a)和(b)分别为熔覆层断面整体和局部形貌,可见断面比较平整且有金属光泽,同时具有明显

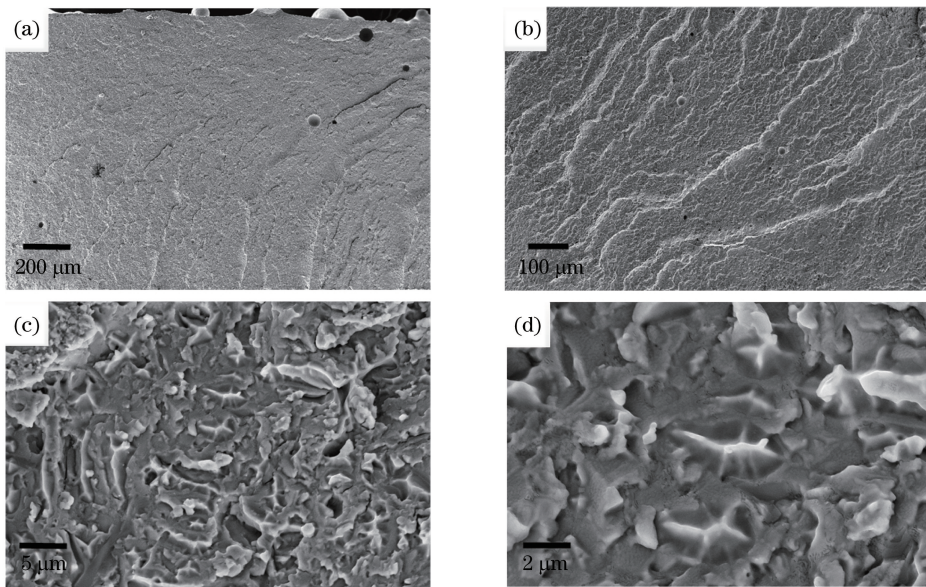


图 5 熔覆层裂纹断口形貌。(a)断面整体形貌;(b)断面河流状花样;(c)(d)断面撕裂棱

Fig. 5 Fracture morphology of crack in laser clad Ni-based-alloy coating. (a) Overall fracture morphology;
(b) river pattern of fracture surface; (c)(d)tearing ridge of fracture surface

的河流状花样。图 5(c)和(d)为在高倍放大后观察到的断面。断面伴有因局部微观塑性变形而形成的许多短而密的撕裂棱,判断该断口特征为准解理断裂^[12]。熔覆层在冷却过程中产生清脆的开裂声,说明熔覆层中存在残余应力,结合图 4 中裂纹的穿晶特征推测裂纹应是固态下形成的脆性断裂,属于冷裂纹范畴^[13]。不同于凝固过程中沿晶液膜分离形成的热裂纹^[14],冷脆裂纹是在高温熔池凝固并冷却至较低温度时产生的^[12],结合残余应力的存在可以进一步推测,激光熔覆 Ni 基合金开裂方式是冷裂纹中的低延开裂。

3.4 熔覆层裂纹萌生和扩展机理

冷脆裂纹是由熔覆层的残余应力和低延展性双重作用的结果^[15]。相关研究发现,激光熔覆层中的残余应力主要有热残余应力、约束应力和组织应力^[6]。热残余应力是由于涂层与基体材料热膨胀系数的差异而产生的,由于镍基涂层的热膨胀系数 $[(13.4\sim 16.8)\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}]$ 大于碳钢基体的热膨胀系数 $[(11.7\sim 13.9)\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}]$ ^[16],该应力表现为残余拉应力并且在熔覆层与基材结合处应力最大^[17],导致裂纹优先从界面起裂。约束热应力是由熔覆层中的温度梯度造成的。温度梯度导致熔覆层不同部位处的冷却速度不同,冷却较快的部位受到相邻组织的约束而产生拉应力^[18]。该应力作用导致冷却最快的涂层表面优先起裂。此外,熔池凝固冷却过程中还可能由于微观相变产生的

组织应力^[6]。

当局部区域的残余应力的合力超过 Ni 基合金的屈服强度时,裂纹萌生^[19]。由图 4 可知,裂纹起源于熔覆层与基体的界面处,并向涂层表面扩展,因此在上述几种应力中,热残余应力在裂纹萌生时起主导作用。裂纹一旦萌生,将沿着最有利的方向扩展。熔覆层中的残余应力场是三维应力场,在扫描方向上残余热应力最大^[19],因而裂纹沿垂直于激光扫描方向开裂。在厚度方向上,裂纹在残余应力的综合作用下向熔覆层表面方向扩展。

裂纹的萌生和扩展同时与熔覆层的硬脆性密切相关。图 6 为熔覆层中微裂纹附近元素的面分布图。在 SEM 下可见裂纹附近不均匀分散的灰黑色块沉积物,通过元素面分布图可以看出 Cr 元素存在明显的局部偏聚现象,与沉积物的分布保持一致。对截面上裂纹附近区域的主要元素进行定量分析,结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,裂纹附近及断口上的 B 和 C 元素均高于原始粉末。 S_1 点富含 Ni 元素,同时含有一定量的 C、Fe 和 Cr,该点为固溶了 C、Fe 和 Cr 元素的 γ -Ni 固溶体。位于灰黑色沉积物区域的 S_2 点处的 Cr、C 和 B 元素的含量很高,而 Ni 和 Fe 元素的含量很低,可以推断裂纹周围的灰黑色沉积物为 CrB 和 Cr_{23}C_6 硬质初生相。 S_3 点处含有较多的 Ni、B 元素,同时还含有一定量的 Cr、C 元素,结合相关研究分析^[1,11,16],可推断该物相为 γ -Ni+Ni₃B、 γ -Ni+Cr₂₃C₆ 等脆性共晶组织。

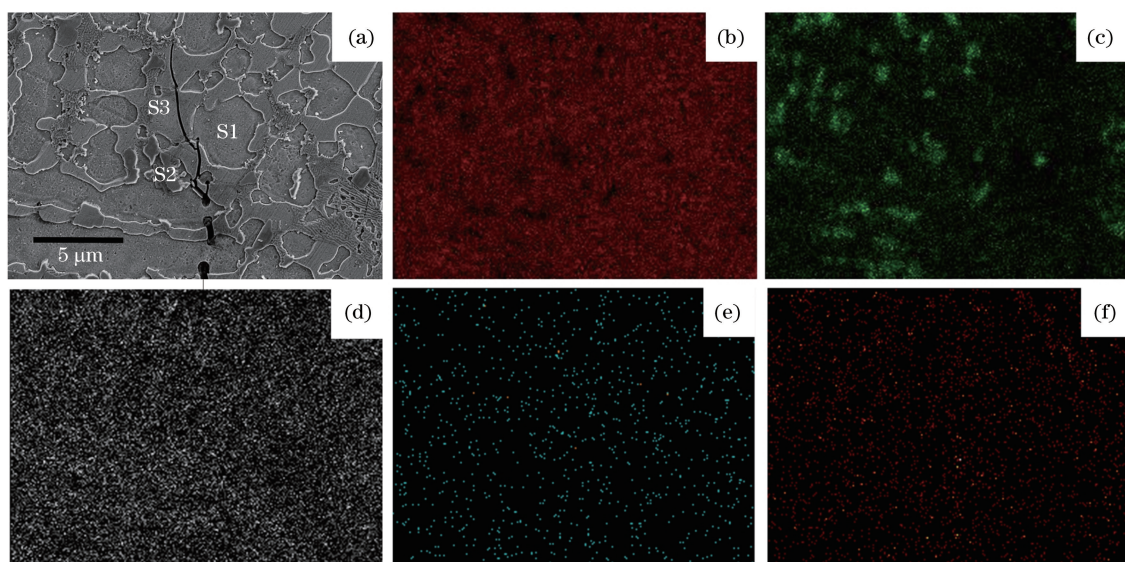


图 6 熔覆层裂纹 SEM 形貌及周边元素分布。(a) SEM 形貌;(b) Ni;(c) Cr;(d) Fe;(e) B;(f) C
Fig. 6 SEM morphology of crack and element distribution in laser clad Ni-based-alloy coating.

(a) SEM morphology; (b) Ni; (c) Cr; (d) Fe; (e) B; (f) C

表2 EDS成分分析(质量分数,%)

Table 2 Compositional analysis by EDS (mass fraction, %)

Point	C	B	Si	Fe	Cr	Ni
S ₁	10.63	—	3.79	15.40	6.96	63.22
S ₂	16.14	7.79	0.15	1.22	73.57	1.13
S ₃	12.75	16.04	2.33	9.40	12.73	46.75

由此可见,激光熔覆 Ni 基合金涂层除了含有 γ -Ni 韧性相,还有大量碳化物、硼化物硬质相以及脆性共晶组织。硬质相的不均匀分布造成熔覆层高脆硬性和低延展性,降低了涂层断裂强度,为裂纹的

萌生和扩展创造了内在条件^[20]。这一判断在开裂敏感性与物相成分、显微硬度的关系中得到了证实(图1和图2)。

3.5 工艺参数对裂纹敏感性的影响

条件试验研究表明,激光功率 P 、送粉速率 Q 、扫描速度 V 、预热温度 T 等激光熔覆工艺参数对裂纹敏感性均具有显著的影响。以单位面积熔覆层中裂纹的总长度即裂纹密度定量评价裂纹敏感性,结果如图7所示。同时,由图7还可观察到不同工艺参数下宏观裂纹的分布特征和扩展形态。

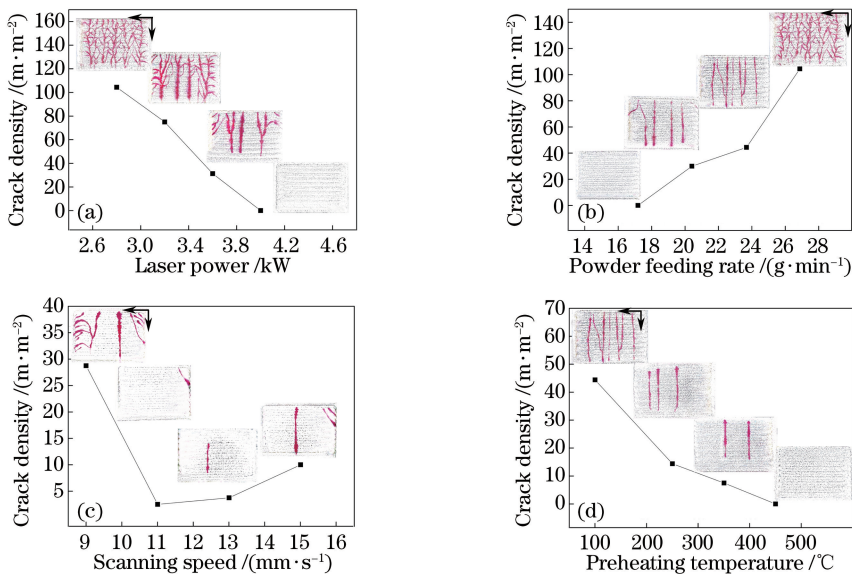


图7 激光熔覆工艺因素对裂纹敏感性的影响(图中标尺均为10 mm)。(a)激光功率($V=10$ mm/s, $Q=25.9$ g/min, $T=100$ °C);(b)送粉速率($P=2.8$ kW, $V=10$ mm/s, $T=100$ °C);(c)扫描速度($P=4.0$ kW, $Q=25.9$ g/min, $T=100$ °C);(d)预热温度($P=2.8$ kW, $Q=22.7$ g/min, $V=10$ mm/s)

Fig. 7 Effects of laser cladding process factors on cracking sensitivity (The rulers represent 10 mm). (a) Laser power ($V=10$ mm/s, $Q=25.9$ g/min, and $T=100$ °C); (b) powder feeding rate ($P=2.8$ kW, $V=10$ mm/s, and $T=100$ °C); (c) scanning speed ($P=4.0$ kW, $Q=25.9$ g/min, and $T=100$ °C); (d) preheating temperature ($P=2.8$ kW, $Q=22.7$ g/min, and $V=10$ mm/s)

由图7(a)可以看出,裂纹敏感性随激光功率的升高而显著降低。这有两方面的因素:一方面,在较高的激光功率下熔池熔融充分,有利于减少硬质相的偏聚和熔渣的上浮^[21],降低熔覆层的硬脆性;另一方面,当激光功率较高时,基材对熔覆层的稀释作用减小了两者之间热膨胀系数的差异,从而降低了热残余应力,有效抑制了裂纹的萌生和扩展。图7(b)说明了送粉速率对裂纹敏感性的影响规律。较高送粉速率下单位质量粉末所受的能量输入较低,熔池熔融不够充分,熔覆层脆性较高。此外,较厚的熔覆层的温度梯度较大,开裂的敏感性较高。由图7(c)可见,裂纹敏感性随扫描速度的增加先降

低后升高。同轴送粉下的熔覆层厚度与扫描速度密切相关,当扫描速度较高时,熔池深度较小,有利于熔渣浮溢和降低熔覆层的脆性。同时,较低厚度下的熔覆层的温度梯度较低^[22],故开裂敏感性会降低。当扫描速度继续提高时,基材上的热量输入较低,基材难以与粉末形成充分熔融的熔池,故裂纹敏感性反而升高。图7(d)表明,随着预热温度的升高,开裂敏感性逐渐降低。显然,这是由于预热有效降低了基材和熔覆层的温度梯度,从而有效减小了熔覆层中的热应力。由此可见,激光熔覆工艺参数对裂纹敏感性均具有较大的影响,通过适当提高激光功率、降低送粉速率、提高预热温度和控制扫描速

度可降低裂纹敏感性。

此外,由图7可以发现,宏观裂纹分布和扩展普遍呈现以下特征:裂纹在熔道起始端多数向扫描方向的反方向偏转,而在熔道末端则向扫描方向偏转。这与熔覆层的温度应力场有关^[23]。熔道温度分布沿着扫描方向逐渐升高,起始端温度较低且应力较大,容易开裂。随着后续熔道热量的输入,起始端高热应力区域减小,裂纹逐渐偏向扫描的相反方向。而在熔道末端,扫描方向上温度的末端效应使熔道后续温度梯度及热应力逐渐增大^[24],故末端裂纹扩展偏向于扫描方向。此外,随着熔道的搭接,后续熔道上裂纹互相交汇且整体裂纹密度逐渐减小,最终裂纹扩展方向趋于垂直扫描方向。这是由于前道熔覆为后续熔道的基材起到预热作用,减小了基材与熔覆层间的温度梯度及残余热应力,从而降低了裂纹敏感性。上述讨论表明熔覆层起始端及末端具有较高的裂纹敏感性,这也是激光熔覆工艺中值得注意的问题。

4 结 论

激光熔覆 Ni 基合金开裂涂层主要由 γ -Ni 固溶体枝晶、共晶组织、硼化物和碳化物组成,熔覆层具有较高的脆硬性。Ni 基合金熔覆层裂纹属于准解理断裂,裂纹在残余应力的作用下在涂层结合处萌生并向表面扩展。硬质相不良分布造成的低延展性为裂纹的形成创造了内在条件。残余应力和涂层组织调控是影响裂纹敏感性的两大因素。降低熔覆层材料与基材之间热膨胀系数的差异和减小温度梯度,可抑制残余应力,降低裂纹敏感性。同时,控制涂层组织中脆性相的偏聚亦可降低裂纹敏感性。

参 考 文 献

- [1] Tu Y, Zhang Y Z, Xi M Z. Investigation of nickel-based alloys coatings on stainless steel by laser cladding[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2008, 32(5): 598-604.
涂义, 张永忠, 席明哲. 不锈钢表面激光熔覆镍基合金层研究[J]. 稀有金属, 2008, 32(5): 598-604.
- [2] He H, Wang D S, Liang E J, *et al.* Improvement on microstructure and cracking susceptibility of laser-clad Ni-based layers by *in situ* generation of tantalum carbides and borides [J]. Advanced Materials Research, 2012, 472/473/474/475: 239-245.
- [3] Wang D S, Liang E J, Chao M J, *et al.* Investigation on the microstructure and cracking susceptibility of laser-clad V_2O_5 /NiCrBSiC alloy coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(8): 1371-1378.
- [4] Hu M L, Xie C S, Zhu B L, *et al.* Fractography study on the cracking behavior of laser-clad multitrack coatings[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2001, 22(2): 23-26.
胡木林, 谢长生, 祝柏林, 等. 多道搭接激光熔覆镍基合金中裂纹断口形貌研究[J]. 材料热处理学报, 2001, 22(2): 23-26.
- [5] Cao Y N, Zhang Y M, Jie X H, *et al.* Study on control of crack in laser cladding Ni-based coating on steel[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(18): 133-136.
曹亚男, 张艳梅, 揭晓华, 等. 钢表面激光熔覆镍基合金涂层裂纹控制的研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(18): 133-136.
- [6] Zhou S F, Zeng X Y, Hu Q W, *et al.* Analysis of crack behavior for Ni-based WC composite coatings by laser cladding and crack-free realization [J]. Applied Surface Science, 2008, 255(5): 1646-1653.
- [7] Yu T, Deng Q L, Dong G, *et al.* Effects of Ta on microstructure and microhardness of Ni based laser clad coating[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(11): 5098-5103.
- [8] Pi Z Q, Qiu C J, Fan X F. Study of crack control for CoNiCrWC composite coating by laser cladding [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(S2): 283-285.
皮政清, 邱长军, 樊湘芳. 激光熔覆 CoNiCrWC 复合涂层裂纹的控制研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(S2): 283-285.
- [9] Dong G, Yan B, Deng Q L, *et al.* Effects of the alloy composition on the microstructure and properties of laser cladding Ni-based alloy coatings [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2011, 29(2): 167-172.
董刚, 严彪, 邓琦林, 等. 合金成分对镍基合金激光熔覆涂层组织与性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2011, 29(2): 167-172.
- [10] Deng D W, Sun J H, Wang X L, *et al.* Laser power effect on microstructure and property of laser cladding nickel based alloy coating [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2016, 40(1): 20-25.
邓德伟, 孙晋华, 王鑫林, 等. 激光功率对激光熔覆镍基合金涂层组织与性能的影响[J]. 稀有金属, 2016, 40(1): 20-25.
- [11] Yuan Q L, Feng X D, Cao J J, *et al.* Research on microstructure of Ni-based alloy coating by laser

- cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2116-2120.
- 袁庆龙, 冯旭东, 曹晶晶, 等. 激光熔覆镍基合金涂层微观组织研究[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2116-2120.
- [12] Chen J, Yang H O, Li Y M, *et al.* The research on two kinds of cracking behavior and mechanism of cladding in rapid laser forming process[J]. Applied Laser, 2002, 22(3): 300-304.
- 陈静, 杨海欧, 李延民, 等. 激光快速成形过程中熔覆层的两种开裂行为及其机理研究[J]. 应用激光, 2002, 22(3): 300-304.
- [13] Song J L, Deng Q L, Ge Z J, *et al.* The cracking control technology of laser rapid forming nickel-based alloys[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(3): 548-552.
- 宋建丽, 邓琦林, 葛志军, 等. 镍基合金激光快速成形裂纹控制技术[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(3): 548-552.
- [14] Yao C W, Xu B S, Huang J, *et al.* Microstructure design of controlling crack of Fe-based laser cladding layer[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(3): 74-79, 83.
- 姚成武, 徐滨士, 黄坚, 等. 铁基合金激光熔覆层裂纹控制的组织设计[J]. 中国表面工程, 2010, 23(3): 74-79, 83.
- [15] Zhong M L, Liu W J. Comparative research on cracking tendency in powder feeding laser cladding Stellite and NiCrSiB alloys[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(11): 1031-1036.
- 钟敏霖, 刘文今. Stellite 和 NiCrSiB 合金激光送粉熔覆裂纹倾向的比较研究[J]. 中国激光, 2002, 29(11): 1031-1036.
- [16] Yu T, Deng Q L, Dong G, *et al.* Influence of Ta on crack susceptibility and mechanical properties of laser clad Ni-based coating[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(22): 25-30.
- 余廷, 邓琦林, 董刚, 等. 钽对激光熔覆镍基涂层的裂纹敏感性及其力学性能的影响[J]. 机械工程学报, 2011, 47(22): 25-30.
- [17] Li M Y, Han B, Cai C B, *et al.* Numerical simulation on temperature and stress fields of laser clad Ni-based coating[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(5): 25-28.
- 李美艳, 韩彬, 蔡春波, 等. 激光熔覆镍基合金温度场和应力场数值模拟[J]. 焊接学报, 2015, 36(5): 25-28.
- [18] Kadolkar P B, Watkins T R, de Hosson J T M, *et al.* State of residual stress in laser-deposited ceramic composite coatings on aluminum alloys[J]. Acta Materialia, 2007, 55(4): 1203-1214.
- [19] Chen Z K, Liu M, Zeng D C, *et al.* Research on formation causes and elimination methods of the laser cladding cracks[J]. Laser Journal, 2009, 30(1): 55-57.
- 陈志坤, 刘敏, 曾德长, 等. 激光熔覆裂纹的产生原因及消除方法探究[J]. 激光杂志, 2009, 30(1): 55-57.
- [20] Zhang J H, Sun R L. Research on porosity and cracking sensitivity of Ni-based composite coating by laser cladding[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(4): 141-144.
- 张佳虹, 孙荣禄. 激光熔覆 Ni 基复合涂层气孔及裂纹敏感性的研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(4): 141-144.
- [21] Zheng Q C, Jin Y J, Li R F, *et al.* Effect of power input on microstructure and crack formation of Ni based coating by laser cladding[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2017, 31(3): 293-297.
- 郑启池, 金亚娟, 李瑞峰, 等. 功率输入对激光熔覆镍基涂层组织和裂纹生成的影响[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2017, 31(3): 293-297.
- [22] Chen R, Yu G, He X L, *et al.* Effect of sulfur diffusion in 38MnVS6 steel on morphology and microstructure of laser cladding layers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0602005.
- 陈茹, 虞钢, 何秀丽, 等. 38MnVS6 钢中硫元素扩散对激光熔覆涂层形貌和组织的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0602005.
- [23] Wang D S, Yu Z Q, Chao M J, *et al.* Effect of laser cladding techniques and component of alloy on the cracking susceptibility of V_2O_5 /NiCrBSiC coatings[J]. Laser Journal, 2005, 26(6): 81-82, 84.
- 王东升, 于志青, 晁明举, 等. V_2O_5 和工艺参数对镍基合金激光熔覆层裂纹敏感性的影响[J]. 激光杂志, 2005, 26(6): 81-82, 84.
- [24] Zeng D W, Xie C S. Numerical simulation for the process of 3D transient convection and heat transfer in the molten pool[J]. Laser Technology, 2002, 26(2): 102-105.
- 曾大文, 谢长生. 激光熔池三维非稳态对流传热过程的数值模拟[J]. 激光技术, 2002, 26(2): 102-105.