

激光光斑直径对熔覆层裂纹的影响

付福兴 畅庚榕 赵小侠 张艳丽

西安文理学院物理与机械电子工程学院, 陕西 西安 710065

摘要 通过理论推导分析了激光熔覆过程中熔覆层裂纹形成的物理机制,研究了激光光斑直径对裂纹缺陷的影响。选择40Cr为基底材料,Ni60为熔覆粉末进行了激光熔覆实验,获取了不同光斑直径下的熔覆效果图,并对裂纹分布特性进行了分析。理论与实验结果表明,随着激光光斑直径的增大,熔覆层的裂纹率逐渐增加,裂纹的深度逐渐加深,裂纹的宽度也随之加大。

关键词 激光熔覆; 光斑直径; 激光比能; 裂纹率

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.031401

Influence of Laser Spot Diameter on Cladding Layer Cracking

Fu Fuxing Chang Gengrong Zhao Xiaoxia Zhang Yanli

*School of Physics and Mechanical & Electronic Engineering, Xi'an University of Arts and Science,
Xi'an, Shaanxi 710065, China*

Abstract The physical mechanism of crack formation in the process of laser cladding is analysed by theoretical derivation and the influence of laser spot diameter on crack defect is researched. The powder of Ni60 is cladded on the surface of base material (40Cr) by experiment and the characteristic of crack is analysed by observing the distributions of crack with optical microscope. The results show that the crack ratio of laser cladding layer is increasing gradually with the increase of spot diameter, in addition, the depth and width of crack are increasing obviously.

Key words laser cladding; spot diameter; rate of laser power; crack ratio

OCIS codes 140.3390; 260.3910; 350.3850

1 引言

激光熔覆技术通过运用强激光束辐照金属基体及其表面的涂层材料,使涂层材料和基体表面薄层同时被熔化,并快速凝固后形成稀释度极低且与基体成冶金结合的表面涂层。它可以显著改善基层表面的耐磨、耐蚀、耐热、抗氧化等性能,从而达到材料表面改性或破损修复的目的^[1-3],该技术已广泛应用于航空航天、汽车制造、重型机械、工业机床、生物医疗等领域,并创造了显著的经济效益。目前,激光熔覆技术的发展日渐成熟,但激光熔覆层的裂纹缺陷问题仍未得到很好地解决,这严重影响了产品的质量和寿命。研究表明,导致激光熔覆层产生裂纹的因素较多,其中主要与熔覆材料以及熔覆工艺参数选择的匹配度有关^[4-5]。当材料选择不合适以及成形工艺匹配不佳时,由于材料的融化、凝固和冷却都是在极快的条件下进行的,容易在熔覆层的表面、体内以及熔覆层与基体的界面处形成裂纹。在激光熔覆的各工艺参数中,激光功率、光斑直径、熔覆速度、送粉速度、扫描速度和预热温度均会影响熔覆层裂纹的数目及开裂程度。文献[6-10]分别研究了激光功率、熔覆速度、送粉速度和扫描速度对熔覆层裂纹的影响,并提出了一些控制裂纹的有效方法。朱贤刚等^[6]认为随激光功率增大、送粉量增大及扫描速度的减小,熔覆层表面的平整程度降低;王东生等^[7]研究了激光功率密度与熔覆层裂纹之间的关系,并提出了采用凸字形光斑可在一定程度上减少熔覆层的开裂趋势;张思玉等^[8,10]对不同扫描速度下熔覆层显微组织的性能进行了测试和分析,着重分析了激光扫描速度对熔覆层裂纹的影响。但到目前为止,专门研究激光光斑直径与熔覆层裂纹之间关系的文献较少,

收稿日期: 2014-08-03; 收到修改稿日期: 2014-10-09; 网络出版日期: 2015-01-29

基金项目: 陕西省西安市科技计划创新基金“文理专项”(CXY1352WL02,CXY1352WL08,CXY1352WL03)

作者简介: 付福兴(1979—),男,博士,讲师,主要从事高功率激光技术应用方面的研究。E-mail: tianlong789@tom.com

因此,很有必要深入地研究激光光斑直径对熔覆层裂纹的影响。

本文以 Ni-Cr 熔覆合金为研究对象,着重研究激光光斑直径对熔覆层微观裂纹的影响,通过理论分析以明确裂纹形成的物理机制以及激光光斑直径与裂纹之间的关系进行激光熔覆实验,观察不同光斑直径下激光熔覆层的裂纹分布情况,以验证理论结果。

2 熔覆层裂纹产生的物理机制

激光熔覆是一个快速加热和快速冷却过程,加热和冷却过程中均会形成微观裂纹。当高能激光束和金属材料作用时,激光分子的能量会被金属粒子所吸收而转换成热能,由于激光熔覆过程作用时间极短,热能来不及向材料表面深处传输,则使吸收光子的表面区域的温度急剧增高以致形成热应力,当应力值大于熔覆材料的强度极限时便会产生裂纹;当扫描光束离开后,被扫描区域迅速冷却,此时的熔覆区没有足够的液体金属补充而受到周围较冷基材的束缚,造成较大的约束应力,当约束应力大于材料所能承受的极限时就在熔覆层表面产生微观裂纹。

假设用于熔覆的热源为基模高斯光源(TEM₀₀模),熔池为曲率半径为 r 的圆球体,则熔覆层沿 r 方向的热应力 $\Delta\sigma$ 可表示为^[11]

$$\Delta\sigma = \frac{\sqrt{2}\alpha E}{1-\mu} \left(\frac{1}{r^3} \int_0^r u_r r^2 dr - \frac{t_0}{3} \right), \quad (1)$$

式中 α 为金属材料的膨胀系数, E 为弹性模量, μ 为泊松比, t_0 为球心处温度, u_r 为在 r 方向上的温度梯度,可表示为

$$u_r = \frac{\Delta t}{\Delta r}. \quad (2)$$

(1)式表明熔覆层内的热应力与金属材料的膨胀系数、弹性模量、泊松比以及激光热源的能量密度有关。材料间热膨胀系数、弹性模量的明显差异会影响热应力的大小,如果减小熔覆层与基体热膨胀系数和弹性模量的差异,熔覆层热应力也随之减小。因此,要合理选择熔覆层与基体热膨胀系数及热容的匹配关系。

3 激光束光斑直径对裂纹的影响

熔覆区单位面积所需能量叫做能量密度 E_s , 又称激光比能,可表示为^[12]

$$E_s = \frac{P}{DV_b}, \quad (3)$$

式中 P 为激光束功率, V_b 为激光扫描速度, D 为激光束光斑直径。

由(3)式可知,当激光功率、扫描速度和送粉率一定时,随着光斑直径增加,激光比能量会逐渐减小,而熔覆层的裂纹率却逐渐增加,开裂倾向增加。但另一方面,激光光斑直径的增大会降低熔覆层的稀释率,增加熔覆层的硬度,提高熔覆层的表面质量。因此,激光熔覆过程中,要寻求最佳的工艺参数,使得熔覆层既没有裂纹的出现,也保证了最佳的熔覆效果。

4 实验结果及分析

为了更好地说明激光束光斑直径对裂纹的影响,选择裂纹敏感材料 40Cr 作为基底材料, Ni60 作为熔覆粉末,光源选择 Nd:YAG 固体激光器。其他工艺参数选择如表 1 所示。

表 1 激光熔覆工艺参数

Table 1 Process parameters of laser cladding

Laser power /W	Waist diameter /mm	Focal distance /mm	Rate of powder feeding /(r/min)	Scanning speed /(mm/s)	Overlap rate
1800	4	110	80	20	50 %

实验过程中,控制功率、送粉速度、扫描速度和搭接率等参数不变,只改变激光束的光斑直径。而光斑直径的改变可以通过改变熔覆基材与激光束的离焦距离来实现,离焦距离越大,作用在基材的光斑直径越大。分别选择离焦 0、1、2、3 和 5 mm,进行激光熔覆实验。激光熔覆的效果如图 1 所示, Ni60 与 40Cr 的结合

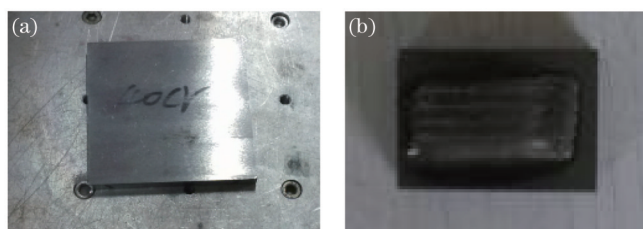


图1 Ni60-40Cr熔覆效果图。(a) 40Cr基底材料(80 mm×80 mm); (b) 离焦1mm时熔覆效果图

Fig.1 Laser cladding figure of Ni60-40Cr. (a) Base material 40Cr (80 mm×80 mm); (b) effect figure of laser cladding with 1mm off-focus distance

度很好,熔覆层表面的粗糙度较好,肉眼基本观察不到宏观裂纹。

在光学电子显微镜下进行观察,熔覆层表面的裂纹分布还是很明显,不同离焦距离下的裂纹分布分别如图2所示。

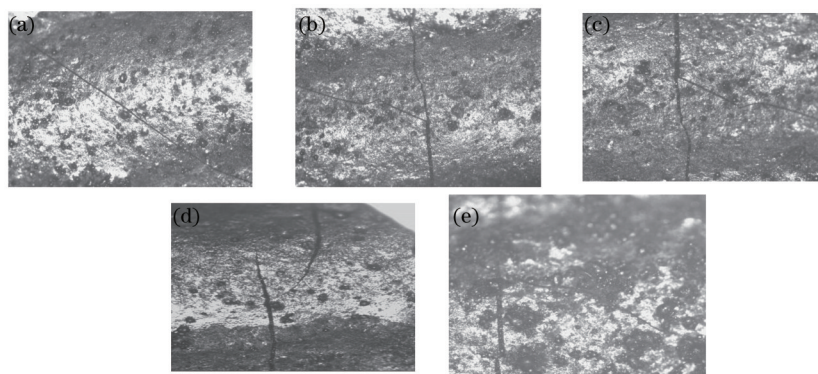


Fig.2 不同离焦距离下的裂纹分布。(a) 0 mm; (b) 1 mm; (c) 2 mm; (d) 3 mm; (e) 5 mm

Fig.2 Distribution of surface crack with different off-focus distances. (a) 0 mm; (b) 1 mm; (c) 2 mm; (d) 3 mm; (e) 5mm
不同离焦距离下的裂纹率及其特性如表2所示。

表2 不同离焦距离下的裂纹特征

Table 2 Characteristics of cladding crack at difference off-focus distance

Off-focus distance /mm	Rate of crack growth /(N/mm)	Crack depth	Crack width
0	0.1	Shallower	Thinner
1	0.16	Shallow	Thin
2	0.2	Deep	Wide
3	0.24	Deeper	Wider
5	0.3	Deepest	Widest

由图2及表2可知,当激光束光斑为4 mm,即熔覆材料放置的位置离焦距离为0 mm时,熔覆层表面的裂纹细长,深度比较浅,裂纹率较低,熔覆层的质量比较好;随着离焦距离的增加,激光光斑直径也在增加,熔覆层的裂纹率逐渐增大,裂纹的深度和宽度也在增加,当离焦5 mm时,熔覆层裂纹明显变的更大,裂纹的深度和宽度也明显增加,熔覆质量明显下降。结果表明,随着光斑直径的增大,熔覆层的裂纹率逐渐增加,裂纹的开裂程度逐渐加剧,这与理论分析的结果相一致。

5 结 论

通过理论分析和实验验证研究了激光光斑直径与熔覆层裂纹之间的关系,得出了以下结论:

1) 激光熔覆过程中,激光光斑直径会影响熔覆层的裂纹率以及裂纹的长短、粗细和深浅程度。随着光斑直径的增大,熔覆层的裂纹率逐渐增加,裂纹的开裂程度会逐渐加剧;

2) 激光熔覆是一个综合物理、材料和机械等学科的复杂过程,在追求高熔覆质量的同时不可避免带来裂纹影响。因此,只有选择合适的熔覆材料和最匹配的工艺参数,才能使得熔覆层既没有裂纹的出现,也保证了最佳的熔覆效果。

参考文献

- 1 K Nagarathnam, K Komvopoulos. Microstructural analysis and oxidation behavior of laser-processed Fe-Cr-Al-Y alloy coatings[J]. Metall Mater Trans A, 1996, 27(2): 381-390.
- 2 Zeng Xiaoyan, Wu Xinwei, Tao Zengyi, *et al.*. Abrasive wear resistance analyses of laser clad Ni-WC ceramic-metal composite coatings[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(8): 885-890.
曾晓燕, 吴新伟, 陶曾毅, 等. 激光熔覆 Ni-WC 金属陶瓷层的耐磨性分析[J]. 金属学报, 1997, 33(8): 885-890.
- 3 Zhang Jian, Wu Wenni, Zhao Longzhi. Research progress and development trend of laser cladding[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(6): 131-135.
张 坚, 吴文妮, 赵龙志. 激光熔覆研究现状及发展趋势[J]. 热加工与工艺, 2013, 42(6): 131-135.
- 4 Zhong Minlin, Liu Wenjin, Ren Jialie. The critical influence factors on crack formation during high power CO₂ laser cladding of NiCrSiB alloy by powder feeding[J]. Appl Laser, 2000, 20(5): 25-30.
钟敏霖, 刘文今, 任家烈. NiCrSiB 合金高功率激光送粉熔敷裂纹形成的敏感因素[J]. 应用激光, 2000, 20(5): 25-30.
- 5 A Techel, L M Berger, S Nowotny. Microstructure of advanced TiC-based coatings prepared by laser cladding[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(3): 374-380.
- 6 Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 296-301.
朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 296-301.
- 7 Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Wang Jingwen, *et al.*. A method of crack control in laser cladding process with changing power density distribution of laser beam[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0103004.
王东生, 田宗军, 王经文, 等. 一种通过改变激光功率密度分布控制熔覆层裂纹的方法[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0103004.
- 8 Zhang Siyu, Zheng Kequan, Zheng Li. Influence of scanning speeds on microstructure and properties of laser cladding WC-B₄C-Co[J]. Chinese J Lasers, 1993, 20(12): 940-943.
张思玉, 郑克全, 郑 立. 扫描速度对激光熔覆 WC-B₄C-Co 涂层显微组织和性能的影响[J]. 中国激光, 1993, 20(12): 940-943.
- 9 Guo Shirui, Chen Zhijun, Zhang Qunli, *et al.*. Effects of different pressures on laser cladding special powder prepared by gas atomization[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0603001.
郭士锐, 陈智君, 张群莉, 等. 不同压力对气雾化激光熔覆专用合金粉末的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0603001.
- 10 Lu Qinglong, Wang Yanfang, Li Li, *et al.*. Effects of scanning speed on microstructures and properties of laser cladding Fe-based amorphous composite coatings[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0203007.
鲁青龙, 王彦芳, 栗 荔, 等. 扫描速度对激光熔覆铁基非晶复合涂层组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0203007.
- 11 Li Weite, Huang Baohai, Bi Zhongbo. Theory Analysis and Application of the Thermodynamics[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
李维特, 黄保海, 毕仲波. 热应力理论分析及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- 12 Zou Xiaobin, Yin Dengke, Gu Jianjun. Research on cracking of laser cladding[J]. Laser Journal, 2010, 31(5): 44-45.
邹小斌, 尹登科, 谷建军. 关于激光熔覆裂纹问题的研究[J]. 激光杂志, 2010, 31(5): 44-45.

栏目编辑: 张浩佳