比能量对 316L 不锈钢表面 stellite6 激光 熔覆层性能研究

张彦超1,朱强1,雷玉成1,李天庆1

(1江苏大学, 江苏 镇江 212013)

摘要:针对 316L不锈钢表面在不同激光比能量下熔覆的stellite6 合金组织,本文在送粉量为 11.8g/min、 光斑直径为 3.5mm等因素不变的条件下,研究了激光比能量从 3.4~12.8 KJ/cm²左右条件下对于熔覆层的 稀释率、力学性能以及微观成分的影响规律。结果表明:随着激光比能量的增加,稀释率逐渐增加;结合 区部位的化学成分也有一定的变化,熔覆层组织主要为柱状晶和枝晶组织,相同部位的晶粒尺寸也发生了 明显变化;熔覆层的硬度变化不明显。当激光比能量在 5.1KJ/cm²以下时,熔覆层组织未能与基体形成有效 结合层。当激光比能量在 10.7~11.4KJ/cm²之间时,熔覆层表面成型质量好,力学性能佳。 关键词:激光比能量; Stellite6 涂层;稀释率;微观组织;硬度值。

0 序言

激光熔覆技术是指使用激光辐射涂层 材料和基体材料表面,使涂层材料和少量基 体材料融化后迅速凝固,在基体表面形成冶 金结合的表面涂层,从而改善基体表面的耐 磨性、耐蚀性等特性的方法^[1]。其具有加热 和冷却速率快(10⁵K/s)、热影响区窄、变 形小以及加工效率高等特点,已经成为当代 材料表面工程领域的研究热点^[2-4]。常用的 激光熔覆材料有钴基、镍基和铁基等。激光 熔覆可以在廉价金属上熔覆高性能贵重的 表面层来降低使用成本,也可以根据在特别 使用环境中熔覆高质量的熔覆层,延长零部 件的使用寿命^[5],在当代社会,激光熔覆是 一种经济效益较高的涂层表面改性技术 ^[6-7]。

不锈钢材料表面激光熔覆是为了使得 基材获得某些特定的性能而在金属表面覆 盖一层很薄的材料的技术。由于金属基体导 热快,熔融的材料会很快冷却凝固,基体材 料几乎不会发生相转变。同时熔覆层受到基 体材料的干扰小^[8]。针对不锈钢材料在特定 环境的使用性能要求,对其进行表面强化是 当代工业绿色生产的需要,国内外学者围绕 着不锈钢激光熔覆开展了大量的研究探索 ^[9]。Bass M^[10]等通过研究计算得出了激光束 的功率密度和材料表面作用的时间,结果发 现激光的入射能量(功率密度和作用时间)

与激光束和材料的耦合率成正比关系, 主要 原因是此时材料表面熔池内有等离子体产 生使得材料对激光的能量吸收减弱。杨宁 [11,12]等研究了激光熔覆不锈钢的工艺参数 对熔覆层组织的影响,得出了扫描速度与稀 释率的关系,探索了激光功率对熔覆层高 度、宽度和深度的影响。刘昊^[13]等基于生死 单元法并结合送粉式激光熔覆的特点,建立 了一种可以同时计算合金涂层的宏观形貌 和瞬态温度场的三维数值模型。B K Pant^[14] 研究了在 13Cr4Ni 不锈钢表面熔覆 stellite6 的性能,研究发现其耐蚀性大大 增强。吕金建^[15]等研究了激光能量密度对选 区激光熔化成型质量的影响,发现试件致密 度和显微硬度随着激光能量密度提高而增 大。

由于激光熔覆工艺参数如激光功率 (P)、扫描速度(Vs)、光斑直径(D)等 并非独立的影响熔覆层宏观和微观质量,而 是相互影响的,比能量(Es)作为单位面积 的辐射能量被国内外研究者所提出,以评价 工艺参数在熔覆层形成过程中的综合作用 ^[16-17]。为研究比能量对激光熔覆效果的综合 规律,发展激光熔覆技术在不锈钢强化和表 面修复的应用,详细探索激光比能量对 316L 不锈钢表面 Stellite6 涂层性能影响,本文 通过一系列实验,分别从表面成型质量、稀 释率、组织成分以及显微硬度等角度,探索 研究比能量对其的影响规律。

1 试验方法

本试验激光设备使用通快公司生产的 Tru Disk 6002 碟片式激光器,额定功率 6000w,输出激光波长为1064nm的连续波激 光,聚焦镜焦距为300mm,光斑直径为3.5mm, 采用同轴送粉方式,依靠 KUKA 机械臂来实 现空间位移带动激光熔覆头进行熔覆试验。 基体材料选用 316L 不锈钢,用激光切割成 100mm×50mm×10mm 的块状,熔覆材料选用 stellite6 合金粉末颗粒度为 100 目~200 目,即 0.154mm~0.074mm,两种材料的化学 成分如表 1 所示。且 316L 为奥氏体不锈钢, stellite6 合金粉末因其球形度较高,具有 良好的流动性,其微观形貌如图 1 所示。

表1 316L 不锈钢和 stellite6 合金粉末化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 316L stainless steel and stellite6 alloy powder (wt, %)

Material	Chemical composition								
	С	Cr	Si	Мо	Ni	Mn	Co	W	Fe
316L	≦0.03	16.67	0.36	2.06	10.56	1.07	-	-	Bal
stellite6	1.15	29	1.1	1	3	0.5	57.25	4	3





(a) microphotograph of matrix 316L (b) microphotograph of stellite6 alloy powder

将切割好的 316L 不锈钢块体用砂纸打 磨,并用无水乙醇清洗,保证试样的表面清 洁度。在实验开始前,将 stellite6 合金粉 末在真空干燥箱中进行 100℃×4h 干燥处 理,在送粉量和光斑直径一定的条件下,通 过调整激光功率和扫描速度来改变比能量 的输入,在熔覆过程中,激光保护气气流量 为 10L/min,送粉气体流量为 2L/min。激光 保护气气流量过大,会造成合金粉末被吹 散,达不到熔覆增高的效果;保护气流量过 小,会降低熔覆层的质量,导致气孔等缺陷 的产生。设定送粉器转速为 3r/min,即送粉 量为 11.8g/min,光斑直径为 3.5mm.。表 2 为实验参数。保护气和送粉气均为纯度为 99.9%的氩气。

激光熔覆过程是一个受到各种因素综 合影响的过程,例如基体材料性能、熔覆粉 末的性能、熔覆粉末颗粒度、激光扫描速度、 激光功率、光斑直径、送粉量等,本实验主 要从激光能量密度的角度(激光功率、扫描 速度两个参数变化)对于熔覆层的稀释率、 表面形貌、显微组织以及力学性能的进行研 究,并比较得出最佳的实验参数,为进一步 研究 316L 不锈钢表面激光熔覆 Co 基涂层做 前期性能探索和工艺铺垫。激光比能量(Es) 被定义为单位面积的激光辐照能量,可根据 以下公式进行计算:

$$Es = P / DVs$$
 (1)

其中式中: E_s--激光比能量; P--激 光功率; D--光斑直径; Vs--扫描速度。

		÷.	
No	Laser power/W	Scanning	Specific
		speed/(mm/min)	$energy/(K J/cm^{-2})$
1	1000	500	3.428
2	1000	400	4.285
3	1500	500	5.142
4	2000	500	6.857
5	2500	600	7.142
6	2500	500	8.571
7	2500	450	9.523
8	2500	400	10.714
9	2000	300	11.428
10	3000	400	12.857

表 2 激光熔覆工艺参数

Table 2 Parameters in laser cladding process

2 实验结果

2.1 激光比能量对熔覆层质量及稀释率影响

熔覆实验完成后使用着色探伤剂进行 表面质量探伤,发现在每道熔覆结束位置处 出现圆点状痕迹,经分析为气孔,未发现裂 纹存在。气孔的产生是因为在激光束停止发 射时,保护气氩气随即停止,但是最后熔化 的粉末和基体依然在熔池内在由浮力和表 面张力的共同作用下产生流动^[18],在流动 同时发生凝固,由于有温度梯度的存在,在 氩气保护消失时不可避免产生了气孔。

从图 2 (a) 可以看出,随着激光比能量 的增加,熔覆层的宽度和深度是在逐渐增加 的,在激光比能量低于 5.1KJ/cm²时,由于 激光功率小,能量密度小,仅供熔化金属粉 末,对基体材料未形成有效的热输入,以至 于熔深不明显,同时稀释率几乎为零。激光 比能量过低就会造成熔覆层与基体结合不 致密的结果,降低了熔覆后工件的力学性 能。在相同送粉量情况下,熔覆层的高度受 激光功率、扫描速度的综合影响,在一定参 数范围内,激光功率越大、扫描速度越小, 熔高越大;反之激光功率越小、扫描速度越小, 熔高越大;反之激光功率越小、扫描速度越 大其熔高越小^[17]。由图2(b)所示可知稀 释率随着比能量的增大在总体趋势上是增 大的。激光比能量越大,则稀释率越大,因 为激光的功率密度越大,合金粉末融化的时 间越短,与基材的作用时间越大,稀释率增 大;扫描速度越小,激光能量融化基材越多, 则稀释率增大。





2.2 激光比能量对熔覆层成分的影响

如图 3 所示: a 组为第 1 组参数的线扫 描数据,激光比能量为 3.4 KJ/cm²; b 组为 第 5 组参数的线扫描数据,激光比能量为 7.1 KJ/cm²; c 组为第 9 组参数的线扫描数据, 激光比能量为 11.4 KJ/cm²。由图中数据可 知:随着激光比能量的增加,Co元素的元 素含量强度逐渐降低,而Fe和Cr、C元素 强度略有上升。这是因为随着激光比能量的 增加,发生了明显的元素扩散现象,Co元 素向不锈钢基体中扩散,而Fe和Cr、C元 素则由基体中向熔覆层扩散。如图 4 所示: 不同比能量表面涂层组织均为 Co 及各种碳 化物如 M₂₃C₆、Cr₇C₃、CoC₃等,只是在强 度上有差异。

从 SEM 图片中可以看出, 晶粒的大小 是发生着明显变化的, 在相同的放大倍数 下, 随着比能量的增加, 晶粒也逐渐变大; 熔覆层底部晶粒基本上为柱状晶和未完全 长大的枝晶组织。由热力学可知: 晶粒的大 小是受到液相温度梯度 G 和凝固速度 R 的 比值影响的, G/R 值越大, 晶粒尺寸越大; 激光比能量越大时, 温度梯度就越大, 故晶 粒尺寸越大。



a 第1组

b 第5组

c 第9组

图 3 不同参数下的 SEM 及 EDS 图

Fig 3 SEM and EDS graphs under different parameters (a)sample 1 (b)sample 5 (c)sample 9

图 4 Stellite 6 涂层物相组成 Fig 4 Phases formed in Stellite6 coating

2.3 激光比能量对熔覆层硬度的影响

如图 5 为不同比能量下 stellite6 熔覆层 的显微硬度曲线,由图中曲线可知:不同比 能量下的显微硬度值不尽相同。在熔覆层中 上层位置保持较高的硬度值,最高可达到 590HV,在热影响区处急剧降低。当激光比 能量值较小时,受热输入的影响,元素未发 生较为明显的扩散,高硬度值只能保持在较 小深度下如 1mm 左右; 当激光比能量逐渐 增大时, 熔覆材料与基体充分发生了元素的 扩散, 形成的 Co 基化合物能够均匀分布在 熔覆层组织内,导致能在较深的位置如 2mm 左右还有 500HV 的硬度值。综合比较, 在 第9组激光比能量为11.4KJ/cm²时硬度值均 匀保持在 480HV 左右。







3 结论

本文主要探讨了送粉量和光斑直径为 定值情况下,由不同激光比能量在 316L 表 面熔覆 stellite6 合金粉末,其熔覆层的表 面质量和稀释率、微观组织成分及硬度趋 势,得出的结论如下:

(1)随着激光比能量的增加,熔高变 化不大,熔覆层宽度逐渐加大;在比能量小 于 5.1 KJ/cm²时,不能形成明显的熔深,熔 覆层不能与基体形成有效的结合;当比能量 大于 5.1 KJ/cm²时,熔深和稀释率逐渐增加。

(2)随着激光比能量的增加,熔覆层 和基体元素发生扩散的程度也加大,主要发 生熔覆层中 Fe、Co、Cr等元素的扩散;表 面涂层组织均为 Co及各种碳化物如 M23C6、 CrrC3、CoC3等,其晶粒尺寸也随着比能量的 增加而增加。

(3) Stellite6 激光熔覆组织硬度最

高可达 590HV,高硬度的深度随着比能量增加而增加,在激光比能量为 11.4KJ/cm²时硬度值均匀保持在 480HV 左右。

参考文献

[1] 张德强, 牛兴林, 李金华, 等. Q235D 激光熔覆实验研究 [J]. 机械设计与造, 2015, (6):105-108.

[2] 王东生,田宗军,沈理达,等. 激光熔覆技术研究现状及 其发展[J]. 应用激光, 2012(6):85-91.

[3] 李养良,金海霞,白小波,等.激光熔覆技术的研究现状 与发展趋势[J].热处理技术与装备,2009,30(4):1-5.

[4] Qiao Y, Fischer T E, Dent A. The effects of fuel chemistry and feedstock powder structure on the mechanical and tribological properties of HVOF thermal-sprayed WC-Co coatings with very fine structures[J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 172(1):24-41.

[5] 何祥明, 刘秀波, 杨茂盛, 等. 奥氏体不锈钢激光熔覆镍基复合涂层高温磨损行为[J]. 中国激光, 2011, 38(9):79-84.

[6] 李春彦,张松,康煜平,等.综述激光熔覆材料的若干问

题[J]. 激光杂志, 2002, 23(3):5-9.

[7] 董世运,马运哲,徐滨士,等.激光熔覆材料研究现状[J].材料导报,2006,20(6):5-9,13.

[8] 陈磊,于治水,张培磊,等.激光表面强化马氏体不锈钢耐汽蚀性能的研究进展[J]. 热加工工艺, 2016, 45(16):27-29.

[9] 咎少平, 焦俊科, 张文武. 316L 不锈钢粉末激光熔覆工 艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53 (605):223-230.

[10] Bass M. Laser materials processing[M]. Sole distributors for the USA and Canada, Elsevier Science, 1983.

[11] 杨宁,杨帆. 激光熔覆工艺参数对熔覆层质量的影响[J]. 热处理技术与装备, 2010, 31(4):17-19.

[12] 安代明. 激光熔覆工艺参数对熔覆层质量的影响[J]. 材料保护, 2012, 45(12):36-37, 48.

[13] 刘昊, 虞钢, 何秀丽, 等. 送粉式激光熔覆中瞬态温 度场与几何形貌的三维数值模拟[J]. 中国激光, 2013, 40(12):78-85.

[14] Pant B K , Arya V , Mann B S . Cavitation Erosion Characteristics of Nitrocarburized and HPDL-Treated Martensitic Stainless Steels[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21(6):1051-1055.

[15] 吕金建, 贾长治, 杨建春. 激光能量密度对选区激光熔化 成型质量的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47 (20): 156-159. .

[16] 曹凤国. 激光加工技术[M]. 北京科学技术出版社, 2007.120-126

[17] 李嘉宁. 激光熔覆技术及应用[M]. 化学工业出版社, 2016.132-159

[18] 宗学文,高倩,周宏志,张佳亮,齐腾博.基于激光选区熔 化的 316L 各向异性和激光能量密度研究[J/0L].中国激 光:1-14[2019-05-30].http://kns.cnki.net/kcms/detail/ 31.1339.TN.20190225.0828.008.html.

作者简介:张彦超,男,1994年生,硕士生,主要研 究方向为激光加工及耐蚀性研究; E-mail: zhangyanchao091@163.com.

通讯作者:朱强,男,1981年生,博士,副教授,主 要研究方向为焊接技术与焊接制造工艺,焊接材料开发与

研究以及焊接结构变形控制理论研究; E-mail:

zhuqng@163.com.





江苏船舶微信公众号



江苏船舶网上投稿系统