doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2013.03.010

Fe314 合金激光熔覆层的应力分布规律*

任维彬^{1,2},董世运¹,徐滨士¹,王玉江¹,闫世兴¹,方金祥¹

(1. 装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室,北京 100072; 2. 65545 部队 保障处, 辽宁 普兰店 116200)

摘 要:研究熔覆层应力分布规律对控制裂纹萌生及提高抗疲劳和抗腐蚀等性能至关重要。利用 Nd:YAG 固体激光器在 45 钢基体表面制备了厚度约 5 mm 的 Fe314 激光熔覆层,利用 X 射线衍射应力测定仪对熔覆 层表层不同位置及其沿深度方向的应力分布情况进行分析,利用金相显微镜观察熔覆层显微组织,利用维氏 硬度计对熔覆层硬度分布规律进行分析。研究结果表明:平行激光扫描方向的熔覆层表面应力最大值出现 在熔覆层边缘,约为 290 MPa;垂直激光扫描方向的表面应力最大值出现在熔覆层中心,约为 230 MPa,由中 心向边缘递减,并逐渐由拉应力转变为压应力;深度方向上,平行激光扫描方向的应力随熔覆层深度增加先 保持平稳后不断增大;垂直激光扫描方向的应力随熔覆层深度增加而增大;应力分布主要受热累积效应影 响,熔覆层具有与热累积效应对应的金相结构,熔覆层硬度范围为 380~450 HV_{0.3},略高于基体。

关键词:激光熔覆;应力分布;显微组织

中图分类号: TG174.44 文献标识码: A 文章编号: 1007-9289(2013)03-0058-06

The Law of Stress Distribution of the Laser Cladding Layer of Fe314 Alloy

REN Wei-bin^{1,2}, DONG Shi-yun¹, XU Bin-shi¹, WANG Yu-jiang¹, YAN Shi-xing¹, FANG Jin-xiang¹ (1. Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072; 2. Department of Service, Troop No. 65545 of Chinese People's Liberation Army, Pulandian 116200, Liaoning)

Abstract: Research on stress distribution of the laser cladding layer was important to control its crack initiation and improve its wear-resistant and corrosion-resistant properties. Laser cladding layer of Fe314 alloy with the thickness of 5 mm was prepared by YAG solid-state laser, the stress distribution at different cladding layer surface positions and along the depth of the cladding layer were analyzed using X-ray diffraction determination, the metallographic microstructure was observed using metallurgical microscope, and the hardness distribution was studied using Vickers hardness tester. The maximum stress along the direction of laser scanning on the surface was about 290 MPa near the edge. The stress perpendicular to the direction of laser scanning was in decline form the center to the edge, its maximum in the centre of the cladding layer surface was about 230 MPa, and it was found transferred from tensile stress to compressive stress. With increasing depth, the stress along to the direction of laser scanning was found stable first and then increased, and the stress perpendicular to the direction of laser scanning increased. The stress distribution was mainly influenced by thermal cumulative effect, the cladding layer had metallographic structure which is in accordance with thermal cumulative effect, and the hardness of the cladding layer was $380 \sim 450$ HV_{0.3}, a little higher than the substrate. **Key words**; laser cladding; stress distribution; microstructure

收稿日期:2012-11-19; 修回日期:2013-03-27; 基金项目: *国家基础研究发展计划(973 计划)(2011CB013403) 作者简介:任维彬(1983-),男(汉),山东单县人,博士生;研究方向:再制造材料成形及制备一体化

网络出版日期: 2013-05-17 10: 36; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130517.1036.001.html 引文格式:任维彬,董世运,徐滨士,等.Fe314 合金激光熔覆层的应力分布规律[J].中国表面工程,2013,26(3):58-63.

0 引 言

激光熔覆层的裂纹萌生情况及抗疲劳、抗腐 蚀等性能对激光再制造产品质量具有决定性影 响^[1-3],而这些性能均与其应力分布密切相关^[4]。 已有研究虽对应力分布及变化规律进行探讨,但 对多层堆积熔覆层应力产生机理及应力与组织形 态变化关系的分析尚不够全面和深入^[5-6]。本文 针对上述问题,采用成形性优异的 Fe314 合金粉 末对基材 45 钢进行堆积熔覆试验,采用 XRD 射 线衍射分析的方法,对熔覆层不同深度区域应力 进行测试,分析应力分布规律及产生机理;通过熔 覆层组织形貌的金相观察,分析熔覆层组织形态 与应力分布关系并进行相关试验验证。

1 试验材料及过程

1.1 设备与材料选择

试验选择 45 钢为基材,熔覆粉末为 Fe314 合金,该粉末适用于激光立体成形及表面熔覆^[7]。 试验设备为机器人控制光纤输出 Nd:YAG 固体 激光器,最大连续输出功率为 1.2 kW,配合载气 式送粉器,以侧向同步送粉方式熔覆,同时对熔池 施加氮气保护^[7],Fe314 粉末成分见表 1。

表1试验材料成分(质量分数/%)

Table 1 Compositions of the testing material (w/%)

Element	Cr	С	Si	
Fe314	14.82% -	0.09% -	0.93% -	
	15.24%	0.11%	1.14%	
Element	В	Ni	Fe	
Fe314	0.92% -	9.22% -	Bal.	
	1.14%	11.12%		

1.2 熔覆堆积试验

试验前,用400号砂纸对基材表面进行打磨 除锈,将粉末置于DZF-6030型真空干燥箱内,在 120℃条件下干燥2h,排除粉末内可能含有的水 分对试验的影响。基于大量工艺试验筛选结 果^[7],选取激光功率,扫描速度,送粉速度以及离 焦量4个对成形效果影响较大的工艺参数常用取 值进行试验,各组工艺参数取值如表2所示。

其中,进行多层堆积熔覆试验时,采用试验获 得的较优工艺参数,进行单向逐道搭接,搭接率为 50%。按照自左向右的顺序,在同一层的熔覆过 程中,前一道熔覆层熔覆之后,后一道熔覆层在前 一道的熔覆起点处开始搭接熔覆,这样的熔覆顺 序便于前一道的熔覆道有充分的时间进行缓冷, 利于堆积成形。在下一层的熔覆开始时,重新回 到前一层的第一道熔覆起点处进行。

表 2 试验正文参数表

Table 2 Orthogonal experiment parameter

Semple	Down	Scanning	Power	Defocusing
Sample	rower	speed $V_{\rm s}/$	feeding rate $V_{\rm f}/$	amount
INO.	P/W	$(mm \cdot s^{-1})$	$(g \cdot min^{-1})$	L/mm
1	1.2	10	4.42	8
2	1.2	8	4.42	-4
3	1.2	12	2.60	4
4	1.0	12	8.46	4
5	1.0	8	2.60	-4
6	1.0	12	8.46	-4
7	0.8	10	2.60	8
8	0.8	8	4.42	8
9	0.8	10	8.46	4

1.3 应力测试试验

利用 X-350 型 X 射线应力测试仪,对基于最 优工艺参数的多层堆积熔覆层不同深度和方向应 力进行测试。在多层堆积熔覆层表面选取如图 1 中 9 个点:其中,点 1~点 5 在同道激光熔覆线上, 点 5 到点 1 的矢量方向定义为 X 方向正向;点 6~ 点 9 与点 3 在垂直行激光扫描方向的同一横线上, 点 6 到点 9 的矢量方向定义为 Y 方向正向。其中 点 1~点 6 在熔覆层表面,点 7~点 9 在基体表面 热影响区。方向规定及各点位置如图 1 所示。



图 1 Fe314 多层堆积熔覆层应力测试点位置 Fig. 1 Stress testing positions of multilayer deposition cladding layer of Fe314 alloy

其中,对熔覆层不同深度应力测试过程如下: 选取点4位置为采样点,对点4及其正下方共8个 不同深度位置点进行应力测试。试验采用饱和 NaCl水溶液进行电化学腐蚀和测试,每次腐蚀深 度约为30 μm,测试完5个点后,采用机械打磨的 方式将熔覆层打磨至距基体表面约60 μm的位 置,为了消除打磨过程中产生的机械应力,再进行 一次电化学腐蚀,腐蚀深度约20 μm,到达第六个 点的位置,然后按照测试1~5点的方法测试6~ 8点,第8个点位置位于基体表面。

1.4 金相观察试验

熔覆层和基体的组织形态及结合方式,都会 对应力分布产生影响。为研究熔覆层组织结构对 应力分布的影响,将基于最优参数的表面多道堆 积熔覆层进行线切割,将切割下试块制备成金相 试样并抛光,用王水腐蚀约 20 s,在 OLYMPUS-GX51 型金相显微镜下观察熔覆层以及基体不同 位置金相组织结构。

1.5 力学性能测试

为分析熔覆层性能以及硬度与基体的匹配 性,利用 HVS-1000 显微硬度计,对采用最优工 艺参数制备的多层堆积试样的熔覆层与基体不同 位置进行硬度测试,按照从熔覆层顶端至基体的 顺序在同一方向选取等间距的 16 个点进行硬度 测试,测试示意图如图 2 所示。



图 2 Fe314 合金多层堆积熔覆层的显微硬度测试点 Fig. 2 Micro - hardness testing positions of multilayer deposition cladding layer of Fe314 alloy

2 试验结果与讨论

2.1 宏观形貌

激光熔覆的宏观形貌作为判断工艺参数成形 性的首要和重要依据^[8],熔覆层成形形貌如图 3 所示,试样 2、4 成形性明显优于其他。其中,熔覆 试样 2 成形性明显优于试样 3,试样 3 出现咬边 和熔焊不充分的现象,主要原因是送粉量不足并 且扫描速度较快,单位时间内送入熔池粉末较少, 导致成形不充分;试样 4 出现表面熔覆线起伏,与 试样 2 相比,其单位时间内送粉量加大,但由于激 光功率不足,熔池内粉末不能充分熔化,部分粉末 在熔池表面受热后快速冷凝,在熔覆层的表面凝 结成形。通过宏观形貌分析对比可得到最优工艺 参数为:激光功率 1.2 kW,扫描速度 8 mm/s,送 粉速度 4.42 g/min,离焦量-4 mm。



图 3 不同工艺参数下熔覆层成形后的形貌 Fig. 3 Morphology of cladding layers at different parameters after shaping

为验证最优工艺参数的正确性,即熔覆试样 2具有相对较好成形性。在最优工艺参数取值附 近设置对比性工艺参数,进行熔覆成形性对比试 验,试验数据如表3所示,熔覆试样分别对应图3 中样本10~13。通过试样2与试样10、11及13 对比,试样13由于扫描速度过大,从而出现熔焊 不充分的现象;而试样12虽然与试样13扫描速 度一样,但是由于送粉速率过大,从而使得激光功 率相对不足,使得粉末未能充分熔化,出现熔覆线 欺负的现象,可见采用最优工艺参数取值的临近 区间内,试样2较试样10~13仍具有较优成形效 果,因此最优工艺参数得到进一步验证。

表 3 对比性试验数据

Table 3 Data of comparative tests

Level	Power P/W	Scanning speed $V_{\rm s}/$ (mm • s ⁻¹)	Feeding rate $V_{\rm f}/({\rm g \cdot min^{-1}})$	Defocusing amount <i>L</i> /mm
10	1	10	4.42	8
11	1.2	12	4.42	8
12	1.2	10	8.46	4
13	1.2	10	4.42	-4

2.2 残余应力分析

测试基于最优工艺参数多层堆积试样,熔覆 层表面平行和垂直激光扫描方向应力分布分别如 图 4 和图 5 所示。从图 4 可知,熔覆层表面主要 受拉应力,平行激光熔覆方向拉应力最大值出现 在熔覆层边缘,约为 290 MPa;从图 5 可知,垂直 激光扫描方向拉应力最大值出现在熔覆层中心, 约为 230 MPa。基体主要受压应力,最大值出现 在熔覆层与基体的交界处。结合图 1 和图 4 可 知,平行激光熔覆方向拉应力在熔覆层边缘相对 较大,垂直激光扫描方向应力由熔覆层至基体逐渐 由拉应力转变为压应力,并且压应力逐渐减小,并 且表面同一位置 X 方向应力稍大于 Y 方向应力。



图 4 表面平行激光熔覆方向应力分布

Fig. 4 Stress parallel to the direction of laser scanning on the surface



图 5 表面垂直激光熔覆方向应力分布

Fig. 5 Stress perpendicular to the direction of laser scanning on the surface

图 6 表示熔覆层的不同深度位置上的应力分 布。从图中可以看出平行激光熔覆方向应力表现 为拉应力,当熔覆层达到一定深度时,随着熔覆层 深度的继续增加,拉应力值从相对稳定转为开始 上升;垂直激光熔覆方向应力也表现为拉应力,并 且随着熔覆层深度的不断增加,拉应力值也在不 断加大,并且增长速度随深度增加而加快。

产生上述现象主要原因是:熔覆层的堆积形 成过程中,已成形熔覆层热量未全部散失前,后续 熔覆层又继续形成,后续熔覆层的热量在已成形 熔覆层基础上进行累积,熔覆层数每增加一层,热 量就累积一次。最先成形的熔覆层受后续熔覆层 的热累积效应最强,不同熔覆层受热累积效应按 照熔覆的先后次序由强减弱。处于最底层的熔覆 层最先成形,受热累积影响也最大,而基体温度相 对较低,因此底层熔覆层与基体之间形成较大温 度梯度,并且由于熔覆层与基体之间热膨胀系数 不同,因此当熔池部位被急剧加热,迅速膨胀之 后,熔覆层与基体经凝固、收缩及冷却,产生收缩 变形,而基体相对收缩较小,并且熔覆层与基体之 间为冶金结合^[9],因而熔覆层表面将受到基体较 大的拉应力作用。中间的熔覆层由于受热累积效 应影响不同,越晚形成的熔覆层收到的热累积影 响越弱,因而产生的热应力不断下降。处于最顶 层的熔覆层由于受这种热累积效应影响最小,并 且与周围环境接触,散热较快,温度梯度相对较 小,因此产生热应力也相对较小。



图 6 熔覆层深度方向应力分布

Fig. 6 Stress distribution in different depths of the laser cladding layer

在靠近熔覆层表面的不同深度位置上,平行 激光熔覆方向应力随着深度的增加先上升一定数 值而后保持相对平稳,这是由以下原因引起:因为 Fe314 属塑性材料,激光熔覆过程中,材料受热熔 化造成材料的屈服强度下降,熔覆层内部应力将 超过材料的屈服强度,产生塑性变形使得部分应 力被释放;此外,激光熔覆过程中,激光在基体上 反复运动使得已熔覆层出现热量积累,降低熔覆 层与基体的温度梯度,对后续熔覆层具有预热和 降低残余应力效果。测试结果表明,随熔覆层深 度的增加,平行激光熔覆方向的应力在深度方向 上先趋于平稳后不断上升,垂直激光熔覆方向应 力在深度方向上表现为不断上升。

2.3 热累积效应验证

由 2.2 中分析可知,熔覆层中应力分布主要 由熔覆层中不同深度位置受热累积效应的影响不 同引起,这种热累积效应将直接引起熔覆层中不 同深度位置上温度的差异变化,加之散热条件的 不同,从而使熔覆层内部金相组织产生对应变化。

采用 OLYMPUS-GX51 型金相显微镜观察 可得熔覆层不同位置金相组织结构分别如图 7 所 示。从图 7(a)可以看出,熔覆层顶部主要为细小 致密的等轴晶,由 2.2 中分析可知,熔覆层表面受 热累积效应最弱,而表面周围环境相对熔覆层表 面温度较低,使得熔覆层表面附近产生较大的负

温度梯度,形成极大过冷度,使熔池表面一薄层液 体中产生大量的晶核向各个方向生长并相互融 合,一定程度后不再能继续生长,便在表面形成薄 层的等轴晶区;从图 7(b)可以看出,熔覆层中部 以树枝晶为主,原因在于先成形的熔覆层作为后 续熔覆层的高温基体,残留在熔覆层中的热量来 不及扩散,同时激光熔覆过程中激光束的往复运 动加大热量的累积作用,使已熔熔覆层温度在一 定的较高温度区间内保持波动,这种小范围的温 度波动对后续熔覆层起到预热作用[10-12],导致凝 固时温度梯度较小,具有释放应力的作用;从 图 7(c)可以看出,熔覆层底部主要由平面晶区、 柱状晶和粗大树枝晶组成,而并没有相对中部更 大的树枝晶等金相组织存在,主要是因为虽然熔 覆层底部受热累积效应最大,但是由于基体与熔 覆层存在较大的正温度梯度,具备快速散热的条 件,熔池首先冷凝出一薄层平面晶,由于熔池内粉 末各组分熔点差异,熔点高的溶质元素首先凝 固^[13],而其他低熔点元素由于成分过冷,导致晶 体向粗大的树枝晶转变。随着距离界面距离的增 加和成分过冷的增大,产生粗大的树枝晶。



(a) Surface and middle

(b) Middle



图 7 Fe314 合金多层堆积熔覆层的组织形貌

Fig. 7 Micrographs of the multilayer deposition laser cladding layer of Fe314 alloy

综上,熔覆层与热效应影响差异相对应的金 相组织验证了残余应力测试分析中关于熔覆层中 热累积效应影响差异的正确性,并进一步验证应 力分布的分析正确性。

2.4 显微硬度

采用 HVS-1000 显微硬度计,获得激光熔覆 层至基体硬度分布如图 8 所示。可见,从熔覆层 至基体显微硬度呈现先递减、再增加的变化趋势, 在结合界面处达到峰值 450 HV_{0.3},其中熔覆层硬 度范围为 380~450 HV_{0.3},基体硬度范围 360~ 410 HV_{0.3}。



图 8 Fe314 合金熔覆层及基体显微硬度分布 Fig. 8 Micro-hardness of the cladding layer and substrate of Fe314 alloy

硬度变化与熔覆层及基体金相组织晶粒致密 度密切相关:晶粒大小及致密程度影响硬度变化, 晶粒细小及致密度高的部位具有相对较高的硬度 值,而晶粒粗大及致密度低的部位硬度值相对 较低。

3 结 论

(1) 采用 Fe314 合金粉末在 45 钢基体上进行 激光熔覆的最优工艺参数是:激光功率 1.2 kW,扫 描速度 8 mm/s,送粉速度 4.42 g/min,离焦量 -4 mm。

(2) 熔覆层表面主要表现为拉应力,最大值 出现在熔覆层边缘,约 290 MPa;基体主要受压应 力,最大值出现在熔覆层与基体的交界处,约为 230 MPa。熔覆层表面平行激光熔覆方向上,应 力熔覆层边缘靠近基体的位置出现较大值;垂直 激光熔覆方向上,应力不断减小,并由拉应力逐渐 转变为压应力,在基体上应力表现为压应力。

(3) 在熔覆层的不同深度上,主要为拉应力, 随着熔覆层数的增加,平行激光熔覆方向的应力 值先保持稳定并逐渐下降,表面应力值最小,约为 280 MPa;垂直熔覆方向上应力不断上升,熔覆层 表面应力最小,约为 200 MPa。

(4) 熔覆层顶部主要以细小致密等轴晶为 主,熔覆层中部主要以树枝晶为主,熔覆层底部主 要由平面晶区、柱状晶和粗大树枝晶组成,熔覆层 细小致密的组织结构,可能具有较好力学性能。

参考文献

[1] 杨洗陈,李会山,刘运武,等.激光再制造技术及其工业应

用[J].中国表面工程,2003,61(4):43-46.

- [2] 马运哲,董世运,徐滨士,等.铁基合金激光熔覆技术工艺 优化研究[J].中国表面工程,2006,19(5):154-160.
- [3] 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.
- [4] 田乃良,杜荣建,周昌炽.激光熔覆添加碳化钨的镍基合金应力状况分布[J].中国激光,2004,31(4):205-508.
- [5] 王致坚, 翟海波, 刘宇, 等. 激光再制造工艺参数的研究[J]. 激光杂志, 2010, 31(5): 50-52.
- [6] 孙宽,姚继蔚,徐忠锦,等.影响激光质量的主要因素 [J]. 农业装备与车辆工程,2007,188(3):36-38.
- [7] 闫世兴,董世运,徐滨士,等.Fe314 合金激光熔覆工艺优
 化与表征研究 [J].红外与激光工程,2011,40(2):235-240.
- [8] 关振中. 激光加工工艺手册 [M]. 北京:中国计量出版社, 2007, 266-268.
- [9] 智翔,赵剑锋,蔡军.激光熔覆修复工艺参数对熔合区成 形质量的影响[J].中国激光,2011,48(3):48-52.
- [10] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理 [M]. 北京:机械工业出版社, 2012, 282-294.
- [11] 李同道, 韩涛, 占焕校, 等. 搭接率对 CK45GAN 钢激光熔 凝硬度及应力分布的影响 [J]. 中国石油大学学报, 2007, 31(6): 152-155.
- [12] Majumdar J Dutta, Pinkerton A, Liu Z, et al. Microstructure characterization and process optimization of laser assisted rapid fabrication of 316L stainless steel [J]. Applied Surface Science, 2005, 247(1/2/3/4); 320-327.
- [13] 洪有昌. 激光重熔镍基合金火焰喷焊层组织及性能 [J]. 中 国激光, 2008, 35(9): 1388-94.

作者地址:北京市丰台区杜家坎 21 号 装甲兵工程学院再制造技术重点实验室 Tel: (010) 6671 8541 E-mail: renweibin100@163.com 100072