

[文章编号] 1004-0609(2002)04-0682-05

锌铝基合金陶瓷层激光重熔区的表面温度场^①

严彪¹, 徐政¹, 平志纲¹, 殷俊林², 卢斌³

(1. 同济大学材料科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海市金属功能材料重点实验室, 上海 200940;

3. 中南大学材料科学与工程学院, 长沙 410083)

[摘要] 使用 HSC-31 快速扫描红外热像仪, 测量了含 Al_2O_3 表层的锌铝合金激光熔覆时的表面温度场, 测得熔池中最高温度为 $1\,672\text{ }^\circ\text{C}$, 边缘温度为 $600\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$, 冷却速率为 $2\times 10^3\sim 3\times 10^4\text{ }^\circ\text{C/s}$ 以及熔池形状和等温曲线。

[关键词] 温度场; 锌铝合金; 激光重熔; 金属基陶瓷复合材料

[中图分类号] TG 17

[文献标识码] A

激光熔覆陶瓷涂层是 20 世纪 80 年代末兴起的一项金属表面强化技术^[1]。激光熔覆能显著地提高金属表面硬度、耐磨性和耐腐蚀性等, 可以实现涂层与基体间的冶金结合, 因此被视为最有价值的表面强化方法, 深受国内外广大学者的重视。

温度场是激光熔覆层质量好坏的决定因素^[2], 同时, 也是激光熔覆工艺研究的关键。激光熔覆池具有尺寸较小、温度很高、冷却速率极快等特点, 目前对温度场的研究多采用函数解析和数值模拟方法^[3], 并取得了很大的进展。由于模拟计算过程中对实际物性参数和边界条件进行了各种假设和简化, 同时所采用的模型多为简化的热传导方程, 与实际过程的温度场有一定的差异, 并不能反映激光熔覆池温度场的真实状况。红外成像测温仪可测量物体的热分布, 并将其变为可视图像, 在工业、医学及科学研究领域已有广泛的应用^[4, 5]。本文作者在详细研究锌铝基合金激光熔覆陶瓷涂层的基础上^[6~11], 应用 HSC-31 快速扫描红外测温仪实际测定了一定工艺参数下激光处理金属基陶瓷涂层时的表面温度场, 获得一些有价值的实验结果, 对深入研究材料激光熔凝时的组织结构及变化规律具有重要的理论和实际意义。

1 实验方法

采用同济大学稀土锌铝合金作为基体材料, 化学成分(质量分数)为 $\text{ZnAl35\% Cu2\% RE}$ 。采用坩埚

电阻炉熔炼, 铸造成型, 经机械加工成 $130\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的基体试样。试样首先用 ME TCO 4MP 等离子喷涂机表面喷涂氧化铝陶瓷层, 喷涂用氧化铝为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Al_2O_3 99%), 采用 Ar 气保护, 喷涂距离为 120 mm , 涂层厚度约 0.30 mm 。

激光处理采用 HJ-4 工业用横流 CO_2 激光器, Ar 气保护, 多模模式光斑, 光斑直径为 $4\sim 10\text{ mm}$, 离焦距离为 $60\sim 80\text{ mm}$ 。在保证熔池大小($5\sim 8\text{ mm}$)和深度($2\sim 4\text{ mm}$)的前提下, 选定激光参数为: 功率 3 kW , 扫描速度 800 mm/min , 横向扫描。

测温仪采用中科院上海技物所研制的 HSC-31 快速扫描红外测温仪及附带图像处理软件。测温时测温仪参数设定为: 亮度 86, 对比度 93, 图像采集频率 25 幅/s , 测温范围 $565\sim 1\,700\text{ }^\circ\text{C}$ 。为减少 CO_2 激光(波长 $10.6\text{ }\mu\text{m}$)对红外测温仪的干扰, 在测温仪红外通道窗口后放置了一块厚 11 mm 且表面抛光的 CaF_2 晶体材料, 起滤波作用。

红外热成像时, 红外热像头的检测信号通过模拟信号转换板送入计算机进行图像处理, 使用专门的软件可以对红外图像进行诸如绘制单点测温、多点测温、测平均温度、横竖温度变化曲线、等温区分布图等操作。

2 结果和分析

2.1 熔池热像图和等温区域

图1所示为激光熔覆熔池的红外图像。从图中

① [基金项目] 上海市金属功能材料研究、应用及开发重点实验室资助项目(200004316)

[收稿日期] 2001-09-28; [修订日期] 2002-01-21

[作者简介] 严彪(1961-), 男, 高级工程师, 博士。

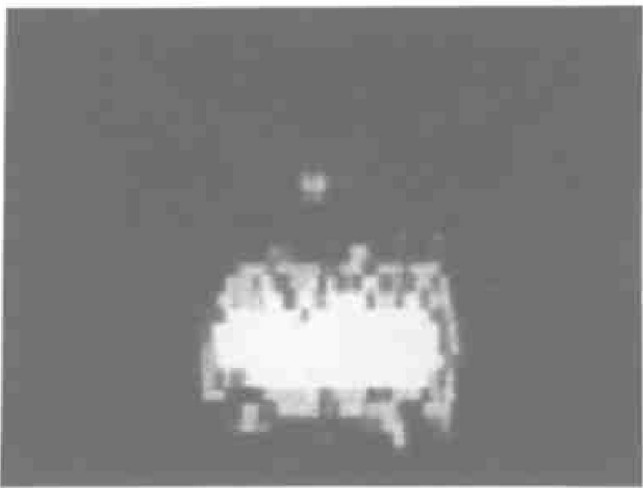


图 1 激光熔池的红外热像图

Fig. 1 Infrared image of melting pool
($P=3\text{ kW}$, $v=800\text{ mm/min}$)

可以清晰地看出熔池的形状。经对图 1 熔池图像中熔池宽度按图像比例测算约为 4 mm, 与实测值一致, 满足实验要求。

对红外热像图中处于不同温度范围内的区域用不同的颜色(在图 1 中显示为灰度)进行标记, 图像右边同时标出了各种色彩对应温度。根据图中显示的颜色可以把熔池大致分为 4 层等温区域。熔池的中心部位温度最高, 均在 1 500~ 1 670 ℃之间, 呈白色, 所占比例也较大, 约 30%; 第二层为红色区域, 温度为 1 300~ 1 500 ℃; 第三层温度范围 950~ 1 300 ℃, 所占比例约 30%; 最外层为蓝色区域, 温度 600~ 900 ℃, 所占比例约 20%。利用计算机软件可作出不同温度的等温曲线, 其中 800, 1 200, 1 600 和 1 672 ℃以上的等温曲线如图 2 所示。从图 2 可见, 等温曲线近似椭圆形, 但形状不很规则。图 2 中 x , y 值为图像仪上的间隔数。

2.2 熔池中多点温度分布和冷却速率

图 1 所示熔池中不同颜色(灰度)表示不同的温度。色彩(灰度)与温度(未标定)的对应关系可通过附带的软件处理, 并可读出温度的读数值。温度的读数值与真实值之间的关系可由下列公式计算:

$$t = (100/9) t_1 + 5080/9 \approx 11.1 t_1 + 564.4 \quad (1)$$

式中 t_1 —热像仪读数, t —实际温度。

对熔池中各点进行测温, 可得出各点的温度值。在熔池中心区域的最高, 实测可达 1 672 ℃, 而熔池边缘区域的实测温度约为 600~ 700 ℃, 如表 1 所示。

激光加热属于快速加热和快速冷却的过程, 熔

表 1 $x=170$ 时, y 上各点的温度值

Table 1 Temperatures of points at y axis when $x=170$

y axis title	230	235	240	245	250	255	260
$t_1/^\circ\text{C}$	3.3	12.8	31.2	53.4	8.7	99.8	25.5
$t/^\circ\text{C}$	601	706	911	1 157	1 216	1 672	847

池中各点的冷却速率极大, 经过计算可得扫描过程中熔池的冷却速率为 $2 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4\text{ }^\circ\text{C/s}$ 。在激光束扫描时, 冷却速率更大, 可达 $3 \times 10^4\text{ }^\circ\text{C/s}$, 这是由于扫描时熔池的散热面积增加的缘故, 如此大的冷却速率正是激光熔覆后材料组织结构中晶粒细化, 性能改善的原因。

2.3 激光重熔区的形貌

从本实验来看, 激光重熔区的形貌是不同的。图 3(a), (b), (c) 和 (d) 分别显示了两种不同类型熔池区的横截面形貌。

图 3(a) 和 (b) 所示熔池区形状呈明显的月牙状或火山口状^[5]。其形成原因为: 当激光束离开试样表面时, 在表面张力梯度的作用下, 迫使熔池表层的中心处的物质流向熔池的边缘区域, 再加上基体的激冷作用, 导致了月牙状的形貌。这也说明了熔池表面的凝固特征主要取决于熔池内熔体的流动。因此, 表面张力、表面润湿特性和激光束加工参数决定了熔池凝固的形貌。图 3(c) 和 (d) 所示熔池形状则较平, 图 3(c) 所示试样还略微有些凸出。这是因为表层喷涂 Al_2O_3 后, 改变了试样表面的润湿特性和表面张力的方向, 在反向表面张力的作用下, 熔池内熔体向表面半径减小的方向流动, 使得熔池的表面较平, 甚至表面略微有些隆起, 形成了图 3(c) 和 (d) 所示的形貌。在所观察的样品中, 没出现 Tsai^[12]提出的情况, 即中间高, 四周低。这说明在本实验中, 试样的对流是主要的。

2.4 熔池宽度和深度

锌铝合金基材的理论熔点为 580 ℃, 实际熔点为 620~ 650 ℃。铸造温度为 700~ 720 ℃。因此, 选定熔池温度为 600 ℃的读数值, 作为测定熔池宽度和深度的数值。

根据热像仪所附带的计算机软件的测试结果:

600 ℃时, 熔池宽度间隔为 27 个, 每个间隔与实际尺寸的换算公式(计算机软件提供)为

$$l = 0.264x \quad (2)$$

式中 l —实际尺寸, mm; x —热像仪上读出的间隔数。

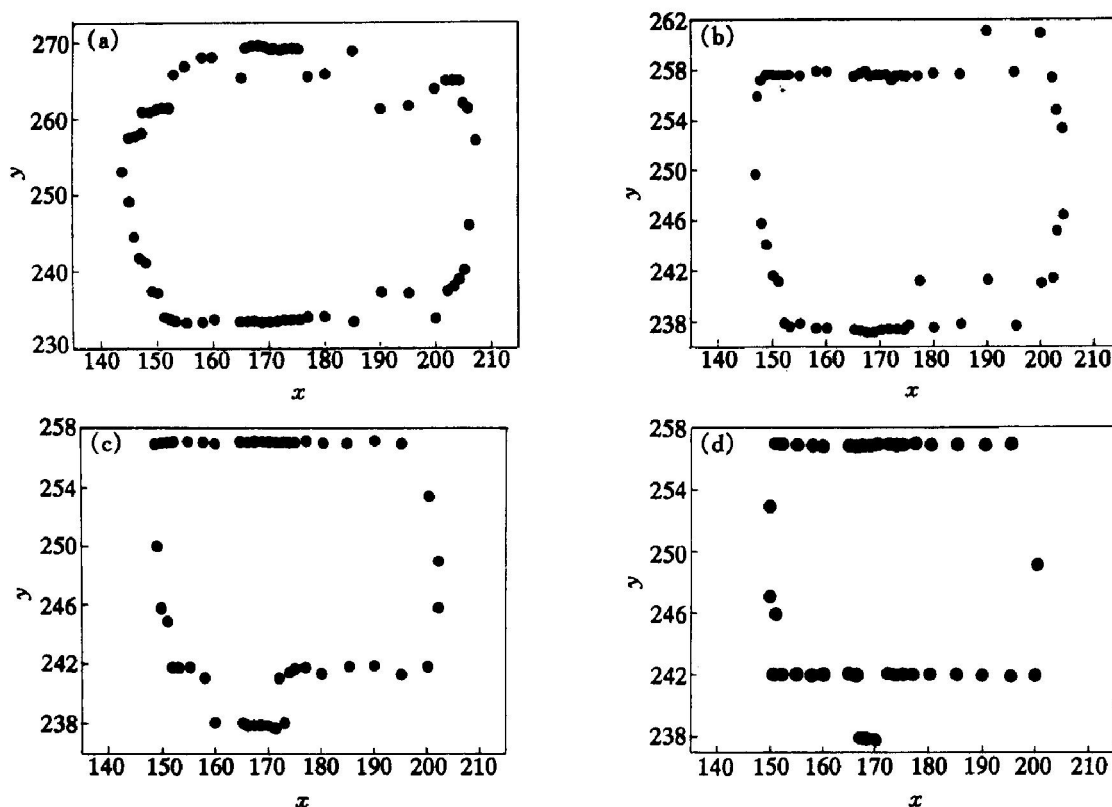


图 2 熔池中不同温度的等温曲线

Fig. 2 Isotherms of different temperatures of melting pool

(a) $-800\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $-1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $-1\,600\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $-\geq 1\,672\text{ }^{\circ}\text{C}$

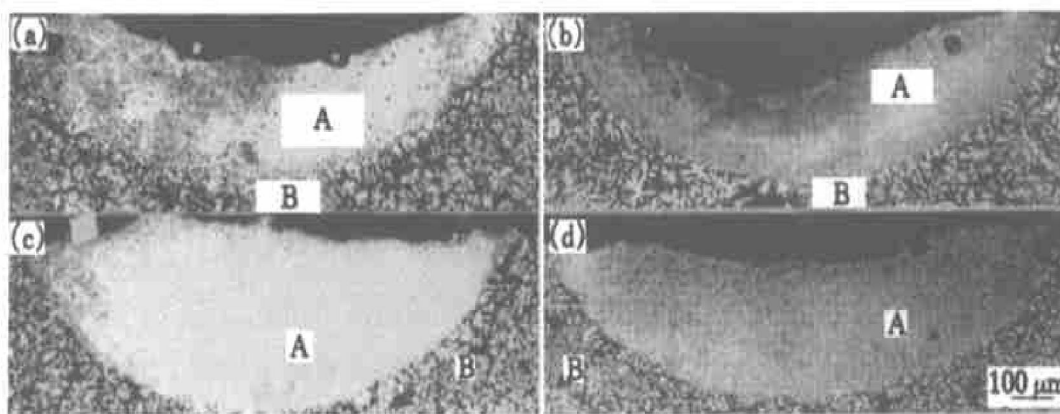


图 3 两种不同的熔池区形貌

Fig. 3 Morphologies of two different melting pools

(a) $-\text{Zr-Al}+\text{ laser remelt}$; (b) $-\text{Zr-Al}+\text{ Al}_2\text{O}_3+\text{ laser remelt}$;
(c) $-\text{Zr-Al-Cu}+\text{ laser remelt}$; (d) $-\text{Zr-Al-Cu}+\text{ Al}_2\text{O}_3+\text{ laser remelt}$

A —Melting pool area; B —Transition area

将数据代入上式计算后得到熔池宽度为 7.13 mm 。

根据热像仪所附带的计算机软件的测试结果： $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，熔池深度间隔为 17 个，则熔池的深度为 4.49 mm 。

2.5 实验值与热源函数模型计算结果的比较

据热源函数模型(公式推导过程略)和 ANSYS 法计算了激光熔池的最高温度、宽度和深度，将所

得数据和热成像仪测定的数据列入表 2。

由表 2 可见，3 种方法所得的宽度基本接近。热成像仪测定的数值由于测温过程中，本身的测量误差和测温环境的影响，使数据生产了偏差。从图 1 上可清楚地看到熔池上部的辉光，这是因为在熔池熔融的表层，熔池表面在激光加热和冲击共同作用下，使熔池表面产生了较大的波动，因此，该处的温度场变化较大(见图 2)；而在熔池中心，即熔池温度达到最高值时，波动几乎为零。由于表层的

波动造成了熔池测量时产生误差,尤其在熔池的深度方面,但总的数值基本相近。

表 2 理论计算值与实验值的比较

Table 2 Comparison of calculated values and measured values

Methods	ERF model	Infrared thermovision	ANSYS method
$t_{\max}/^{\circ}\text{C}$	1 506	1 672	1 700
Width/mm	6. 03	7. 12	5. 30
Depth/mm	—	4. 49	1. 60

3 结论

- 1) 实验证明,应用红外热像技术测量激光熔覆温度场是可行的,最高测温范围可达 1 700 ℃,具有很高的温度分辨率(1 ℃)及响应频率(40 ms)。
- 2) 红外测温仪测得激光熔覆陶瓷(Al_2O_3)层的表面温度场最高温度为 1 672 ℃,并与理论计算值相近。
- 3) 连续扫描时熔池形状近似为椭圆形,由于红外表层测温数据的波动,造成了熔池深度的数据偏差较大。
- 4) 应用红外测温仪测得的数据,可计算出在本实验的参数情况下,激光熔覆陶瓷涂层时冷却速率高达 $10^3\sim 10^4\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 。

[REFERENCES]

[1] 周林. 激光熔覆陶瓷涂层中的缺陷及防止 [J]. 热加工工艺, 1995(6): 11– 14.
ZHOU Lin. The deficiency and prevent of the ceramic layer for laser cladding melted [J]. Tech of Heat Processing, 1995(6): 11– 14.

[2] 曾大文, 谢长生. 激光熔覆温度场和流场数值模拟研究和发展趋势 [J]. 材料科学与工程, 1997, 15(4): 1 – 8.
ZENG Dawen, XIE Chang-sheng. Review of numerical simulation of the temperature field and fiuld flow field in laser cladding melted pool [J]. Materials Science and Enr-gineering, 1997, 15(4): 1– 8.

[3] 杨洗陈, 郑天淳. 激光表面熔凝温度场计算 [J]. 材料科学与工程, 1999, 17(1): 21– 25.
YANG Xi-chen, ZHENG Tian-chun. The claculation of temperature field in laser surface melting [J]. Materials Science and Engineering, 1999, 17(1): 21– 25.

[4] ZHU Zhi-chang, LI Xi-qian, YU Shao-luo, et al. Sur-

face temperature field survey for laser heating of steels [J]. Chinese Journal of Lasers, 1994, B3(4): 363– 368.

[5] 张明, 曾令可. 火焰温度场的红外热成像动态测试 [J]. 激光与红外, 1997, 27(5): 288– 291.
ZHANG Ming, ZENG Ling-ke. IR thermal imaging test of the flare dynamic temperature field [J]. Journal of Lasers and Infrared, 1997, 27(5): 288– 291.

[6] 陶劲松, 唐琦, 严彪. 金属基复合陶瓷层的应用与研究 [J]. 上海有色金属, 1999, 20(3): 121– 126.
TAO Jin-song, TANG Qi, YAN Biao. The application and research of metal based composite ceramic layer [J]. Shanghai Nonferrous Metals, 1999, 20(3): 121– 126.

[7] 王军, 严彪, 徐政. 金属基复合材料的发展和未来 [J]. 上海有色金属, 1999, 20(4): 188– 192.
WANG Jun, YAN Biao, XU Zheng. Development and future of meta+matrix composite [J]. Shanghai Nonfer-rous Metals, 1999, 20(4): 188– 192.

[8] 严彪, 王军, 徐政. 激光重熔的锌铝基 Al_2O_3 陶瓷复合层形貌及成因 [J]. 建筑材料学报, 2000, 3 (4): 349– 354.
YAN Biao, WANG Jun, XU Zheng. Morphology and its formation mechanism of laser remelting area on Zr-Al based ceramic thin film [J]. Journal of Building Materir-als, 2000, 3(4): 349– 354.

[9] 严彪, 徐政, 殷俊林. 锌铝基 Al_2O_3 陶瓷复合层上激光重熔区的相组成及成因 [J]. 上海有色金属, 2000, 210(4): 188– 192.
YAN Biao, XU Zheng, YIN Jun-lin. The microstructure for laser re-melting area on the Zr-Al based ceramic thin film and its form mechanism [J]. Shanghai Nonferrous Metals, 2000, 210(4): 188– 192.

[10] 平志纲, 严彪, 徐政. 激光熔覆温度场模拟计算和测量 [J]. 上海有色金属, 2001, 22(3): 110– 114.
PING Zhi-gang, YAN Biao, XU Zheng. The calcular-tion and suvey of temperature field in laser surface melt-ing [J]. Shanghai Nonferrous Metals, 2001, 22(3): 110– 114.

[11] 严彪, 徐政, 殷俊林, 等. 陶瓷相对锌铝基合金激光重熔区表面硬度的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(S2): 195– 198.
YAN Biao, XU Zheng, YIN Jun-lin, et al. Effect of Al_2O_3 phase on microhardness of laser remelting area of Zr-Al based alloy [J]. The Chinese Journal of Nonfer-rous Metals, 2001, 11(S2): 195– 198.

[12] Yang X C, Zheng T C. Calculation of temperature field in laser surface melting [J]. J Met Sci Technol, 1991, 17(5): 364– 368.

Surface temperature field survey for laser re-melting area of Zr-Al based ceramic thin film

YAN Biao¹, XU Zheng¹, PING Zhigang¹, YIN Jurr-lin², LU Bin³

(1. School of Materials Science and Engineering, Tongji University,
Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Key Lab for Research, Developing and Applications of
Metallic Functional Materials, Shanghai, 200940, China;

3. College of Materials Science and Engineering, Central South University,
Changsha 410083, China)

[Abstract] The measurements of the surface temperature fields of laser re-melting area in the Zr-Al based ceramic thin film, scanning heating by CO₂ laser, were carried out with an HSC-31 fast-scanning infrared thermovision. The center and edge temperatures of melting pool, and the isotherms of different temperatures, and the shape of the melting pool were measured.

[Key words] Zr-Al based alloys; metal matrix composites(MMC); laser re-melt; surface temperature fields

(编辑 何学锋)