

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0284-05

激光深熔焊接车身安全件的热循环研究

伍 强¹, 陈根余¹, 徐兰英², 李力钧¹, 龚金科¹

(¹湖南大学机械与汽车工程学院, 湖南 长沙 410082)
(²华南理工大学机械工程学院, 广东 广州 510640)

摘要 在热电偶标定测试的基础上,通过实验获得了焊缝热影响区的实际热循环曲线。将高温等离子体简化为点热源,薄板焊接时的热源简化为线状热源后,采用叠加原理建立激光焊接高强度镀锌钢热循环的数学模型。对模型进行了解析计算,获得了热影响区的理论热循环曲线。对比研究后认为,热循环数学模型能反应激光深熔焊接的实际热循环过程。焊缝显微组织中存在少量的马氏体的事实表明,激光焊接高强度镀锌钢的热循环特点是加热冷却速度快。

关键词 光学设计与制造;激光深熔焊接;高强度镀锌钢;热循环的测定 热源数学模型

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

Research on Thermal Cycling of Deep Penetration Laser Welding to Safety Part of Vehicle Body

WU Qiang¹, CHEN Gen-yu¹, XU Lan-ying², LI Li-jun¹, GONG Jin-ke¹

(¹ College of Mechanical and Automotive Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)
(² College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract Based on the thermojunction assignment test, actual thermal cycling curve of welded seam heat-affected zone is obtained. After simplifying high-temperature plasma as dot heat reservoir, heat reservoir of light gauge welding as linear heat reservoir and adopting principle of superposition, mathematical model to laser welding zinc coated high strength steel is established and analyzed, meanwhile theoretical thermal cycling curve of welded seam heat-affected zone is obtained. By contrasting the two results, it demonstrates that thermal cycling mathematical model can explain actual thermal cycling process of deep penetration laser welding. Microscale martensite is existed in welding seam microscopic structure, which indicates that thermal cycling characteristic of laser welding is quick heating and cooling velocity.

Key words optical design and fabrication; deep penetration laser welding; zinc coated high strength steel; thermal cycle detection; mathematical model of thermal source

1 引 言

近年来,“轻量化”和“安全性”作为汽车产业的重点越来越受到人们的重视^[1]。在围绕车门等覆盖件与悬挂件进行轻量化的项目中,采用新材料以及新的成形方法是减轻车身质量的重要途径:所开发的新型材料主要有高强度钢板、超高强度钢板、轻金属材料如镁/铝合金、塑料以及复合材料等^[2]。激光的特点是能量集中、功率密度高、热影响区和热变形小,容易实现自动化、加工效率和可靠性高,因此,汽

车激光焊接在减轻汽车重量、提高车辆安全性和可靠性、节能节材等方面能发挥独特的作用。

激光焊接特别是激光深熔焊接是一个极为复杂的物理化学过程^[3]。焊接接头的性能除了与材料本身的焊接性有关外,很大程度上取决于焊接工艺参数或者说焊接热循环的影响。因为焊接热循环直接影响焊接热影响区的加热和冷却条件,从而影响热影响区晶粒的尺寸和最终的接头组织。获取焊缝中温度分布的数据对于弄清激光焊接的机制是极其重

基金项目: 国家自然科学基金(50575070)和“985”二期工程湖南大学汽车先进设计制造技术科技创新平台资助课题。

作者简介: 伍 强(1967—),男,湖北荆州人,博士研究生,主要从事激光加工方面的研究。

E-mail: 410082wuqiang@sina.com

导师简介: 陈根余(1965—),男,湖南长沙人,教授,主要从事激光加工新技术和高效磨削技术的研究。

E-mail: hdgychen@163.com

要的，而通过测量温度获取热循环数据则是了解相关参数对冶金及焊件机械性能影响的前提条件^[4]。本文在热电偶标定的基础上，采用 CO₂ 连续激光焊接车身安全件用高强度镀锌钢薄板的同时，对焊缝的热循环作了实验研究；建立了热循环的数学模型，并将解析计算结果和实验测定的结果作了对比分析。

2 焊接热循环的实验研究

2.1 热电偶标定

考虑焊缝的温度特性，采用铂铑 10-铂作为实验用热电偶来检测焊接热循环信号，实验的布置如图 1 所示。

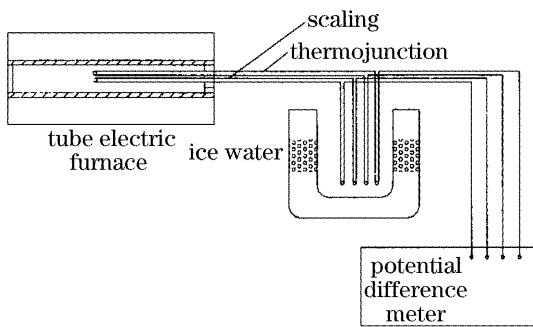


图 1 热电偶的静态标定示意图

Fig. 1 Chart of thermojunction static scalling

特性未知的铂铑 10-铂作为待标定热电偶，特性已知的热电偶作为标准热电偶。标定时，调节管式电炉的炉温，对比标准热电偶的热电势，得到待标定热电偶的热电特性曲线，如图 2 所示。

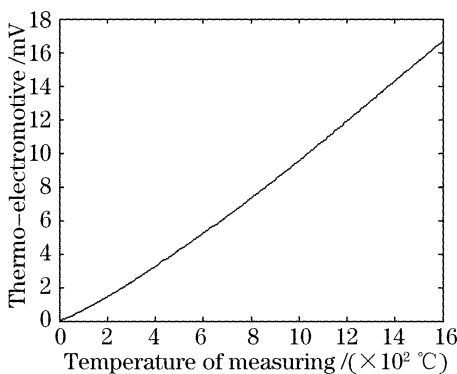


图 2 铂铑 10-铂热电偶分度线

Fig. 2 Graduation line of thermojunction

2.2 实验条件

热循环的测定实验的布置如图 3 所示。

实验所用的激光器为连续输出模式，波长为 10.6 μm，焦深 z 为 3 mm，聚焦元件的焦距 f 为 127 mm 的硒化锌透镜，焦斑直径约为 0.42 mm。南京安正软件工程有限公司生产的采集系统 AZ802A 采集温度信号，热电特性曲线已知的铂铑 10-铂丝

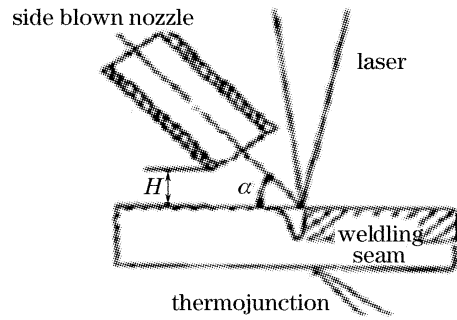


图 3 热源数学模型验证的实验布置图

Fig. 3 Proving testing chart of mathematic 作为检测用的热电偶。焊接材料是瑞典生产的车身专用高强度镀锌钢(DOGAL 800DP)，工件尺寸为 100 mm×30 mm×1.5 mm，焊接接头采用对接方式。材料的化学成分及力学性能如表 1，表 2 所示。

表 1 实验材料的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of tested materials

C	Si	Mn	P	S	Others
≤0.18	≤0.5	≤2.0	≤0.025	≤0.015	≥0.015

表 2 实验材料的力学性能

Table 2 Mechanical properties of tested materials

σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%
800~950	≥500~650	≥10

2.3 实验研究

采用优化的焊接工艺参数进行焊接^[1]。以 N₂ 作为保护气体，激光功率 1300 W，焊接速度 0.96 m/min，与焊接平面夹角 α 在 30°左右，气流方向与焊接速度方向相反侧吹保护气体，焦点在工件表面下 0.4 mm 附近。对实验材料进行了深熔焊接，得到了焊接件下表面距离焊缝中心的垂直距离为 0.8 mm 点的实际热循环曲线。图 4 为热电偶测得的电压-时间曲线(幅值放大 10 倍)。采用外推电势法，可将测量电势转换为实际电势，从而获得焊缝实际的热循环曲线。

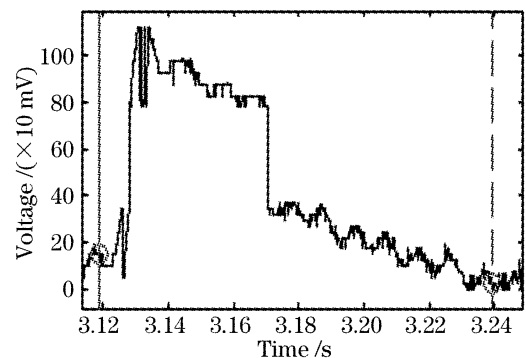


图 4 温度传感器测得的电压-时间曲线

Fig. 4 Trial curve of V-T

在激光焊接工件时,焊接速度高,热源对热电偶的作用时间很短。由于存在热惯性,使热电偶不可能达到热平衡时的温度,必然存在动态误差。焊缝区各处的温度动态误差为^[5]

$$\Delta T = f(X) - T = \tau_0 \left(\frac{\alpha}{X} - \beta \right) A X^\alpha \exp(-\beta X), \quad (1)$$

当 $\frac{d(\Delta T)}{dX} = 0$ 时, ΔT 最大。这时 $X = \frac{\alpha \pm \sqrt{\alpha}}{\beta}$ 。

采用最小二乘法,对得到的焊接温度电势信号曲线进行拟合,设拟合函数为

$$T = AX^\alpha \exp(-\beta X),$$

则

$$\begin{cases} -\beta \lg e \sum_{k=1}^n X_k + \alpha \sum_{k=1}^n \lg X_k + n \lg A = \sum_{k=1}^n \lg T_k, \\ -\beta \lg e \sum_{k=1}^n (X_k \lg X_k) + \alpha \sum_{k=1}^n \lg^2 X_k + \lg A \sum_{k=1}^n \lg X_k = \sum_{k=1}^n \lg T_k \lg X_k, \\ -\beta \lg e \sum_{k=1}^n X_k^2 + \alpha \sum_{k=1}^n X_k \lg X_k + \lg A \sum_{k=1}^n X_k = \sum_{k=1}^n X_n \lg T_k, \end{cases} \quad (2)$$

从而确定 A, α, β , 由(1)式得到温度动态误差。图5为补偿动态误差后,实验测得焊接热影响区的实际热循环曲线,最高温度 T_m 为 1180°C 。

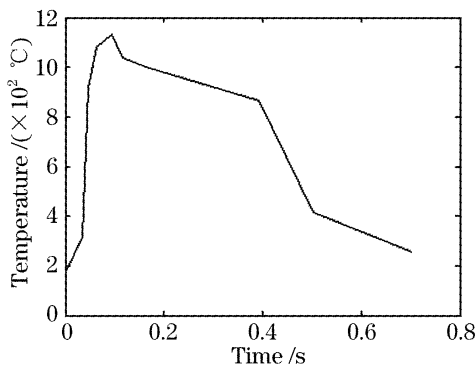


图5 焊接热影响区实际热循环曲线

Fig. 5 Practicable hot recycle curt of welding HAZ

3 热循环数学模型的建立及计算

3.1 数学模型的建立

激光焊接薄板时,可以认为在板厚方向没有温差,把激光束热源看成是沿板厚方向的线状热源,属平面传热,即沿厚度方向的传热为零。激光深熔焊接过程中,通常伴有高温光致等离子体。当激光功率密度较高时,光致等离子体上升至工件表面。稠密的等离子体云不仅会导致聚焦光斑扩散,而且将强烈地吸收入射激光能量,高温的等离子体中心对焊接工件有强烈的加热作用,使材料表面熔化区扩大。等离子体一般被控制在小孔开口处,可视为等离子体高温中心处于工件的上表面。因此,可以将高温等离子体简化为一个点状热源,以对应于焊缝顶部的半圆区域^[6]。线状热源作用下,焊件上某点经 t 秒后该点的温度为

$$T(x, t) = \frac{q}{vh \sqrt{4\pi\lambda c\rho t}} \cdot \exp\left[-\left(\frac{x^2}{4at} + bt\right)\right], \quad (3)$$

将高温等离子体简化为点状热源后,在这个点状热源的作用下,焊件上某点经过 t 秒后该点的温度为

$$T(x, y, t) = \frac{q}{2\pi\lambda vt} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{4at}\right), \quad (4)$$

根据叠加原理,焊接工件上某点的温度应该是点热源与线热源对该点共同作用的结果,则某点的温度应为

$$T(x, y, t) = \frac{q_1}{vh \sqrt{4\pi\lambda c\rho t}} \cdot \exp\left[-\left(\frac{x^2}{4at} + bt\right)\right] + \frac{q_2}{2\pi\lambda vt} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{4at}\right), \quad (5)$$

式中 x 为计算点与焊缝轴线的水平距离(m); y 为计算点到工件上表面的距离(m); q 为热源有效功率(W); q_1 为线热源的有效功率(W); q_2 为点热源的有效功率(W); v 为热源移动的速度(m/s); λ 为材料的热传导系数[J/(m·s·°C)]; c 为材料的比热容[J/(kg·°C)]; ρ 为材料的密度(kg/m³); a 为材料的导温系数(m²/s); h 为焊接钢板的厚度(m); t 为时间(s); $b = 2\alpha/(c\rho h)$ 为工件的表面散热系数(s⁻¹)。

3.2 数学模型求解

图6是在MM-6卧式金相显微镜下放大32倍时,焊接接头的微观组织。从图6中可以看出,焊件下表面距焊缝中心0.8mm的位置处于焊缝的热影响区。

计算热源数学模型时,取与焊缝轴线的水平距离为0.8mm的位置作为热循环的计算点。为了确定 q_1, q_2 , 现定义分配比 β 为点热源的有效功率与全

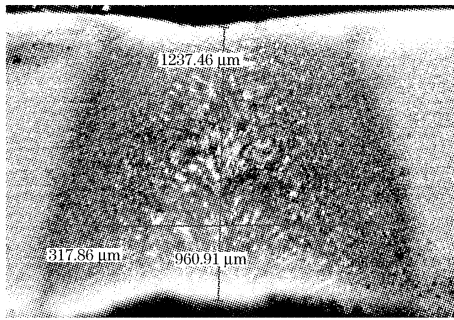


图 6 焊接件焊缝的金相组织

Fig. 6 Metallurgical structure of welding seam

部热源的有效功率之比

$$\beta = q_2 / (q_1 + q_2), \quad (6)$$

分配比 β 与线能量 E (J/mm) 的关系^[7]

$$\beta = 0.115 + 9.6 \times 10^{-4} E. \quad (7)$$

将材料的热物理参数代入(5)式后,得到利用点热源叠加线热源的热循环理论曲线。如图 7 所示,为计算得到的焊件下表面距焊缝中心 0.8 mm 处的理论热循环曲线,可计算得到最高温度 T_m 为 1210 °C。

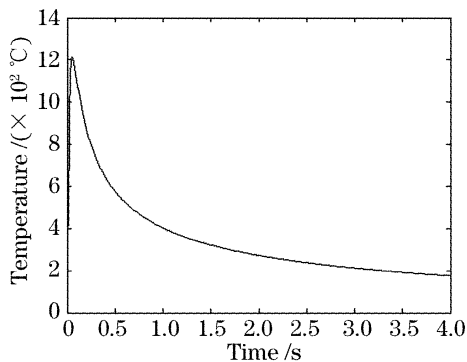


图 7 理论计算的温度-时间曲线

Fig. 7 Theoretical curve of $T-t$

4 结果与分析

比较图 5 和图 7 后可以发现,参考点实际的热循环曲线和理论计算曲线基本吻合,如图 8 所示。说明将激光焊接简化为点热源叠加线热源后得到的数学模型能反应激光深熔焊接的热循环过程。从图中可以看出,激光焊接热循环的理论曲线和实验得到的实际曲线都存在明显的升温过程,温度在极短的时间内就上升到最大值;当热源远离后,被测点开始降温,冷却速度由快变慢。

焊缝金属的凝固组织与结晶的成长速度、界面的温度梯度、组成的过冷程度有关^[8]。图 9 是利用 MM-6 卧式金相显微镜在放大 500 倍的情况下对试件焊缝进行的显微组织实验图。从图中可以看出,热影响区的金相组织是上贝氏体+低碳马氏体+铁素体;熔池区的金相组织是上贝氏体+低碳马氏体;

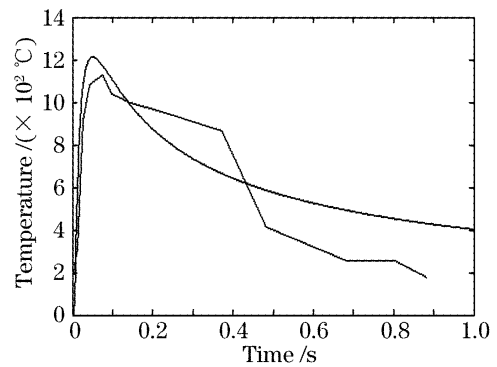


图 8 理论与实际热循环曲线的比较图

Fig. 8 Theoretical and practicable curve of HAZ

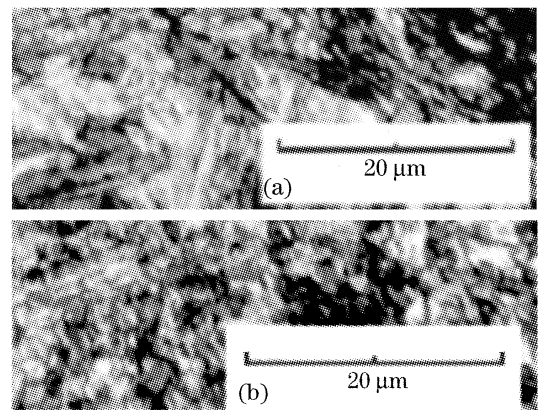


图 9 焊接件焊缝熔池区(a)和热影响区(b)的金相组织

Fig. 9 Metallurgical structure of molten pool (a) and HAZ (b)

热影响区的晶粒明显比熔池区的晶粒细小。组织中出现低碳马氏体说明了激光焊接高强度镀锌钢时的加热冷却速度快。

5 结 论

激光焊接具有比普通焊接方法快得多的加热和冷却速度,实际测得, $P=1300$ W, $V=0.96$ m/min, 在工件下表面距焊缝中心 0.8 mm 处,最高温度 T_m 为 1180 °C。

将高温等离子体简化为点热源后,采用点热源叠加线热源的方法建立的数学模型,对高强度镀锌钢激光深熔焊接进行了理论计算。计算结果与实验方法得到的实际热循环曲线接近。

实验为激光焊接高强度镀锌钢的组织性能预测以及焊接工艺参数的制定提供了一定的指导。同时,可以根据激光焊接高强度镀锌钢的热循环特征预测出热影响区的组织分布。

参 考 文 献

- 1 Wu Qiang, Chen Genyu, Wang Gui *et al.*. CO₂ laser welding of zinc coated high strength steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006,

- 33(8): 1133~1138
伍 强,陈根余,王 贵 等. 高强度镀锌钢的 CO₂ 激光焊接研究[J]. 中国激光, 2006, 33(8): 1133~1138
- 2 Tian Haobin, Lin Jianping, Liu Ruitong *et al.*. A review on ultralight auto body and related forming technologies [J]. *Automotive Engineer*, 2005, 27(3): 381~384
田浩彬,林建平,刘瑞同 等. 汽车车身轻量化及其相关成形技术综述[J]. 汽车工程, 2005, 27(3): 381~384
- 3 Qin Guoliang, Qi Xiubin, Yang Yongbo *et al.*. Coaxial visual sensing technology in Nd:YAG laser welding with high power[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2004, 40(7): 180~185
秦国梁,齐秀滨,杨永波 等. 大功率 Nd:YAG 激光焊接过程同轴视觉传感[J]. 机械工程学报, 2004, 40(7): 180~185
- 4 Liu Shunhong, Wan Pengteng, Hu Lianguo *et al.*. State-of-the-art of research on the temperature field in laser welding[J]. *China Mechanical Engineering*, 2001, 12(4): 478~480
刘顺洪,万鹏腾,胡良果 等. 激光焊温度场研究进展和展望[J]. 中国机械工程, 2001, 12(4): 478~480
- 5 Wu Qiang. Craft study on CO₂ laser welding of Zinc coated high strength steel [D]. Master Dissertation, Hunan University, Changsha, 2006. 33~35
伍 强. 车身用高强度镀锌钢 CO₂ 激光焊接的工艺研究[D]. 硕士论文,长沙: 湖南大学, 2006. 33~35
- 6 Zhang Wenyue. Welding Heat Transfer [M]. Beijing: China Machine Press, 1989. 20~45
张文钺. 焊接传热学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989. 20~45
- 7 Wang Cheng. Study of Laser Welding of 400 MPa super Steel and its Weldability [D]. Doctor Dissertation, Beijing: Tsinghua University, 2002. 46~52
王 成. 400 MPa 级超级钢激光焊接及其焊接性研究[D]. 博士论文,北京: 清华大学, 2002. 46~52
- 8 Zhou Minhui, Yu Meipu. Weld Defect and Countermeasure [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Documentation Press, 1989. 37~39
周敏惠,於美甫. 焊接缺陷与对策[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989. 37~39