

镁合金 AZ31 焊接温度场的红外测量 和数值模拟*

刘黎明** 迟鸣声 黄瑞生 宋 刚 周 阳

(大连理工大学三束材料改性国家重点实验室, 大连 116024)

摘要 采用非致冷焦面红外热像仪研究、测量了镁合金 AZ31 钨极氩弧焊的焊接温度场, 并通过红外测温数据对焊接温度场数学模型的计算参量进行了校正. 在此前提下, 利用数值模拟方法弥补了弧光干扰区域的温度场缺失, 得到了整体焊接温度场. 温度场分析结果为焊后微观组织状态研究提供了分析基础.

关键词 镁合金 温度场 红外热像仪 数值模拟 微观组织

镁合金被称为“21 世纪绿色工程材料”, 是目前有色金属研究和发展的方向之一^[1]. 焊接是形成结构件的重要手段, 对镁合金材料焊接性的研究具有重要意义.

焊接温度场决定了焊接应力与应变场, 它还与冶金、结晶、相变过程有着不可分割的联系, 是影响焊接质量和焊接生产率的主要因素^[2]. 所以通过焊接温度场信息反馈调节焊接参数, 也成为控制焊接质量的主要手段之一^[3].

焊接温度场的测量分为接触法与非接触法两种. 接触法缺点较多, 不仅工作量很大, 而且很难同时得到多点乃至全场温度^[4], 作为非接触法之一的红外热像仪测温法则能实时地进行温度场观测并一次性获得全场温度信息. 国内外学者对红外热像法在焊接领域的控制、测温方面的应用做了很多相关工作^[5~11], 而关于镁合金焊接过程中的红外热像法测量却很有限. 在红外热像仪测量弧焊温度场过程中, 主要存在的问题在于, 强烈的弧光干扰使正面熔池区域温度场的测量准确性难以保证. 国外研究者采用挡板或滤波的办法^[12,13]虽然能减小部分干扰, 但不能从根本上避免干扰的存在. 焊接数值模拟是一种有效的焊接温度场预测手段, 但其必须建立在大量准确数据源的基础上. 红外热像仪所得的有效区域内

收稿日期: 2005-06-23; 接受日期: 2005-07-26

* 国家“十五”科技攻关计划(2004BA311A11)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0271)资助项目

** E-mail: liulm@dlut.edu.cn

SCIENCE IN CHINA Ser. E Technological Sciences

温度场数据可以用来校正焊接热源模型与物性参数^[14], 这就为焊接数值模拟提供了有力的数据支持, 而在准确热源模型与物性参数基础上的数值模拟则可以弥补红外热像仪因弧光干扰而造成的熔池区温度场缺失.

本文以 AZ31B 镁合金为研究对象, 采用非致冷焦面红外热像仪研究了其钨极氩弧焊接的正、背面温度场特点, 校正了焊接热源模型和物理性能参数, 并通过数值模拟弥补了弧光干扰区域的温度场缺失, 得到整体焊接温度场, 最后用所得到的温度场数据分析了不同焊接线能量下微观组织的特点.

1 实验原理简介

1.1 红外测温原理

一切温度高于绝对零度的物体都在不停地辐射电磁波. 光辐射作为一种电磁波辐射与被研究物体表面温度紧密相连. 黑体辐射强度与单色波长和温度关系的 Planck 定律数学表示式如下:

$$W_{\lambda} = C_1 [\lambda^5 (\exp(C_2 / \lambda T) - 1)]^{-1}, \quad (1)$$

式中, λ 为波长, T 为物体的绝对温度, $C_1 = 2\pi^5 c^2 h / 15$ 为 Planck 定律第一常数, $C_2 = hc/k$ 为 Planck 定律第二常数, h 为 Planck 量子常数, k 为 Boltzmann 常数, c 为光速.

对单色 Planck 公式进行全波段积分可得到全波辐射方程, 即黑体 Stefan-Boltzmann 定律:

$$W = \int_0^{+\infty} W_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4, \quad (2)$$

式中, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, $\sigma = (5.6697 \pm 0.0029) \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$. 以上为黑体的辐射能温度关系, 绝对黑体能将外界辐射到表面的热全部吸收, 而黑体仅仅是一种理想的物体. 实际上, 对于大部分金属, 尤其是表面光亮的金属如镁铝等更是和理论上的黑体相差甚远, 为此人们提出了发射率的概念. 发射率就是实际物体的全辐射出射度与其相同温度下的黑体的全辐射出射度的比值. 黑体的发射率为 1, 而实际被测物体(灰体)的发射率则是一个在 0 和 1 之间的常数. 由此得到了灰体 Stefan-Boltzmann 定律:

$$W = \varepsilon T^4. \quad (3)$$

从而得到了辐射测量灰体表面温度的公式:

$$T = \sqrt[4]{\frac{W}{\varepsilon \sigma}}, \quad (4)$$

式中, W 为外界辐射总能量, ε 为灰体发射率

在实际测量的过程中, 一般先采用热电偶标定被测物体的发射率^[15,16], 然后再利用红外热像仪测定物体的温度场.

1.2 实验设备与实验方法

实验中测温主要在国产热像仪 SAT-HY6000 上完成, 其探测器类型为非致冷焦面, 工作波段 8~14 μm , 像素数为 320×240 , 测温范围-20~2000 , 分为低温、中温和高温三档. 由于弧光干扰, 使熔池附近高温区域的温度很难测量到, 又因为镁合金 AZ31 的熔点较低(605), 所以在实验中热像仪选取的为低温档测温. 测温精度 2%, 帧频 50 帧/s. 实验中拍摄距离为 1 m, 相对湿度 17%, 拍摄角度为 45° . 发射率标定采用 NiCr-NiSi 型热电偶.

在进行红外测温前用热电偶标定了热像仪的发射率. 焊接测温的主要方法为正、背面温度场拍摄. 热像仪可将拍摄到的温度场以数字热图存储并进行点、线及面分析(如图 1 所示). 采集到的温度场数据可导入 Matlab 数学绘图分析软件做进一步的后处理, 得到更加清晰、直观的三维温度场与二维等温线分析.

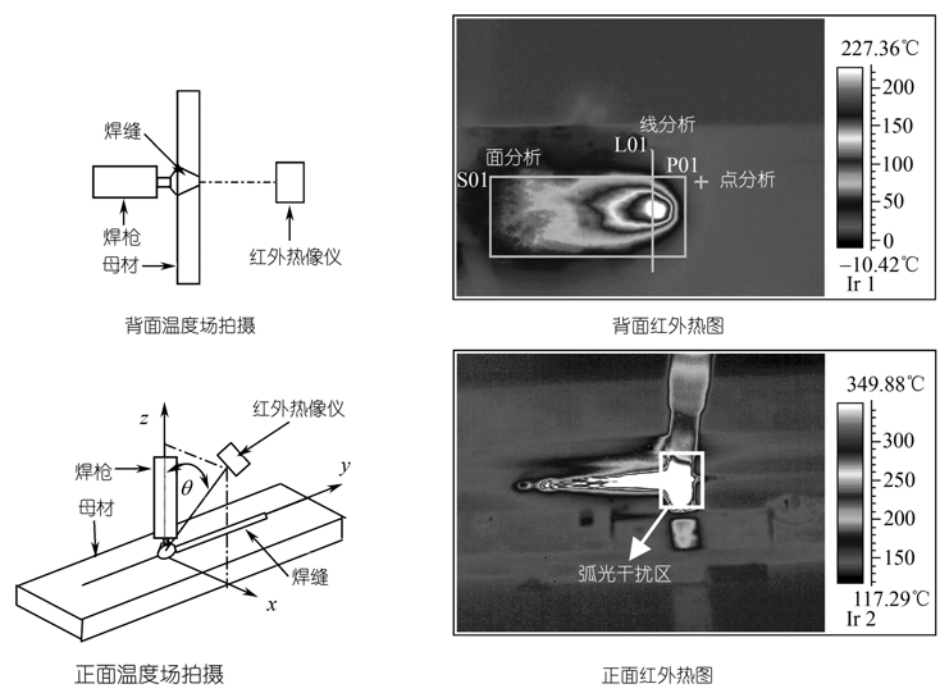


图 1 正、背面红外焊接温度场测量

2 焊接温度场的红外测量与焊接热过程参数的校正

2.1 发射率 ε 的热电偶标定

发射率与发射体本身的性质、表面状态、温度及波长有关, 而且发射率对测

温结果的影响很大. 实验中采用定点 TIG 焊接的方式用热电偶与红外点测温相结合标定镁合金 AZ31 的发射率, 热像仪选取的为低温档测温, 选择标定的区域为温度区间 40~350 之间. 结果发现, 当 $\varepsilon=0.18$ 时, 热电偶与红外测温值符合一定的规律(如表 1 所示), 由此提出下面的修正公式:

$$t = 1.2406t' - 30.034, \tag{5}$$

式中, t 为真实温度(热电偶测得), t' 为红外测量温度

这样, 通过热像仪测得的温度经修正公式转换后即可得到真实温度的值, 从而获得真实温度场. 在下文中所提到的红外测温值所指的都是通过(5)式修正后的测量结果.

表 1 红外测量温度与真实温度对照表

$t/$	330	270	220	180	151	130	112	93	88	67	44
$t'/$	290	242	200	169	147	130	115.5	99	96	79	57

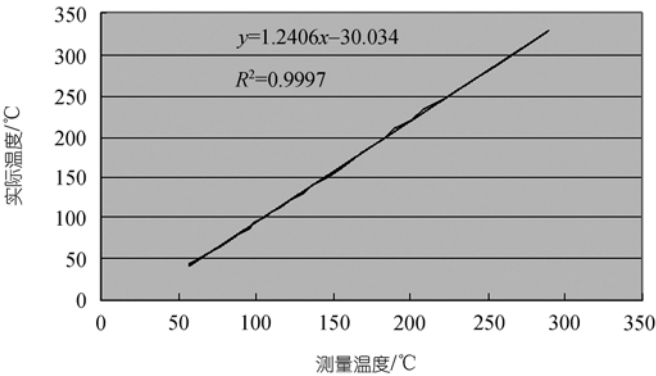


图 2 实际温度与测量温度拟和曲线

2.2 焊接温度场的红外测量

实验中对 300 mm × 100 mm × 2.5 mm 厚度的镁合金 AZ31 板材进行了钨极氩弧焊正、背面的温度场测温. 在正面温度场的测量过程中, 强烈的弧光干扰使熔池区域附近的温度场测量受到很大干扰, 不能作为可靠的实验数据, 所以在正面温度场的分析过程中回避弧光干扰区, 而选择在弧光干扰区以外的温度场进行分析. 经多次实验研究与分析发现, 干扰区域的大小一般为熔池区周围的 10 mm × 6 mm 范围, 在这个区域以外的正面温度场则是基本准确的. 背面焊接温度场拍摄则没有任何干扰, 数据可以认为是准确、可信的. 图 3 和 4 给出了进入准稳态后不同参数下的正、背面温度场分布结果. 从温度场的二维、三维画面上可以清楚地看出峰值温度、温度梯度及等温线分布等重要的温度场信息.

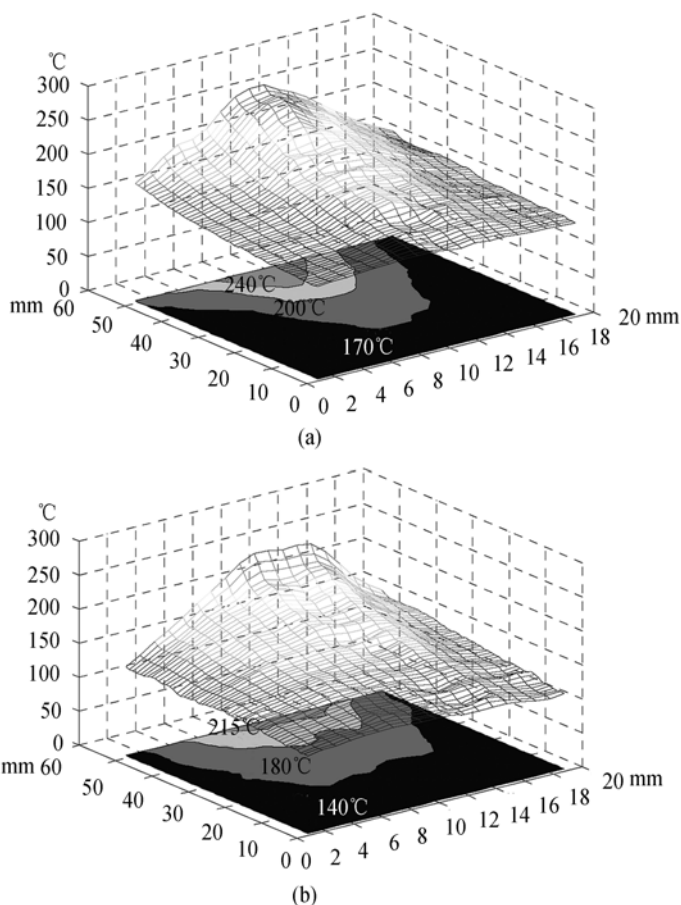


图 3 正面红外温度场

(a) 速度 400 mm/min, 电流 50 A; (b) 速度 800 mm/min, 电流 50 A

2.3 温度场计算参量的红外校正

数值模拟是一种焊接温度场的有效计算手段, 但其受到电弧有效功率、热源分布参数与物理性能参数等方面的制约, 很难得到精确的结果. 通过红外热像仪测得的干扰区外的准确温度场信息, 可以校正数值模拟中的参量, 从而得到干扰区内乃至全场的温度信息.

2.3.1 热传导系数的校正

对于焊接热传导过程, 可用 Fourier 方程表示为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (6)$$

式中, T , t , λ , ρ 和 C_p 分别为温度、时间、热传导系数、密度和比热. 比热、密度

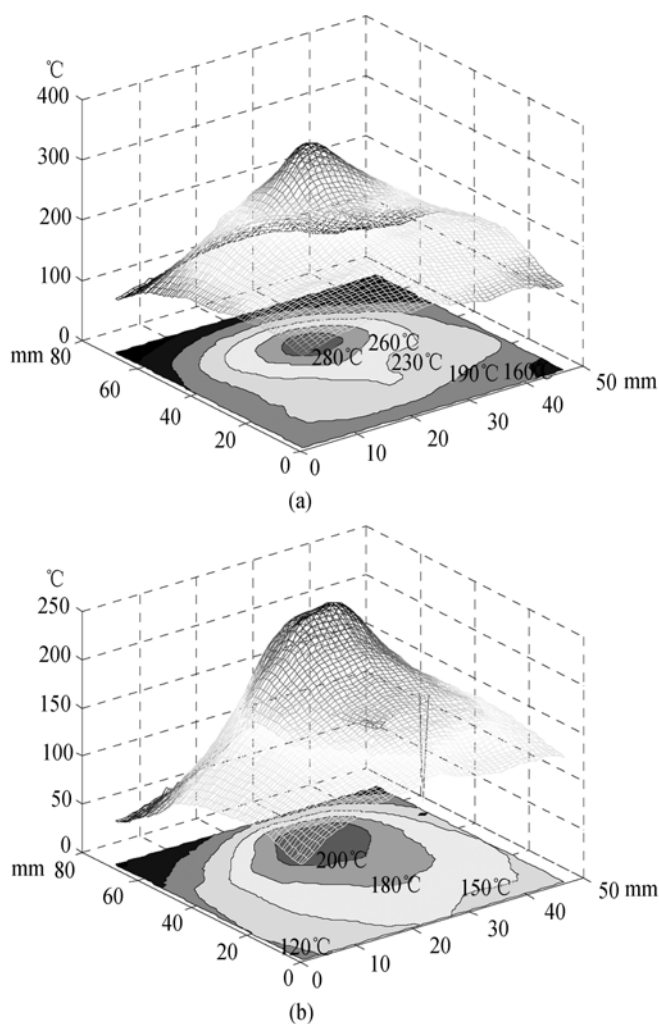


图 4 背面红外温度场

(a) 速度 400 mm/min, 电流 70 A; (b) 速度 800 mm/min, 电流 70 A

随温度变化不大, 故视为常数. 在焊接温度场的计算中, 热传导系数对结果准确率的影响却有很大影响. 整理此方程得

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \lambda}{\partial T} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = 0. \quad (7)$$

某点 (x_0, y_0, z_0) 在某个 t_0 时刻处于某个温度 T_0 , 且 $\frac{\partial T}{\partial x}$, $\frac{\partial T}{\partial y}$, $\frac{\partial T}{\partial z}$, $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$,

$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$ 和 $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ 在该时刻及该点上的数值都可以通过热像仪的多点测温功能间接得,

所以可以解得

$$\lambda = \frac{1}{A} e^{\frac{AT_0 - K}{B}} - \frac{C}{A}, \quad (8)$$

式中, $A = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$, $B = \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2$, $C = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$, K 是积分常数,

可以先通过多点温度的联立方程解得到 K 值, 之后求解热导率 λ . 由此可以得到镁合金 AZ31B 钨极氩弧焊接中的随温度变化的热传导系数值.

2.3.2 其他计算参数的校正情况

数值模拟中采用 Gauss 面热源模型, 其热源模型的表达式为

$$q(r) = \frac{Q}{2\pi} \exp\left(-\frac{r^2}{2\delta_q^2}\right), \quad (9)$$

式中, $Q = \eta UI$, Q , δ_q , η , U 和 I 分别代表电弧有效功率、热源分布参数、电弧有效功率系数、焊接电压和焊接电流. 通过正、背面红外温度场数据与数值模拟结合经反复校正 δ_q 和 η 数值可得到在焊接速度 400~800 mm/min 范围, 焊接电流 70 A 情况下, 2.5 mm 厚镁合金钨极氩弧焊过程, $\delta_q = 1.8$ mm, $\eta = 0.6$.

2.4 校正结果与整体焊接温度场的获取

图 5 和 6 分别为正、背面红外测量的温度场分布与数值模拟计算的温度场的比较示意图, 从图中可以看出, 数值模拟基本上可以准确地反映实际红外测温的情况, 这也说明得到的校正数据是准确的.

在校正温度场各计算参量并与实际红外测温对比验证以后, 我们用数值模拟得到了弧光干扰区域以及整体温度场的分布情况, 如图 7 所示.

2.5 焊接温度场对焊后微观组织热影响区域宽度的影响

焊接温度场对焊后微观组织的影响主要体现在: 高温停留时间、加热的峰值温度及冷却速度三者上. 高温停留时间长、峰值温度高及冷却速度慢都易造成晶粒长大. AZ31B 镁合金钨极氩弧焊过程中易在焊接热影响区处发生明显的晶粒长大现象. 通过红外温度场研究与数值模拟相结合, 可以定量的研究焊接热循环过程, 并找出其对焊后微观组织的影响规律, 从而更好地控制工艺参数调整焊接热循环以改善热影响区组织.

图 8 为由数值模拟方法得到的不同焊接线能量情况下热影响区域(距熔合线 0.05 mm 处)的焊接热循环过程曲线. 从图中可以得到, 前者的高温停留时间 1.3 s,

后者为 0.4 s; 峰值温度前者为 447 , 后者为 380 . 而且从两者背面温度场的等温线分析(图 4)上也可看出前者的高温范围更宽. 对应图 9 的微观组织中, 前者热影响晶粒的长大程度明显高于后者, 表现为前者的热影响区宽度(0.27 mm)接近是后者(0.15 mm)的 2 倍.

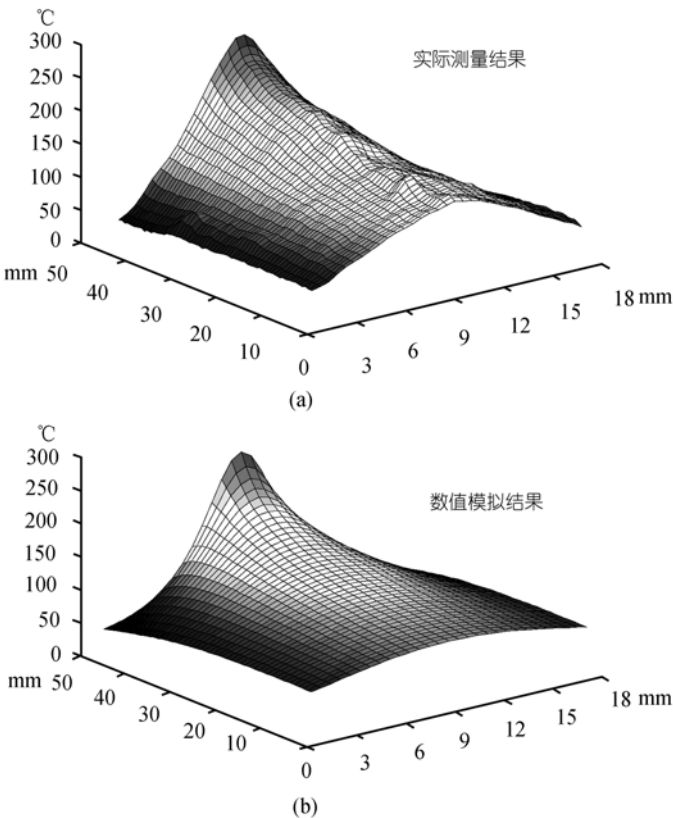


图 5 正面温度场校正结果

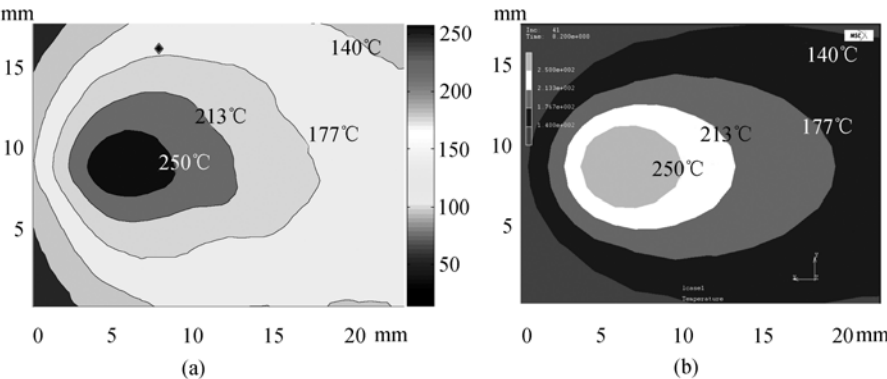


图 6 背面温度场校正结果

(a) 实际测量结果, (b) 数值模拟结果

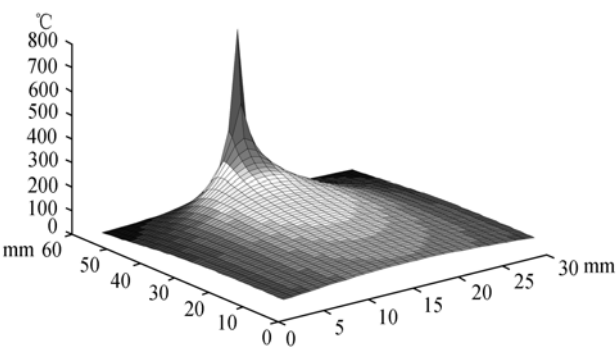


图 7 整体温度场分布

速度 600 mm/min, 电流 70A

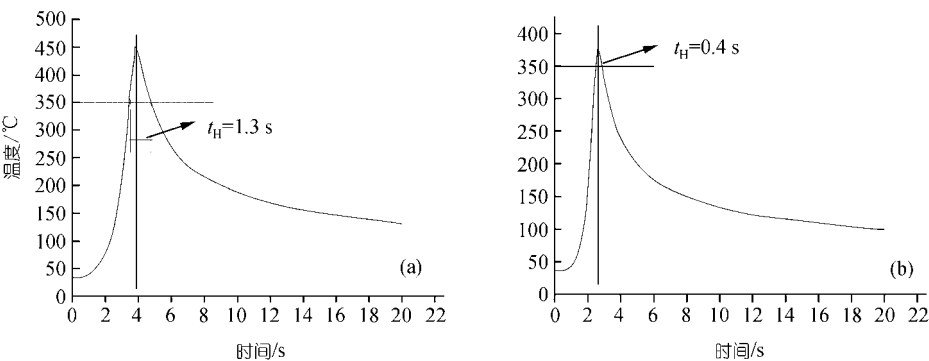


图 8 不同焊接参数下的焊接热循环曲线

(a) 400 mm/min, 70A; (b) 800 mm/min, 70A

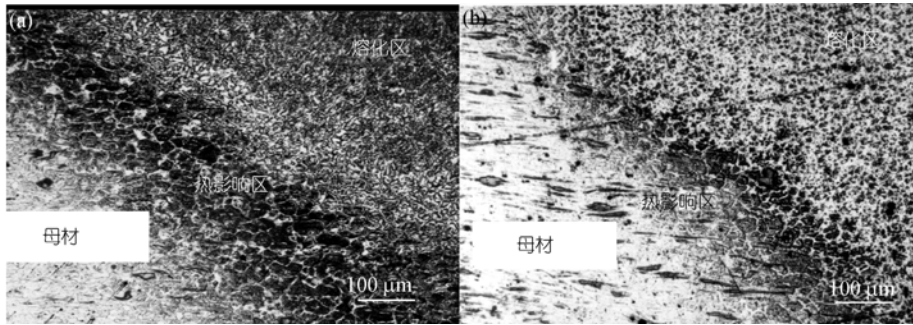


图 9 不同焊接参数下的微观组织形

(a) 400 mm/min, 70 A; (b) 800 mm/min, 70 A

3 结论

(i) 采用非接触、非致冷聚焦面技术红外热像仪测温, 在通过热电偶校正发射率 ϵ 前提下, 较为准确地获得了镁合金 AZ31 钨极氩弧焊接中的背面整体温度场与正面弧光干扰区外的温度场信息, 通过热像仪提取到红外热图中的温度场信

息形象直观的绘制了二维、三维温度场。

(ii) 通过正、背面温度场信息的红外测量为焊接数学计算提供了数据源, 并以此来校正焊接数学计算中的各个参量, 在此基础上进行的焊接数值模拟可得到弧光干扰区内的温度场信息, 最终得到整体温度场。

(iii) 通过红外温度场测定与焊接数值模拟结合后定量的计算了焊接热循环过程, 得到焊接高温停留时间和峰值温度等参数, 解释了不同焊接线能量下热影响区宽度与温度场的对应关系, 为合理控制焊接参数改善热影响区组织形态奠定了理论基础。

参 考 文 献

- 1 Mordike B L, Ebert T. Magnesium properties-applications-potential. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 302: 37~45 [\[DOI\]](#)
- 2 Radaj D. *Heat Effects of Welding*. New York: Springer-Verlag, 1992
- 3 张 华, 潘际銮, 廖宝剑. 焊接温度场的实时检测及等温线宽度闭环控制. *中国科学, E 辑*, 1998, 28(3): 23~29
- 4 张文钺. *焊接传热学*. 北京: 机械工业出版社, 1989
- 5 Nagarajan S, Banerjee P, Chen W H. Control of the welding process using infrared sensors. *IEEE Transactions on Robotics*, 1992, 8(1): 86~93 [\[DOI\]](#)
- 6 Nagarajan S, Chen W H, Chin B A. Infrared sensing of adaptive arc welding. *Welding Research Supplement*, 1989, 11: 462~466
- 7 Chin B A, Madsen N H, Goodling J S. Infrared thermography for sensing the arc welding process. *Welding Research Supplement*, 1983, 9: 227~234
- 8 Wilik H C, Kottilingam S, Zee R H. Infrared sensing techniques for penetration depth control of the submerged arc welding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 113: 228~233 [\[DOI\]](#)
- 9 Henrikson P, Ericsson M. Non-contact temperature measurements using an infrared camera in aerospace welding applications. *ASM Proceedings of the International Conference: Trends in Welding Research*, 2002. 930~935
- 10 Holm H, Kjeldsen H C E, Kristensen J K. A reference architecture for the design of an industrial temperature feedback welding control system. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 139: 499~504 [\[DOI\]](#)
- 11 Amin Al-Habaibeh, Robert Parkin. An autonomous low-Cost infrared system for the on-line monitoring of manufacturing processes using novelty detection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2003, 22: 249~258 [\[DOI\]](#)
- 12 Bicknell A, Smith J S, Lucas J. Infrared sensor for top face monitoring of weld pools. *Meas Sci Technol*, 1994, 3: 371~378 [\[DOI\]](#)
- 13 Farson D, Richardson R, Li X. Infrared measurement of base metal temperature in gas tungsten arc welding. *Weld Res Suppl*, 1998, 77(9): 396.
- 14 陶 军, 李冬青, 王明昱, 等. 焊接过程热传导系数反演法. *焊接学报*, 2004, 25(6): 87~89
- 15 Glickstein S S. Temperature Measurements in a Free Burning Arc. *Welding Research Supplement*, 1976. 222~229
- 16 Menart J, Heberlein J, Pfender E. Theoretical radiative transport results for a free-burning arc using a line-by-line technique. *J Phys D: Appl Phys*, 1999, 32: 55~63 [\[DOI\]](#)