

激光热丝焊电阻热控制及送丝参数优化

温 鹏^{1,2}, 郑世卿¹, 单际国^{1,2}, 冯振华¹

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 如何选择送丝参数从而获得合适电阻热是确保焊丝稳定过渡和高效熔覆的必要条件。文中通过高速摄像观察电阻热对焊丝过渡行为的影响,采用红外双色测温对焊丝温度进行测量。结果表明,导电嘴以下 30 mm 处焊丝的温度可作为最优电阻热的判据;利用数值模拟方法建立了焊丝非稳态导热模型,计算了导电嘴以下 30 mm 处焊丝的温度,从而可以预测最优电阻热对应的送丝参数。对不同送丝速度下最优电流比较发现,一定电阻热下加热电流的平方与送丝速度的比值为常数,可用于快速选择最优电阻热的送丝参数。

关键词: 激光热丝焊; 电阻热优化; 高速摄像; 红外双色测温; 数值模拟

中图分类号: TG 485 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2015)09-0017-04

0 序 言

激光热丝焊利用电阻热将焊丝预加热后送入熔池,减小了焊丝熔化对激光热量的依赖,不仅降低了焊丝与激光相对位置的精度要求,而且提升了填充效率,是一种有发展前景的激光填丝焊技术,目前已在表面堆焊^[1-3]和窄间隙焊接^[4]中得到应用。例如日本的日立-巴布科克公司利用激光热丝焊实现了坡口宽 5 mm 厚度 50 mm 的窄间隙焊接^[5]。

激光热丝焊焊丝获得的电阻热对接头成形和质量有显著影响。Shinozaki 等人^[6,7]研究发现由电阻热决定的焊丝温度是影响 TIG 热丝焊焊缝成形的主要原因。Ohnishi, Yamamoto, 温鹏等人^[8-11]针对送丝参数对激光热丝焊焊缝成形进行了试验研究,结果表明电流过小引起顶丝,焊缝成形较差;电流合适,使得焊丝在熔池内熔化时,焊缝成形良好;电流过大引起焊丝在熔池外发生熔断,造成飞溅、夹丝甚至焊缝不连续。

由此推测,激光热丝焊必然存在一个最优电阻热,既能充分利用电阻热,降低对激光的依赖,又不会使焊丝在熔池外熔断。目前尚未发现针对激光热丝焊过程中焊丝温度场的定量研究,尚未有人提出基于获得焊丝稳定过渡和高效熔覆的电阻热控制原则。文中采用试验和数值模拟相结合的手段,对最优电阻热及其送丝参数进行研究。

1 试验方法

母材为 Q235 低碳钢,板厚 3 mm。焊丝为 308L 不锈钢,直径为 1.2 mm,化学成分(质量分数)为 0.024% C, 0.42% Si, 1.65% Mn, 20.1% Cr, 10.33% Ni。焊丝固相线温度 1 398 °C, 液相线温度 1 454 °C。

激光热丝焊接系统采用 IPG 光纤激光器作为热源,波长 1.07 μm;采用 Panasonic 热丝电源对焊丝进行电阻加热,电源为恒流模式,正极接焊丝,负极接工件。激光功率 2 kW,光斑直径 4 mm,焊接速度 0.5 m/min,光丝距 1 mm,焊丝伸出长度 35 mm,焊丝倾角 70°,送丝速度 1~3 m/min 和加热电流 60~120 A。

采用半导体激光照明(功率 8.8 W, 波长 810 nm)配合高速相机(帧速 250 幅/s, 快门时间 0.5 ms)观察焊丝过渡行为。采用双色红外测温仪(响应光谱 0.75~1.1 μm, 量程 700~3 000 °C, 采样频率 20 Hz, 响应时间 10 ms)测量焊丝温度。

2 结果和讨论

2.1 最优电阻热判据与特征点温度测量

固定送丝速度 $v_f = 2$ m/min, 高速摄像机拍摄了加热电流从 80 A 变化到 100 A 时的焊丝过渡行为, 图 1 为典型过渡形态。加热电流 $I = 80$ A 时(图 1a), 熔池外焊丝不发生熔化, 加热后的焊丝稳定地过渡到熔池里; $I = 95$ A 时(图 1b), 接近熔池的焊丝前端焊丝直径变细, 说明此处焊丝发生了局部熔化, 此时焊丝仍然能够稳定过渡到熔池而不发生

熔断; $I = 100$ A 时(图 1c), 焊丝在进入熔池前发生熔断, 焊丝过渡不稳定。由此判断, $I = 95$ A 时, 电阻热为保证焊丝不发生熔断情况下的最大值, 即为最优电阻热。

当电阻热不断增加时, 焊丝前端发生了局部熔化, 焊丝局部熔化长度随电阻热增加而增长。一旦焊丝局部熔化长度超过临界值, 局部熔化段焊丝在电磁收缩力作用下发生缩颈, 进而导致焊丝发生熔断。由图 1b 可知, 焊丝不发生熔断的临界状态下焊丝在导电嘴以下 30 mm 处开始发生熔化。因此, 可将焊丝 30 mm 处的温度作为判断最优电阻热的特征点温度, 用 T_{30} 表示。当 T_{30} 等于焊丝固相线温度 1 398 °C 时, 电阻热为最优电阻热, 如果电阻热继续增加, 焊丝前端发生熔断, 焊丝加热停止, 焊接过程变得不连续。

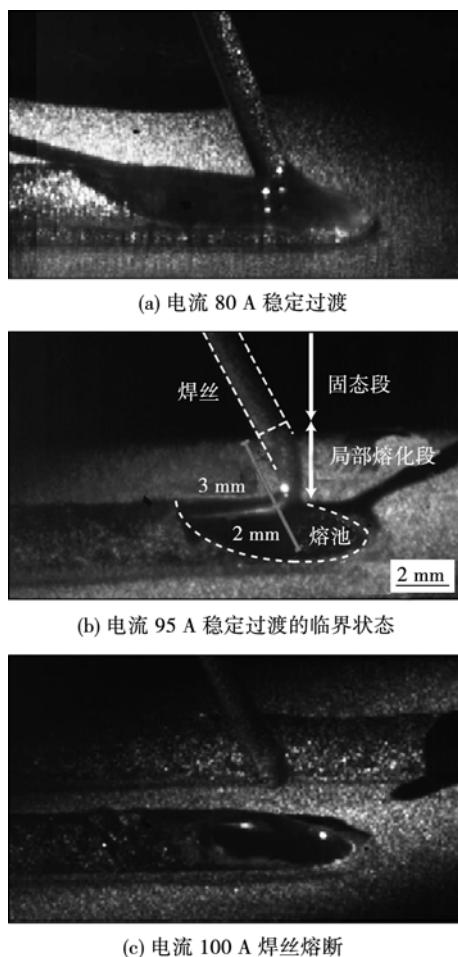


图 1 加热电流对焊丝过渡稳定性的影响

Fig. 1 Influence of current on wire transfer stability

焊丝处于运动状态, 不适合采用接触式测温。此外, 焊丝特征点接近熔池, 激光反射和熔池上方金属蒸气对红外测温有强烈干扰, 使得特征点温度 T_{30} 的测定成为难题。文中采用的红外双色测温具有可测

量温度高、测温精度高和响应速度快等优点, 但其响应光谱涵盖了光纤激光波长。为了避免激光反射对测温的影响, 测温时采用了脉冲激光模式, 在停光间隙采集焊丝特征点温度。

图 2 为 T_{30} 测量结果, 所用激光脉冲周期 1 s, 占空比 90%, $v_f = 2$ m/min, $I = 95$ A。在激光发射阶段, 强烈的激光反射致使测温结果溢出量程, 无法获得测量数据; 在停光间隙, 稳定地获得了焊丝特征点温度 T_{30} , 避免了激光反射对温度测量的干扰。试验测得 $T_{30} = 1 395$ °C, 接近焊丝的固相线温度 1 398 °C, 说明利用 T_{30} 温度作为最优电阻热的判据是合理的。

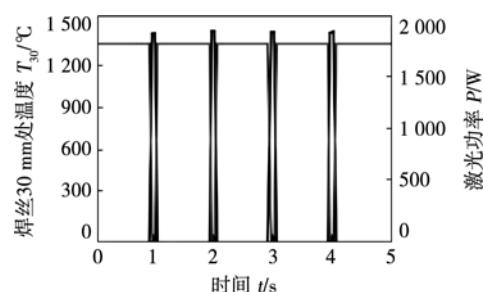


图 2 脉冲激光模式下特征点温度 T_{30} 的测量

Fig. 2 Measurement of characteristic point temperature T_{30} under pulsed laser mode

为了验证脉冲激光测温的可行性, 研究了激光占空比和峰值功率对特征点温度 T_{30} 的影响, 如图 3 所示。每个温度数据测量 3 次取平均值。结果表明, 激光占空比和峰值功率对 T_{30} 影响很小。因此可以认为, 采用脉冲激光代替连续激光来测量焊丝温度的方法是可行的。这说明熔池外焊丝温度由电阻热决定, 受熔池热传导的影响很小, 文献[10]也同样说明了这一现象。

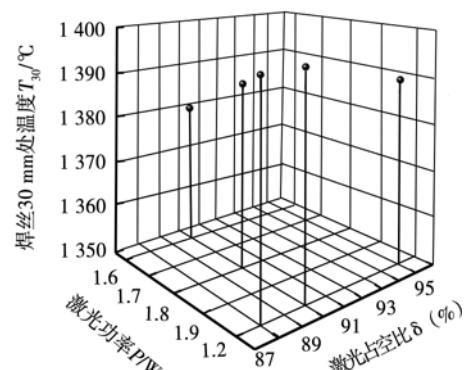


图 3 激光功率与占空比对焊丝特征点温度 T_{30} 的影响

Fig. 3 Influence of laser power and duty cycle on T_{30}

2.2 焊丝温度场建模和计算

对熔池外焊丝进行三维建模, 假设焊丝始终保

持连续均质固态, 焊丝内部只存在热传导而没有对流传热, 焊丝温度场属于非稳态导热, 可以通过求解导热微分方程获得, 即

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{\Phi}}{\rho c} \quad (1)$$

式中: T 表示温度; t 表示时间; λ 表示热导率; ρ 表示密度; c 表示比热容; $\dot{\Phi}$ 表示内热源强度(单位时间单位体积发出的热量). 内热源强度包括电阻热 Q_R 和焊丝前端受到激光反射产生热量 Q_F , Q_R 可由焦耳定律计算获得, 如式(2)所示; 采用半球形高斯热源模型对特征点以下的焊丝施加激光反射热, 如式(3)所示. 其中, ρ' 表示电阻率, I 表示电流, R 表示焊丝电阻, S 表示焊丝横截面积, dl 表示焊丝微元的长度, P_r 表示反射光功率, r 表示反射光作用半径, 根据高速摄像观察结果, r 取 2.5 mm. 对焊丝顶端(与导电嘴接触)、表面(与空气接触)和底面(与熔池接触)均采用第三类边界条件, 如式(4)所示. 其中 $i=1, 2, 3$; h_1, h_2, h_3 分别表示焊丝顶端、表面和底面的表面传热系数; $T_{ci}, T_{c2}, T_{c3}, T_w$ 分别表示导电嘴、熔池、空气和焊丝表面的温度.

$$Q_R = \frac{I^2 R}{dl} = \frac{I^2 \rho' dl}{S} = \frac{I^2 \rho'}{S^2} \quad (2)$$

$$Q_F = \frac{P_r}{\pi \sqrt{\pi} r^3} \exp \left(3 \frac{x^2 + y^2}{r^2} \right) \quad (3)$$

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = h_i (T_{ci} - T_w) \quad (4)$$

计算获得了最优电阻热($v_f = 2$ m/min, $I = 95$ A)时的焊丝温度场, 如图4所示. 在特征点以上, 焊丝温度在长度方向上大致呈线性分布. 焊丝温度的计算值与测量值非常吻合.

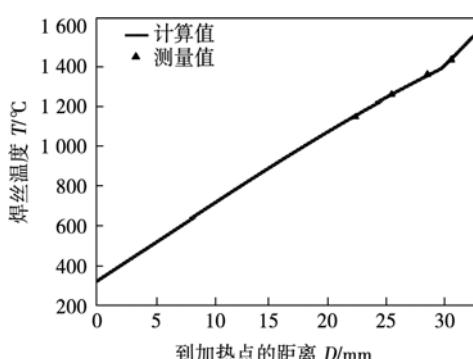


图4 最优电阻热下焊丝温度场的分布

Fig. 4 Wire temperature field under optimal resistance heat

图5为 $v_f = 2$ m/min 时, 不同加热电流下特征点温度 T_{30} 计算结果与测量结果的对比. 发现 T_{30} 随着

加热电流的增加而增加, T_{30} 计算值与试验值有较好的吻合. 当 $I = 100$ A 时, T_{30} 计算值超过了焊丝固相线温度, 在试验中则观察到了焊丝发生熔断. 上述结果说明所建模型可以用来准确计算不同送丝参数下的焊丝特征点温度.

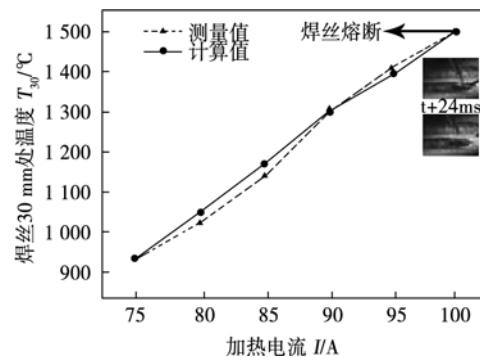


图5 不同加热电流下 T_{30} 计算值与测量值比较

Fig. 5 Comparison between calculated T_{30} and measured T_{30} under different currents

2.3 最优电阻热及其送丝参数选择

用上述焊丝温度场模型计算出不同送丝参数下的 T_{30} 后, 将其与焊丝固相线温度进行比较, 可判断电阻热是否达到最优电阻热, 同样利用该模型还可获得最优电阻热对应的送丝参数. 针对不同送丝速度 v_f , 将 1 A 作为电流变化最小步长, 采用二分法计算获得了各送丝速度下 $T_{30} = 1398$ °C 时电流值, 如表1所示. 对各组参数进行焊丝温度测量, 发现 T_{30} 值略低于焊丝固相线温度, 最大误差不超过 30 °C, 如图6所示. 激光热丝焊接试验发现, 表1各组参数均实现了稳定的焊丝过渡, 且焊缝成形良好. 由此认为, 采用表1中送丝参数获得的电阻热接近最优值.

表1 最优电阻热对应的送丝参数

Table 1 Wire feeding parameters for optimal resistance heat

送丝速度 v_f / (m·min ⁻¹)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
电流 I / A	67	82	95	106	116

通过数据拟合发现, 表1中送丝参数满足式(5)所示关系, 即电流平方与送丝速度的比值为常数. 根据焦耳定律, 焊丝电阻热 Q 由焊丝电阻率 ρ' 、直径 d 、焊丝伸出长度 l 、加热电流 I 和送丝速度 v_f 决定, 如式(6)所示.

$$\frac{I^2}{v_f} = 4512 \quad (5)$$

$$Q = I^2 R t = I^2 \rho' \frac{l}{S} \frac{l}{v_f} = \rho' \frac{4l^2 I^2}{\pi d^2 v_f} = K \frac{I^2}{v_f} \quad (6)$$

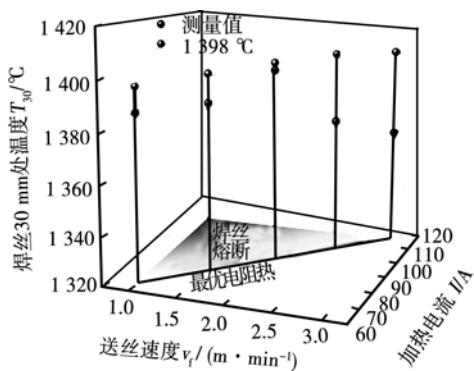


图6 最优送丝参数下 T_{30} 测量值与固相线温度比较

Fig. 6 Comparison between measured T_{30} under optimal wire feeding parameters and wire solidus

对于同一材质焊丝(电阻率 ρ' 相同),若焊丝直径 d 和焊丝伸出长度 l 固定,式(6)中 K 值为常数. 将式(5)带入式(6)可知,对于相同焊丝和焊丝伸出长度,最优电阻热为定值. 因此,当知道最优电阻热对应的某一组送丝参数后,根据电流平方与送丝速度的比值为常数,推导出满足最优电阻热的其它送丝参数组合.

3 结 论

(1) 对于激光热丝焊,焊丝送入熔池前被加热至不发生熔断的临界状态时,电阻加热效率最高,此时的电阻热为最优值. 结合高速摄像和双色红外测温方法,发现导电嘴以下 30 mm 处可作为判断最优电阻热的特征点,当该点温度(T_{30})等于焊丝固相线温度时,电阻热为最优值.

(2) 建立了非稳态导热模型用于计算焊丝温度场,获得了不同送丝参数下的 T_{30} ,计算结果与试验结果基本吻合,说明该模型可以准确计算 T_{30} .

(3) 通过 T_{30} 计算值与焊丝固相线温度比较,可判断不同送丝参数下电阻热是否为最优. 在文中试验条件下,当焊丝材质、直径及其伸出长度不变且电阻热为最优时,送丝速度与加热电流之间满足关系: $I^2/v_f = 4512$,这一关系式可用于快速选择最优送丝参数.

参考文献:

[1] Janne N, Jouko R, Jonne N. Comparison of laser cladding with

powder and hot and cold wire techniques[C]// In: Laser Institute of America. ICALEO 2006 - 25th International Congress on Applications of Laser and Electro Optics Congress Proceedings. Scottsdale: Laser Institute of America, 2006: 634 - 637.

- [2] Janne N, Jouko R, Jonne N. Hot-wire cladding process studies [C]// In: Laser Institute of America. ICALEO 2007 - 26th International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics-Congress Proceedings. Orlando: Laser Institute of America, 2007: 947 - 952.
- [3] 肖荣诗, 左铁钏, Günter Ambrosy. 电流强化铝合金 CO_2 激光焊接[J]. 中国激光, 2004, 31(3): 359 - 362.
- Xiao Rongshi, Zuo Tiechuan, Günter Ambrosy. Investigation on current enhanced CO_2 laser welding of aluminum[J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(3): 359 - 362.
- [4] 朱先亮. 高强钢厚板激光填丝多层焊特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [5] Okagaito T, Watanabe H, Shinozaki K. Development of narrow gap hot-wire laser welding process for heat-resistant steel pipe for boiler[C]// National Welding Conference of Japan. Osaka: Japan Welding Society, 2012: 406 - 407.
- [6] Shinozaki K, Yamamoto M, Nagamitsu Y. Welding phenomenon during ultra-high-speed GTA welding method using pulse-heated hot-wire[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2009, 27(2): 22 - 26.
- [7] Shinozaki K, Yamamoto M, Mitsuhashi K. Bead formation and wire temperature distribution during ultra-high-speed GTA welding using pulse-heated hot-wire[J]. Welding in the World, 2011, 55(3/4): 12 - 18.
- [8] Ohnishi T, Kawahito Y, Katayama S. High-power and high-brightness laser butt welding with using hot wire for thick high-strength steel plate[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2011, 29(1): 41 - 47.
- [9] Yamamoto M, Shinozaki K, Kadoi K. Development of hot-wire laser welding method for lap joint of steel sheet with wide gap[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2011, 29(3): 58 - 61.
- [10] Yamamoto M, Shinozaki K, Kadoi K. Development of high-efficiency high-quality hot-wire laser fillet welding process[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2011, 29(3): 62 - 65.
- [11] 温 鹏, 郑世卿, 荻崎贤二. 填充热丝激光窄间隙焊接的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1 - 6.
- Wen Peng, Zheng Shiqing, Shinozaki Kenji. Experimental research on laser narrow gap welding with filling hot wire[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(11): 1 - 6.

作者简介: 温 鹏,男,1981年出生,博士,副教授. 主要从事焊接和激光加工方面的研究. Email: wenpeng@tsinghua.edu.cn

通讯作者: 单际国,男,博士,教授,博士研究生导师. Email: shan-jg@tsinghua.edu.cn