

送丝速度对铝合金脉冲 MIG 焊能量输入及温度场数值仿真的影响

黄麒麟, 张延松

(上海交通大学 上海市复杂薄板结构数字化制造重点实验室, 上海 200240)

摘要: 由于脉冲 MIG 焊接热输入量低以及自动化程度高, 其被广泛应用于复杂薄壁结构件的焊接中。针对铝合金脉冲 MIG 焊, 在焊机一元化控制系统基础上建立了送丝速度、焊接电参数与平均焊接功率的关系, 并根据此关系建立了不同送丝速度下的温度场仿真模型, 对比模拟和实测结果发现, 焊接接头的熔深大小以及变化趋势符合良好。最终以焊接接头的熔深为指标得到了 6005A 铝合金结构脉冲 MIG 焊接的最佳送丝速度为 7.0 m/min。

关键词: 脉冲 MIG 焊; 送丝速度; 铝合金; 数值仿真

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20192952

中图分类号: TG457.14; TG444+.74

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2021)1-0112-05

Influence of Wire Feeding Speed on Heat Input and Temperature Field Numerical Simulation of Pulse MIG Welding for Aluminum Alloy

HUANG Qilin, ZHANG Yansong

(1. Shanghai Key Laboratory of Digital Manufacture for Thin-walled Structures, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Pulse MIG welding has been widely applied in complex thin-walled structure parts because of its low heat input and high automatization. Aiming at pulse MIG welding of aluminum alloy, relationships among wire feeding speed, electric parameters and average welding power were established based on the unified control system of welding machine. Furthermore, simulation model of temperature field under different wire feeding speeds were built according to above relationship. Penetration depth values and tendency are well agreed with experiment results by comparing the results of simulation and experiment. Finally, best wire feeding speed is set to be 7.0 m/min for MIG welding of 6005A aluminum alloy structure according to penetration depth.

Key words: pulse MIG welding; wire feeding speed; aluminum alloy; numerical simulation

脉冲熔化极惰性气体保护焊 (pulse metal inert gas arc welding, 脉冲 MIG 焊) 通过峰值电流维持“一脉一滴”的熔滴过渡, 基值电流维持电弧的稳定燃烧, 相较于铝合金的 MIG 焊接方法, 具有更强的适应性^[1]。但是其调节参数多且相互耦合, 学者们为了提高脉冲 MIG 焊的焊接质量与稳定性, 对其做了大量相关研究^[2-3]。而建立一元化参数^[4]控制系统, 只改变一个参数, 其他参数根据专家数据库协调改变, 就为脉冲 MIG 焊的参数调整提供了新的思路。国外 Fronius 等公司开发的数字化脉冲 MIG 焊机就已经带有覆盖焊接参数的专家数据库^[5]。国内蒋成燕^[6]等人通过正交试验建立了以送丝速度为调节量的一元化数据库。但是一元化数据库仅建立了送丝速度与

焊接电流、电压等参数的关系, 送丝速度未能与焊接过程的能量输入建立联系, 因此基于一元参数控制的脉冲 MIG 焊的焊接温度场数值仿真的能量输入难以直接确定。Praveen 等^[7]总结了脉冲 MIG 焊接的常见波形及其平均电流、平均功率的表达式, 但是未解决一元化参数与焊接能量输入关系的问题。

针对上述问题, 围绕脉冲 MIG 焊接中的送丝速度这一关键参数, 根据焊机内置的一元化参数调节系统与焊接能量输入的推导, 建立了送丝速度、焊接电流电压参数、平均焊接功率的关系, 并根据此关系建立了不同送丝速度下的温度场数值仿真模型, 以熔深为指标确定了铝合金结构的最佳送丝速度, 并以试验结果验证了数值仿真的正确性。

1 送丝速度对焊接能量输入影响

1.1 送丝速度与焊接电参数关系

本研究采用的焊机为 LSQ5 型号的 MIG 焊机,

收稿日期: 2019-10-13

作者简介: 黄麒麟 (1995-) 男, 四川德阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为复杂薄壁结构制造质量控制;

E-mail: huangqilin520@126.com

可提供多种脉冲模式选择,焊接过程主要采用 I 型脉冲模式,是基于送丝速度的一元化参数调节系统。该焊接过程电流变化曲线示意图如图 1 所示。脉冲 MIG 焊接一个脉冲周期时间为从 t_0 时刻到 t_4 时刻,分为电流上升、峰值电流保持、电流下降、基值电流保持四个阶段。焊接过程中影响能量输入的电流控制参数包括峰值时间 t_p 、脉冲周期时间 t_c 、峰值电流 I_p 、基值电流 I_b 、峰值电流保持时间宽度比 R_p 、基值电流保持时间宽度比 R_b 。而焊接电压在整个焊接过程保持为一恒定值,其中电压控制参数包括电压 U_0 、电压补偿 U_c 。

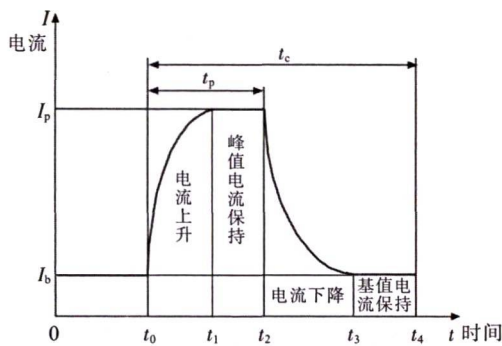


图 1 脉冲 MIG 焊接电流曲线
Fig.1 Welding current curve of pulse MIG

以直径为 1.2 mm 的 ER 4043 (AlSi5) 铝合金焊丝对应的一元化参数调节系统为例,调节送丝速度是控制脉冲 MIG 焊接过程的主要方法。改变送丝速度后,焊机会根据内置专家系统自动协调匹配焊接电流和电压相关参数,其余电参数保持不变。调节送丝速度从 0~10 m/min,即能得到如图 2 所示的送丝速度与基值电流、电压的关系曲线图。随着送丝速度的增加,单位时间内焊丝金属填充体积越大,需要更高的能量输入熔化焊丝与母材形成焊缝,反映到脉冲 MIG 焊接参数上是基值电流与电压参数的增大。

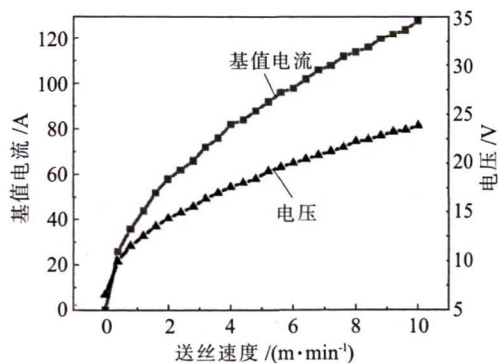


图 2 送丝速度与基值电流、电压曲线
Fig.2 Curves of base current, voltage and wire feeding speed

1.2 焊接电参数与能量输入关系

在脉冲 MIG 焊接过程中,送丝速度的改变并不直接影响能量输入,而是通过专家系统自动协调匹配基值电流和电压来影响焊接功率输入。由图 1 可知,脉冲 MIG 焊在一个脉冲周期中电流变化分为四个阶段,其中峰值电流保持阶段与基值电流保持阶段的电流为恒定值,分别为峰值电流与基值电流;电流上升与电流下降阶段电流曲线以二次曲线拟合,保证阶段结束处电流关于时间导数连续以实现平滑过渡。一个脉冲周期中四个阶段的焊接电流随时间变化的拟合如式(1)所示:

$$I = \begin{cases} \frac{I_b - I_p}{(t_1 - t_0)^2} (t - t_0)^2 + I_p & t_0 \leq t < t_1 \\ I_p & t_1 \leq t < t_2 \\ \frac{I_b - I_p}{(t_3 - t_2)^2} (t - t_3)^2 + I_b & t_2 \leq t < t_3 \\ I_b & t_3 \leq t < t_4 \end{cases} \quad (1)$$

在脉冲 MIG 焊的整个脉冲周期中,焊接电压保持恒定,如式(2)所示:

$$U = U_0 + U_c \quad (t_0 \leq t < t_4) \quad (2)$$

脉冲周期的平均焊接功率可以分四阶段,由电压、电流的乘积积分后求平均值获得,即 $P = \int_{t_0}^{t_4} U I dt / t_c$,并以系统中的焊接电参数替换表达可得平均焊接功率,如式(3)所示:

$$P = \frac{1}{t_c} \cdot (U_0 + U_c) \cdot \{ I_p t_p + I_b (t_c - t_p) + 1/3 (I_p - I_b) [(t_c - t_p) \cdot (1 - R_b) - t_p (1 - R_p)] \} \quad (3)$$

焊接电参数均会影响脉冲 MIG 焊的平均焊接功率,其中基值电流与电压由送丝速度决定,其余焊接电参数在送丝速度调整过程中保持不变,如表 1 所示。因此,送丝速度通过影响基值电流与电压参数来决定脉冲 MIG 焊接的能量输入。

2 焊接试验

为了验证送丝速度的影响,本文脉冲 MIG 焊研究实验对象为某动力电池包下壳体框架局部,如图 3 所示,由 3 mm 厚的后框部件型材与 2.5 mm 厚的纵梁部件型材构成,材料为 6005A 铝合金。焊机为 LSQ5 型号的 MIG 焊机,T 型接头焊接工艺为脉冲 MIG 焊,脉冲类型为 I 脉冲,选用直径 1.2 mm 的 ER 4043 (AlSi5) 铝合金焊丝,干伸长度为 15 mm,焊接夹角为 45°,焊接方向如箭头所指方向,焊缝长度为

表 1 脉冲 MIG 焊接工艺参数
Tab.1 The process parameters of pulse MIG

峰值时间 t_p / ms	脉冲周期时间 t_c / ms	脉冲电流 I_p / A	峰值电流保持时间宽度比 R_p (%)	基值电流保持时间宽度比 R_b (%)	电压补偿 U_c / V
2	100	250	80	20	0

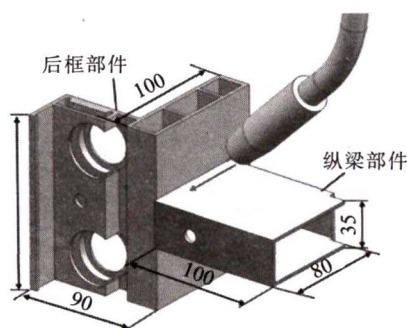


图 3 铝合金结构示意图 (mm)
Fig.3 Schematic of aluminum alloy structure (mm)

40mm, 保护气体为 99.999% 的氩气。三组试验的送丝速度、基值电流、电压与焊接速度如表 2 所示, 其余工艺参数与表 1 保持相同。

表 2 实验焊接工艺参数
Tab.2 The process parameters of welding experiment

组数	送丝速度 v_f / (mm·min ⁻¹)	基值电流 I_b / A	电压 U_0 / V	焊接速度 v / (mm·s ⁻¹)
1	5.5	94	19.4	8
2	7.0	106	21.0	8
3	8.5	118	22.6	8

焊接后试件经切割、制样、磨抛后用 Keller 试剂腐蚀 20s, 在光学显微镜下观察焊缝区形貌与金相组织, 最后将试验测量结果与温度场有限元模型结果进行对比, 验证温度场数值模拟的准确性。

3 温度场数值仿真建模

3.1 建模与网格划分

几何模型在 UG 中建立, 导入 HyperMesh 进行网格的划分。采用 4 节点 4 面体单元, 网格尺寸由焊缝周围的 0.5mm 逐渐过渡至最大 3mm, 并确保连接处共节点。最终整个结构共有 92885 个节点, 398096 个单元, 有限元模型网格划分如图 4 所示, 前处理以及计算在 Simufact.welding 焊接仿真分析软件中完成。

3.2 热源模型

热源模型选择双椭球热源^[8], 此种热源既能反映熔池前后不对称热流分布, 也能模拟具有一定熔深的焊接过程, 符合脉冲 MIG 焊的焊接过程特点,

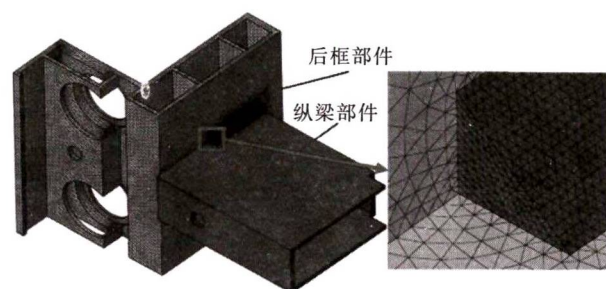


图 4 铝合金结构有限元模型网格划分
Fig.4 Mesh generation of finite element model of aluminum alloy structure

其热流分布的三维模型如图 5 所示, a_f 、 a_r 、 b 和 d 为热源的几何形状参数。

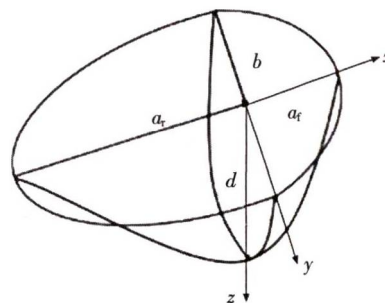


图 5 双椭球热源热流分布模型
Fig.5 Double ellipsoid heat source model

前半椭球热流分布函数为:

$$q_f(x, y, z, t) = \frac{f_f \eta P \sqrt{3}}{\pi \sqrt{\pi} a_f b d} \exp \left[-3 \left(\frac{x-vt}{a_f} \right)^2 - 3 \left(\frac{y}{b} \right)^2 - 3 \left(\frac{z}{d} \right)^2 \right] \quad (4)$$

后半椭球热流分布函数为:

$$q_r(x, y, z, t) = \frac{f_r \eta P \sqrt{3}}{\pi \sqrt{\pi} a_f b d} \cdot \exp \left[-3 \left(\frac{x-vt}{a_f} \right)^2 - 3 \left(\frac{y}{b} \right)^2 - 3 \left(\frac{z}{d} \right)^2 \right] \quad (5)$$

式中: η 为焊接热效率, 取 0.85; f_f 和 f_r 分别为前后椭球的能量分配系数; v 为焊接速度; P 为焊接功率。本模型主要由送丝速度决定。

3.3 材料热物理属性与热边界条件

焊接结构材料为 6005A 铝合金, 焊丝材料为 4043 铝合金, 两者随温度变化的热物理属性(热导

率、比热容)曲线如图 6 所示,焊接时熔池凝固过程对温度场有影响,故两者的相变潜热取为 3.9×10^5 J/kg,6005A 铝合金固相线温度与熔点分别取为 585°C 与 659°C ,4043 铝合金固相线温度与熔点分别取为 570°C 与 590°C 。铝合金结构在焊接时与周围环境的散热主要考虑对流传热以及辐射传热,对流换热系数取为 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,辐射换热系数取为 0.6,环境温度取为 20°C 。

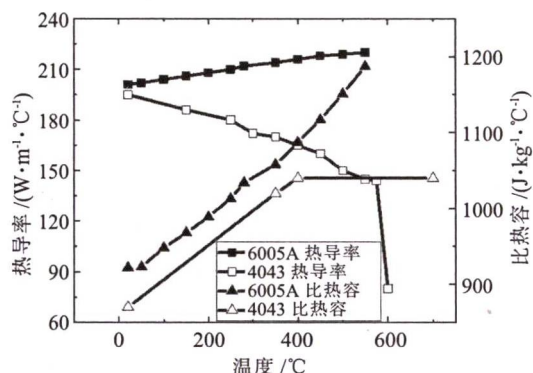


图 6 铝合金热物性曲线

Fig.6 Thermophysical property curves of aluminium alloy

4 结果与讨论

4.1 送丝速度与平均焊接功率的关系

送丝速度的改变通过一元化参数调节系统直接影响基值电流与电压,其关系如图 2 所示。基值电流与电压及其他焊接电参数根据式(3)决定平均功率。最终可得送丝速度与平均焊接功率曲线如图 7 所示。在焊接温度场有限元建模中,焊接热源模型虽然可能存在不同的热流分布,但是模型核心输入都是焊接功率。针对一元化参数调节系统建立送丝速度与平均焊接功率的关系后,有限元模型中就能根据送丝速度快速确定热源模型的功率。焊接试验与温度场数值仿真中三组送丝速度与其对应的平均焊接

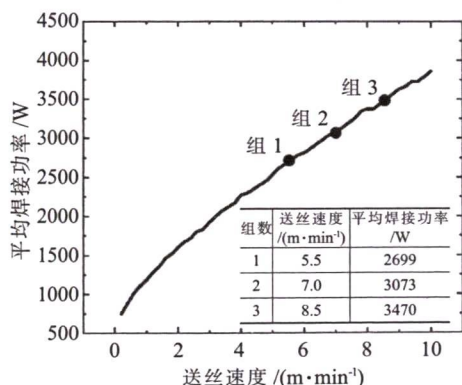


图 7 送丝速度与平均焊接功率曲线

Fig.7 Curve of average wire feeding speed and welding power

功率可直接在图 7 中得到。

4.2 温度场数值模拟

图 8 为不同送丝速度下铝合金部件截面焊缝形貌的仿真与试验结果。仿真结果中以在最高温度场中的焊丝的熔点为边界界定焊缝区,试验结果中以焊缝与母材间的熔合线为边界界定焊缝区,并分别测量统计焊缝纵向以及横向熔深尺寸 b_1 、 b_2 ,熔深结果如图 9 所示。仿真结果与试验结果符合较好,能够较好反映熔深变化趋势,其中纵向与横向的工件厚度分别为 3 mm 与 2.5 mm。

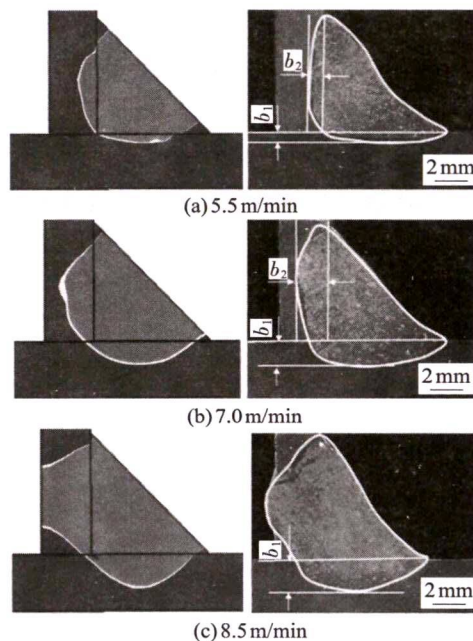


图 8 不同送丝速度下仿真与试验焊缝形貌对比

Fig.8 Comparison of weld morphologies obtained by simulation and experiment under different wire feeding speeds

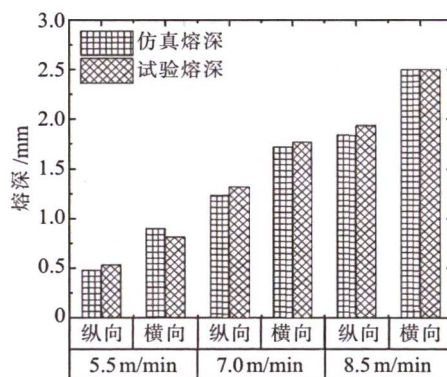


图 9 仿真与试验焊缝熔深对比

Fig.9 Comparison of penetration depth obtained by simulation and experiment

当送丝速度为 5.5 m/min 时,仿真的纵向熔深与横向熔深为 0.48 mm 与 0.81 mm,焊透率仅为 16% 与 32%,纵向熔深焊透率小于标准^[9]要求的 25%,横

向熔深仅略高于临界值,熔深过浅会导致焊接接头强度不足。当送丝速度为 8.5 m/min,焊接接头有不错的纵向熔深表现,为 1.94 mm,但是熔敷金属已经超过工件厚度,出现了焊透背面凸出的缺陷,也会影响部件的使用性能。由此可见,送丝速度的大小会直接影响焊接接头熔深深度,但过小与过大的送丝速度都会使焊接接头难以满足生产使用要求。当送丝速度为 7.0 m/min 时,纵向熔深与横向熔深为 1.32 mm 与 1.77 mm,焊透率为 44% 与 71%,两侧焊透率都远大于标准要求的 25%,也未出现焊透背面凸出的缺陷。因此,使用 ER4043 焊丝以脉冲 MIG 工艺焊接此铝合金结构时,一元化参数调整系统中送丝速度 7.0 m/min,对应基值电流 106 A,电压 21.0 V 为最佳焊接工艺参数。

此外,在同一送丝速度下,横向熔深总是大于纵

向熔深,这是由于横向工件厚度为 2.5 mm 小于纵向厚度 3 mm,热量在铝合金工件中横向传递速度大于纵向方向,横向方向会具有更深的熔深。因此在送丝速度调整的过程中,纵向更易出现熔深不足的缺陷,而横向更易出现焊透背面凸出缺陷,此结果在送丝速度 5.5 m/min 与 8.5 m/min 的仿真与试验结果中分别得到印证。

4.3 微观组织

图 10 为 T 型焊接接头金相组织形貌,6005A 铝合金与焊缝金属间存在轮廓清晰的熔合线。焊缝组织为典型铸态组织,靠近熔合线附近为沿散热温度梯度方向生长的柱状晶,焊缝中心分布着树枝状的等轴晶。6005A 铝合金母材组织为 α -Al 基体上析出少量棒状和点状的强化相。焊缝与母材组织的明显差异便于根据熔合线明确界定焊缝区,以进行焊缝

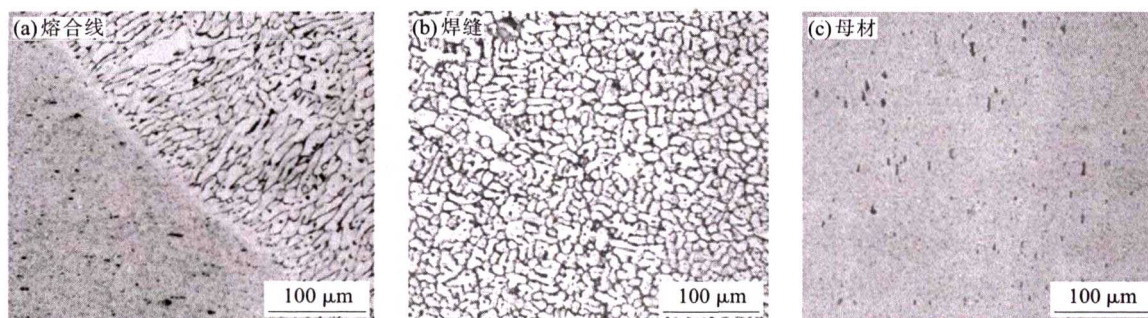


图 10 焊接接头微观组织 Fig.10 Microstructure of welded joint

形貌几何尺寸的测量。

5 结论

(1)送丝速度通过一元化参数调节系统中基值电流与电压的协调匹配影响脉冲 MIG 焊接的平均焊接功率,平均焊接功率随着送丝速度的增大而增大。

(2)温度场数值仿真模型可以根据送丝速度与平均焊接功率的关系快速确定热源模型功率,且仿真结果与试验结果吻合较好,验证了方法的有效性。

(3)铝合金结构在送丝速度调整的过程中,纵向更易出现熔深不足的缺陷,而横向更易出现焊透背面凸出缺陷,最佳送丝速度为 7.0 m/min,对应基值电流为 106 A,电压为 21.0 V。

参考文献:

[1] Pal K, Pal S K. Effect of pulse parameters on weld quality in pulsed gas metal arc welding: a review[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2011, 20(6):918-931.

[2] Li J, Li H, Wei H, et al. Effect of pulse on pulse frequency on welding process and welding quality of pulse on pulse MIG welding-brazing of aluminum alloys to stainless steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(1-4):51-63.

[3] 徐敏,薛家祥,黄雯锦. 铝合金薄板脉冲 MIG 焊低热输入工艺[J]. 焊接学报, 2017, 38(6):110-114.

[4] 薛家祥,姜乘风,张晓莉,等. 基于最小二乘法的脉冲 MIG 焊参数一元化调节[J]. 焊接学报, 2014, 35(8):75-78.

[5] Hirata Y. Pulse arc welding [J]. Journal of Japan Society, 2002, 71(3):115-130.

[6] 蒋成燕,陈克选,陈涛,等. 脉冲 MIG 焊参数一元化试验研究[J]. 电焊机, 2013(7):26-28.

[7] Praveen P, Yarlagadda P K D V, Kang M J. Advancements in pulse gas metal arc welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164-165:1113-1119.

[8] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1984, 15(2):299-305.

[9] 铝及铝合金弧焊: SMTC 5 140 009-2012 (IV) [S]. 2012.