

铝合金高速 FSW 热输入模型及焊缝峰值温度研究

万心勇¹, 胡志力¹, 庞秋^{1,2}, 詹博异¹

(1. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430070)

(2. 武汉东湖学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 将焊接速度大幅度提升至 1000 mm/min, 在不同焊接转速下(1000~1900 r/min)对 3 mm 厚退火态 7075 铝合金薄板进行搅拌摩擦焊接实验, 并用高精度红外热像仪测量焊缝温度, 研究了焊接转速对焊缝峰值温度、焊缝外观以及接头组织的影响规律。发现当转速低于 1600 r/min 时, 随着转速的升高, 焊缝峰值温度逐渐升高, 在 1600 r/min 时达到最高, 接近 500 °C。1600 r/min 以后, 峰值温度在 480~495 °C 之间波动, 并有轻微下降的趋势。这一结果与已有热输入模型及焊缝峰值温度公式不相符合。此外, 综合考虑焊缝表面以及接头微观组织, 发现当转速在 1400, 1500, 1600 r/min 时, 焊接质量达到最佳。对材料摩擦机制进行分析, 发现摩擦系数随焊接转速和焊接温度的变化而变化, 从而在热输入模型中引入摩擦系数变量, 最终建立了稳态焊接时峰值温度与焊接转速的关系公式。

关键词: 搅拌摩擦焊; 高焊速; 摩擦系数变量; 热输入模型; 峰值温度公式

中图分类号: TG453+.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)06-1990-06

铝合金是一种较为理想的轻量化材料^[1,2], 实际应用中, 连接是一个难点^[3,4]。目前铝合金熔焊连接技术仍存在诸多问题^[5], 如较大的残余变形及残余应力影响焊件的制造精度和使用性能。而搅拌摩擦焊(friction stirring welding, FSW)是一种固相连接技术, 特点是接头残余应力小、变形小, 焊接能耗低, 对环境无污染^[6-8], 在航空航天领域已经取得了广泛应用^[9-11]。

目前关于 FSW 的研究多集中在热源模型上^[12-16], 因为热输入量影响材料的流动、焊缝晶粒尺寸、沉淀相的数量与分布, 决定了焊接质量。在给定搅拌针结构以及轴肩下压量的情况下, Arbogast 和 Hartley^[17]对铝合金 FSW 峰值温度进行研究, 在分析大量实验数据后, 定义了一种热输入指数 HI, 如式(1), 用来表示焊接速度和转速对热输入的影响, 并得出焊接峰值温度与热输入指数的关系表达式(2):

$$HI = \frac{\omega^2}{v \times 10^4} \quad (1)$$

$$\frac{T_p}{T_m} = kHI^\alpha \quad (2)$$

式中, ω 为轴肩角速度, v 为焊接速度, T_p 为峰值温度, T_m 为合金熔点, α 为指数 (0.01~0.06), k 为常数

(0.65~0.75)。

以 2024-T3 铝合金为研究对象, Zhang 和 Li 等人^[18]采用统计的方法, 总结分析已有文献中的实验数据, 得出了一个新的焊接峰值温度表达式(3), 其中热输入指数 q 和式(1)颇为相似。并给出结论: 2024 铝合金最佳的焊接温度为 400~465 °C, 相对应的焊接参数为 $v=175\sim350$ mm/min, $n=800\sim1200$ r/min, 指出在此范围内可以得到最高抗拉强度为 458 MPa 的焊缝, 约为母材的 94.6%。

$$\frac{T_p}{T_s} = kq^\alpha \exp^{\beta/q} + \frac{T_r}{T_s} \quad (3)$$

$$q = \frac{r\omega^2}{v \times 10^4} \quad (4)$$

式中, T_p 为峰值温度, T_r 为室温, T_s 为固相线温度, r 为轴肩半径, k , α 和 β 是常数。

Qian 等人^[19]基于材料流动建立数值模型来进行铝合金 FSW 焊接工艺窗口的研究, 发现模型得出的最佳焊接参数与实验结果相吻合, 但窗口内的焊接速度都位于 500 mm/min 以下, 相比目前汽车制造中商用的连接技术, 如 TIG、MIG、激光焊等焊接速度可以达到 3 m/min^[20], FSW 较低的焊接速度极大地限制了

收稿日期: 2018-06-08

基金项目: 国家自然科学基金 (51775397, 51405358); 中国汽车产业创新发展联合基金 (U1564202); 新能源汽车科学与关键技术学科创新引智基地资助 (B17034); 上海市复杂薄板结构数字化制造重点实验室开放课题 (2017002); 武汉理工大学研究生优秀学位论文培育项目 (2017-YS-046)

作者简介: 万心勇, 男, 1991 年生, 硕士生, 武汉理工大学汽车工程学院, 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430070, 电话: 027-87856733, E-mail: wy126wxy@126.com

其在汽车工业上的应用。

本研究将 FSW 焊接速度提高至 1000 mm/min，发现现有的经典热输入模型已经无法适用于相对应的焊接转速的选择，因此采用退火态 7075 铝合金进行高焊速 FSW 工艺实验，并基于动态摩擦系数，建立新的高焊速 FSW 热输入模型及焊接工艺窗口，为实现高焊速铝合金 FSW 的实际工业应用提供技术支持。

1 实验

实验材料为退火态 7075 铝合金轧制板材，成分和性能如表 1 和表 2，尺寸为 300 mm×80 mm×3 mm。所用主要设备如图 1 所示，其中测温设备为美国 FOTRIC-226 红外热像仪，测温精度为±2 °C。

搅拌头的轴肩半径 6 mm，锥形带螺纹搅拌针根部半径 2.5 mm，长度 2.78 mm，下压量 0.2 mm。固定焊接速度为 1000 mm/min，在不同焊接转速下(1000~1900 r/min)，进行多组焊接实验。与以往使用热电偶测量某一点的焊接温度不同，本实验采用高精度红外热像仪录制整个焊接过程，包括搅拌针旋转扎入、进给焊接及搅拌针旋转拔出 3 个阶段。使用红外热像仪之前，设置相关参数，待搅拌头和待焊板材的最高温度恢复到环境温度后，启动焊接设备，并对焊接过程进行录制。

2 结果与讨论

2.1 不同焊接转速下焊缝峰值温度分析

图 2 是转速为 1200 r/min 时峰值温度变化曲线。由变化特征可以将焊接过程分为 5 个阶段。实验研究的重点是稳态焊接峰值温度随转速的变化情况，所以需要焊接行程进行重点分析，如图 3a 所示。当搅拌头旋转摩擦停留 5 s 预热结束后，瞬间的焊接进给速度会造成搅拌头和待焊接板材的冲击震动，也即在焊接行程起始阶段峰值温度波动较大。同样的，当焊接行程结束时，也存在类似的情况。所以在焊接行程中选取稳态焊接区间，并在此区间测温的原则是：根据焊接行程中峰值温度曲线的波动情况，去掉焊接行程的起始段和结束段，区间内的温度波动应尽量小。

采取上述原则，导出选定的测温区间内的各个时刻点的峰值温度值，计算算术平均数值，可得各个转速下稳态焊接时焊缝峰值温度，如表 3。保持相同的焊接参数，每个转速分别进行两次实验测量，对两次实验所得温度数值取平均值描点画出温度变化趋势“拟合曲线”，如图 3b 所示。当转速低于 1600 r/min 时，随着转速的升高，峰值温度逐渐升高到接近 500 °C；但是当转速高于 1600 r/min 时，随着转速的升高，峰值温度在 480~495 °C 之间波动，并有稍微下降的趋

表 1 7075-O 铝合金化学成分

Table 1 Chemical composition of 7075-O aluminum alloy (ω/%)

Zn	Mg	Cu	Mn	Si	Fe	Cr	Ti	Al
5.1~6.1	2.1~2.9	1.2~2.0	0.30	0.40	0.50	0.18~0.28	0.20	Bal.

表 2 7075-O 铝合金性能

Table 2 Properties of 7075-O aluminum alloy

Tensile strength/ MPa	Yield strength/ MPa	Elongation/ %	Hardness, HV/ ×10 MPa	Solidus temperature/°C	Liquidus temperature/°C
225	112	17	70	520	630

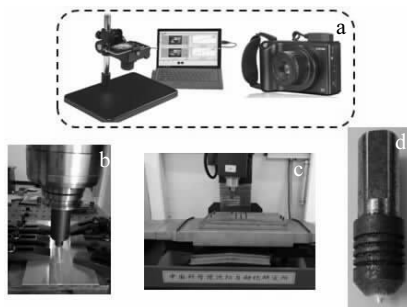


图 1 红外热像仪，焊接装置，搅拌摩擦焊设备，搅拌头
Fig.1 Thermal infrared camera (a), schematic of welding (b), setup of friction-stir welding (c), and tool of welding (d)

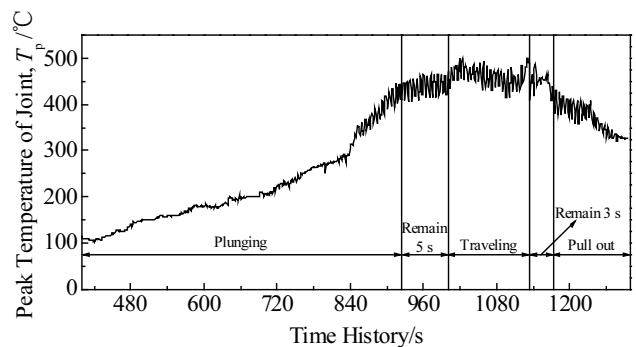


图 2 焊缝峰值温度随焊接时间变化曲线
Fig.2 Peak temperature versus various moments (1200 r/min)

表 3 不同焊接转速下的峰值温度

Table 3 Peak temperature at different rotational speeds

$n/r \cdot \text{min}^{-1}$	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900
$T_p/^\circ\text{C}$	430 425	439 434	451 443	455 460	473 476	484 490	481 496	495 483	485 495	481 490

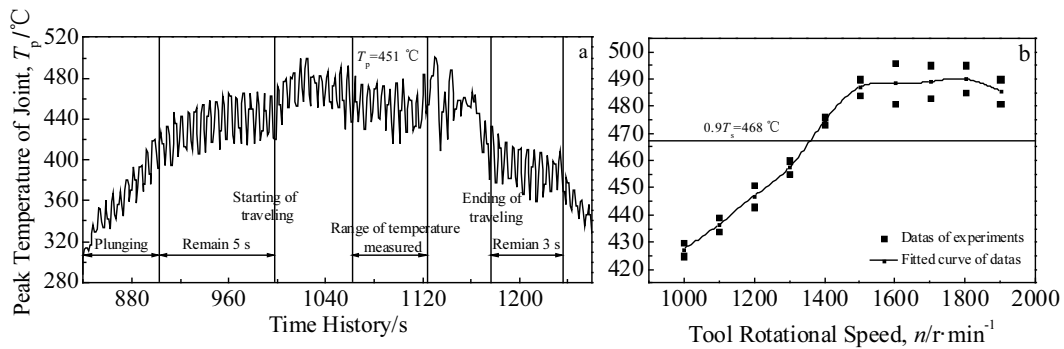


图 3 焊接行程内焊缝峰值温度随焊接时间变化曲线 (1200 r/min) 和焊接转速对焊缝峰值温度的影响

Fig.3 Peak temperature in range of traveling versus various moments (1200 r/min) (a) and effect of tool rotational speed on the peak temperature of joints (b)

势。这个变化趋势和文献[21]中的实验结果基本一致。

2.2 建立高速焊搅拌摩擦焊峰值温度公式

若固定焊接速度, Zhang^[18]给出的峰值温度式(3)就变成以转速为变量的一元函数, 即 $T_p=f(n)$, 如式(5):

$$T_p = T_s \cdot kq^\alpha \exp^{\beta/q} + T_r \quad (5)$$

对于 7075 铝合金, 计算时各参数取值如表 4, 当焊接速度为 1000 mm/min 时, 以转速为横坐标绘制函数图像如图 4a 所示。随着转速的升高, 峰值温度逐渐升高。当转速为 6000 r/min 时, 峰值温度达到 500 °C。当转速为 1000~1900 r/min 时, 峰值温度在 332~445 °C 之间。但是此公式的计算值不符合本文的实验结果, 从图 4b 可知, 其一在数值上, 两者最小偏差也在 10% 以上; 其二在变化趋势上, 式(5)所得曲线在转速达到 1600 r/min 以后并没有出现趋平且稍微下降的趋势。

综上可知, 适用于低焊速的理论和公式不能直接迁移应用于高焊速。具体体现在以下方面:

(a) 适用于低焊速的转速与焊速的比值(R_t/v)和焊接窗口对高焊速不适用;

(b) 低焊速热输入模型忽略摩擦系数的变化所带来的影响;

(c) 低焊速峰值温度公式不适用于高焊速。

低焊速热源模型不考虑摩擦系数或把接触摩擦系

数设置为定值^[22-24]等, 这些假设在研究低速 FSW 时有一定的方便性和准确性, 但是无法反映高焊速 FSW 中极其复杂的热力耦合过程^[25-28]。随着焊接速度的大幅度提升, 为了保证热输入量, 焊接转速势必提高, 塑性变形加剧, 焊接温度整体升高, 材料流动紊乱, 导

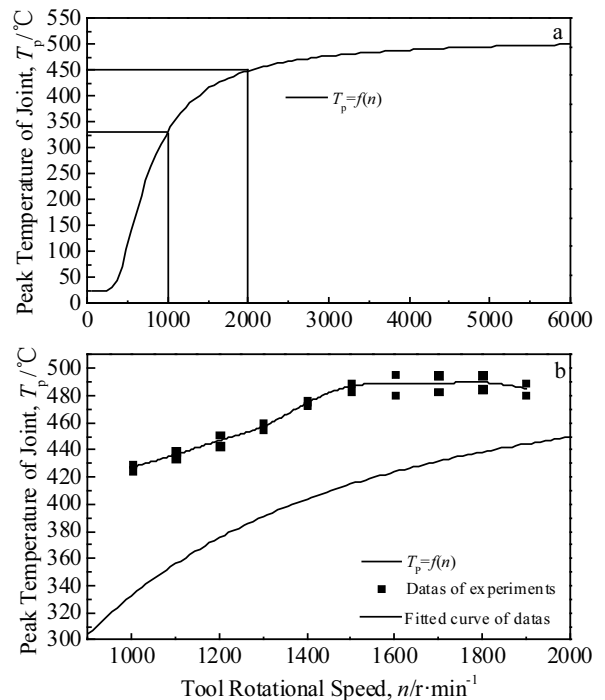


图 4 峰值温度公式曲线和实验数据与峰值温度公式比较

Fig.4 Peak temperature as a function of tool rotary speed (a) and comparison of the experimentally measured peak temperature of joint with literature function (b)

表 4 计算所需参数

Table 4 Parameters used for calculation of the peak temperature

$T_s/^\circ\text{C}$	$T_r/^\circ\text{C}$	r/m	k	α	β
520	25	6×10^{-3}	0.90051	0.00974	-0.16218

致摩擦机制由粘着摩擦向粘着和滑动混合摩擦转变，摩擦系数随着摩擦压力、焊接温度的变化在 FSW 过程中动态变化^[29-31]。Scott Miller 等人^[31]用 AA6061 和工具钢制成的空心轴进行摩擦实验，指出在摩擦起始阶段，随着温度的升高，摩擦系数逐渐增加，当温度升高到某个值以后，摩擦系数反而开始下降。

由于 FSW 中热输入量大部分来自轴肩与材料的摩擦，所以本文在考虑摩擦系数的变化对热输入量的影响时，也主要考虑轴肩端面处的摩擦系数随焊接参数的变化情况。根据 Scott Miller 等人^[31]的实验结果可得各个转速所对应的轴肩摩擦温度下的摩擦系数，如表 5。

在本研究的焊接实验中，由于严格控制轴肩下压力统一为 0.2 mm，所以每次实验中摩擦压力相同。由峰值温度随转速变化曲线可知，随着转速的增加，稳态焊接峰值温度随之增加。一方面，转速的增加所引起的相对摩擦速度的增加会影响摩擦系数，另一方面，转速的变化所引起的轴肩摩擦温度的变化也会改变摩擦系数，所以综上，可以将摩擦系数当作转速的单值函数。于是，对表 5 中的数值进行回归处理，如图 5a，从而建立摩擦系数与焊接转速的关系式(6)，即 $\mu=f(n)$ ：

$$\mu = \gamma \exp^{(\beta v_r)} \quad (6)$$

其中，相对摩擦速度 $v_r = \omega r$ ，单位 m/s， ω 为轴肩角速

度 rad/s， r 为轴肩半径，在本实验中 $r=6$ mm，回归系数 $\gamma=2.185$ ， $\theta=-1.104$ 。

本研究引入一个包含焊接速度和转速且能够反映热输入量大小的热输入指数 Q ，如式 (7) 所示，也即在式 (3) 的基础上引入一个变量动态摩擦系数 μ ，如式 (6)，从而考虑摩擦系数的变化对热输入量的影响。通过热输入指数 Q 进行回归处理，可以进一步建立温度比值与转速的关系式 (8)。

$$Q = \mu \frac{r\omega^2}{v \times 10^4} \quad (7)$$

$$\frac{T_p - T_r}{T_s} = a(Q^\alpha / \exp^{\beta/Q}) + b \quad (8)$$

式中， ω 为焊接转角速度 rad/s； v 为焊接速度 m/s； r 为搅拌头的轴肩半径； T_p 为焊缝峰值温度； T_r 为焊接环境温度，也即室温； T_s 为被焊材料的固相线温度，各参数取值如表 6。

当固定焊接速度为 1000 mm/min 时，式(8)就变成了以转速为变量的一元函数，记为 $T_p=F(n)$ ，函数图像如图 5b。可以看出，函数图像与实验数据变化趋势高度一致。另外，结合已有实验数据与峰值温度公式可以预测，当焊接转速进一步增加，超过 2000 r/min 后，焊接峰值温度将会延续轻微下降的趋势，并最终趋平。

表 5 不同焊接条件下的摩擦系数值

Table 5 Values of coefficient of friction under different welding conditions

$n/r \cdot \text{min}^{-1}$	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900
$T_p/^\circ\text{C}$	430 425	439 434	451 443	455 460	473 476	484 490	481 496	495 483	485 495	481 490
μ	1.09 1.12	1.01 1.08	0.95 0.98	0.92 0.90	0.82 0.79	0.73 0.62	0.74 0.60	0.60 0.73	0.71 0.61	0.74 0.62

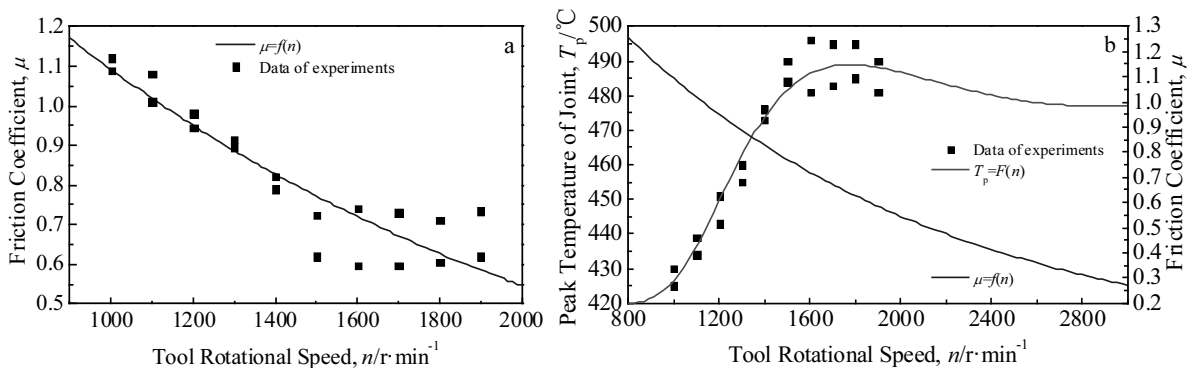


图 5 轴肩端面处摩擦系数随转速的变化关系和峰值温度公式以及摩擦系数与焊接转速的关系

Fig.5 Exponential relationship between the friction coefficient and tool rotational speed (a); peak temperature and friction coefficient as functions of tool rotational speed (b)

表 6 相关计算参数

Table 6 Pertinent parameters for calculation analysis

$T_s/^\circ\text{C}$	$T_r/^\circ\text{C}$	r/m	a	b	α	β
520	25	6×10^{-3}	290	0.7589	-10	7.933

2.3 不同焊接转速下的接头组织与性能

图 6 是各焊接转速下焊缝外观与接头组织。当焊接转速为 1000~1200 r/min 时，由于焊接温度不高，所

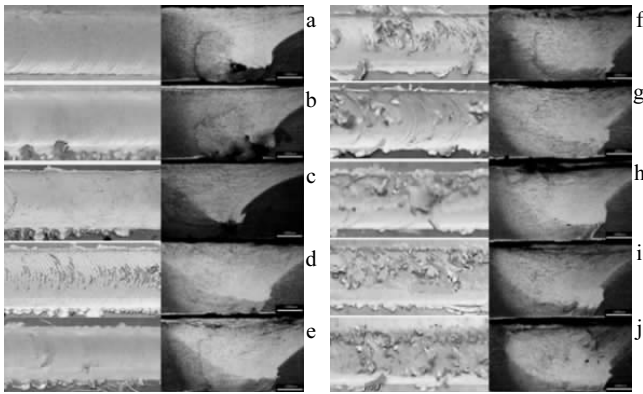


图 6 各焊接转速下焊缝外观与接头组织

Fig.6 Appearance of joints and cross-section macrostructures obtained in different welding conditions (a~j is at the speed of 1000~1900 r/min, respectively)

以焊缝表面呈现出光滑的鱼鳞纹，但从焊缝表面到内部，焊接温度逐渐降低，导致内部材料未完全达到熔融状态，软化不足，流动性不佳，从而接头组织出现了因填充不完全引起的隧道型孔洞缺陷。

当焊接转速为 1300~1600 r/min 时，随着转速的升高，焊缝峰值温度逐渐升高，焊缝表面开始出现轻微的起皮毛刺等现象，但此时焊缝内部材料软化充分，流动性能提高，所以接头组织孔洞缺陷逐渐消失。

当转速进一步增加，较高的温度以及轴肩的高速旋转挤压与快速移动使焊缝表面起皮严重，此时虽然较高的温度保证了材料具有必要的流动性能，但较高的旋转速度带来更加急速的填充流场，而焊接速度保持不变，从而焊接转速与焊接速度发生失配，以致填充流场发生紊乱，出现涡流紊流等现象，最终导致焊核区前进侧底部出现分散的疏松型或裂纹型孔洞缺陷，此时孔洞的尺寸较低转速时明显减小。

实验结果表明，若固定焊接速度为 1000 mm/min，当转速为 1400、1500、1600 r/min 时，也即焊缝峰值温度范围是 470~495 °C 时，可以得到无缺陷的焊接接头，这与低焊速的最佳温度范围 420~470 °C 有所区别。因为对于高焊速 FSW，只有当热输入量以及焊接速度与转速相互配合达到最佳，也即同时具有合理的温度场和填充流场时，才有可能获得无缺陷的焊接接头。

3 结 论

1) 把焊接速度大幅度提升至 1000 mm/min 时，发现焊缝峰值温度随着转速的增加而增加，当转速达到

1600 r/min 时峰值温度达到最大值 496 °C，当转速为 1600~1900 r/min 时，峰值温度在 480~495 °C 之间波动，并有轻微下降的趋势。

2) 在热输入模型中引入摩擦系数变量，反映转速的增加和焊缝峰值温度的变化所引起的摩擦系数的改变对热输入量的影响，从而建立了新的焊缝峰值温度和转速的关系公式。

3) 当固定焊接速度为 1000 mm/min，转速为 1400、1500、1600 r/min 时，可以得到无缺陷的焊接接头，对应的焊缝峰值温度范围是 470~495 °C。

参考文献 References

- [1] Feng Meibin(冯美斌). *Automotive Engineering*(汽车工程)[J], 2006, 28(3): 213
- [2] Long Jiangqi(龙江启), Lan Fengchong(兰凤崇), Chen Jiqing(陈吉清). *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2008, 44(6): 27
- [3] Wang Kuaishe(王快社), Wang Xunhong(王训宏), Su Xiaoli(苏晓莉) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(10): 1835
- [4] Tolga Dursun, Costas Soutis. *Materials and Design*[J], 2014, 56: 862
- [5] Rezaei H, Mirbeik M H, Bisadi H. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*[J], 2011, 225: 1761
- [6] Wang kuaishe(王快社), Wu Nan(吴楠), Wang Wen(王文) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(9): 1949
- [7] Gong Wenbiao(宫文彪), Tian Hongjiao(田红娇), Liu Wei(刘威) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(S2): 854
- [8] Adeel Zafar, Awang M, Sajjad Raza Khan. *2nd International Conference on Mechanical, Manufacturing and Process Plant Engineering*[C]. Singapore: Springer, 2017: 19
- [9] Nandan R, DebRoy T, Bhadeshia H K D H. *Progress in Materials Science*[J], 2008, 53: 980
- [10] Dong Jihong(董继红), Dong Chunlin(董春林) Meng Qiang(孟强) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(S2): 423
- [11] Zhang Huijie(张会杰), Wang Min(王敏), Zhang Xiao(张骁) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2015, 36(12): 65
- [12] Li Hongke(李红克), Shi Qingyu(史清宇), Zhao Haiyan(赵海燕) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2006, 27(11): 81

- [13] Ahmed Ramadan Shaaban Essa, Mohamed Mohamed Zaky Ahmed, Abdel-Karim Yousif Ahmed Mohamed *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2016, 5(3): 234
- [14] Hamilton C, Dymek S, Sommers A. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*[J], 2008, 48: 1120
- [15] He Xiacong, Gu Fengshou, Ball Andrew. *Progress in Materials Science*[J], 2014, 65: 1
- [16] Song M, Kovacevic R. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*[J], 2003, 43: 605
- [17] Arbegast W J, Hartley P J. *Proceedings of the Fifth International Conference on Trends in Welding Research*[C]. Pine Mountain: ASM International, 1998: 541
- [18] Zhang Z H, Li W Y, Li J L *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2014, 73: 1213
- [19] Qian Jinwen, Li Jinglong, Sun Fu *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2013, 68: 175
- [20] Jia Jin(贾进), Yang Shanglei(杨尚磊), Ni Weiyaun(倪维源) *et al.* *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2014, 41(10): 1 003 002-1
- [21] Axel Fehrenbacher, Neil A Duffie, Nicola J Ferrier *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [J], 2014, 71: 165
- [22] Hamilton B C, Dymek S, Sommers A. *Welding Journal*[J], 2010, 89: 190
- [23] Kevin J Colligan, Rajiv S Mishra. *Scripta Materialia*[J], 2008, 58(5): 327
- [24] Schmidt H, Hattel J, Wert J. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*[J], 2004, 12: 143
- [25] Li W Y, Li J F, Zhang Z H *et al.* *Experimental Mechanics*[J], 2013, 53(9): 1573
- [26] Judy Schneider, Ronald Beshears, Arthur C Nunes Jr. *Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 435-436: 297
- [27] Patricio F Mendez, Karem E Tello, Thomas J Lienert. *Acta Materialia*[J], 2010, 58(18): 6012
- [28] Heurtier P, Jones M J, Desrayaud C *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2006, 171: 348
- [29] Du Suigeng(杜随更), Duan Liyu(段立宇), Wu Shidun(吴诗惇) *et al.* *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*(机械科学与技术)[J], 1997, 16(4): 703
- [30] Mohamed Assidi, Lionel Fourment, Simon Guerdoux *et al.* *International Journal of Machine Tools & Manufacture*[J], 2010, 50(2): 143
- [31] Scott Miller, Lee Arnold, Grant Kruger. *Proceedings of the ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference*[C]. Erie Pennsylvania: ASME, 2010: 34 106

Thermal Model and Peak Temperature in High-Travel Velocity Friction Stir Welding of Aluminum Alloy

Wan Xinyong¹, Hu Zhili¹, Pang Qiu^{1,2}, Zhan Boyi¹

(1. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

(2. Wuhan Donghu University, Wuhan 430070, China)

Abstract: 7075-O aluminum alloy rolled plates of 3 mm thickness were friction stir butt welded at a constant high-travel speed of 1000 mm/min and various tool rotary speeds (1000~1900 r/min). The peak temperature of the joint was measured by a thermal infrared camera. Effects of tool rotary speed on peak temperature and appearance and cross-sections microstructures of FSW joints were investigated. The results show that peak temperature of the joint increases gradually with increasing the tool rotary speed till 1600 r/min and reaches the maximum at 1600 r/min, approximately 500 °C. Increase of rotation speed higher than 1600 r/min brings about fluctuation of peak temperature from 480 °C to 495 °C and slightly decreasing tendency. This is not consistent with the previous thermal modeling and peak temperature function of welding parameters. With an emphasis on weld quality, the experimental results of cross-sections microstructures indicate that the optimum tool rotary speeds are 1400, 1500, and 1600 r/min. Based on the mechanism analysis of heat generation about friction, an analytical thermal model of high-travel FSW was developed to estimate the function of the peak temperature in which a variable of friction coefficient was created in the thermal model.

Key words: friction stir welding; high-travel velocity; variable of friction coefficient; thermal modeling; function of peak temperature