

回填式搅拌摩擦点焊过程 温度场的数值模拟

柴 鹏^{1,2},左莹莹³,陈克鹏³,齐铂金¹,姬书得³

(1.北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100191;

2.中国航空制造技术研究院,北京 100024;

3.沈阳航空航天大学航空宇航学院,沈阳 110136)

[摘要] 根据回填式搅拌摩擦点焊的连接机理,合理的温度场是获得高性能接头的基础;根据回填式搅拌摩擦点焊过程的特点,利用有限元分析软件 MSC.Marc 建立了焊接过程的有限元模型;在利用测温试验验证有限元模型正确性的基础上,利用数值模拟的方法对 7075-T6 铝合金焊接过程中的温度场进行研究。结果表明:在预热阶段,温度峰值随摩擦时间的增加呈现先快速后缓慢上升的趋势,在 8s 左右趋向稳定;在焊接阶段,温度峰值始终位于套筒端面的中心附近,且最大值出现在套筒回抽 1s 时,同时提高搅拌工具的旋转速度可增加焊接过程的温度最大值。

关键词: 回填式搅拌摩擦点焊;有限元模型;数值模拟;温度场;转速;摩擦时间

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.11.034



柴 鹏

博士研究生,高级工程师,主要研究方向为搅拌摩擦(点)焊工艺及机理研究,发表 SCI、EI 收录文章 20 余篇。

随着全球资源短缺和环境污染等问题的日趋严峻,运载工具的轻量化已成为现代制造业的必然趋势。一方面可以采用各种轻质合金(如铝合金和镁合金)来减小运载工具的重量;另一方面可以通过新型高效的制造工艺技术在提升产品的可靠性的同时,还助力运载工具的轻量化^[1]。铝合金因具有较高的比强度和良好的抗腐蚀性等优点而被广泛应用于航空航天和汽车制造等领域中。铝合金的主要点连接技术有铆接、电阻点焊和搅拌摩擦点焊。铆接技术存在的主要缺点为工艺复杂(需要预开孔)和增加接头重量等,而电阻点焊的主要缺点则为耗能多、易产生气孔和焊后较大的残余应力等^[2-3]。

搅拌摩擦点焊(Friction Stir Spot Welding, FSSW)是以搅拌摩擦焊

(Friction Stir Welding, FSW)为基础发展而来的一种新型固相点焊技术^[4],具有操作简单、焊点质量高、节能环保等优点,目前已应用于汽车制造领域,且在航空航天等领域具有良好的应用前景,美中不足的是,搅拌摩擦点焊仍会在工件表面留下一个影响焊点表面外观、降低接头力学性能的匙孔。

回填式搅拌摩擦点焊(Refill Friction Stir Spot Welding, RFSSW)是德国 GKSS 中心于 2003 年发明的一种新型点焊技术^[5],该技术通过控制所用搅拌工具各部件的相对运动可获得无匙孔的焊点。相比于常规 FSSW, RFSSW 焊接过程所用搅拌工具更为复杂,其由不旋转的压紧环、旋转的套筒和搅拌针组成^[6],焊接过程可以分为摩擦、下扎、回填与

撤离4个阶段：在摩擦阶段，压紧环固定于上板表面，套筒和搅拌针与试板旋转摩擦，使材料软化；在下扎阶段，套筒和搅拌针分别向下和向上运动，塑性化材料在套筒的推动作用下流入搅拌针向上运动形成的空腔；在回填阶段，达到预期扎入深度后，套筒和搅拌针同时改变运动方向，塑性化材料在搅拌针作用下挤回空腔；在撤离阶段，搅拌头撤离，完成焊接^[7]。

与FSW相对比，RFSSW过程温度场的研究较少，苏志强等^[8]利用DEFORM软件建立数值模型，模拟了RFSSW的焊接过程，得到了焊点不同位置的温度循环曲线。王希靖等^[9]利用ANSYS软件，模拟了RFSSW焊接过程中的温度场，得出最高温度位于套筒端面中心，但并未研究焊接参数影响温度场的规律。

本文利用有限元分析软件MSC.Marc建立7075-T6铝合金RFSSW过程的有限元模型，利用单元死活技术对焊接过程的温度场进行了模拟，研究不同焊接参数下点焊过程温度场的分布状态和变化规律，为优化焊接工艺提供技术支持。单元死活技术就是在有限元模型中添加与下扎阶段结束时流入套筒内部(空腔)材料相同体积的单元，假设这部分单元在计算前是不激活的，即处于“死”的状态。在下扎过程中，由下至上依次将空腔中“杀死”的单元“激活”，与此同时由上至下“杀死”套筒移动路径上的单元。在回填过程中，由上至下依次将空腔中“激活”的单元“杀死”，与此同时由下至上“激活”套筒移动路径上的单元。

有限元模型的建立

1 有限元网格划分

本模型中的7075-T6铝合金的尺寸为150mm×50mm×2mm，搭接方式如图1所示。焊接过程中组

成搅拌工具的搅拌针直径6.36mm、套筒外径9mm、压紧环外径18mm，采用MSC.Marc有限元分析软件进行有限元模拟，网格单元类型为SOLID43。为了保证计算的准确性并尽可能减少计算量，采用了非均匀网格划分，在焊点中心附近的区域采用较密集的网格，远离焊点中心的区域采用较稀疏的网格。试板共计23488个单元，26954个节点，网格划分情况如图2所示。其中，生死单元为5040个，节点为6414个。

2 材料参数与工艺参数

7075-T6铝合金的热物理性能受温度影响较大，因此在模拟过程中必须考虑温度变化对材料属性的影响。7075-T6铝合金的密度为2810kg/m³，其他热物理性能如表1

所示^[10]。

本文研究了摩擦阶段的时间对于焊板温度场演变规律的影响，转速为1800r/min。在下扎与回填阶段所用工艺参数如表2所示，其中转速取值为1000r/min、1200r/min、1400r/min、1600r/min、1800r/min与2000r/min。罗凌云^[11]通过试验发现RFSSW的下扎与回填阶段的焊接压力变化不大，因此本文将焊接压力 P 设为定值。

3 散热边界条件

本文中将模型的初始温度设为20℃，模型暴露在空气中的上表面和侧面，会与空气进行对流换热，将此对流换热系数均设置为30W/(m²·℃)。有限元模型上表面与搅拌工具接触的区域，以及下表面与垫板接触的区域，

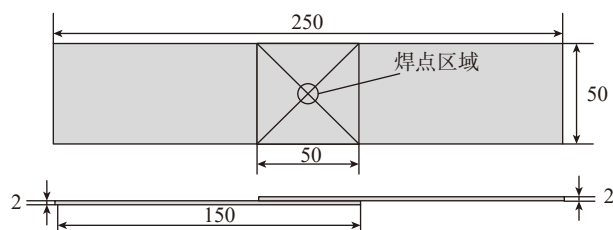


图1 搭接方式示意图 (mm)

Fig.1 Schematic of lap joint configuration

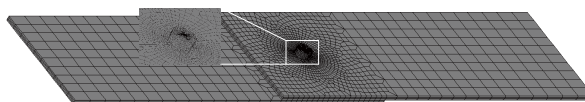


图2 有限元网格划分

Fig.2 Mesh generation of finite element model

表1 7075-T6铝合金热物理性能

Table 1 Thermophysical properties of 7075-T6 Al alloy

温度 $T/^\circ\text{C}$	比热容 $C/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	热导率 $K/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
25	835.4	114.8
100	897.0	128.4
150	916.3	135.7
200	974.0	142.2
300	1012.5	152.7
400	1128.0	160.8
500	1205.0	166.7

换热作用均远强于空气对流,将散热系数设置为 $200\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})^{[12]}$ 。

4 热源模型

根据 RFSSW 焊接过程的特点,其焊接热输入主要来源于 3 个部分:套筒内、外侧面及端面与焊件间的摩擦产热;搅拌针端面与焊件间的摩擦热;金属的塑性变形热。RFSSW 由 FSW 演变而来,其塑性变形产热仅占总焊接热输入的一小部分,因此计算过程中通常忽略材料塑性变形产热^[13]。

套筒端面产热的实际有效区域为套筒外径 R_1 与套筒内径 R_2 之间的圆环,假设焊接压力均匀地施加于套筒,不随半径变化,则半径为 r ,宽度为 dr 的微圆环上所受摩擦力为^[14-16]

$$df = \mu F = \mu P_s ds = \mu P_s 2\pi r dr \quad (1)$$

式中, f 为套筒端面上的摩擦力; F 为套筒端面上的压力; μ 为摩擦系数,取 0.3。微圆环上套筒旋转作用力矩为:

$$dM = r df = 2\pi P_s \mu r^2 dr \quad (2)$$

套筒旋转扭矩为:

$$M_{\text{sleeve}} = \int_{R_2}^{R_1} dM = \frac{2\pi\mu r}{3} (R_1^3 - R_2^3) \quad (3)$$

套筒端面产热功率为:

$$W_{\text{sleeve bottom}} = \omega M_{\text{sleeve bottom}} = \frac{2\pi\omega\mu P_s}{3} (R_1^3 - R_2^3) \quad (4)$$

套筒内侧面产热功率为:

$$W_{\text{sleeve inside}} = \omega M_{\text{sleeve inside}} = 2\pi\omega\mu P_s R_2^2 H \quad (5)$$

套筒外侧面产热功率为:

$$W_{\text{sleeve outside}} = \omega M_{\text{sleeve outside}} = 2\pi\omega\mu P_s R_1^2 H \quad (6)$$

式中, ω 为搅拌头转速; P_s 为套筒端

面上的均匀轴向力; H 为套筒下扎深度; 搅拌针半径为 R_2 , 设搅拌针承受的均匀压力为 P_p , 则搅拌针旋转扭矩为^[14-16]:

$$M_{\text{pin}} = M_{\text{pin bottom}} = \frac{2\pi\mu P_p R_2^3}{3} \quad (7)$$

产热功率为:

$$W_{\text{pin}} = \omega M_{\text{pin}} = \omega M_{\text{pin bottom}} = \frac{2\pi\omega\mu P_p R_2^3}{3} \quad (8)$$

在本研究中,搅拌针与套筒在焊接过程中提供的热输入通过 Flux 子程序进行施加。同时,在模拟过程中,为了使结果更加准确,使用生死单元法模拟焊点区域金属在下扎与回填阶段的运动过程,单元杀死和激活通过 Uactive 子程序实现。

结果与讨论

本文将 RFSSW 过程分为预热阶段和焊接阶段。预热阶段即前文所述的摩擦阶段; 焊接阶段分为加热阶段以及撤离阶段,而焊接加热阶段则包括下扎与回填阶段。下面以

预热阶段以及焊接加热阶段为对象进行温度场演变规律的分析。

1 预热阶段的温度场

为了验证有限元模型的正确性,首先对预热阶段(摩擦阶段)的温度场进行了数值模拟及试验测量,结果如图 3 所示。其中,测温试验数据通过 K 型热电偶测量获取,测量点位于压紧环外侧 1mm 处,如图 3(a)中 h_2 点所示。由图 3(a)可知,预热阶段的高温区主要位于试板与套筒及搅拌针的接触区,且套筒边缘(h_1 点)经历的温度较套筒内部低; 随到搅拌工具旋转轴距离的增加,材料的温度逐渐降低。同时,在预热阶段,试板表面的温度随摩擦时间的增加呈现先快速后缓慢上升的规律,在 8s 时温度基本达到稳态,如图 3(b)所示。 h_2 点的实测温度值和模拟温度值在预热阶段各时间点上仅有较小的差异,在 8s 时,两者的温度值分别为 227.1C 和 232.5C , 误差 $<5\%$, 这表明本文建立的有限元模型是合理的。

对于 RFSSW 工艺来说,搅拌工

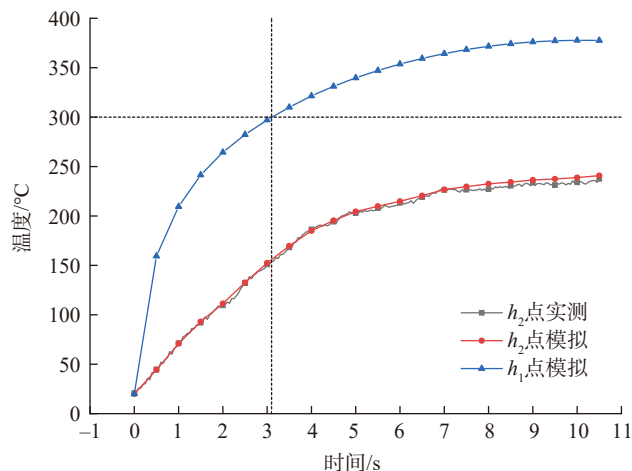
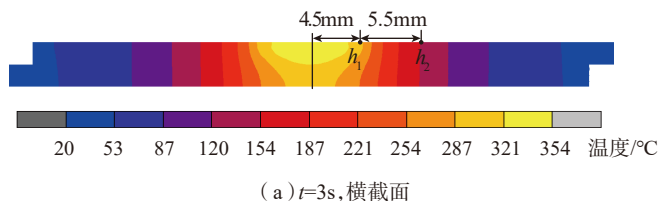


图3 预热阶段的温度场及温度演变规律

Fig.3 Temperature field and temperature evolutions at pre-heating stage

表2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

参数	数值
旋转速度 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1000~2000
下扎压力 /N	7500
下扎深度 /mm	2.5
下扎时间 /s	2.5
回填时间 /s	2.5

具的磨损甚至折断难以避免,其原因主要在于搅拌工具在下扎阶段的阻力过大,焊前预热可提升焊件内部的材料温度如图3(a)所示,使材料的变形抗力降低,利于降低搅拌工具在下扎阶段的阻力。然而,过大的焊前预热时间会降低焊接效率。因此,本文以与套筒边缘接触的 h_1 点为对象,研究预热阶段的温度与时间的关系,进而确定较优的预热时间。对于金属材料,材料的变形抗力随温度的升高而降低,而材料具有超塑性特征的温度是本文优选预热时间的依据。金属材料超塑性所需的变形温度一般在熔点热力学温度的一半以上,且7075-T6铝合金的熔点范围为475~635℃,本文选取的温度为300℃,由图3(b)可知, h_1 点达到300℃的时间为3.1s。

2 焊接加热阶段的温度场

为了方便计算,取摩擦阶段时间为3s并进行RFSSW过程焊接阶段的温度场分析,不同时刻焊点的温度分布如图4所示。通过分析可知,整个焊接过程中,高温区域主要分布在试板上与搅拌针及套筒相接触的区域。由于套筒的直径大于搅拌针直径,单位面积热输入更高,因此在相同转速的情况下,温度最大值出现在与套筒接触的区域。下扎阶段结束时($t=5.5s$),整板的温度分布要高于回填阶段结束时($t=8s$);在下扎阶段结束时($t=5.5s$),温度最大值位于焊点内部,如图4(f)所示;在回填阶段($t=8s$)结束时,温度最大值位于焊点表面,如图4(g)所示。对比图4(a)~(c)可知,随着焊接过程的进行,高温区域逐渐扩大,形成明显的温度梯度。值得注意的是,在整个焊接过程中,最高温度一直位于套筒端面的中心附近,此结果有以下两个原因:一是在相同转速下,套筒端面的线速度相对较大,可产生较大的摩擦热;二是与套筒端面的中心处相比,套筒外侧虽可产生较多的热量,但会有更多的热传导,从

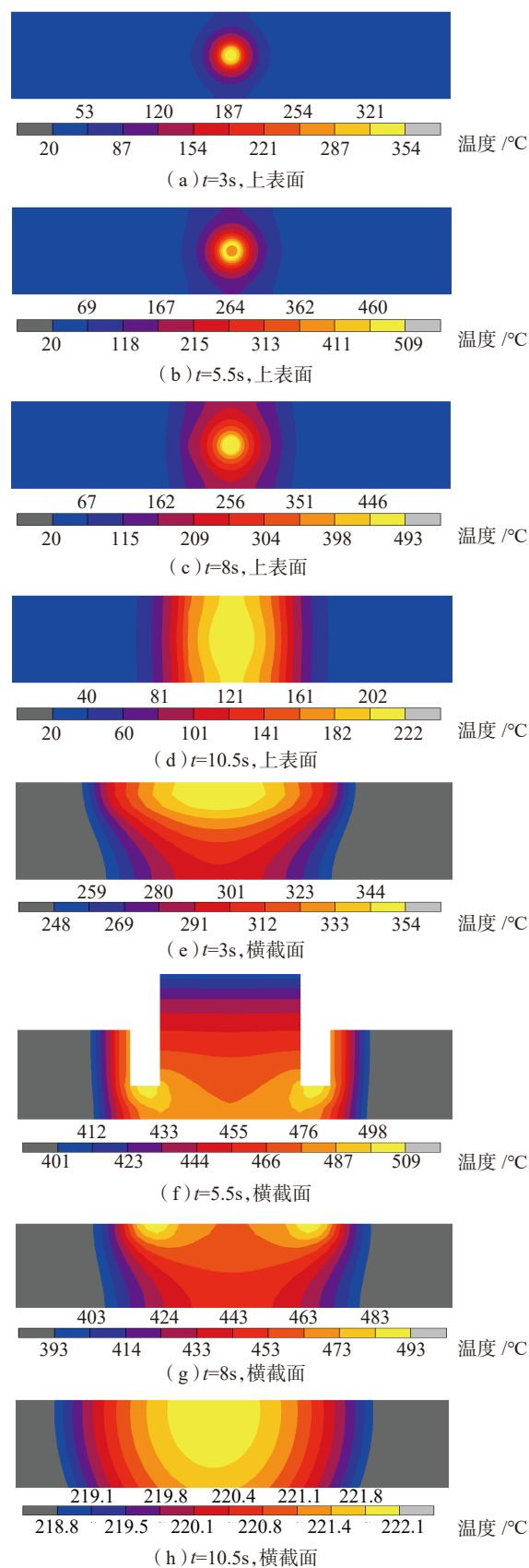


图4 不同时刻下焊点的温度分布

Fig.4 Temperature fields at different welding time

而引起温度降低。

为了详细分析温度分布规律,沿焊板厚度方向取 5 个焊点区以外的点(图 5 (a))进行研究,图 5 (b)是各点的温度循环曲线。通过分析可知,焊点外侧各点的温度演变过程相同,均为先升高再降低的趋势,由于试板的厚度较小,各点在相同时间下的温度相差不大;随到焊点上表面距离的增加,点的温度最大值呈现小幅度下降的趋势。沿板厚方向各点达到温度最大值的时间相同,均为套筒下扎阶段结束($t=5.5s$)后的 1s。这是因为在下扎过程中,焊点区域提供的热输入不断提高,摩擦热导致的热输入大于散热导致的热损失;在回填过程中,热输入随着搅拌工具与待焊材料接触面积的减少而逐渐减少,当回填阶段进行到 1s 时产热与散热平衡,温度达到最大值。

为了进一步分析不同区域在焊接阶段的温度演变规律,取平行焊点上表面的各点(图 6 (a))进行分析,图 6 (b)为各点的温度循环曲线。其中,各点到焊点上表面的距离为套筒的最大扎入深度值 2.5mm。由于图 6 (a)中各点的温度主要依赖于焊点区热输入的热传导,因此温度达到最大值的时间随着焊点区距离的增加而延长。由图 4 (a)可知,焊点区为高温区,而远离焊点区的温度接近室温,因此在焊点周围形成明显的温度梯度,这也使得图 6 (a)中特征点的温度最大值随着焊点区距离的增加而减小。另外,离焊点区越近点的降温速率越大,最后趋于板上的各点温度基本相同,进而开始缓慢的降温过程。

为了分析转速对高温区域温度的影响规律,取焊点下表面中心点(图 5 (a)中点 P_6)的温度最大值为对象进行分析,如图 7 所示,通过分析可知,随着搅拌工具转速的增加,在单位时间内作用在焊材上的热输入增加,导致该点的温度最大值呈上

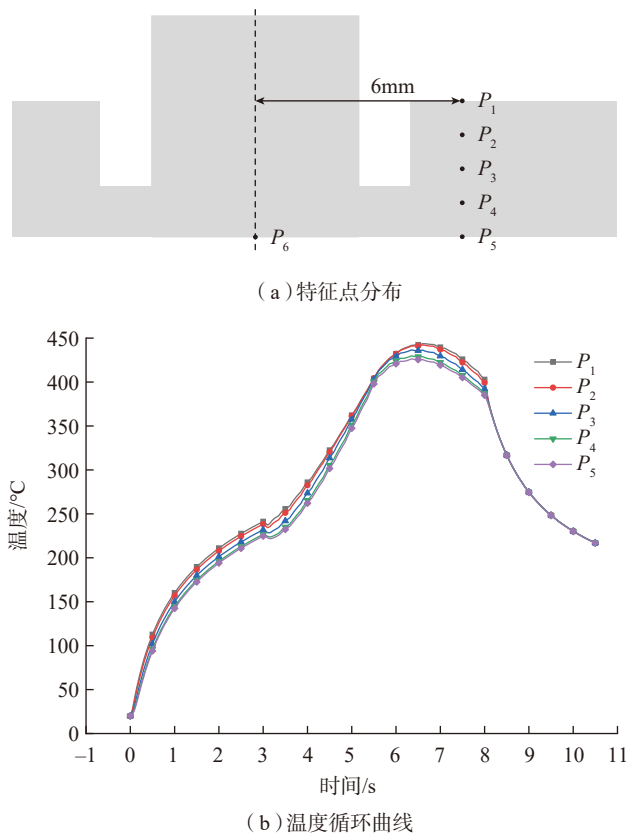


图5 焊点厚度方向上各点的温度循环曲线

Fig.5 Temperature history plots of researched points along thickness direction of welding spot

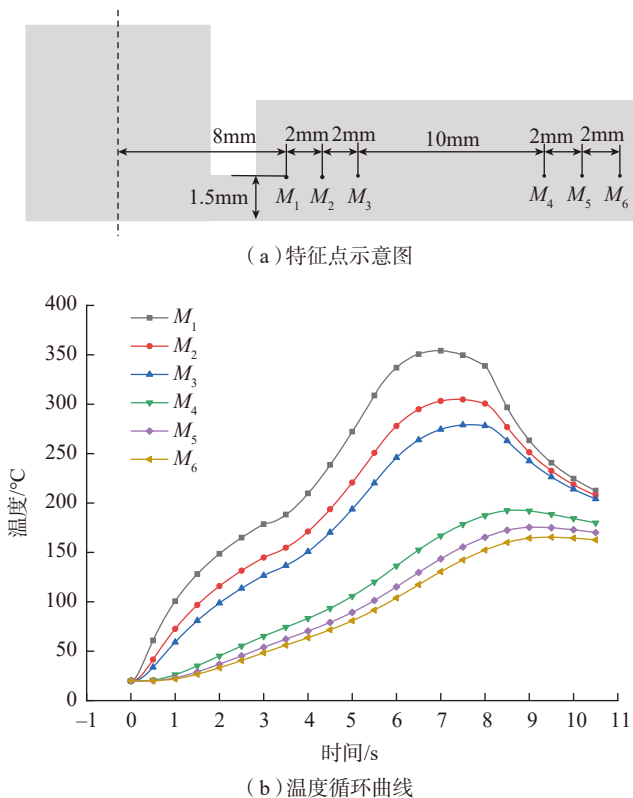


图6 水平方向上各点的温度循环曲线

Fig.6 Temperature history plots of researched points along parallel direction of welding spot

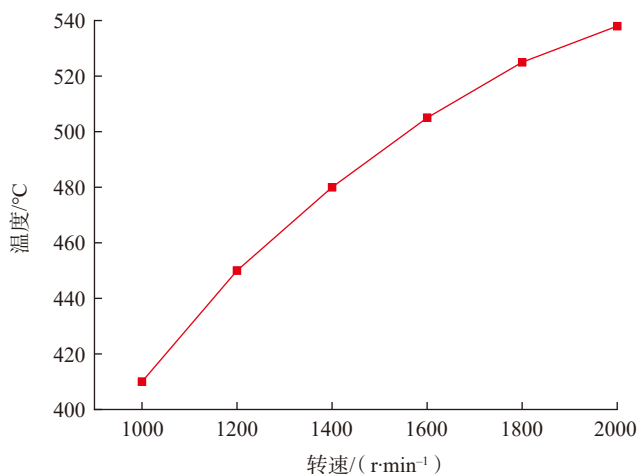


图7 不同转速下特征点温度最大值的变化曲线

Fig.7 Relation between maximum temperature of researched point and rotating speed

升趋势。另外,随着转速的增加,转速对温度最大值的影响作用减弱,使温度最大值上升幅度减小。

结论

采用以数值模拟为主、试验验证为辅的方法对 RFSSW 过程的温度场进行了分析,主要结论如下:

(1) 在摩擦预热阶段,焊点区的温度峰值随摩擦时间的增加呈现先快速后缓慢增加的规律,最后趋于稳定;在焊接的加热阶段,高温区随焊接时间的增加而逐渐扩大,但最高温度始终位于套筒端面中心。在 RFSSW 过程中,温度最大值出现在回填阶段进行到 1s 时。

(2) 随转速的增加,RFSSW 过程的温度最大值上升;与高转速相比,在低转速下温度最大值的上升幅度较大。

参考文献

[1] 杨洪刚,赵欣. 铝合金回填式搅拌摩擦点焊工艺试验[J]. 焊接技术, 2012, 41(11): 24-26.

YANG Honggang, ZHAO Xin. Experimental study on refill friction stir spot welding of aluminum alloy[J]. Welding

Technology, 2012, 41(11): 24-26.

[2] 邢艳双,党鹏飞,李丰,等. 异种铝合金回填式搅拌摩擦点焊的组织与性能[J]. 焊接学报, 2018, 39(1): 22-25, 130.

XING Yanshuang, DANG Pengfei, LI Feng, et al. Microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welded dissimilar 7075/6061 aluminum alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(1): 22-25, 130.

[3] 王国庆,赵衍华,杜岩峰,等. 铝合金搭接结构的搅拌摩擦焊接技术[J]. 航空制造技术, 2017, 60(10): 91-98.

WANG Guoqing, ZHAO Yanhua, DU Yanfeng, et al. Friction stir welding techniques for lap structure of aluminium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(10): 91-98.

[4] 申志康,杨新岐,张照华,等. 铝合金回填式搅拌摩擦点焊组织及力学性能分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(6): 73-76.

SHEN Zhikang, YANG Xinqi, ZHANG Zhaohua, et al. Analysis of microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welded aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(6): 73-76.

[5] 王朗,王敏,郭立杰. LY12 铝合金回填式搅拌摩擦点焊工艺研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(1): 150-153.

WANG Lang, WANG Min, GUO Lijie. Research on backfilling friction stir spot welding of LY12 Al alloy[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(1): 150-153.

[6] 石瑶,张利国,吕赞,等. 6061/7075 异种铝合金回填式搅拌摩擦点焊接头的组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(17): 170-172.

SHI Yao, ZHANG Liguo, LÜ Zan, et al. Microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welding joint of 6061/7075 dissimilar aluminum alloys[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(17): 170-172.

[7] 周灿丰,焦向东,高辉. 回填式搅拌摩擦点焊技术研究新进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(12): 48-54.

ZHOU Canfeng, JIAO Xiangdong, GAO Hui. New research progress of refill friction stir spot welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(12): 48-54.

[8] 苏志强,刘娟,李超,等. 搅拌摩擦点焊过程温度循环数值模拟[J]. 焊接技术, 2018, 47(3): 35-38.

SU Zhiqiang, LIU Juan, LI Chao, et al. Numerical simulation of temperature cycleduring refilled friction stir spot welding process[J]. Welding Technology, 2018, 47(3): 35-38.

[9] 王希靖,许有伟,魏万奎,等. 6082-T6 回填式搅拌摩擦点焊热一流耦合分析[J]. 材料科学与工艺, 2015, 23(6): 120-124.

WANG Xijing, XU Youwei, WEI Wankui, et al. Heat-flow coupling analysis of 6082-T6 with refill friction stir spot welding[J]. Materials Science and Technology, 2015, 23(6): 120-124.

[10] 郭柱,朱浩,崔少朋,等. 7075 铝合金搅拌摩擦点焊接头温度场及残余应力场的有限元模拟[J]. 焊接学报, 2015, 36(2): 92-96.

GUO Zhu, ZHU Hao, CUI Shaopeng, et al. Finite element simulation of friction stir welding temperature field and residual stress field of 7075 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(2): 92-96.

[11] 罗凌云. 2A12-T4 铝合金回填式搅拌摩擦点焊工艺及机理研究[D]. 哈尔滨: 哈

哈尔滨工业大学, 2018.

LUO Lingyun. Research on process and mechanism of refill friction stir spot welding for 2A12-T4 aluminum alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

[12] 刘景麟, 吕赞, 陈克鹏, 等. 静止轴肩对FSW温度与应力影响的数值模拟[J]. 精密成形工程, 2019, 11(3): 144-149.

LIU Jinglin, LÜ Zan, CHEN Kepeng, et al. Effect of stationary shoulder on welding temperature and stress during friction stir welding investigated by numerical simulation[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(3): 144-149.

[13] LIU J L, LV Z, CHEN K P, et al. Effect of stationary shoulder on welding temperature and stress during friction stir welding investigated by numerical simulation[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(3): 144-149.

[14] 安丽, 钱伟, 邹青峰, 等. 2A14-T6铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接温度场研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(5): 225-229.

AN Li, QIAN Wei, ZOU Qingfeng, et al. Research of temperature field in bobbin tool friction stir welding for 2A14-T6 aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(5): 225-229.

[15] SONG M, KOVACEVIC R. Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(6): 605-615.

[16] CHAO Y J, QI X. Heat transfer and thermo-mechanical analysis of friction stir joining of AA6061-T6 plates[C]//1st International Symposium on Friction Stir Welding. California: Thousand Oaks, 1999.

通讯作者: 姬书得, 工学博士、教授, 主要研究方向为搅拌摩擦焊等, E-mail: superjsd@163.com。

Numerical Simulation of Temperature Field During Refill Friction Stir Spot Welding

CHAI Peng^{1,2}, ZUO Yingying³, CHEN Kepeng³, QI Bojin¹, JI Shude³

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

3. College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

[ABSTRACT] According to the joining mechanism of refill friction stir spot welding, reasonable temperature field is the basis of obtaining joints with high quality. Based on the characteristics of refill friction stir spot welding process, a finite element model was established by the finite element analysis software MSC. Marc. The rightness of this model was verified by the temperature measurement experiments, and then the temperature field of 7075-T6 aluminum alloy during welding was investigated by numerical simulation. The results show that at the pre-heating stage, the peak temperature increases rapidly and then slowly with the increase of friction time, and the value reaches a stable one at about 8s. At the welding stage, the peak temperature is located at the center of bottom surface of the sleeve, and the maximum value is obtained when the sleeve is retracted for 1s. Increasing the rotating speed of stirring tool can increase the peak temperature during welding.

Keywords: Refill friction stir spot welding; Finite element model; Numerical simulation; Temperature field; Rotating speed; Friction time

(责编 古系)