

搅拌工具与垫板对搅拌摩擦焊温度场影响的数值分析*

Numerical Analysis on Effect of Stir Tool and Backplate on Temperature Evolution During Friction Stir Welding

西北工业大学凝固技术国家重点实验室与陕西省摩擦焊接重点实验室 张志函 李文亚

[摘要] 采用 ABAQUS/Explicit 模块建立了搅拌摩擦焊接(FSW)的完全热力耦合三维计算模型,研究了 10 mm 厚 7050 铝合金 FSW 过程中,不同材料的搅拌工具与垫板对焊接温度场演变的影响。研究结果表明:不同材料的垫板与搅拌工具对焊接温度场有一定的影响;通过搅拌工具与垫板的热传导是热量散失的主要方式;在焊接过程中,随着垫板换热系数的增加,工件上下表面各等温线以搅拌工具为中心向内明显收缩。

关键词: 搅拌摩擦焊 有限元分析 铝合金 温度场

[ABSTRACT] A fully thermo-mechanically coupled three-dimensional finite element model is developed for the whole process of friction stir welded 10 mm thick 7050 aluminum alloy by using ABAQUS/Explicit software. The effects of tool and backplate materials on the temperature filed evolution are systematically investigated. The results show that the tool and backplate materials have obvious influences on the temperature filed evolution. The heat loss is mainly attributed to the conduction by the tool and backplate. All the isotherms gradually contract taking the tool as the center with the increase of the bottom convective coefficient during the welding process.

Keywords: Friction stir welding Finite element analysis Aluminum alloy Temperature field

搅拌摩擦焊(FSW)作为一种节能、环保、高效的新型固相焊接技术得到国内外的广泛关注。国外已经成功将 FSW 用于航空航天、船舶等关键制造业,FSW 在国防及其他工业领域的轻合金制造中有着巨大的应用前景。

在搅拌摩擦焊焊接过程中,搅拌工具肩部与被焊板材之间的摩擦和搅拌针与被焊材料之间的摩擦所产

生的摩擦热使被焊金属达到塑性软化状态,同时在该过程中材料组织结构转变、应力应变、金属流动和垫板的热损耗等相互耦合、共同作用而形成了焊接温度场。目前,国内外已对搅拌摩擦焊的温度场进行了大量的数值模拟与实验研究工作^[1-10]。文献[7]通过数值模拟的方法研究了搅拌摩擦焊过程中,焊接速度对工件温度场的影响。Frigaard 等^[8]建立了搅拌摩擦焊接的三维传热模型,同时采用内置热电偶的方法测量了搅拌摩擦焊接过程中的温度场,通过实验对数值计算的结果进行了验证。Schmidt^[9]采用一个完全热力耦合三维有限元模型对搅拌摩擦焊接温度场进行了分析,预测了孔洞的形成及移动阶段的温度分布,然而模拟开始时搅拌工具轴肩与工件已完全接触。Kim 等^[10]采用数值模拟的方法研究了 AA5083-H18 薄板的搅拌摩擦焊工艺,并将数值模拟的最高温度与实验数据进行了对比和验证。

但至今关于不同材料的搅拌工具与垫板对搅拌摩擦焊温度场影响的文献报道甚少,与此同时,搅拌工具与垫板材料的选择是焊接工艺设计中无法避免的问题,搅拌工具决定焊接热输入量,同时也是获得高质量焊接接头的关键^[11-12]。基于此,本文研究了 7050 铝合金搅拌摩擦焊焊接过程中不同材料的搅拌工具与垫板对焊接温度场演变的影响。

1 计算方法

1.1 计算模型

在该计算模型中,焊接材料为 7050 铝合金。为研究搅拌工具对焊接温度场的影响,研究采用了 T8 工具钢和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢 2 种搅拌工具进行比较。搅拌针长度为 9.2 mm,工件尺寸为 200 mm × 150 mm × 10 mm,网格采用渐变,在焊缝中心区域单元较密集,其单元尺寸约为 1mm,如图 1 所示。

1.2 计算边界条件

垫板与被焊工件之间的接触条件非常复杂,同时二者之间存在接触热传导,从而导致工件与垫板的热传

* 国家自然科学基金(51005180)、凝固技术国家重点实验室自主研究课题(69-QP-2011)资助。

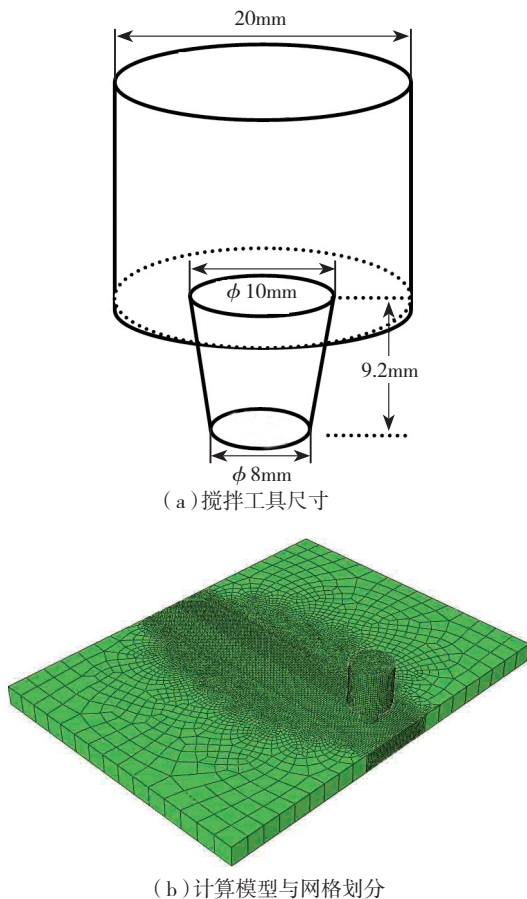


图1 搅拌工具和计算模型

Fig.1 Tool and simulation model

导非常复杂,目前还没有任何试验手段可以精确测量。Khandkar 等^[13]采用对流换热系数为 $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 来代替不锈钢垫板的热损失,结果表明计算结果与试验测得的温度吻合良好。文献[14]采用对流换热系数为 $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 来估计通过垫板的热损耗。因此对于边界条件,本文计算中不包含垫板,而是采用0(绝热)作对比、 $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 和 $4000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 的换热系数来替代不同垫板的热耗;计算中工件底部与外边约束全部位移,上表面为自由面;考虑到工件与周围空气的换热,除工件下表面外,其余表面与空气的换热系数给定为 $30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。对于初始条件,计算中初始温度为 20°C ,搅拌工具转速为 $300 \text{ r}/\text{min}$,焊接速度为 $120 \text{ mm}/\text{min}$,插入深度为 9.4 mm ,插入时间为 10 s ,停留时间为 5 s ,移动时间为 25 s 。

我们前期研究^[1]得出使用单元失效来处理单元严重畸变是非常有效的,因此,本文计算中采用了失效方式以保证计算的顺利进行,同时考虑应变强化、应变率强化与温度软化效应的J-C塑性材料模型,利用8节点、六面体、缩减积分热-结构耦合单元 C3D8RT,同样也考虑了摩擦生热与非弹性功转化成熟,非弹性功热转化

系数为 0.9。

2 计算结果与分析

2.1 搅拌工具对焊接温度场的影响

图2是垫板换热系数为 $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 时,不同搅拌工具下工件上表面温度分布云图。从图2(a)、2(b)可以清楚地看出:当搅拌工具材料是不锈钢时,其温度场高温区域明显比工具钢多,这是由于工具钢热导率比不锈钢大,使得更多的热量通过前者散失掉。当焊接时间为 5 s 时(如图2(c)、2(d)),温度场演变规律与 0.9 s 时类似,不同的是热扩散区的范围已扩大。

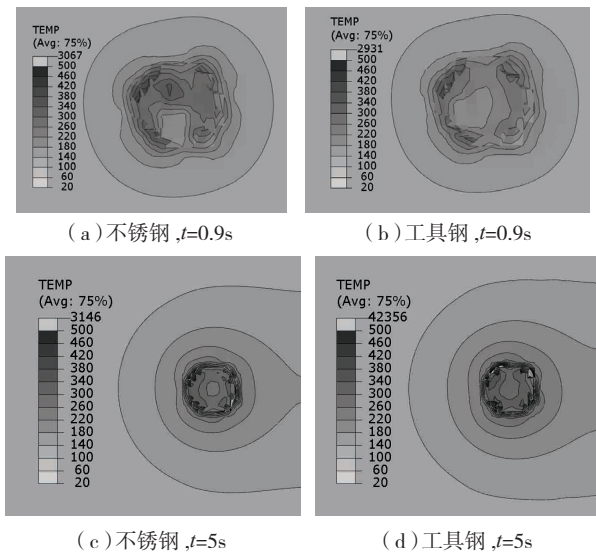


图2 插入阶段不同搅拌工具下工件上表面温度分布云图

Fig.2 Temperature contours of the top surface of welded plate at different tools during plunge stage

图3为停留过程中不同搅拌工具与时间下,焊件上表面温度分布云图,垫板换热系数 $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。可以看出温度分布云图均呈现半椭圆状,但热扩散区域范围基本一致,这种一致性可能是因为轴肩的接触使得热输入急剧增加,以及搅拌工具温度的升高,使得通过搅拌工具散失的热量所占比例较小,从而对温度场的影响不明显。

图4为垫板换热系数 $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 时,不同搅拌工具下工件上表面温度分布云图。可以看出,同一时间下热扩散区范围基本一致;随焊接时间的增加,焊件上表面的等温线演变为封闭的椭圆形,在搅拌工具前方密集后方稀疏。这种现象的出现可能是因为搅拌工具周围温度高,在热传导作用下使得相同时间内搅拌工具附近区域积累更多的能量,而远离搅拌工具的后方由于先期的预热作用,以及高温区累计的能量大部分被导出或从界面处散失使得温度场已经基本趋于稳态。

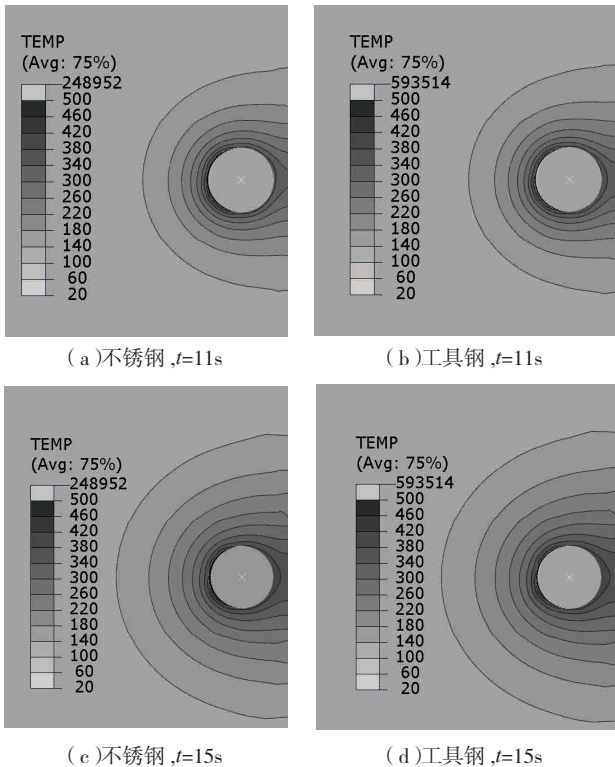


图3 停留阶段不同搅拌工具下工件上表面温度分布云图

Fig.3 Temperature contours of the top surface of welded plate at different tools during stay stage

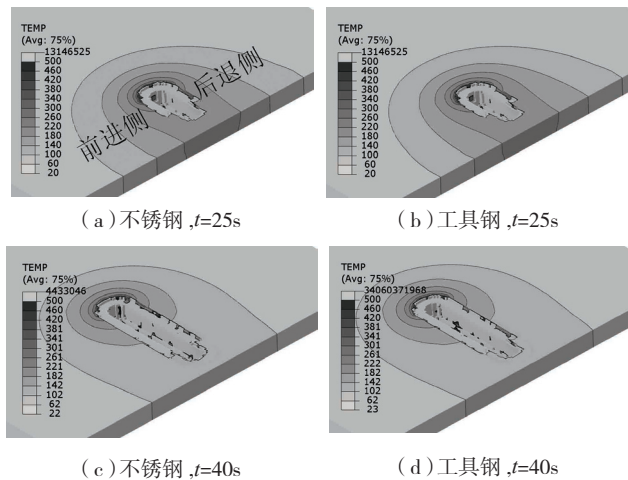


图4 焊接阶段不同搅拌工具下工件上表面温度分布云图

Fig. 4 Temperature contours of the top surface of welded plate at different tools during welding stage

2.2 垫板对焊接温度场的影响

图5为焊接完成时,不同垫板换热系数时工件上表面温度分布云图(搅拌工具材料为不锈钢)。由图中可以看出,随着垫板换热系数的增加,工件上表面各等温线以搅拌工具为中心向内显著收缩,尤其是外围的等温线,这可能是由于换热系数增大使得工件热损失较大,而搅拌工具邻近区域温度相对较高,因此,高温区域的压缩性很明显。图6为焊接完成时,不同垫板换热系数时工件下

表面温度分布云图(搅拌工具材料为不锈钢)。温度场的演变规律与图5基本一致,在此不再赘述,但等温线在前进侧与后退侧的不对称性却更明显。以上分析表明:通过垫板的热传导是热量散失的主要方式,对于热导率高的垫板材料,由于其热损失较大,因此对温度场的影响更为显著。需指出的是,由于本研究中使用单元删除技术,因此该温度场分布只能作为参考,但其变化规律与相同条件下实际焊接过程类似。如何解决删除单元对焊接温度场影响的难题是我们后期研究工作的重点。

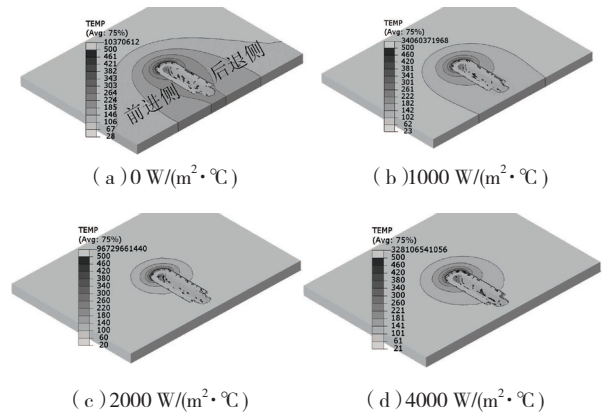


图5 不同垫板换热系数时工件上表面温度分布云图

Fig.5 Temperature contours of the top surface of welded plate at different backplate convective coefficient

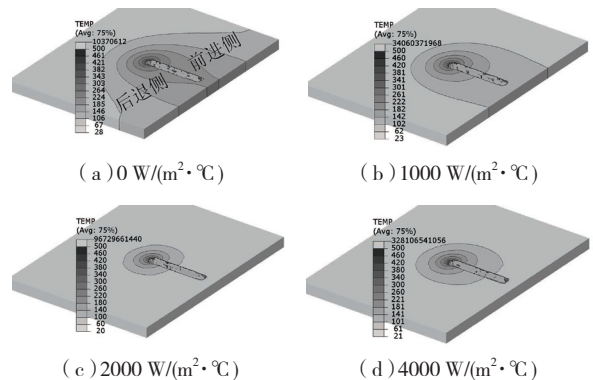


图6 不同垫板换热系数时工件下表面温度分布云图

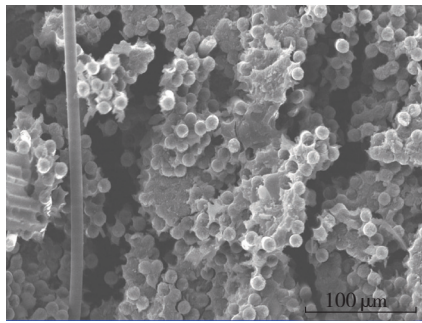
Fig.6 Temperature contours of the bottom surface of welded plate at different backplate convective coefficient

3 结论

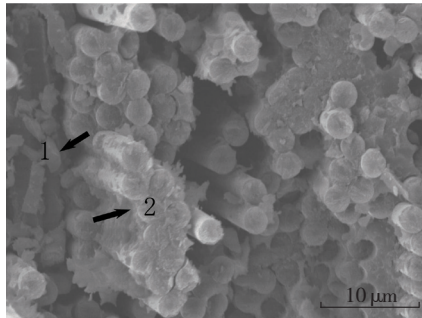
(1)垫板与搅拌工具材料物性对焊接温度场有一定的影响。1Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢作为搅拌工具时,在插入阶段初期其温度场高温区域明显较T8工具多。

(2)在整个焊接过程中,随着垫板换热系数的增加,工件上表面各等温线以搅拌工具为中心向内明显收缩。在搅拌工具前方,热扩散区范围变化较小,而后方变化明显。

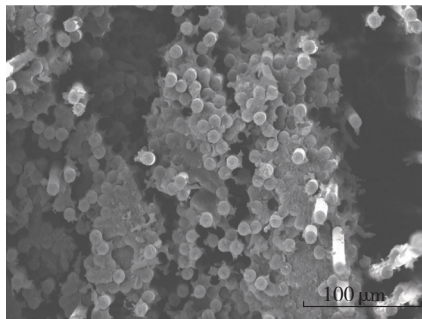
(下转第68页)



(a) 湿热老化前



(b) 室温湿热老化 240h



(c) 70℃湿热老化 240h

图5 湿热老化前后T700/3234复合材料弯曲试样断口的SEM照片
Fig.5 SEM micrographs of T700/3234 composites bending fractures (original and after moisture absorption)

纤维和基体之间的界面出现一定程度的脱粘,导致其力学性能下降。

参考文献

[1] 李成功,傅恒志,于翹. 航空航天材料. 北京:国防工业出版社,2002:123-185.
[2] Akay M, Spratt G R, Meenan B. The effects of long-term exposure to high temperatures on the ILSS and impact performance of carbon fibre reinforced bismaleimide. *Composites Science and Technology*, 2003, 63: 1053-1059.
[3] Gao Y, Dong S L, He S, et al. Characterization on stress distribution and thermal expansion behavior for M40J/AG-80 composites experienced vacuum thermo-cycling. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2006, 25(16): 1647-1657.
[4] 过梅丽,肇研,许凤和,等. 先进聚合物基复合材料的老化研究— I 热氧老化. *航空学报*, 2000, 21(4):62-65.

[5] 张立鹏,沈真. 复合材料吸湿试验的若干问题. *航空制造技术*, 2009 (增刊):85-88.
[6] 李敏,张宝艳. 5428/T700 复合材料的耐湿热性能. *纤维复合材料*, 2006 (1): 4.
[7] 肖迎红,汪信,陆路德,等. 玻纤增强热塑性聚酯复合材料湿热老化性能. *工程塑料应用*, 2001, 29 (9): 35-37.

(责编 深蓝)

(上接第 64 页)

参考文献

[1] Li W Y, Yu M, Li J L, et al. Explicit finite element analysis of the plunge stage of tool in friction stir welding. *Materials Science Forum*, 2009, 620-622: 233-236.
[2] Hamiltona C, Dymekb S, Sommers A. A thermal model of friction stir welding in aluminum alloys. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48: 1120-1130.
[3] Buffa G, Fratini L, Shivpuri R. Finite element studies on friction stir welding processes of tailored blanks. *Computers and Structures*, 2008, 86: 181-189.
[4] Zhang H W, Zhang Z. Numerical modeling of friction stir welding processes by using rate-dependent constitutive model. *Journal of Materials Science and Technology*, 2007, 23: 73-80.
[5] Xu S, Deng X, Reynolds A P, et al. Finite element simulation of material flow in friction stir welding. *Sci Technol Weld Joining*, 2001(6): 191-193.
[6] 王希靖,韩晓辉,郭瑞杰. 搅拌摩擦焊接过程温度场数值模拟. *焊接学报*, 2005, 26(12): 17-20.
[7] Zhang Z, Zhang H W. Numerical studies on the effect of transverse speed in friction stir welding. *Materials and Design*, 2009, 30: 900-907.
[8] Frigaard O. A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, 32 (5): 1189-1190.
[9] Schmidt H, Hattel J, Wert J. A local model for the thermo-mechanical conditions in friction stir welding. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2005, 13(1): 77-93.
[10] Kim D, Badarinarayan H, Kim H J, et al. Numerical simulation of friction stir butt welding process for AA5083-H18 sheets. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2010, 29: 204-215.
[11] Shindo D J, Rivera A R, Murr L E. Shape optimization for tool wear in the friction - stir welding of cast Al359-20%SiC MMC. *Journal of Materials Science*, 2002, 37(10): 4999-5005.
[12] Prado R A, Murr L E, Shindo D J, et al. Tool wear in the friction stir welding of aluminum alloy 6061 + 20 %Al₂O₃: a preliminary study. *Scripta Materialia*, 2001, 45: 75-80.
[13] Khandkar M Z H, Khan J A, Reynolds A P. Prediction of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2003, 8(3): 165-173.
[14] Chao Y, Qi X. Thermal and thermo-mechanical modeling of friction stir welding of aluminum alloy 6001-T6. *Journal of Materials Processing and Manufacturing Science*, 1998, 7(10): 215-233.

(责编 深蓝)