文章编号：1007-791X（2012）06-0491-06

2024 铝合金控冷搅拌摩擦焊温度场数值模拟研究

付瑞东[1,2,*]，赵丽伟[2]，张剑锋[2]

（1. 燕山大学 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室，河北 秦皇岛 066004；2. 燕山大学 材料科学与工程学院，河北 秦皇岛 066004）

摘　要：基于 Morfeo 有限元分析平台，采用热流耦合、热力耦合相结合的方法，对空冷和水冷条件下 2024 铝合金搅拌摩擦焊初始阶段和稳定阶段的温度场分布、特征点焊接热循环进行了数值模拟，并对模拟结果进行了实验验证。结果表明：温度场高温区域均出现在搅拌工具轴肩下方的位置，且在搅拌工具后侧位置温度最高；空冷时各特征点焊接热循环的升温速率稍高于水冷的升温速率，而降温速率远远低于水冷时的速率。实际测试的焊接热循环与模拟预测值吻合较好。

关键词：2024 铝合金；搅拌摩擦焊；温度场；数值模拟

中图分类号：TG453　　文献标识码：A　　DOI：10.3969/j.issn.1007-791X.2012.06.004

0　引言

搅拌摩擦焊（Friction Stir Welding，简称 FSW）是英国焊接研究所在 1991 年发明的一项先进的固相连接技术[1]，其工作原理如图 1 所示。在搅拌摩擦焊接过程中，高速旋转的搅拌工具（其由搅拌针和轴肩构成）慢慢地插入工件表面，通过摩擦所产生的热量，使焊缝金属温度升高并发生塑化。在搅拌工具的顶锻和机械搅拌作用下，焊缝金属发生塑性流动，伴随搅拌工具沿着一定方向的行进，完成整个焊接过程。搅拌摩擦焊的峰值温度约为 $0.8T_m$（T_m为材料的熔点），因此属于固相焊接。此外，因焊缝区金属受到剧烈的热机械作用而发生动态再结晶，导致焊缝组织显著细化。目前，搅拌摩擦焊已成功用于传统熔化焊难于焊接的 2000 和 7000 系列的高强度铝合金的焊接，并且在航空、航天、船舶及轨道交通领域得到应用。

2024 铝合金是一种热处理强化高强铝合金，其焊接接头对焊接热输入非常敏感，过高峰值温度的热循环会使焊接接头热影响区的组织发生不同程度的粗化及长大，进而恶化焊接接头的性能[2]。采用优化搅拌摩擦焊接参数（如主轴转速和行进速度）的方法可在一定程度上抑制这种组织恶化。然而，改变焊接参数受到材料热塑性流动能力、材料厚度等的限制，其调节能力有限。为此，考虑通过采用外部冷却措施，与焊接参数调整相配合，可进一步调控焊接热输入和焊接热循环。

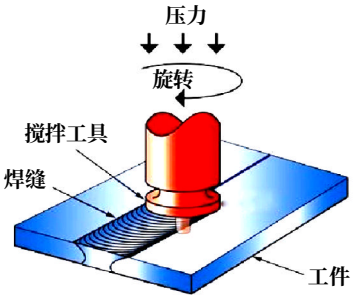


图 1　搅拌摩擦焊工作原理图

Fig. 1　Illustration of friction stir welding

搅拌摩擦焊过程中的产热及其温度场的数值模拟，一直是该领域的热点问题，其中的关键问题是搅拌摩擦焊热源模型的构建。然而，由于搅拌摩擦焊过程中的热量主要来自摩擦生热和塑性变形产热，两种热量在总热量中的比例和分布比较复杂，因此众多研究者提出了各种各样的温度场热源模型。Chao 等考虑了搅拌头轴肩的摩擦生热，建

收稿日期：2012-04-26

作者简介：*付瑞东（1968-），男，黑龙江齐齐哈尔人，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为先进焊接技术、金属材料强韧化技术，Email：rdfu@ysu.edu.cn。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

立了单热源有限元模型[3]；Frigaard 等将搅拌摩擦焊过程简化为在轴向力的作用下，旋转轴相对于平面滑动摩擦的单热源模型[4]；Schmidt 等提出了一种基于塑性理论的产热模型，认为影响热量产生的主要因素是随温度变化的屈服应力[2]；王磊建立了一种简化的热源模型，并将该热源模型应用于焊接过程的温度场动态仿真，得到了焊接过程中不同位置和不同时刻的热循环曲线，并确立了温度场在空间和时间上的分布规律[5]。朱文峰等立足于单热源模型的不足之处，综合考虑搅拌头轴肩的转动摩擦生热和搅拌头的塑性变形剪切生热，建立了搅拌摩擦焊双热源有限元模型，通过 ANSYS 软件的二次开发，实现了该搅拌摩擦焊工艺瞬态热交换的数值仿真，并获得了焊接全过程的三维温度场分布[6]。上述研究对于搅拌摩擦焊数值模拟和仿真研究奠定了重要的理论基础。然而，由于搅拌摩擦焊过程中塑性金属的传热和流动，既有固体学的特征，又有流体学的特征，因此目前广泛使用的商用模拟软件如 ANSYS、DEFORM、ADINA 等都存在一定的局限性。

本文采用专业有限元软件 Morfeo 对控冷条件下搅拌摩擦焊焊接接头附近区域的温度场进行数值模拟，并对两种冷却条件（空冷和水冷）下焊接温度场的分布情况以及特征点所经历的热循环过程进行表征，为进一步优化控冷搅拌摩擦焊焊接参数提供参考。

1 数值模拟计算方法

搅拌摩擦加工过程中，热输入主要来自 3 个方面：轴肩与工件表面的摩擦热（轴肩热输入）、搅拌针与工件接触区域的摩擦热（搅拌针热输入）和搅拌针附近金属的塑性变形热。

目前，国内外已发展了多种搅拌摩擦焊接过程中的产热模型，但这些模型基本都是通过实测所得的数据来建立产热方程，然后将该产热方程作为热源输入到计算模型中。而基于 Morfeo 平台的产热模型，并不依赖于实测数据，它将整个模拟过程分成两个部分：

1）建立热流耦合模型（又称为局部模型），该模型是一个流体动力学模型，根据搅拌头附近材料流动情况，可以得到搅拌头附近的热源分布，从而计算出温度场、速度场和粘性耗散，并可对搅拌头附近局部区域的温度场、速度场、压力场和塑性变形能等进行预测。

2）建立热力耦合模型（又称为整体模型），该模型中输入工件模型中的热源来自热流耦合模型中计算得到的塑性变形能。其可预测整个工件在加工过程中的温度场分布、温度循环曲线以及应力和残余应力。

两个计算模型之间的具体联系如图 2 所示。

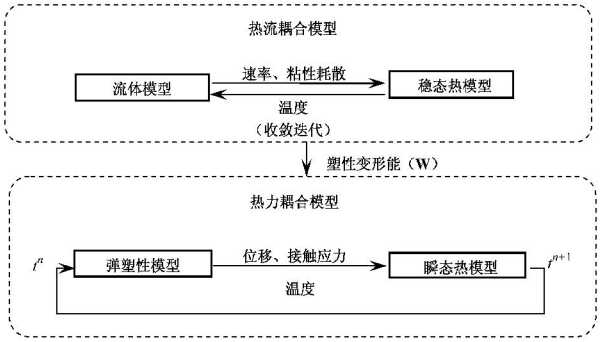


图 2 Morfeo 模拟两个计算模型之间的联系

Fig. 2 The relationship between two calculation modes based on Morfeo software simulation

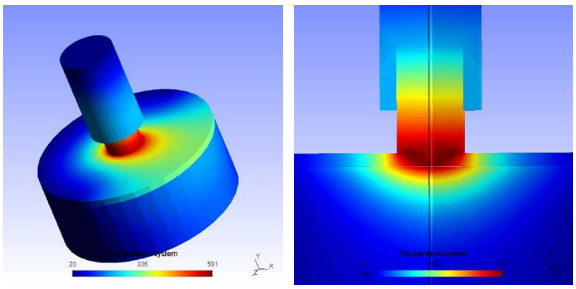
实际焊接温度场模拟可简化为初始阶段、稳定阶段和结束阶段 3 个阶段。其中初始阶段指搅拌针压入阶段（也可认为焊接热源的形成阶段）；稳定阶段为搅拌头沿加工焊缝移动的阶段，其约占整个加工阶段的 90%左右；结束阶段指的是搅拌针的拔出阶段。本文重点探讨前两个阶段。模拟的材料为 2024 高强铝合金，模拟时采用的焊接参数为：主轴转速ω=800 r/min，行进速度v=80 mm/min，并分别讨论空冷和水冷条件下的焊接温度场分布。此外，为验证模拟结果正确与否，采用在特征点位置处埋置热电偶的方法，对实际焊接接头中的焊接热循环进行测试。

2 焊接初始阶段热源温度分布

热流耦合模型相当于一个热源计算模型，主要研究的是搅拌针附近很小区域材料的流动情况，进而计算得到搅拌工具附近的温度场、速度场和压力场分布以及粘性耗散，最后利用得到的粘性耗散积分求得相当于热源的塑性变形能，加载到后续计算的热力耦合模型中，因此热流耦合模型的模拟计算中并未考虑不同的外界条件。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 3 为焊接初始阶段搅拌工具钻入工件后形成的热源温度分布。图 3 (a) 为模型整体系统进入稳定阶段时的 3D 温度场分布云图，图 3 (b) 为 2D 横截面温度分布。



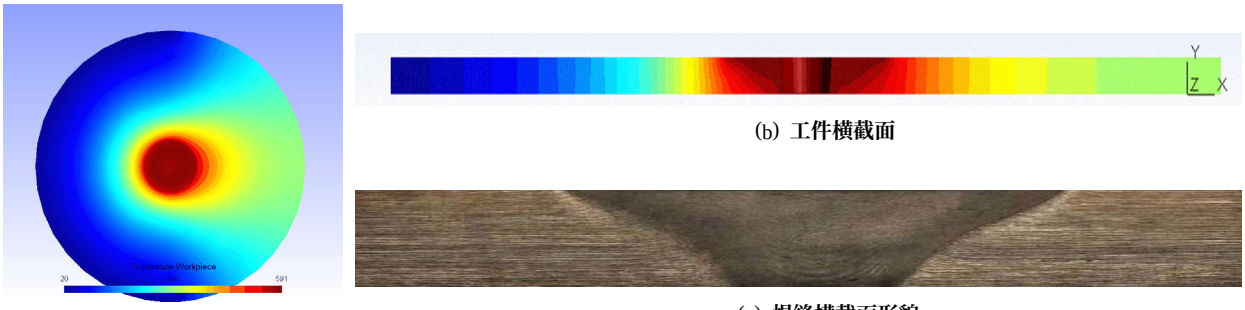
(a) 3D 视图　　(b) 2D 横截面视图

图 3　焊接初始阶段热源温度场分布

Fig. 3　Temperature distribution of weld heat resource during initial stage of FSW

从图中可以清楚地看到，热源峰值温度达到 591 ℃，已超过 0.8 T_m的常见温度范围并接近 2024 铝合金的熔点（约为 638 ℃），其原因有待进一步验证。温度最高区域出现在轴肩范围以内，并且分布在轴肩以下靠近工件上表面的一个小区域内。这说明在初始阶段焊接的热量的主要来自于搅拌头轴肩与工件之间的摩擦产热。

图 4 为热源温度场达到稳态时工件上表面温度分布。从图 4 (a) 中可以看到，工件的上表面与搅拌头轴肩接触的区域温度比较高；沿厚度方向向底部温度逐渐降低。图 4 (b) 为沿厚度方向的热源温度分布，其呈“V”型分布，与图 4 (c) 实际焊缝截面形貌比较，可以看出二者非常类似，这说明温度场的分布对焊缝区微观组织结构的演变有极其重要的影响。



(a) 工件顶面

(b) 工件横截面

(c) 焊缝横截面形貌

图 4　焊接稳定阶段时温度场分布及焊缝截面形貌

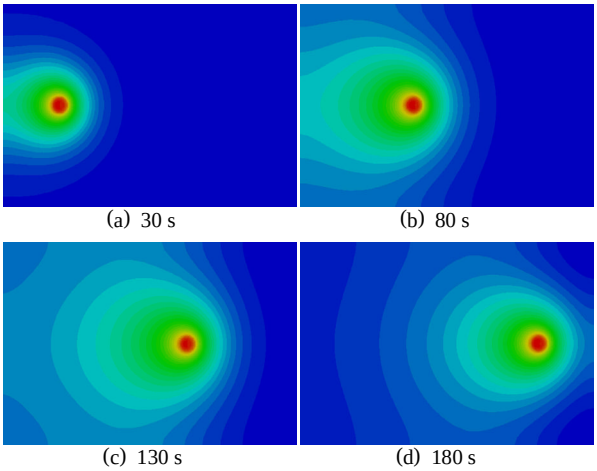
Fig. 4　Temperature distribution during steady stage and transversal morphology of FSW joint

此外还可看到，搅拌区附近的温度远高于其他区域，温度梯度比较大。模拟计算的结果表明，焊缝的最高温度点并不是出现在搅拌工具的中心位置，而是搅拌工具后方，即搅拌针与轴肩的接合处。最高温度之所以会出现在搅拌头后方，是因为在搅拌工具沿焊接方向移动的过程中，工具前端的金属受到搅拌工具的挤压而流向后侧，其本身的热流也随之带到后侧而使此处温度较其他位置要高。

3　焊接稳态阶段温度场分布

3.1　空冷条件下工件的温度场分布

图 5 为空冷条件下，上述热源作用于工件后不同时刻的温度场模拟结果。



(a) 30 s　　(b) 80 s

(c) 130 s　　(d) 180 s

图 5　空冷条件下工件不同时刻温度等值线分布

Fig. 5　Temperature fields at different time under air cooling

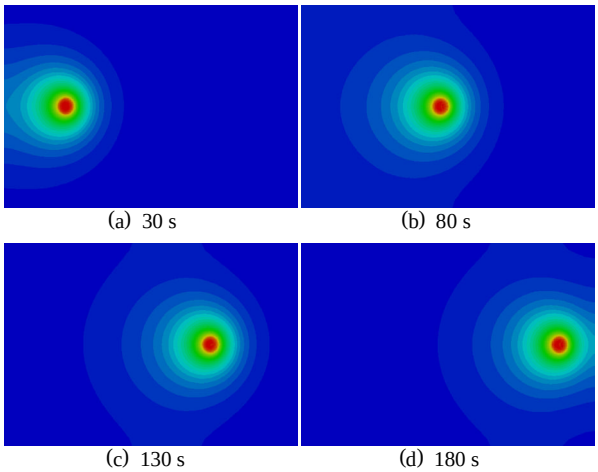
可以看到，从 30 s 以后焊接过程进入“稳态

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

阶段”，也就是焊接时最高温度始终保持在 507 ℃左右的动态类稳态阶段。随着搅拌摩擦焊接过程的进行，焊接热源仍然非常集中，整个工件表面温度迅速变化，温度升高较快，高温区域随着搅拌工具沿着焊缝向前移动；搅拌工具前方的温度较低，后方的温度较高；搅拌工具前方位置的温度梯度较大，而后方温度梯度较为平缓；此外，由于空气中焊缝中的热量主要在工件内进行传导，随焊接过程的进行，温度分布范围逐渐扩大。当焊接时间超过 180 s 后，温度分布在模拟的工件尺寸范围内达到稳态。

3.2 水冷条件下工件的温度场分布

图 6 为水冷条件下搅拌摩擦焊温度分布随焊接时间变化的情况。对比图 5 中空冷条件下工件温度场可以明显看出：在有水冷的情况下，工件温度场分布区域明显缩小并呈封闭环状。搅拌工具后侧位置的温度梯度比前侧大，这是因为水的散热系数比空气高，在焊接过程中由于水的冷却作用，温度迅速下降所致。此外从水冷条件下温度场分布范围来看，焊接热影响区的范围明显缩小，且高温区都被约束在搅拌工具轴肩作用范围内。



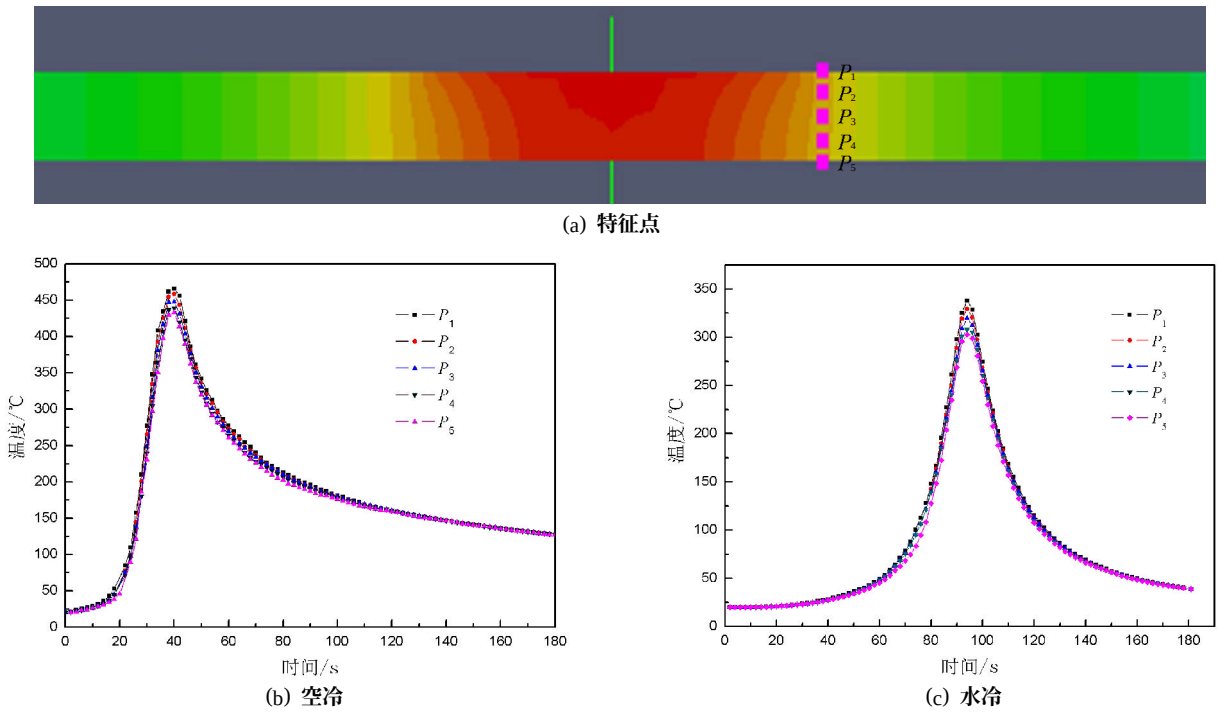
(a) 30 s (b) 80 s (c) 130 s (d) 180 s

图 6 水冷条件下工件不同时刻温度等值线分布

Fig.6 Temperature fields at different time under water cooling

4 特征点焊接热循环

图 7 为空冷和水冷条件下沿焊缝厚度方向上 5 个特征点的温度循环曲线。



(a) 特征点

(b) 空冷 (c) 水冷

图 7 焊缝厚度方向上不同位置的温度循环

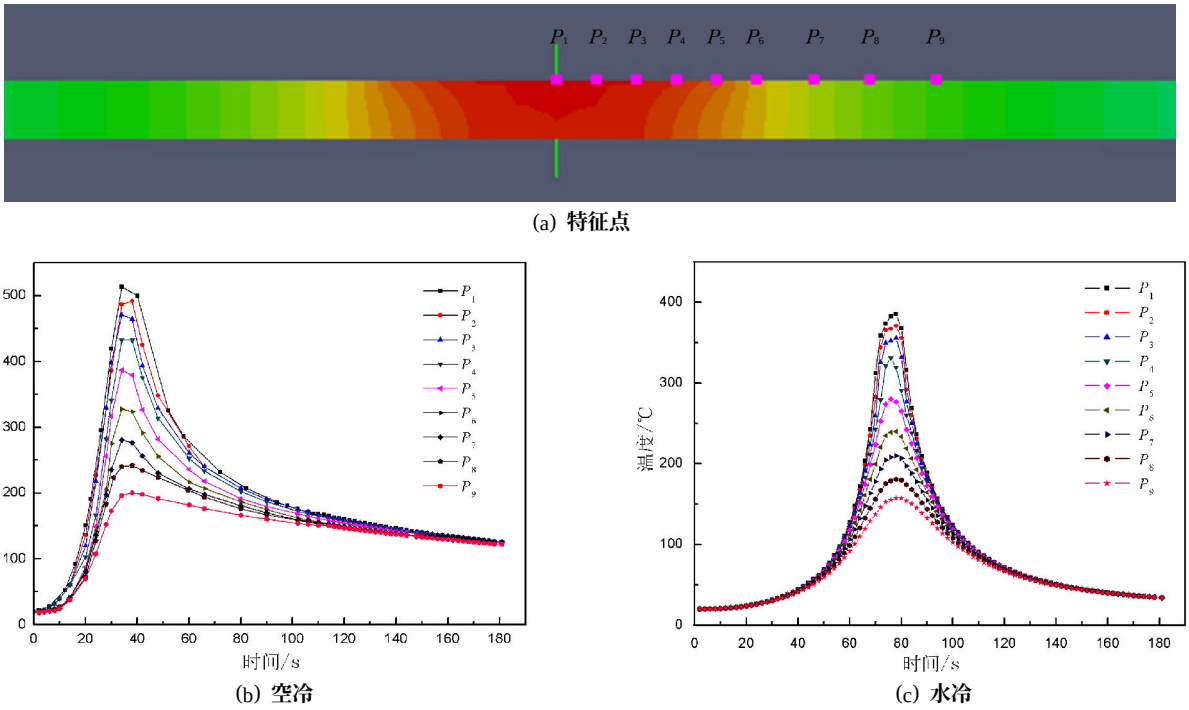
Fig. 7 Weld thermal cycle of different positions along thickness direction

从图中可以看出，每个点的焊接热循环特征基本一致，特征点的峰值温度差并不是很大，上下表面的温度梯度较小，这主要是因为模拟中采用的是薄板，温度传导很快。此外，对比两种焊接条件下

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

厚度方向上各个特征点的温度循环曲线可以看出：空气中各特征点温度循环曲线的升温速率比冷水中的稍高，降温速率却远远低于冷水中的，这主要是因为在加工过程中，相比于冷水，空气中的散热主要依靠工件本身的热传导，而水中焊接散热主要依靠外部水冷作用。

图 8 是空冷和水冷条件下沿焊缝方向距焊缝中心不同位置（0 mm，1.8 mm，3.6 mm，5.4 mm，7.2 mm，9.0 mm，11.5 mm，14 mm 和 17 mm）处特征点的焊接热循环曲线。对比图 8（b）、（c）可以看出，在水中焊接时，P_1点热循环的峰值温度在 400 ℃以下，远低于空气中焊接时此位置处的峰值温度；同时在P_9点位置的热循环峰值温度，空气中为 200 ℃，而水中为 150 ℃。对比空气和水中焊接时的升温和降温速率，同样可以看出前者中的升温速率稍高于后者，而后者的降温速率却远远高于前者。



(a) 特征点

(b) 空冷　　(c) 水冷

图 8　垂直于焊缝不同位置处温度循环曲线

Fig. 8　Weld thermal cycle of different positions along transversal direction

5　模拟结果验证

选择了水冷条件下、工艺参数为ω=800 r/min，v=80 mm/min 进行实际焊接实验，并测试了与P_8位置相同的特征点焊接热循环，测试结果与模拟结果对比如图 9 所示。可以看出模拟结果与实测值吻合得较好。但是在焊接循环末期的实测值要明显高于模拟值，这是由于实验中虽然采用了循环水进行冷却，但水温因焊接热的作用有所上升所致。通过以上对比可知，本文针对搅拌摩擦焊接过程提出的有限元模型可以较好地预测实际焊接过程的温度场分布。

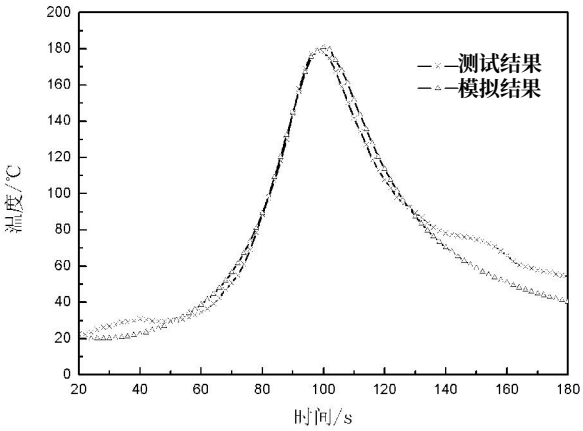


图 9　实验数据与模拟数据对比

Fig. 9　Comparison between calculation result and experimental result

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

6 结论

1）基于热流耦合模型（即热源计算模型）的模拟结果表明：温度场的高温区域出现在搅拌工具轴肩下方靠近工件上表面的一个小区域内，说明轴肩作用区的产热是搅拌摩擦焊的主要热量来源。

2）基于热力耦合模型的模拟结果表明：空冷和水冷条件下焊接初始阶段（即搅拌针的压入过程）高温区均出现在搅拌工具轴肩与工件上表面接触的区域；焊接稳定阶段的温度场分布均为搅拌工具前方的温度较低，后方的温度较高。空冷条件下焊接热循环的升温速率高于水冷时的升温速率，而降温速率却远远低于水冷时的降温速率。

3）通过实测得到水冷条件下特征点焊接热循环结果与模拟结果拟合较好，可为进一步优化空冷搅拌摩擦焊工艺参数提供参考。

致谢

感谢北京创联智软科技有限公司为本论文提供软件技术支持。

参考文献

[1] Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C, et al.. Friction stir welding: Great Britain, 9125978.8［P］. 1991.

[2] Schmidt H B, Hattel J H. Thermal modelling of friction stir welding［J］. Scripta Materialia, 2008,58（5）: 332-337.

[3] Chao Y, Qi X. Thermal and thermal-mechanical modeling of friction stir welding of aluminum alloy 6001-T6［J］. Materials Processing and Manufacturing Science, 1998,7（10）: 215-233.

[4] Frigaard O. A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloys［J］. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001,32（5）: 1l89-l190.

[5] 王磊, 谢里阳, 张丹. 搅拌摩擦焊接过程温度场动态仿真［J］. 东北大学学报, 2008,29（7）: 1025-1028.

[6] 朱文峰, 徐春. 高速列车铝合金车身双热源搅拌摩擦焊仿真［J］. 焊接学报, 2008,29（10）: 45-49,51.

Numerical simulation of temperature field of control-cooling friction stir welding for 2024 aluminium alloy

FU Rui-dong[1,2], ZHAO Li-wei[2], ZHANG Jian-feng[2]

（1. State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China）

Abstract: Based on FEA software of Morfeo, the temperature distribution and weld thermal cycles of the friction stir welding（FSW）joints of 2024 aluminium alloy are simulated under air and water cooling conditions using the method of thermal-fluent and thermal-mechanical coulping. The results show that the high-temperature zones are located at the interface between the shoulder of the stir tool and the top surface of workpiece. Moreover, the temperature at the back of the stir tool is higher than that at the front. The heating rate of the case in air welding is slightly faster than that in water welding, while the cooling rate in air welding is much lower than that in water welding. The experimental values involved in the weld thermal cycles coincide with the calculated results.

Key words: 2024 aluminium alloy; friction stir welding; temperature field; numerical simulation

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net