

回填式搅拌摩擦点焊工具的温度与扭矩变化规律研究

陈云霞^{1, 2}, 孙春晓³, 伍燚³, 武晓燕³, 李军^{3, 4}, 江海涛³

1. 奇瑞汽车股份有限公司 安徽芜湖 241003

2. 新能源汽车轻量化技术安徽省重点实验室 安徽芜湖 241003

3. 北京科技大学高效轧制与智能制造国家工程研究中心 北京 100083

4. 蔚来汽车科技(安徽)有限公司 安徽合肥 230001

摘要: 基于DEFORM-3D软件, 建立了异种材料回填式搅拌摩擦点焊过程的热机耦合模型, 对焊具开展了旋转速度、下扎速度及深度温度、扭矩分析, 得到了轴肩与搅拌针在焊接过程的温度、扭矩的演化规律。通过对比6种典型工艺参数发现, 转速的升高、下扎速度的降低与下扎深度的增加均会导致焊具的温度升高。下扎速度对焊具峰值扭矩的影响较小, 转速的降低与下扎深度的增加会导致焊具扭矩的增大。

关键词: 回填式搅拌摩擦点焊; 焊具; 温度; 扭矩

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2024.08.010

回填式搅拌摩擦点焊 (Refill Friction Stir Spot Welding, RFSSW) 技术是德国GKSS中心于2002年发明的一种新的点焊技术, 其焊具由轴肩、搅拌针和压紧环三部分组成^[1], 通过轴肩和搅拌针的相互配合实现下扎与回填, 可消除常规搅拌摩擦点焊 (Friction stir spot welding, FSSW) 中普遍存在的匙孔缺陷, 增大接头的有效承载面积, 提高接头的静载强度^[2-4]。

在焊接过程中, 轴肩和搅拌针通过与被焊板材的强烈摩擦来产生热量, 因此在工作中容易发生磨损, 轴肩和搅拌针的间隙易于被热塑性材料填充而粘连甚

至卡死^[5]。严重的磨损不仅会加快焊具的报废, 增加使用成本, 还会导致接头力学性能下降, 影响使用性能。焊具的磨损跟被焊材料的强度以及各工艺下的工况 (温度、受力) 紧密相关。当前, 对于RFSSW 的研究主要集中在焊接设备开发、焊接过程和成形机理研究、焊缝组织与力学性能分析、异种材料连接这几个方面, 对于焊具工况的研究较少。Brigham Larsen等人^[6]使用集成的传感器和称重传感器从焊接机采集焊接过程中的载荷和扭矩数据, 表明扭矩的分析对焊具的受力情况有很好的体现作用。

因此，针对回填式搅拌摩擦点焊焊具的温度与扭矩开展研究，对延长焊具的使用寿命具有重要的意义。本文基于DEFORM-3D软件，利用数值模拟的方法，对2系和7系铝合金异种材料搭接进行RFSSW焊接仿真，来研究各工艺下轴肩与搅拌针的温度、扭矩变化规律。

热机耦合模型

1.几何模型与网格划分

回填式搅拌摩擦点焊几何结构如图1所示，轴肩尺寸内径为6mm、外径为9mm、高8mm，搅拌针直径6mm、高10mm，压紧套内径9mm、外径18mm、高4mm，垫台直径10mm，高4mm。2B06铝合金板（上）和7B04铝合金板（下）尺寸分别为50×50×1mm、50×50×1.5mm。

对焊具与板材选用合适的单元尺寸进行四面体网格划分，如图2所示。为了保证计算精度，对板材的焊点区域进行了网格加密，其余部分网格则稀疏。模拟过程中，采用网格重划分技术以解决网格畸变问题，当焊接工具与工件的网格相互渗透距离达到网格边长的0.7倍时，判定网格重新划分开启。

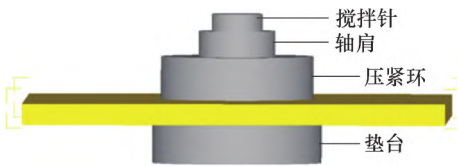
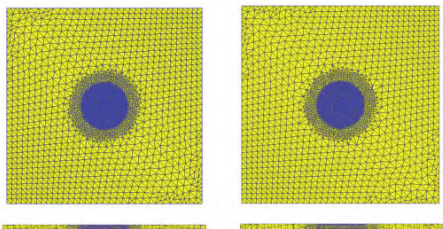


图1 RFSSW几何模型



a) 上板 b) 下板
图2 板材网格划分

2.材料属性与物理模型

将被焊板材视为刚-塑性材料，焊具则设为刚体。在数值模拟中，常用Johnson-Cook本构模型、Arrhenius

双曲正弦关系式来定义塑形体在变形中流变应力与温度、应力和应变率的函数关系，两模型在DEORRM-3D软件中均有内置。上板2B06铝合金采用JC本构模型，下板7B04铝合金采用Arrhenius关系，具体参数均可从文献^[7, 8]中调研得到。焊具材料为 H13 热作模具钢，直接选用数据库中收录的H13钢的材料属性。

3.边界条件与接触设置

工件和焊具及空气发生对流换热，对流换热系数设定成0.02N/s mm℃，工件与焊具及垫台之间的热传导设置成11N/s mm℃。环境和工件初始温度设置为20℃。焊具与被焊板材之间设置成不可分离；摩擦类型为剪切摩擦，定值0.3；压紧环和垫台之间的夹持作用使得搭接时两板不会发生偏移，为了贴近实际情况，这里把压紧套、垫台与两板之间的剪切摩擦系数调整为5，上下板之间的摩擦也调整为1。

表1为改变工艺参数后，控制单一变量的模拟参数清单。其中，编号1、2、3对比分析转速的影响；编号2、4对比分析下扎速度的影响；编号2、5、6对比分析下扎深度的影响。

表1 模拟参数清单

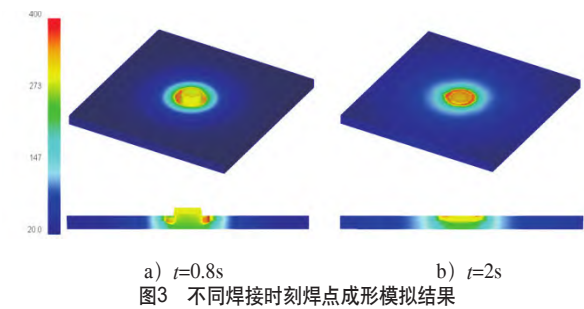
编号	转速 / (r/min)	下扎深度 /mm	下扎速度 / (mm/s)	回填速度 / (mm/s)
1	900	1.2	1.5	1
2	1500	1.2	1.5	1
3	1800	1.2	1.5	1
4	1500	1.2	1	1
5	1500	1	1.5	1
6	1500	1.4	1.5	1

结果及讨论

1.数值模型验证

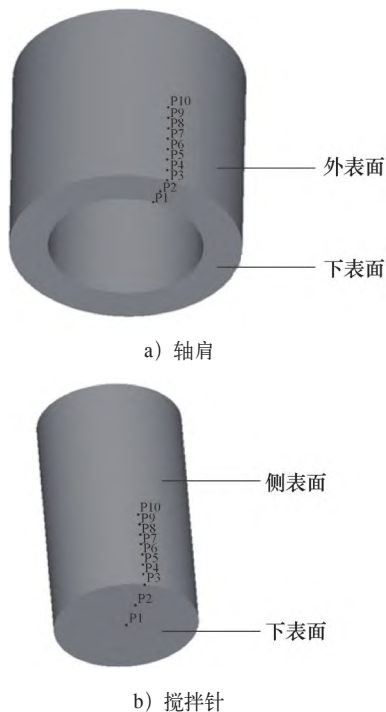
在典型焊接参数转速 $w=900\text{r/min}$ 、下扎深度 $d=1.2\text{mm}$ 、下扎速度 $v_1=1.5\text{mm/s}$ 及回填速度 $v_2=1\text{mm/s}$ 下，焊接时刻 $t=0.8\text{s}$ 及 $t=2\text{s}$ 下焊点成形的模拟结果如图3所示。0.8s时下扎阶段结束，上下板皆发生一定的上凸，上下板界面呈“π”状，界面处贴紧能形成很好

的冶金结合；2s回填结束，焊点表面成型良好，焊接过程中并未出现充填不满及环沟槽等问题，焊后表面平整，上下板界面处呈“碗”状。与苏志强等人^[9]文章中呈现的RFSSW实际成形过程做对比，良好吻合，因此，所建立的仿真模型可有效模拟RFSSW过程。

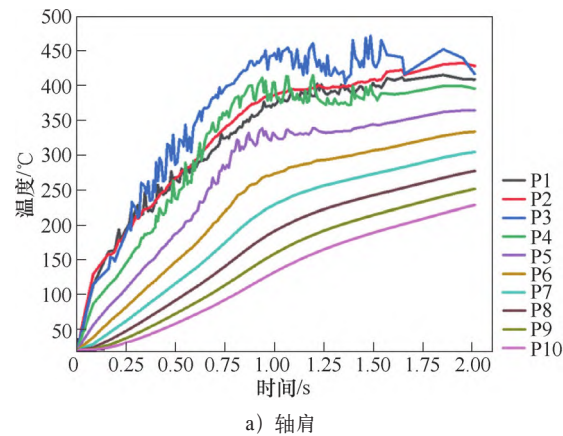
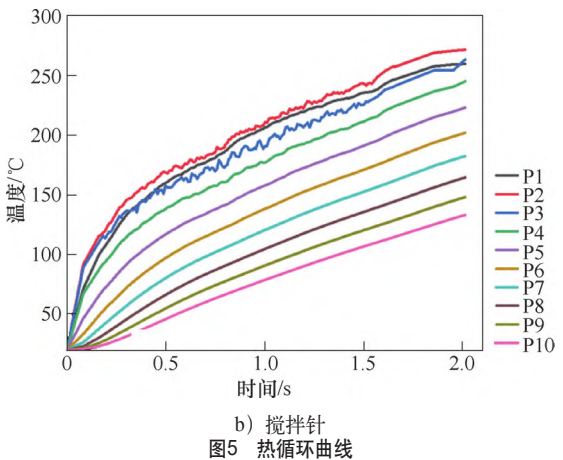


2.焊具温度场及热循环分析

为了精确直观地呈现搅拌头参数的变化，利用点追踪法对焊具多个位置进行获取，如图4所示。热循环曲线如图5所示。结合图6、图7轴肩与搅拌头的温度云图，可以得到焊具的温度演变规律。



在轴肩下扎、搅拌针上抬的过程中，轴肩下表面和外表面作为产热面与塑性材料逐渐接触充分，轴肩下端（图4a点P1、P2、P3、P4、P5处）的温度曲线迅速上升，如图6（ $t=0.8s$ ）所示，两个产热面交界处（图



4a点P3处）拥有最大的线速度且为摩擦的最前沿而成为最高温区；由于搅拌针的侧表面不会与热塑性材料发生接触，所以在整个焊接过程中产热面总是在下表面（见图7），且搅拌针最高温区（图4b点P2处）在下表面中心（图4b点P1处）与下表面最外侧（图4b点P3处）之间，这是由于热塑性材料并未填充满轴肩与搅拌针形成的空腔，使得线速度最大的下表面最外侧并未与热塑性材料充分接触的缘故，搅拌针温度远低于轴肩（相差约200℃），说明此阶段轴肩与热塑性材料的接触力远大于搅拌针，为主要摩擦产热源。

在轴肩回抽、搅拌针下扎的过程中，轴肩外表面与热塑性材料的接触面积逐渐减小，轴肩下端（图4a点P1、P2、P3、P4、P5处）的温度曲线逐渐达到平稳，说明此时轴肩与被焊板材之间的热传导达到了动态平衡，至回填结束，只剩下下表面与热塑性材料相接触，此时整个下表面成为了轴肩的高温区（图6 $t=2s$ ），轴肩上端（点P6、P7、P8、P9、P10处）由于远离热源，随着热的传导而始终未到达最高温度；

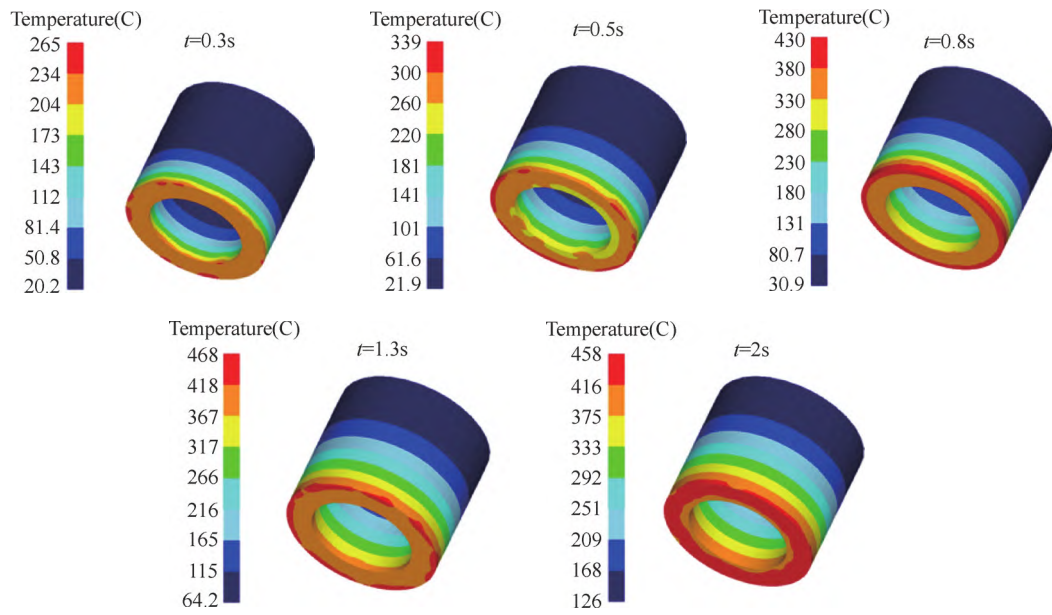


图6 不同焊接时刻轴肩温度云图

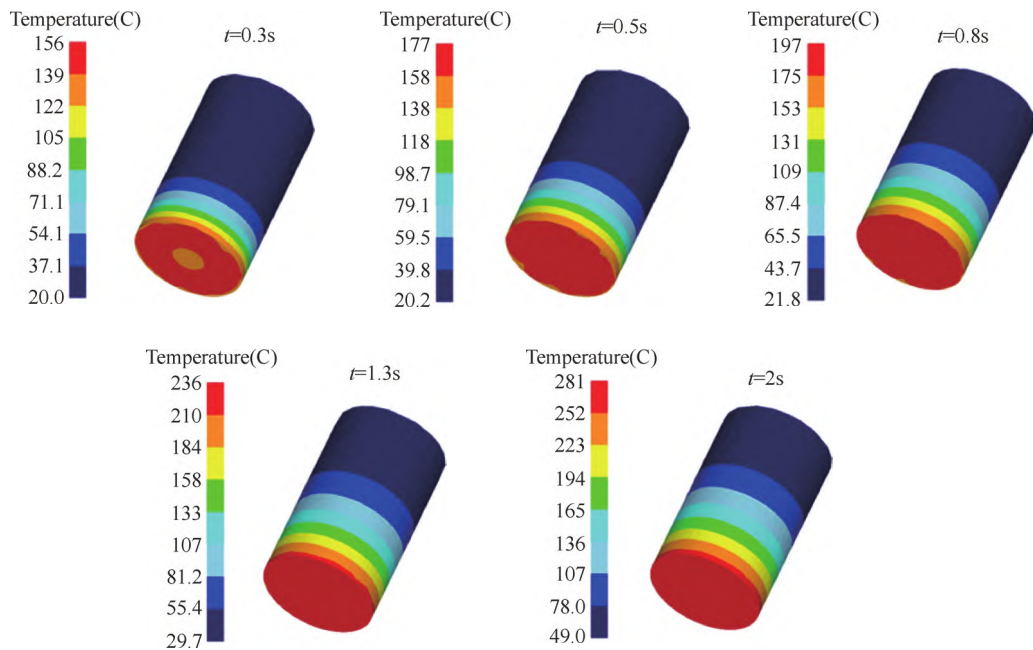


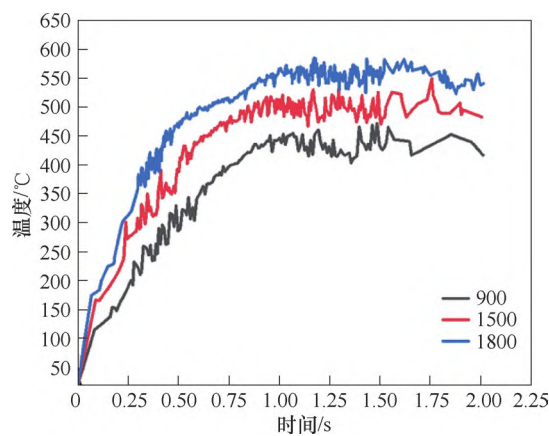
图7 不同焊接时刻搅拌针温度云图

与轴肩不同，搅拌针热循环曲线一直递增，不会在此阶段达到平稳，说明搅拌针的下扎增大了与热塑性材料的压力从而增大了摩擦产热。

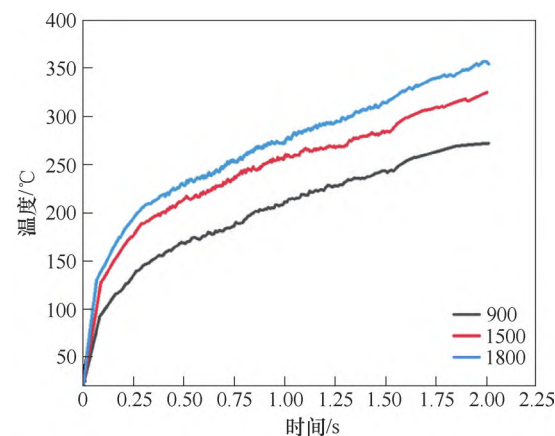
将6种工艺下轴肩最高温处（图4a点P3）与搅拌针最高温处（图4b点P2）的温度数据进行整理对比分析。随着转速的升高，焊具的峰值温度明显增大，如图8所示。轴肩的峰值温度：1800r/min的584℃ > 1500r/min的548℃ > 900r/min的471℃。搅拌针的峰值温度：

1800r/min的357℃ > 1500r/min的324℃ > 900r/min的271℃。

编号2工艺的下扎速度为1.5mm/s，在0.8s时下扎结束，下扎深度1.2mm，总用时2s。编号4工艺的下扎速度为1mm/s，在1.2s时下扎结束，下扎深度1.2mm，总用时2.4s。如图9a所示，由于下扎速度的降低，编号4的总焊接时间变长，使得焊具与热塑性材料的摩擦接触时间更久，导致轴肩与搅拌针的峰值温度升高。编



a) 轴肩



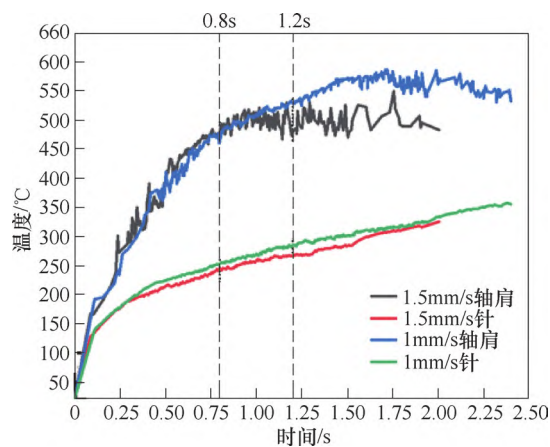
b) 搅拌针

图8 不同转速下针热循环曲线

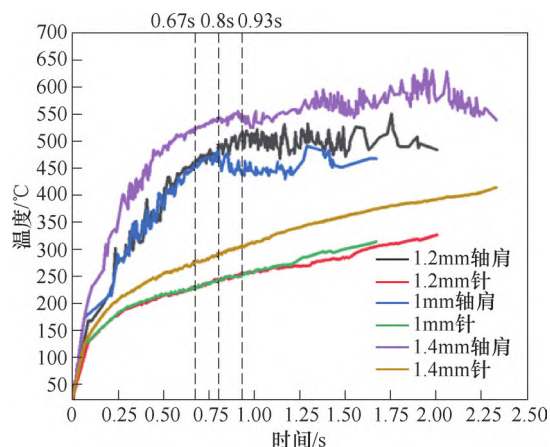
号4工艺的轴肩和搅拌针在1.2s时的温度均高于编号2工艺的轴肩和搅拌针在0.8s时的温度，说明相同的行程（或下扎深度），下扎速度小的焊具温度要高于下扎速度大的。轴肩的峰值温度：1mm/s的586℃>1.5mm/s的548℃；搅拌针的峰值温度：1mm/s的357℃>1.5mm/s的324℃。

编号2、5、6的工艺下扎深度分别为1.2mm、1mm和1.4mm，分别在0.8s、0.67s和0.93s下扎到最深处，如图9b所示。随着下扎深度的增加，有更多的热塑性材料与焊具接触，使得摩擦产热增加，进而使得焊具的峰值温度升高。轴肩的峰值温度：1.5mm的627℃>1.2mm的548℃>1mm的490℃；搅拌针的峰值温度：1.5mm的414℃>1.2mm的324℃>1mm的313℃。

综上，转速的升高、下扎速度的降低与下扎深度的增加会导致焊具的温度升高。编号3（转速1800r/min、下扎速度1.5mm/s）与编号5（转速1500r/min、下扎速度1mm/s）的两种工艺参数下的轴肩与搅拌针的峰



a) 不同下扎速度



b) 不同下扎深度

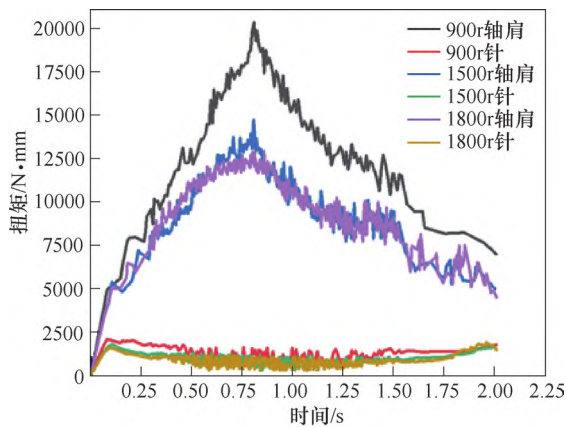
图9 不同条件下焊具热循环曲线

值温度分别为584℃与357℃、586℃与357℃，几乎相等，说明在焊接时可通过多参数的调节来得到相同的焊接温度，以达到相似的焊接效果。并且可以通过尝试、改变参数来优中选优，以求达到兼顾板材焊接性能良好与焊具寿命长久的目的。

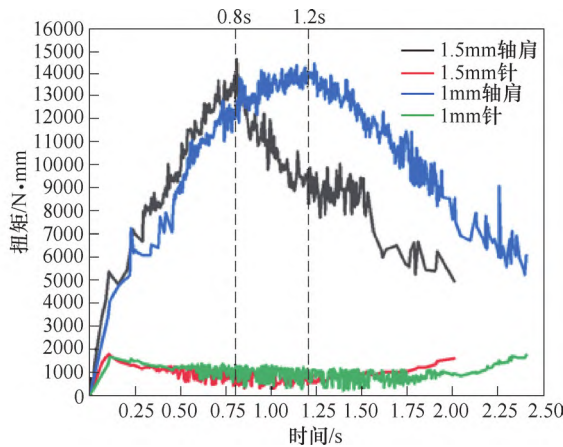
3.焊具扭矩分析

不同转速、下扎速度与下扎深度下焊具扭矩随时间变化曲线如图10所示。在轴肩下扎、搅拌针上抬的过程中，轴肩的扭矩逐渐增大，在下扎结束时达到峰值；搅拌针扭矩远小于轴肩，在焊接初期迅速增大，而后随着搅拌针下表面处的热塑性材料逐渐升温软化而下降趋于平稳。在轴肩回抽、搅拌针下扎的过程中，轴肩的扭矩逐渐减小；搅拌针的扭矩小幅度增加，呼应下扎导致的压力增大。

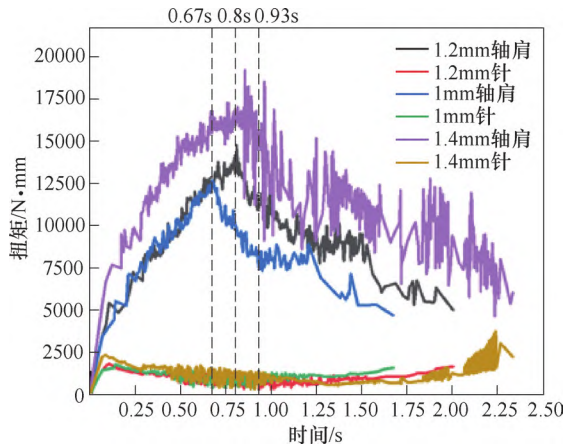
如图10a所示，由于不同转速下被焊板材的高温软化程度不同，转速为900r/min的轴肩的峰值扭矩远大



a) 不同转速



b) 不同下扎速度



c) 不同下扎深度

图10 不同条件焊具扭矩

于1500r/min和1800r/min的, 1500r/min的稍大于1800r/min。搅拌针也保持900r/min>1500r/min>1800r/min的规律。如图10b所示, 下扎速度的改变除了延长了焊接时间, 几乎不影响焊具的扭矩, 两工艺下轴肩扭矩均在下扎结束时刻达到峰值且相等。如图10c所示, 随着

下扎深度的增加, 轴肩和搅拌针的峰值扭矩均发生增大。扭矩随时间变化的曲线下覆盖的面积更大, 表明搅拌头需要在更大的力下保持更长的时间, 这必然对搅拌头在更高温度和更大受力下工作提出了更高的性能要求。

综上, 下扎速度对焊具峰值扭矩的影响较小, 转速的降低与下扎深度的增加会导致焊具扭矩的增大。在满足板材焊接性能的条件下, 可考虑提高转速、降低下扎深度来减小焊具在工作中的受力与磨损。

结语

1) 通过DEORM-3D软件建立的异种材料回填式搅拌摩擦点焊热耦合模型对焊点成型的仿真效果良好。下扎阶段结束时, 上下板界面呈“π”状, 界面处贴合紧密; 回填结束时, 焊后表面平整, 上下板界面处呈“碗”状。

2) 在轴肩下扎、搅拌针上抬的过程中, 轴肩下表面与外表面作为产热面, 两面交界处拥有最大的线速度而成为最高温区, 扭矩持续升高; 搅拌针温度远低于轴肩, 最高温区位于下表面中心与外侧之间, 扭矩在初始阶段上升迅速, 而后逐渐下降保持平稳。在轴肩回抽、搅拌针下扎的过程中, 轴肩温度保持平稳, 扭矩逐渐下降; 搅拌针温度持续升高, 扭矩小幅度增加。

3) 转速的升高、下扎速度的降低与下扎深度的增加会导致焊具的温度升高。下扎速度对焊具峰值扭矩的影响较小, 转速的降低与下扎深度的增加会导致焊具扭矩的增大。

参考文献:

- [1] Tier M D, Rosendo T S, Santos J F D, et al. The influence of refill FSSW parameters on the microstructure and shear strength of 5042 aluminium welds[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2013, 213 (6) : 997-1005.
- [2] 张照华. 铝合金搅拌摩擦点焊接头连接机制与力学性能研究[D]. 天津大学.
- [3] Uematsu Y, Tokaji K, Tozaki Y, et al. Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behaviour of friction stir spot welded joints in Al-Mg-Si alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2008, (下转第47页)

产生的扭曲问题，需要在单件、侧围内板总成、侧围总成Y向平面上部和角接板其他部位增加验证测点，用于识别和观察扭曲变化，如图18所示。

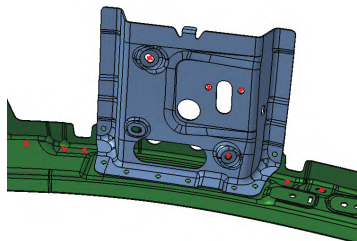


图18 侧围内板总成增加测点示意

4) 侧围内板总成偏移公差设定。参考总成需求，侧围内板角接板部位对应设置为线性偏移公差，如图19所示。

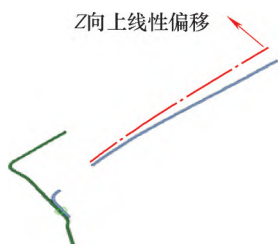


图19 侧围内板总成公差偏移图

5) 侧围总成工装夹具设计。侧围内板合成工序，在侧围内板角接板Z向上部增加辅助支撑面，用于适当程度的约束和矫形，如图20所示。

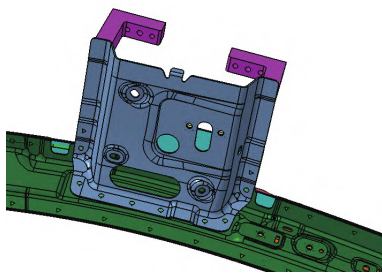


图20 增加侧围内板角接板矫形示意

6) 产品结构优化。采用简化模型结构可知，当前车型侧围前柱角接板结构为悬臂结构，前柱角接板Z向匹配面长度168mm左右，设为 r_2 ，Y向焊接面长度约为80mm，设为 r_1 ，由三角模型可知，当发生旋转变化时， r_2 变化量为 r_1 的2倍以上，如图21所示。

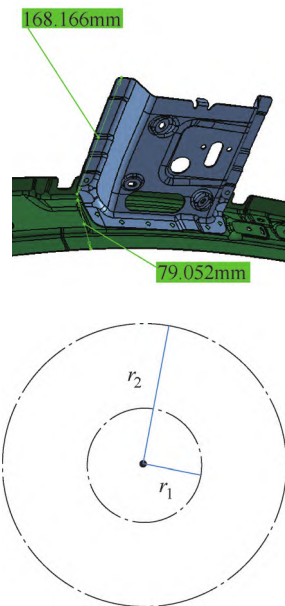


图21 侧围内板角接板产品结构优化示意图

该结构在焊接时，受限于零件匹配关系及焊点姿态，会产生较大的变形，因此，可考虑将前柱角接板和前柱内板上侧内板设置为一体式零件，同时缩短Z向尺寸，将有效改善角接板焊接尺寸的控制。

参考文献

- [1] 陈炳辉. 简析汽车白车身焊接工艺[J]. 农业机械与装备, 2023 (8) : 151-153.
- [2] 杜法刚. 汽车车身的焊接工艺及其措施[J]. 技术应用, 2018 (2) : 81-81. **AUTO1950**
- [3] 30 (10-11) : 1956-1966.
- [4] 周利, 周炜璐, 杜正勇, 等. 搅拌摩擦点焊技术研究现状[J]. 航天制造技术, 2014 (5) : 6.
- [5] 任俊刚, 谢里阳, 王磊, 等. 回填式搅拌摩擦点焊工具粘连特性研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45 (15) : 3.
- [6] Larsen B, Hunt J, Hovanski Y, et al. Investigating steel tool life in the RFSSW process [J]. Journal of manufacturing processes, 2020: 637-645.
- [7] 陈大勇. 2B06铝合金板材高应变速率增塑机制及冲击液压成形性研究[D]. 中国科学技术大学, 2020.
- [8] 赵运强. 超高强铝合金非对称回填式FSSW成形特征与接头组织性能[D]. 哈尔滨工业大学, 2015.
- [9] 苏志强, 董康英, 孙世烜, 等. 回填式搅拌摩擦点焊过程中材料流动的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2018, 47 (17) : 225-228. **AUTO1950**

(上接第41页)