

# A356/6061异种铝合金搅拌摩擦的数值模拟

姜 晗<sup>1</sup>, 应志平<sup>2</sup>, 刘建平<sup>3</sup>, 胡成博<sup>3</sup>

<sup>1</sup>浙江理工大学机械工程学院, 浙江 杭州

<sup>2</sup>新昌浙江理工大学技术创新研究院有限公司, 浙江 绍兴

<sup>3</sup>浙江万丰摩轮有限公司, 浙江 绍兴

收稿日期: 2023年9月11日; 录用日期: 2023年11月1日; 发布日期: 2023年11月7日

## 摘 要

本文在基于Abaqus仿真软件的基础下, 利用耦合欧拉-拉格朗日(CEL)方法研究了A356/6061异种铝合金在不同焊接参数下其温度场的影响, 结果发现焊接转速越大其温度峰值越高, 而焊接速度对其温度峰值影响很小, 低焊速却会使较低熔点的铝合金过早出现融化现象, 造成焊接缺陷。本文也为后续A356/6061异种铝合金的研究提供了帮助。

## 关键词

搅拌摩擦焊接, 数值模拟, 异种铝合金, CEL

# Numerical Simulation of Stirring Friction of A356/6061 Dissimilar Aluminum Alloy

Han Jiang<sup>1</sup>, Zhiping Ying<sup>2</sup>, Jianping Liu<sup>3</sup>, Chengbo Hu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Xinchang Zhejiang University of Technology Technological Innovation Research Institute Co., Ltd., Shaoxing Zhejiang

<sup>3</sup>Zhejiang Wanfeng Motorcycle WHEEL Co., Ltd., Shaoxing Zhejiang

Received: Sep. 11<sup>th</sup>, 2023; accepted: Nov. 1<sup>st</sup>, 2023; published: Nov. 7<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Based on Abaqus simulation software, this article uses the coupled Euler Lagrangian (CEL) method to study the temperature field of A356/6061 dissimilar aluminum alloys under different welding parameters. The results show that the higher the welding speed, the higher the temperature peak,

文章引用: 姜晗, 应志平, 刘建平, 胡成博. A356/6061 异种铝合金搅拌摩擦的数值模拟[J]. 建模与仿真, 2023, 12(6): 5103-5113. DOI: 10.12677/mos.2023.126464

while the welding speed has little effect on the temperature peak. Low welding speed can lead to premature melting of aluminum alloys with lower melting points, resulting in welding defects. This article also provides assistance for the subsequent research on A356/6061 dissimilar aluminum alloys.

## Keywords

Friction Stir Welding, Numerical Simulation, Dissimilar Aluminum Alloy, CEL

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

铝合金具有密度低、强度高、抗冲击性和耐腐蚀性高等特性。随着铝合金应用越来越广泛,单一铝合金的性能已经不能满足实际工况需要,异种铝合金被广泛应用于机械制造的各个领域,特别是航空航天领域[1]。搅拌摩擦焊(FSW)是英国焊接研究所于20世纪末发明的一种新型固相焊接技术,已经成为一种非常适合连接许多难焊接金属的独特技术,尤其是高强度铝合金和一些异种金属[2]。国内外前期对搅拌摩擦焊接的数值模拟主要采用简化热源模型的方法来模拟摩擦搅拌焊接,而陈彦君[3]采用了任意的拉格朗日-欧拉方法(ALE)相比于简化热源得到了更加准确的结果,马英磊[4]采用了CEL方法模拟了异种铝合金搅拌摩擦的全过程。戈翔宇[5]国内首次在CEL的基础上采用质量缩放技术加速了计算效率,侯曾[6]在CEL的基础上,进一步研究了不同旋转速度和焊接速度对焊接温度场分布结果的影响,结果表明其模型能很好的预测结果的准确,孙甲尧[7]等通过对A356/6061异种铝合金搅拌摩擦焊接的实验研究表明,焊速较低时A356置于前进侧有利于获得较高的接头性能,焊速较高时6061置于前进侧有利于获得较高的接头性能。然而国内少有对A356/6061异种铝合金搅拌摩擦数值模拟的研究,所以本文将利用Abaqus商业仿真软件研究其不同焊接参数情况下温度场的数值。

## 2. 数值模型的构建

### 2.1. 几何模型及网格划分

为了简化计算,提高计算效率。本文对搅拌头几何模型进行了简化,忽略了螺纹和轴肩上部,其它尺寸完全一致如图1。此外搅拌头采用四结点热耦合四面体单元(C3D4T)进行网格划分。焊板被视为一个同实际焊材大小相同的欧拉域,其大小为200 mm × 150 mm × 5 mm,如图2所示。此外对焊板进行局部网格划分在焊缝附近采用大小为0.5 mm的网格单元,远离焊缝区域采用大小为2mm的网格单元提高计算效率。其网格类型为8结点热耦合纯属欧拉六面体单元(EC3D8RT)。

### 2.2. 材料属性

搅拌摩擦焊接属于热力耦合的模拟,材料的热导率,弹性模量,膨胀系数,比热容,等性质随温度的变化而变化。密度和泊松比随温度变化很小,本次模拟设置密度和泊松比为定值,A356的密度为2.66 kg/mm<sup>3</sup>,泊松比为0.33。6061的密度为2.7 kg/mm<sup>3</sup>,泊松比为0.33。查阅文献[4][8]得到6061和A356的热物性参数如表1和表2。搅拌头采用耐高温的工具钢材,其材料参数如表3[6]。

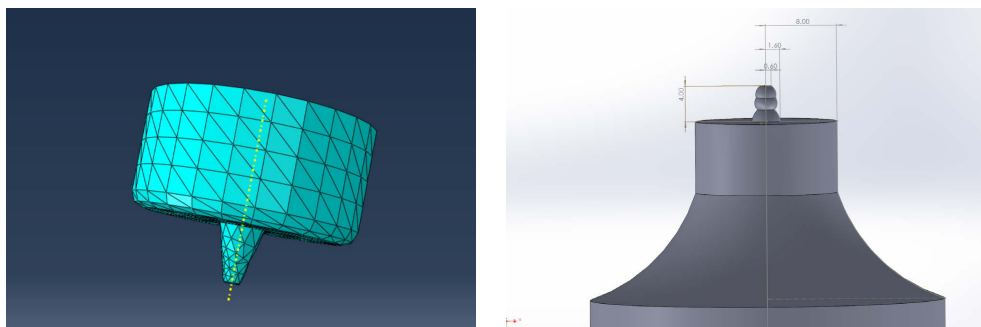


Figure 1. 3D simplification and physical image of mixing head

图 1. 搅拌头三维简化及实物图

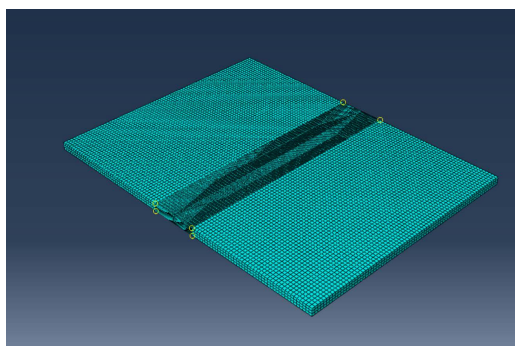


Figure 2. Welding plate grid division

图 2. 焊板网格划分

Table 1. 6061 Thermophysical parameters

表 1. 6061 热物性参数

温度(°C)	导热系数(mW/°C)	比热容(mJ/t°C)	膨胀系数( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	弹性模量(MPa)
20	162	945,000,000	23.45	68540
93.3	177	978,000,000	24.61	66190
204.4	192	1,028,000,000	26.6	59160
260	201	1,052,000,000	27.56	53990
371	217	1,104,000,000	29.57	40340
482.2	226	1,136,000,000	31.71	20200

Table 2. A356 Thermophysical parameters

表 2. A356 热物性参数

温度(°C)	导热系数(mW/°C)	比热容(mJ/t°C)	膨胀系数( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	弹性模量(MPa)
20	140	850,000,000	21.8	72500
100	155	880,000,000	21.8	68000
200	163	922,000,000	23.6	64000
300	168	1,000,000,000	26	60000
400	168	1,050,000,000	25.41	58000

Continued

500	168	1,075,000,000	26	55000
600	168	1,140,000,000	26.43	10000
700	168	1,120,000,000	26.86	5000
800	167	1,125,000,000	27.42	100

**Table 3.** Mixing head material parameters**表 3.** 搅拌头材料参数

导热系数(mW/°C)	比热容(mJ/t°C)	弹性模量(MPa)	泊松比	密度(kg/mm <sup>3</sup> )
45	490,000,000	210,000	0.3	7.85

此外, 搅拌摩擦焊接过程会发生复杂的材料流动, abaqus 中通常利用 johnson cook 模型描述大应变、高应变率、高温环境下金属材料的强度极限以及失效过程。johnson cook 的本构方程如下:

$$\sigma = \left[ A + B(\varepsilon^n) \right] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right) \right] \left[ \frac{T - T_R}{T_M - T_R} \right]^m$$

通过查阅相关文献[9] [10]得到 A356 和 6061 的 johnson cook 模型参数如表 4。

**Table 4.** Johnson cook model parameters**表 4.** Johnson cook 模型参数

	A (Mpa)	B (Mpa)	C	m	n	TR (°C)	TM (°C)	$\varepsilon_0$
A356	69.76	45.69	0.07	0.821	0.159	300	612.5	1
6061	289.6	203.4	0.011	1.34	0.35	21.26	652.37	1

### 2.3. 装配及分析步

将搅拌头置于距焊缝起始位置 15 mm, 贴于焊板的表面。设定三个分析步类型均为动力, 温度 - 位移, 显示。开启几何非线性, 其中下压分析步搅拌头旋转向下时间为 2 s, 预热分析步搅拌头不在向下而是原地保持转速 2 s, 加工阶段搅拌头沿焊缝加工持续 36 s。

### 2.4. 相互作用及载荷

焊接板材被定义为欧拉实体, 搅拌头利用参考点进行刚体绑定, 搅拌摩擦焊接过程存在着热量传递, 焊板底部实际过程中与砧板接触, 存在着较大热量交换, 本文省略了砧板的模型。焊板四周和上表面与空气存在热交换。参考文献([6], p. 40)得到换热系数如表 5。

**Table 5.** Heat transfer coefficient**表 5.** 热交换系数

	热交换系数(mw/mm <sup>2</sup> °C)	外界温度(°C)
底面	0.5	20
侧面及上表面	0.03	20

搅拌头与焊板之间存在接触，Abaqus 中通过通用接触来描述。接触类型中，切向行为选择罚函数，摩擦系数选取 0.3 [9]，在法向行为上选择硬接触。由摩擦产生的耗散能百分数为 0.8 [3]。实际工况为防止焊接过程中焊板移动会将焊板固定，Abaqus 中在初始分析步中将焊板底部完全固定直到焊接结束。对搅拌头绑定刚体约束的参考点进行转速和速度边界条件的施加。模型在计算前还需要设置一个初始温度场，初始温度为室温 20℃。

## 2.5. 质量缩放

ALE 模型可以利用质量缩放达到效果，但是对 CEL 的模型似乎并不起作用。文献[5]已验证采用人为的增加材料的密度和引入修正的比热容的方法，来达到计算结果较为准确的情况下提高了计算效率。所以本文采用同样的方法，设置放大系数  $k_m = 10,000$ 。要保证结果的可信，其在焊接的过程中动能要远小于内能，通常需小于 1%。如图 3 所示，动能与内能的比值可以看出在下压阶段其值达到最大但远小于 1%，可以认为结果较为准确。

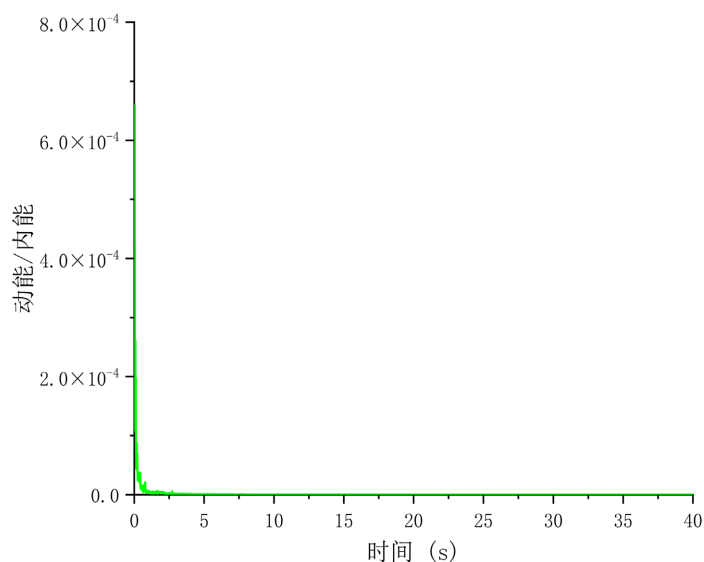


Figure 3. Kinetic energy/Internal energy diagram  
图 3. 动能/内能图

## 3. 仿真结果分析

### 3.1. 转速对温度场的影响

保持 200 mm/min 的焊接速度，分别取转速为 1150 rpm，1100 rpm，1000 rpm，其他参数保持不变来对比稳定焊接阶段开始，焊接中期，焊接结束的结果。

#### 3.1.1. 焊接参数 1150 rpm 的结果

由图 4 和图 5(a)可知，在 1150 rpm 转速下温度峰值最高达到了 635℃，但并未达到 6061 铝合金熔点 650℃，在加工起始到加工阶段中期温度升高了 123℃，而在后半段温度仅仅升高了 17℃，且加工开始至 1.8 s 内温度迅速由 495℃升高至 595℃，然后至 36 s 期间温度缓慢升温至 635℃。隐藏 6061 半边焊板和搅拌头，提取 A356 焊板峰值温度得图 5(b)，可知在加工 33 s 后其温度峰值达到 A356 铝合金熔点 612.5℃，A356 焊板出现了部分融化现象。

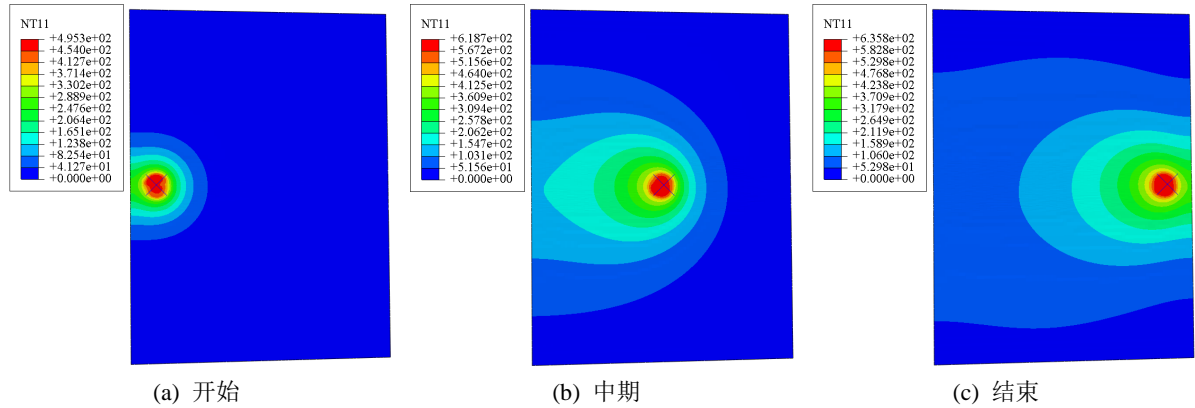


Figure 4. Cloud chart of three stages of welding processing  
图 4. 焊接加工三个阶段云图

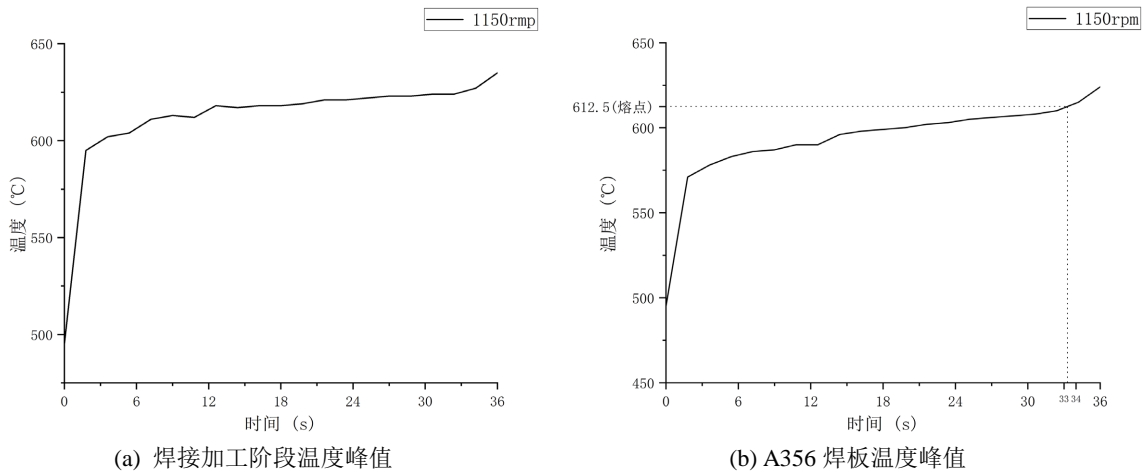


Figure 5. Temperature peak during welding processing stage  
图 5. 焊接加工阶段温度峰值

### 3.1.2. 焊接参数 1100 rpm 的结果

当转速由 1150 rpm 降低至 1100 rpm 时, 由图 6 和图 7(a)可知其温度峰值由 635°C 降低为 620°C, 加工起始阶段到加工中期温度上升了 129°C, 中期至加工结束温度上升了 12°C, 且温度峰值由加工起

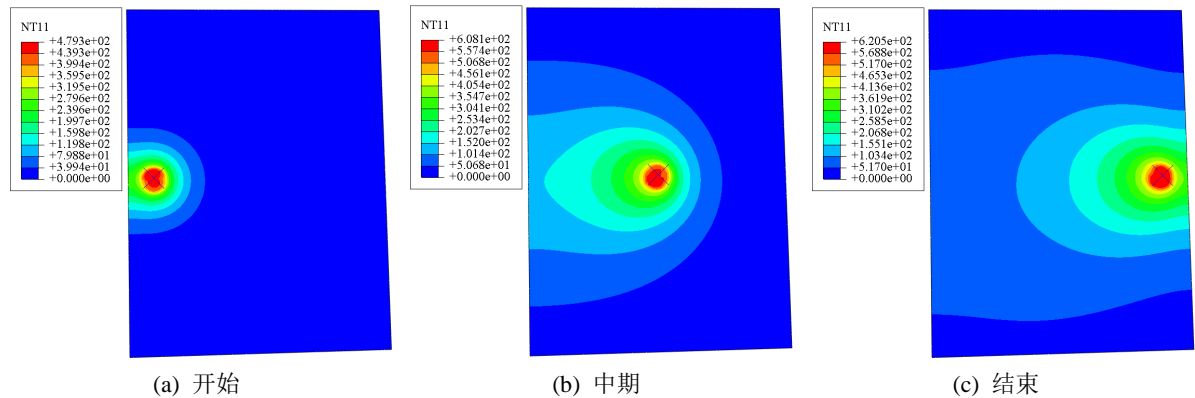
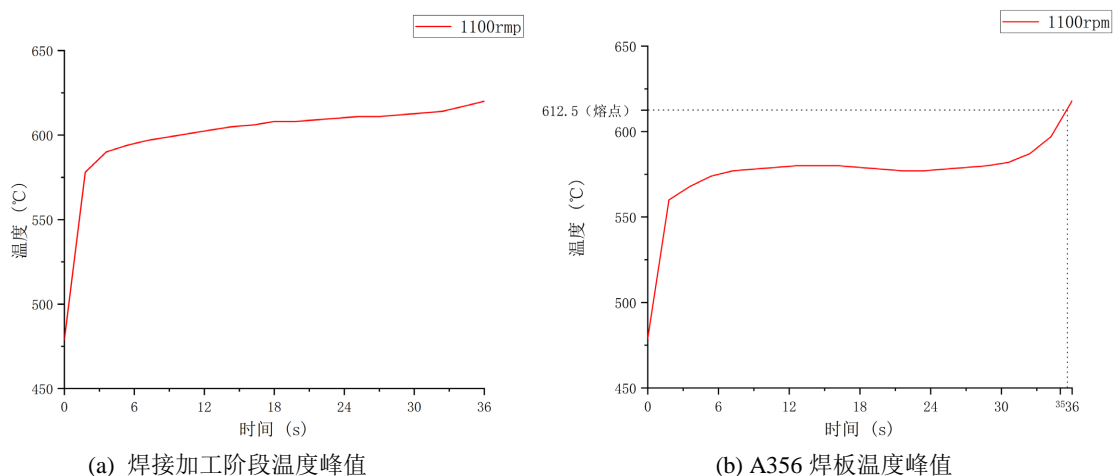


Figure 6. Cloud chart of three stages of welding processing  
图 6. 焊接加工三个阶段云图



**Figure 7.** Temperature peak during welding processing stag  
**图 7.** 焊接加工阶段温度峰值

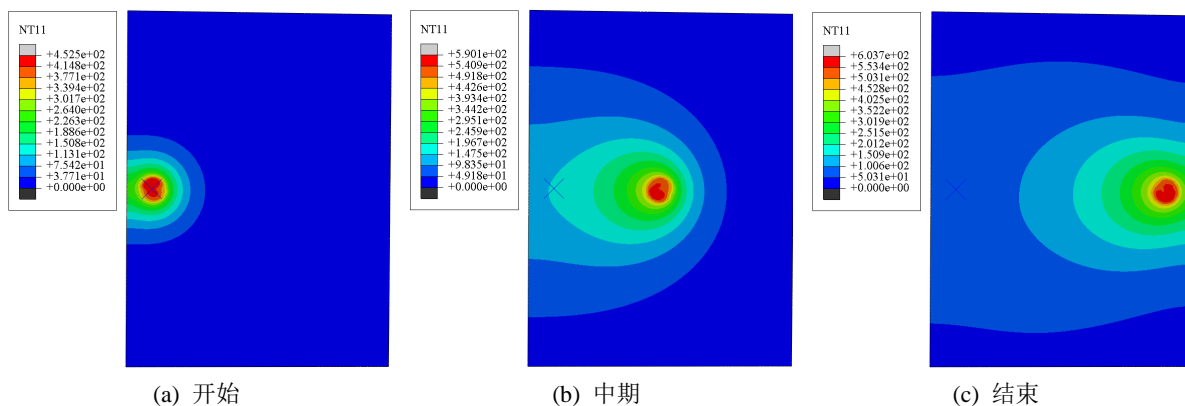
始至 1.8 s 温度迅速上升至 578°C，随后缓慢上升至 620°C。由图 7(b)可知降低转速 A356 半边焊板达到的峰值温度更低且达到部件熔点的时间更长。

### 3.1.3. 焊接参数 1000 rpm 的结果

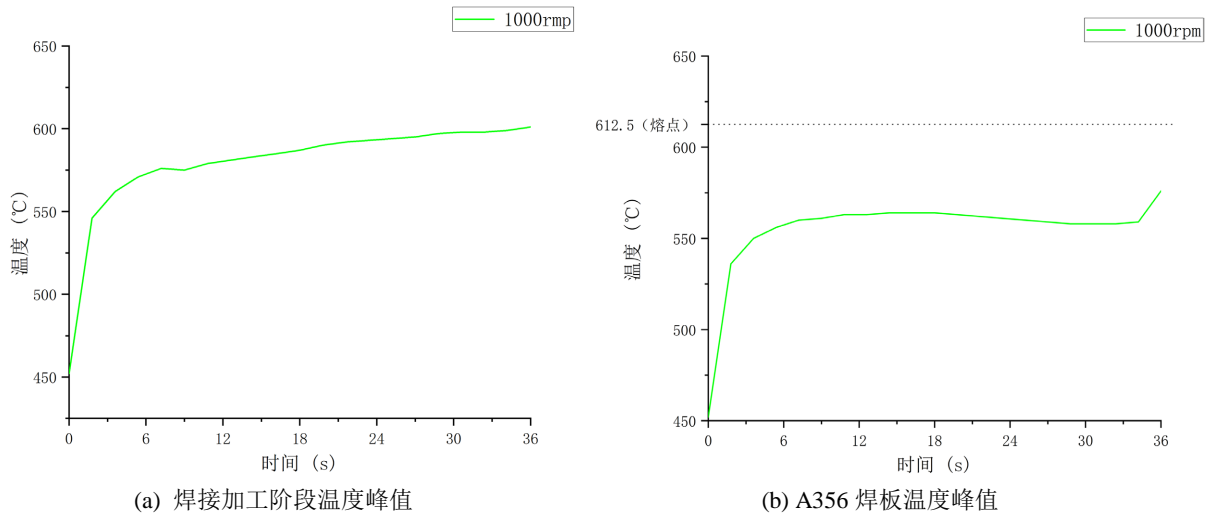
由图 8 及图 9(a)可知转速为 1000 rpm 时加工阶段初期至中期温度上升了 138°C，由中期至结束温度上升了 13°C，且在加工开始至 1.8 s 温度迅速由 452°C 上升至 546°C，1.8 s 至结束温度缓慢上升至 603°C。图 9(b)可知当降低转速至 1000 rpm 时 A356 半边焊板温度峰值始终未超过 A356 铝合金熔点 612.5°C，符合搅拌摩擦焊接的要求。

### 3.1.4. 小结

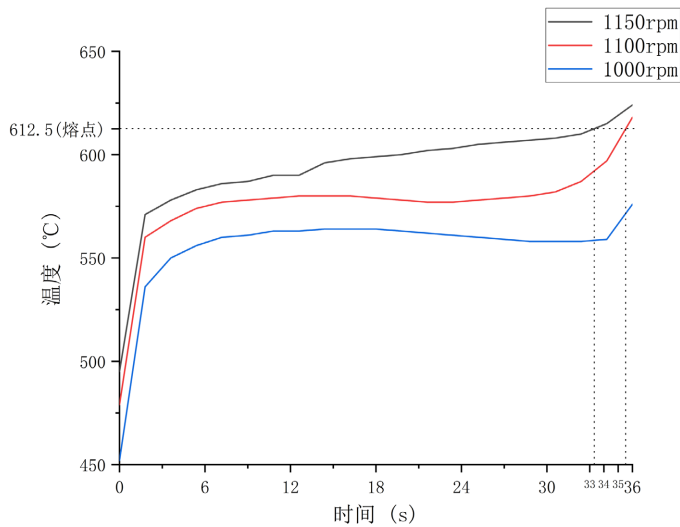
通过改变焊接转速发现，转速的提高会使整个焊接过程温度峰值增大，整理结果如表 6，且由于两种铝合金的熔点不同，焊接过程需满足温度峰值小于熔点较小的铝合金熔点，通过仿真发现转速 1000 rpm 符合要求。比较三个焊接转速的仿真结果温度都是在加工阶段 1.8 s 内迅速升温，随后缓慢上升至峰值，且转速越低其迅速上升阶段上升温差越大，其是因为转速越高，其预热阶段结束温度值越大，加工迅速升温阶段相同时间内温差就越小。通过图 10 对比三种参数下 A356 半边焊板的温度峰值，可知转速越大其达到熔点的时间越短，融化的部分越多，易造成焊接缺陷。



**Figure 8.** Cloud chart of three stages of welding processing  
**图 8.** 焊接加工三个阶段云图



**Figure 9.** Temperature peak during welding processing stag  
**图 9.** 焊接加工阶段温度峰值



**Figure 10.** Temperature peak of A356 half welded plate with different parameters  
**图 10.** 不同参数 A356 半边焊板温度峰值

**Table 6.** Temperature at different speeds  
**表 6.** 不同转速下的温度

参数编号	焊接转速(r/min)	焊接速度(mm/min)	温度峰值(°C)
1	1150	200	635
2	1100	200	620
3	1000	200	603

### 3.2. 焊接速度对温度场的影响

保持 1150 rpm 转速不变，分别取 200 mm/min，175 mm/min，150 mm/min 的焊接速度来对比焊接加工阶段起始，中期，结束三个阶段的结果。



### 3.2.1. 焊接速度 175 mm/min 的结果

对比图 11 和图 4 发现 200 mm/min 和 175 mm/min 焊接速度下其温度峰值几乎大小相等, 由图 12(a) 可知加工阶段初始温度迅速升温然后缓慢升温至 636°C, 加工结束时会有微小的降低。由图 12(b) 知在加工阶段未到达中期其温度峰值已达熔点, 意味着更小的焊接速度搅拌头与焊板摩擦时间越长产生的热量会越多, 从而会使 A356 更快的超过熔点, 出现融化现象。

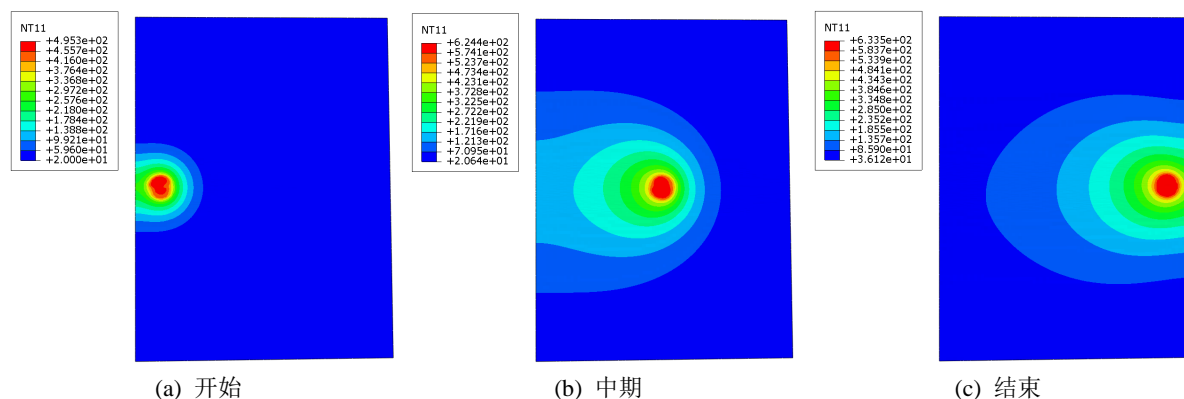


Figure 11. Cloud map of welding processing stage  
图 11. 焊接加工阶段云图

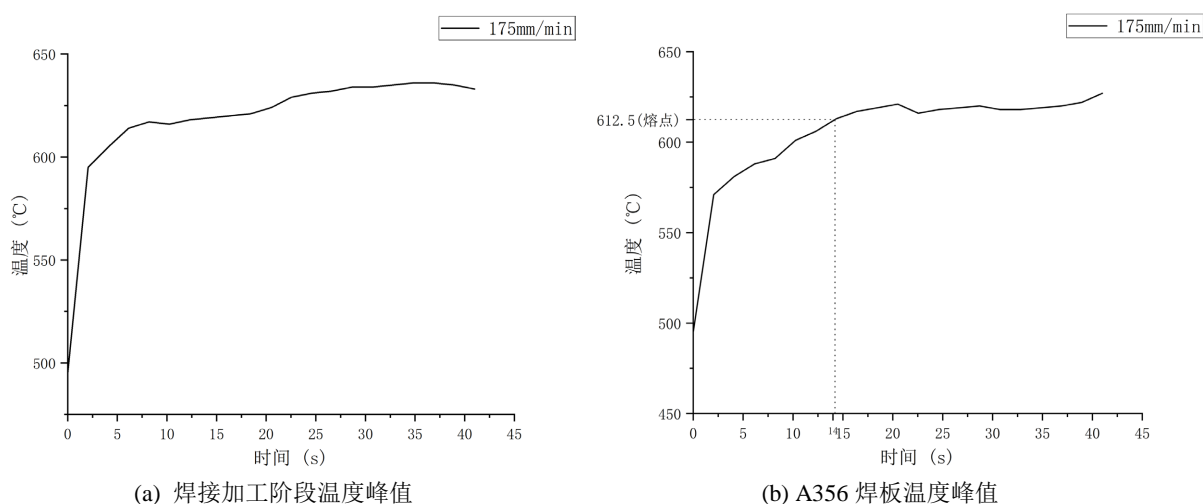


Figure 12. Peak welding processing temperature  
图 12. 焊接加工温度峰值

### 3.2.2. 焊接速度 150 mm/min 的结果

由图 13 和图 14(a) 可知当焊接速度为 150 mm/min 时温度峰值在加工阶段前期温度迅速上升, 随后温度缓慢上升至 634°C, 加工结束时温度降低至 626°C, 会出现双峰现象。由图 14(b) 可知 A356 焊板自 21 s 后接近其熔点随后出现融化现象。

### 3.2.3. 小结

当焊接速度分别取 200 mm/min, 175 mm/min, 150 mm/min 时其温度峰值几乎相同并整理在表 7, 焊接速度对温度峰值的变化影响很小。由图 15 可知当转速取 1150 rpm 前提下, 取 200 mm/min, 175 mm/min, 150 mm/min 焊速, 其分别在 34 s, 14 s, 21 s, 附近达到熔点, 占总的加工阶段时间的 94%, 34%, 和 43%。

因此对整个加工阶段时长相对来说在 150~200 mm/min 之间会出现 A356 半边焊板达到熔点的最短时间。

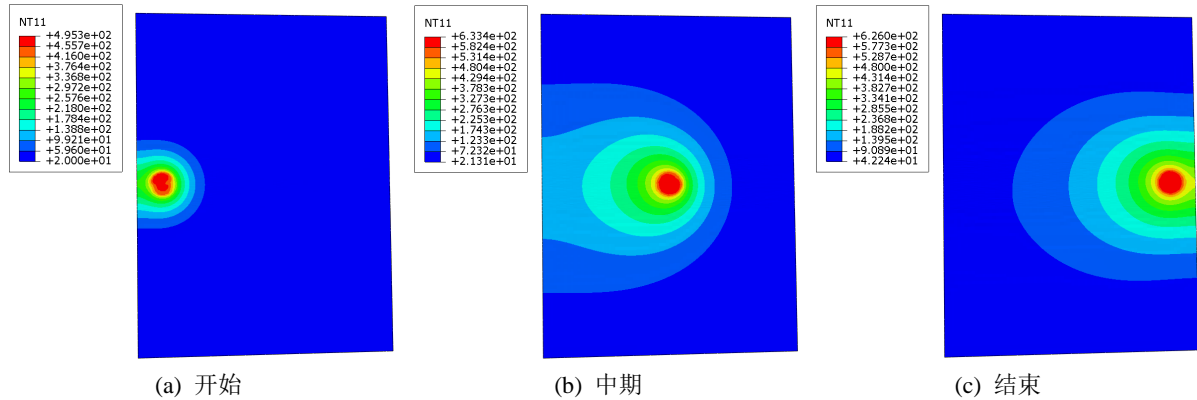


Figure 13. Cloud map of welding processing stage  
图 13. 焊接加工阶段云图

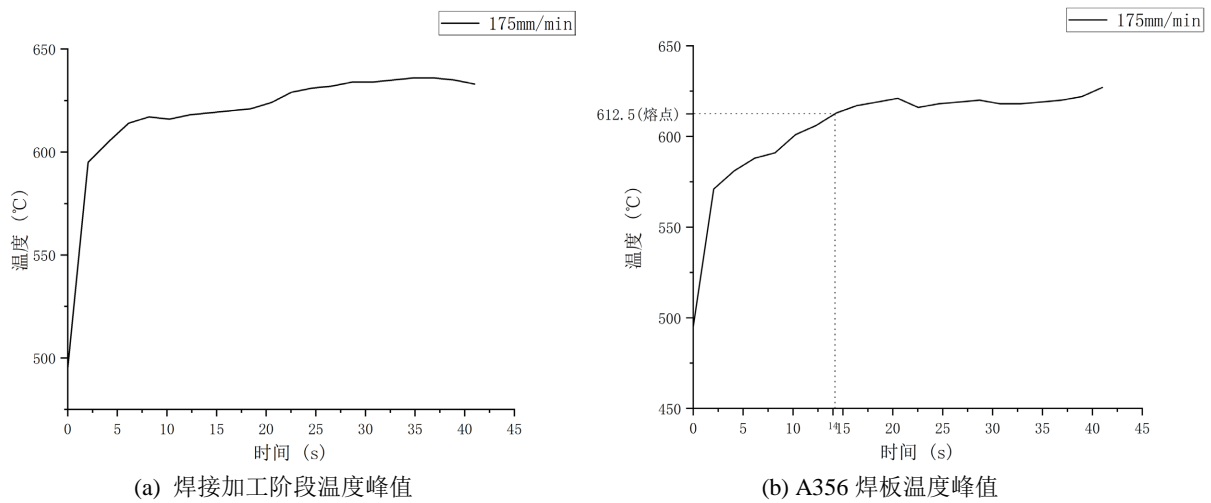


Figure 14. Peak welding processing temperature  
图 14. 焊接加工温度峰值

Table 7. Temperature at different welding speeds  
表 7. 不同焊速下的温度

参数编号	焊接转速(r/min)	焊接速度(mm/min)	温度峰值(°C)
1	1150	200	635
2	1150	175	636
3	1150	150	634

#### 4. 结论

在焊速保持 200 mm/min 及其他条件不变的情况下, 转速越大其温度峰值越大, 且在三种参数比较下, 只有在转速 1000 rpm 下, 异种铝合金中较低熔点的 A356 加工全程未超过熔点, 符合搅拌摩擦焊接的要求。在保持转速 1150 rpm 及其他条件不变的情况下, 焊速的改变对焊接温度峰值影响较小, 且在 150~200 mm/min 焊速之间会出现相对来说最早达到 A356 的熔点, 出现融化现象造成焊接缺陷。

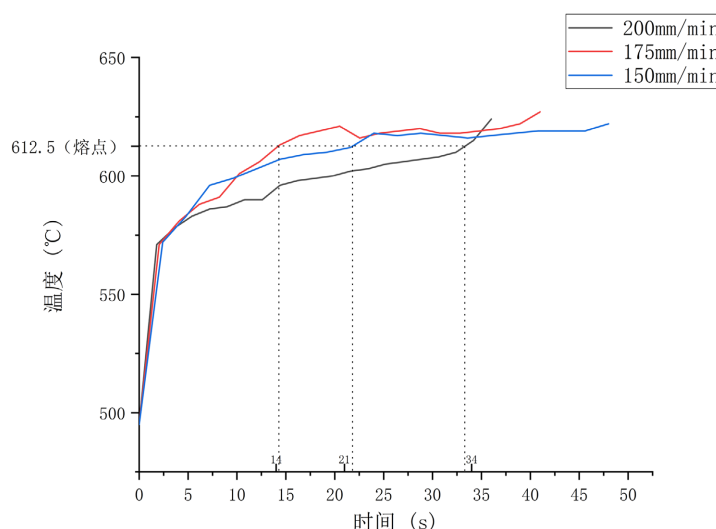


Figure 15. Temperature peak of A356 half welded plate with different parameters

图 15. 不同参数 A356 半边焊板温度峰值

## 基金项目

高性能轻量化合金材料与成型技术研发及产业化——大尺寸高强韧铝合金轮毂的复合成型制造关键技术研究及应用项目(2022C01203)。

## 参考文献

- [1] 杨健, 骆顺存, 裴鹏飞, 等. 异种铝合金焊接研究现状及展望[J]. 电焊机, 2023, 53(5): 1-11.
- [2] 张帅, 王进. 基于 CEL 方法的搅拌摩擦焊 6061 铝合金温度场研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(3): 64-71.
- [3] 陈彦君. 基于 ABAQUS 的搅拌摩擦焊仿真模拟分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2020.
- [4] 马英磊. 铝/镁异种合金搅拌摩擦焊温度场和应力场的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2023.
- [5] 弋翔宇. 5083-O 铝合金搅拌摩擦焊数值仿真及焊接性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [6] 侯增. 2024 铝合金/AZ31B 镁合金异种金属搅拌摩擦焊温度场的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- [7] 孙甲尧, 刘让贤, 胡良君, 等. A356-T6/6061-T6 异种铝合金搅拌摩擦焊的工艺研究[J]. 宇航材料工艺, 2017, 47(2): 60-66.
- [8] 张洁, 武鹏伟, 张东启, 等. 铝合金薄壁箱体焊接应力有限元模拟[J]. 热加工工艺, 2013, 42(3): 203-205.
- [9] 李作成, 高恩志, 王杰, 等. 轴肩下压量对 6061 铝合金搅拌摩擦加工过程影响的数值模拟[J]. 轻合金加工技术, 2020, 48(7): 39-44+52.
- [10] Niu, L.Q., Cao, M., Liang, Z.L., Han, B. and Zhang, Q. (2020) A Modified Johnson-Cook Model Considering Strain Softening of A356 Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, **789**, 139612. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139612>