

# 搅拌针偏移量影响铝镁异质金属搅拌摩擦焊材料流动的数值模拟

孙汇彬, 李亚玲, 马朝平, 宋绍峰, 曾容, 吴昊

重庆机电职业技术大学机械工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年4月22日; 录用日期: 2024年5月24日; 发布日期: 2024年5月31日

## 摘要

本文采用耦合的欧拉-拉格朗日方法, 构建了添加中间金属的铝镁异质合金搅拌摩擦焊的数值分析模型。针对两种不同配置进行了研究: 一种是搅拌头轴线与焊缝中心线重合(配置1), 另一种是搅拌头轴线向铝合金偏置1 mm (配置2)。研究结果显示, 配置1的材料流动更为充分。在前进侧, 铝合金主要从搅拌头前方水平流动至后退侧; 而在后退侧, 一部分镁合金从搅拌头后方水平流动至前进侧, 另一部分则从搅拌头后方向板厚底部流动, 随后在螺纹搅拌针的作用下继续向板厚上方流动。根据材料流动范围, 可将接头横截面划分为轴肩影响区和搅拌针影响区。中间金属的流动分为3个区域。配置2在轴肩影响区和搅拌针影响区的铝/镁截面都更为光滑和规则。由于材料流动的不充分, 所以配置2在接头内部形成了“隧道”缺陷。

## 关键词

铝镁异质合金, 搅拌摩擦焊, 材料流动, 耦合的欧拉-拉格朗日方法

## Numerical Simulation Study of the Influence of the Offset of the Stirring Pin on the Material Flow in Friction Stir Welding of Aluminum and Magnesium Dissimilar Alloy

Huibin Sun, Yalin Li, Chaoping Ma, Shaofeng Song, Rong Zeng, Hao Wu

School of Mechanical Engineering, Chongqing Vocational and Technical University of Mechatronics, Chongqing

Received: Apr. 22<sup>nd</sup>, 2024; accepted: May 24<sup>th</sup>, 2024; published: May 31<sup>st</sup>, 2024

文章引用: 孙汇彬, 李亚玲, 马朝平, 宋绍峰, 曾容, 吴昊. 搅拌针偏移量影响铝镁异质金属搅拌摩擦焊材料流动的数值模拟[J]. 材料科学, 2024, 14(5): 782-789. DOI: 10.12677/ms.2024.145086

## Abstract

This article uses the coupled Euler-Lagrange method to establish a numerical analysis model of friction stir welding of Aluminum and Magnesium dissimilar alloy with intermediate metal. Two different configurations are studied: one in which the axis of the stirrer is aligned with the center-line of the weld (configuration 1), and the other in which the axis of the stirrer is offset by 1mm towards the aluminum side (configuration 2). The results show that material flow is more complete in configuration 1. On the advancing side, aluminum mainly flows horizontally from the front of the stirrer to the retreating side. On the retreating side, some magnesium flows horizontally to the advancing side, while another part flows from the back of the stirrer towards the bottom of the plate thickness and then continues to flow towards the top of the plate thickness under the action of the threaded stirring needle. According to the range of material flow, the cross-section of the joint can be divided into two areas: the shoulder influence zone and the needle influence zone. The flow of intermediate metal is divided into three regions. In configuration 2, both the aluminum/magnesium cross-sections in the shoulder and needle influence zones are smoother and more regular. However, due to insufficient material flow, configuration 2 forms a “tunnel” defect inside the joint.

## Keywords

Aluminum and Magnesium Dissimilar Alloy, Friction Stir Welding, Material Flow, CEL Model

Copyright © 2024 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

铝合金和镁合金由于具有密度低、比强度和比刚度高等优点，已被广泛应用于汽车、交通、航空航天等领域[1]。为进一步解决轻量化问题，铝/镁复合结构的连接问题受到广泛关注[2]。搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)作为一种先进的固相连接技术，具有焊接热输入低、接头变形小等优点，已发展为铝合金等轻合金重要的连接方法之一[3]。

但是，由于铝合金和镁合金在晶体结构和物化性能上的巨大差异，焊接形成铝/镁异质合金接头面临诸多挑战[4]。这其中，界面处连续分布的 Al-Mg 脆性金属间化合物(Intermetallic Compounds, IMCs)对接头性能影响最为显著。为抑制 Al-Mg 脆性 IMCs 的形成，研究人员通过试验发现，相比于减少 Al/Mg 界面在高温下停留的时间[5] [6]和外加辅助能量[7]，添加中间金属[8] [9]对抑制 Al-Mg 脆性 IMCs 的作用更为显著。

在 FSW 过程中，金属材料的流动与 Al/Mg 脆性 IMCs 的形成、分布、大小密切相关[10]。但是由于 FSW 过程的复杂性，现阶段仍无法实现通过试验手段直接观察材料流动和温度分布[11]。而数值模拟的方法在节省试验花费的同时，可以对 FSW 过程中的温度分布和材料流动进行直观的、定量的分析。对于 FSW 的数值模拟，目前主要有计算固体力学方法(Computational Solid Mechanics, CSM)，计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)、任意的拉格朗日 - 欧拉方法(Arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)和耦合的欧拉 - 拉格朗日方法(Coupled Eulerian-Lagrangian, CEL)等[12]。

综上，本文拟采用耦合的欧拉 - 拉格朗日方法(Coupled Eulerian-Lagrangian, CEL)，以 7075 铝合金和

AZ31B 镁合金为研究对象，添加纯 Zn 为中间金属，对搅拌头偏移量对材料流动的影响规律进行深入探讨和分析，为铝/镁异种合金复合接头的连接提供重要的理论参考。

## 2. 数值模型

图 1 为铝镁异种材料 FSW 的有限元模型。整个欧拉区域包括母材、填充金属和一个空层。母材和填充金属最初填充在欧拉域指定位置，具体尺寸分别为 100 mm × 49.5 mm × 3 mm 和 100 mm × 1 mm × 3 mm。在 100 mm × 100 mm 母材区域上方有一层厚度为 2 mm 的空层。搅拌头为拉格朗日刚体。欧拉域单元类为 EC3D8RT，数量为 413,842。拉格朗日刚体的单元类型为 C3D4T，数量为 125,987。

在整个焊接过程中，搅拌头旋转速度保持 500 转/分钟，焊接速度保持 50 mm/分钟。配置 1 搅拌头轴线与焊缝中心线重合，配置 2 搅拌头轴线向铝合金侧偏置 1 mm。搅拌头采用带螺纹形搅拌针，轴肩直径为 15 mm，大端直径为 4 mm，小端直径为 2 mm，搅拌针长 2.85 mm。

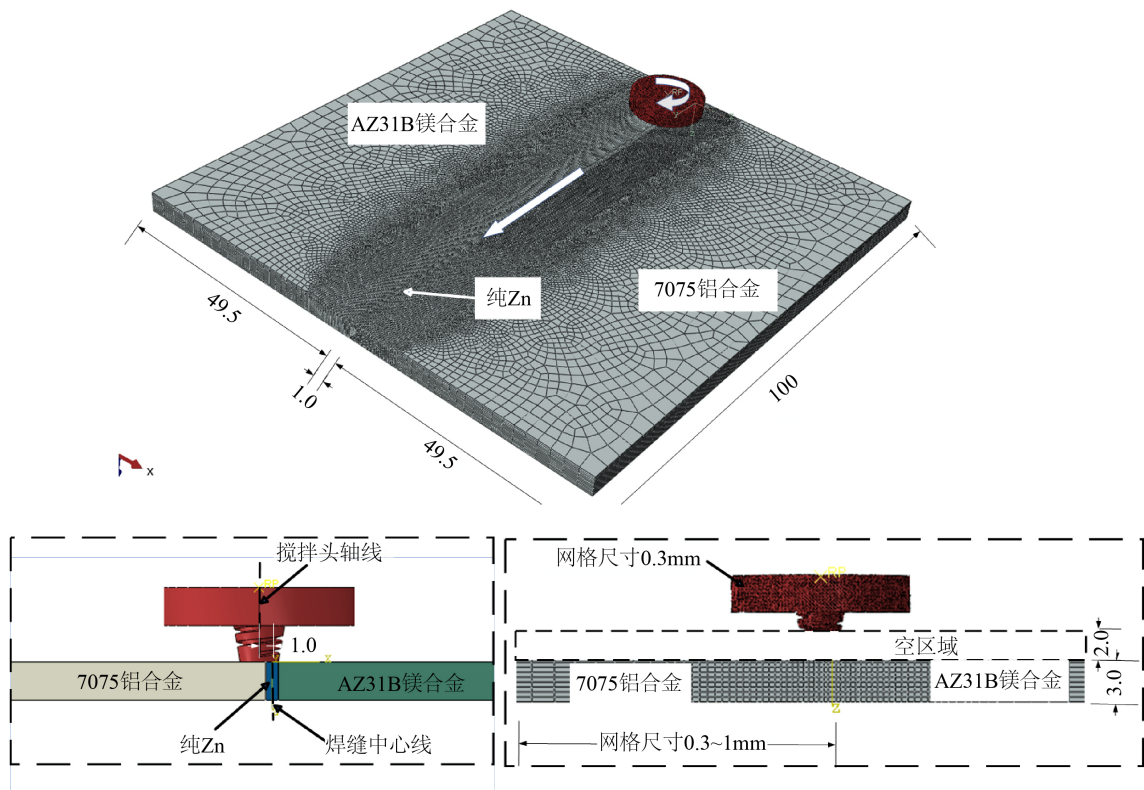


Figure 1. Aluminum and Magnesium dissimilar alloy friction stir welding CEL model

图 1. 铝/镁异质合金搅拌摩擦焊 CEL 模型

在 FSW 过程中，材料的塑性流动应力、温度、塑性应变和塑性应变率之间的关系由 Johnson-Cook 本构方程表示，该方程如公式(1)：

$$\sigma(T, \varepsilon, \dot{\varepsilon}) = (A + B\varepsilon^n) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left\{ 1 - \left[ \frac{(T - T_R)}{(T_M - T_R)} \right]^m \right\} \quad (1)$$

其中  $\sigma$  为流动应力， $\varepsilon$  为等效塑性应变， $\dot{\varepsilon}$  为等效塑性应变率， $\dot{\varepsilon}_0$  为参考应变率， $T_R$  为室温， $T_M$  为材料熔点。A, B, C, n, 和 m 为材料常数。7075 铝合金, AZ31B 镁合金, Zn 填充层的 Johnson-Cook 本

构方程材料常数如表 1 所示。此外，材料的其它热机物理参数均与温度相关，具体如表 2 所示。

在 FSW 过程中，焊接热输入主要来源于搅拌头与母材的摩擦和母材的塑性变形。搅拌头与母材的摩擦产热由公式(2)计算：

$$Q_f = \mu p \gamma \quad (2)$$

式中： $\mu$  为摩擦系数，本模型取 0.3， $p$  为搅拌头与母材在接触面上的法向压力， $\gamma$  为剪切速率。

**Table 1.** Johnson-cook model constants for 7075, AZ31B and Zn [13]

**表 1.** 7075 铝合金，AZ31B 镁合金和 Zn 填充层的 Johnson-Cook 材料参数[13]

	A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	$T_M$ (°C)	$T_R$ (°C)
<b>7075</b>	520	420	0.001	0.52	1.61	620	25
<b>AZ31B</b>	224	380	0.02	0.76	1.55	605	25
<b>Zn</b>	163	648	0.006	0.33	1.44	1726	25

塑性变形产热由公式(3)计算：

$$Q_p = \eta \sigma \varepsilon_{pl} \quad (3)$$

式中： $\eta$  为塑性变形能量转为温度的系数，本模型取 0.9， $\sigma$  为应力， $\varepsilon_{pl}$  为塑性应变速率。

在 FSW 过程中，工件上表面与侧面直接与空气接触，换热系数设置为  $20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。工件底面与金属夹具直接接触，换热系数设置为  $1000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。约束欧拉域底面和侧面的自由度，上表面自由。搅拌头的旋转和移动由参考点控制。

**Table 2.** Thermo-mechanical properties for 7075, AZ31B and Zn [13]

**表 2.** 7075 铝合金，AZ31B 镁合金和 Zn 填充层的热机械物理参数[13]

参数	材料	温度(°C)					
		20	100	200	300	400	500
导热系数 (W/m·K)	7075	130	186	197	194	196	196
	Zn	0					
	AZ31B	96.4	101	105	109	113	/
比热容 (J/kg·K)	7075	870	910	960	980	1040	1100
	Zn	446					
	AZ31B	1050	1130	1170	1210	1280	/
膨胀系数 ( $10^{-5}/\text{K}$ )	7075	2.15	2.34	2.36	2.43	2.52	2.61
	Zn	0					
	AZ31B	2.65	2.66	2.71	2.79	2.85	3.0
杨氏模量 (GPa)	7075	71.1	65.2	56.3	38.0	31.5	25.0
	Zn	65					
	AZ31B	44.8	34.3	30.2	29.4	/	/

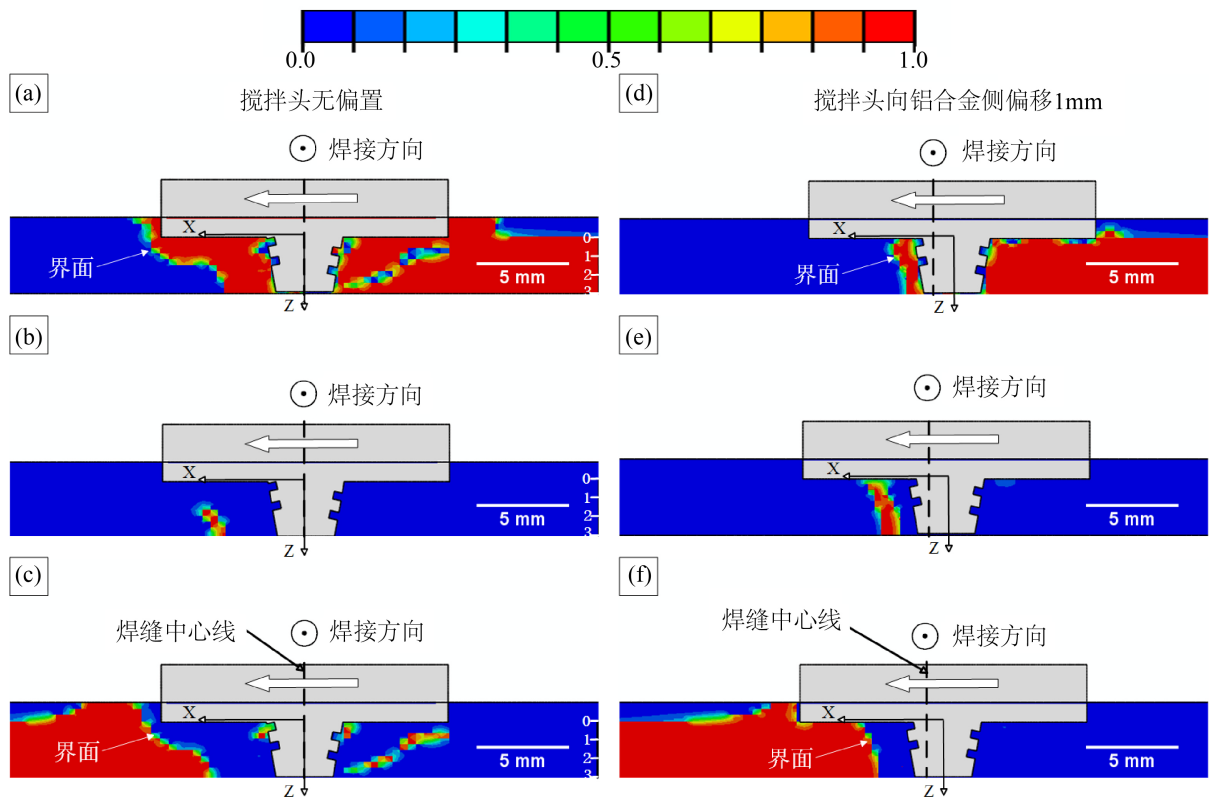
### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 横截面材料分布

图 2 展示了两种配置情况下横截面的材料分布情况。从图 2(a)和图 2(c)可以看出, 在配置 1 的情况下, 整个横截面可以划分为轴肩影响区( $z = 0 \sim 1.5$ )和搅拌针影响区( $z = 1.5 \sim 3.0$ )。镁/铝界面呈现出弯曲状态。观察图 2(b)可以发现, Zn 填充金属主要分布于搅拌针影响区, 在轴肩影响区并没有分布。这部分填充金属随着搅拌头的旋转流动到了其它区域。

图 2(d)和图 2(f)展示了配置 2 情况下镁/铝界面的分布情况。由于搅拌头偏置量的存在, Zn 填充金属的流动性降低并阻碍了铝合金和镁合金基体流动, 因此与配置 1 相比, 配置 2 的镁/铝界面更加平滑, 整个横截面无法区分轴肩影响区和搅拌针影响区。同时, 图 2(e)中 Zn 填充金属在轴肩影响区内没有随着搅拌头的旋转而发生流动。

综上所述, 两种配置情况下横截面的材料分布存在显著差异。在配置 1 中, 材料流动受到轴肩和搅拌针的共同影响, 形成了明显的分区。而在配置 2 中, 轴肩和搅拌针对填充金属和镁合金的流动的影响减弱, 导致界面更加平滑且不易区分各区域。



**Figure 2.** Materials distribution in the cross section at 5 seconds of welding ((a) and (d) 7075; (b) and (e) Zn; (c) and (f) AZ31B)

**图 2.** 焊接 5 s 时刻横截面不同材料分布。(a)和(d) 7075 铝合金体积分数; (b)和(e)填充金属 Zn 体积分数; (c)和(f) AZ31B 镁合金体积分数)

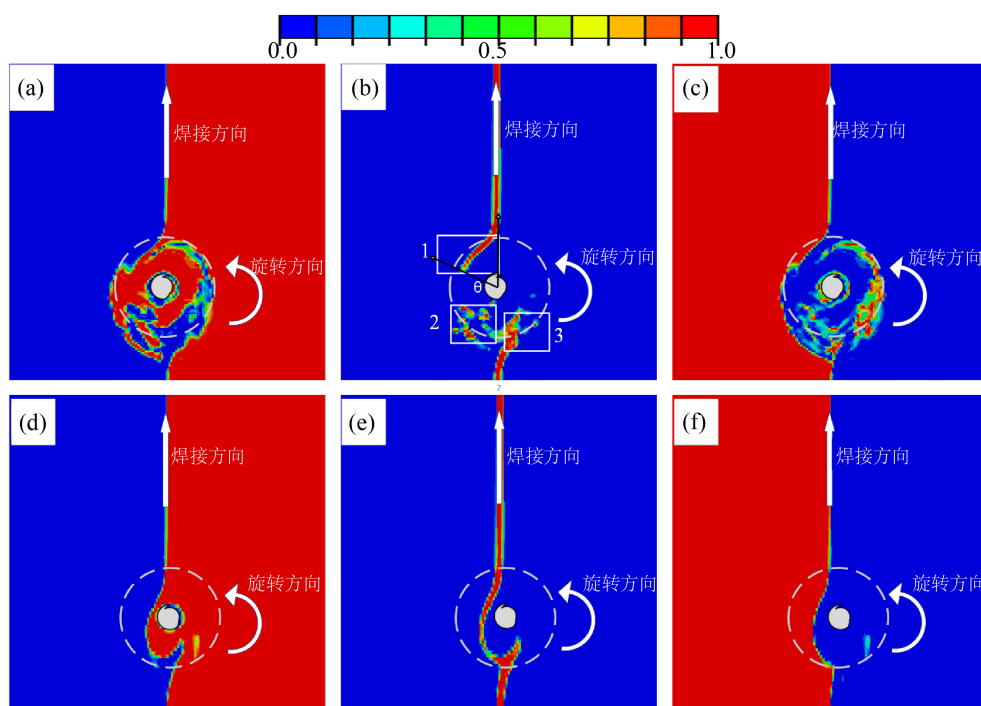
#### 3.2. $z = 0.8$ 水平截面材料分布

图 3 展示了焊接 5s 时刻,  $z = 0.8$  水平截面上的材料分布情况。这一截面处于轴肩影响区, 因此材料

流动受到轴肩的显著影响。

观察图 3(a)和图 3(c), 可以看到在配置 1 的情况下, 7075 铝合金和 AZ31B 镁合金在轴肩外缘和内部呈现出不同的流动特征。镁合金主要沿着轴肩外缘流动, 从后退侧流向前进侧, 而铝合金则在轴肩内部流动, 从前进侧流向后退侧。总体而言, 在同一水平截面上, 铝合金的流动总量超过镁合金的流动总量。结合横截面的材料分布可以推测, 位于前进侧的铝合水平流动穿过焊缝中心线后, 堆积于后退侧。位于后退侧的镁合金, 一部分水平流过焊缝中心线后堆积于前进侧, 另一部分则沿着板厚(z 轴)方向流动。

图 3(b)进一步揭示了配置 1 情况下中间填充材料的分布特征。中间材料的分布可以分为三个区域。在区域 1, 搅拌头正前方材料在焊接温度场作用下发生软化, 随后在轴肩作用下发生塑性变形并流动到后退侧, 填充材料塑性流动的范围为  $\theta = 0\sim 60^\circ$  (以搅拌头圆心为原点, 逆时针为正方向建立极坐标系)。而在  $\theta$  为  $60^\circ\sim 110^\circ$  的范围内, 填充材料则没有分布, 这部分材料随着搅拌头的旋转运动到图 3(b)中的区域 2。随着搅拌头不断前进, 区域 2 中的填充材料形成了“Z”形折线。区域 3 为搅拌头尾部材料向前进侧流动形成的, 并且这部分材料会随着搅拌头前进向板厚(z 轴)方向流动。



**Figure 3.** Material distribution in the horizontal section of  $z = 0.8$  at the time of 5s welding. ((a) and (d) 7075; (b) and (e) Zn; (c) and (f) AZ31B)

**图 3.** 焊接 5 s 时刻  $z = 0.8$  水平截面材料分布。((a)和(d) 7075 铝合金体积分数; (b)和(e) Zn 中间填充材料体积分数; (c)和(f) AZ31B 镁合金体积分数)

从图 3(d)和图 3(f)可以看到, 配置 2 情况下整个铝/镁分界面较为光滑, 材料流动范围较小, 主要集中于轴肩内部区域。而图 3(e)显示填充材料在  $\theta$  为  $0^\circ\sim 180^\circ$  范围内都保持连续分布, 没有形成明显的 3 个区域。

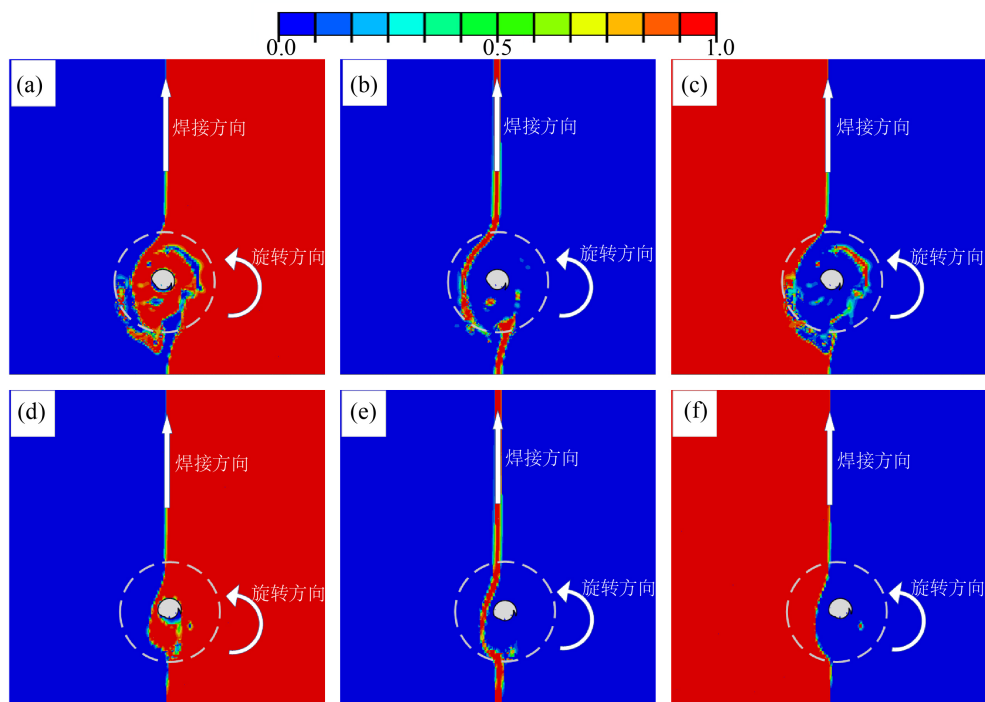
综上, 在轴肩影响区域内, 材料流动受到轴肩结构的显著影响。然而, 与配置 1 相比, 配置 2 的材料流动性有所降低, 导致整个铝/镁界面更加光滑且流动范围较小。这种流动性差异对接头力学性能具有重要影响。

### 3.3. $z = 2.5$ 水平截面材料分布

图 4 展示了焊接 5 s 时刻,  $z = 2.5$  水平截面的材料分布情况。在此截面上, 材料流动主要受到搅拌针的影响, 因此流动范围相对较小。

从图 4(a) 可以看到, 在配置 1 情况下, 7075 铝合金在搅拌针周围持续从前进侧流动到后退侧。然而, 观察图 4(c) 发现, 在同一水平截面上, 并没有相同量的 AZ31B 镁合金流动到前进侧。结合横截面的材料分布, 可以推测镁合金先从后退侧沿着板厚( $z$  轴正方向)方向沉积于前进侧, 随后在搅拌针螺纹的作用下向板材表面( $z$  轴负方向)流动。

如图 4(b) 显示填充材料在  $\theta$  为  $0^\circ \sim 180^\circ$  范围内呈现连续分布, 而在其他区域则偶有分布。在配置 2 情况下, 从图 4(d) 和图 4(f) 可以看到铝/镁界面光滑、规则。同时, 在同一横截面上, 7075 铝合金流入后退侧的量与 AZ31B 镁合金流入前进侧的量大致相等, 表明镁合金在板厚( $z$  轴)方向的流动并不充分。这种流动不足的情况导致了图 4(d) 中的“隧道”缺陷。图 4(e) 显示了中间填充材料的分布同样保持连续、规则, 且其他区域基本没有分布。



**Figure 4.** Material distribution in the  $z = 2.5$  horizontal section at the time of 5s welding. ((a) and (d) 7075; (b) and (e) Zn; (c) and (f) AZ31B)

**图 4.** 焊接 5 s 时刻  $z = 2.5$  水平截面材料分布。((a)和(d) 7075 铝合金体积分数; (b)和(e) Zn 中间填充材料体积分数; (c)和(f) AZ31B 镁合金体积分数)

综上所述, 在搅拌针影响区内, 材料流动性明显弱于轴肩影响区。然而, 与配置 1 相比, 配置 2 的材料流动性更为受限。整个镁/铝界面呈现出光滑、规则的特点, 中间材料也呈现出规则形态, 这种状况对接头力学性能的影响是不利的。由于材料流动的不充分, 接头形成了明显的“隧道”缺陷。

## 4. 结论

本文以 7075 铝合金和 AZ31B 镁合金为研究对象, 添加纯 Zn 作为中间金属, 采用 CEL 法构建了 FSW

数值分析模型，主要探讨了搅拌头偏置对材料流动的影响规律，主要结论如下：

1) 当搅拌头轴线与焊缝中心线重合时，横截面上的材料流动区域可分为轴肩影响区( $z = 0\sim 1.5$  mm)和搅拌针影响区( $z = 1.5\sim 3$  mm)。铝合金和镁合金基体材料流动充分，界面呈现曲折形态。当搅拌头轴线向铝合金侧偏置 1mm 时，镁合金和铝合金基体材料的流动受限，界面较为光滑。

2) 在轴肩影响区( $z = 0.8$  mm)截取水平面，当搅拌头轴线与焊缝中心线重合时，镁合金的流动集中于轴肩边缘区域，铝合金的流动则集中在轴肩内部区域。当搅拌头轴线向铝合金偏置 1 mm 时，同一截面上铝合金和镁合金的流动量基本相当。

3) 在搅拌针影响区( $z = 2.5$ )截取水平面，当搅拌头轴线与焊缝中心线重合时，在同一水平截面上，铝合金的流动量大于镁合金的流动量。镁合金在水平流动的同时，还在板厚( $z$  轴)方向发生流动。当搅拌头轴线向铝合金偏置 1 mm 时，由于材料流动不充分，接头形成了“隧道”型缺陷。

## 致 谢

感谢重庆市教委科学研究项目(KJQN202203703, KJQN202203704)对本文的资助。

## 参考文献

- [1] 段亚雄, 刘其鹏, 高月华, 等. 基于 CEL 方法的 Al/Mg 搅拌摩擦焊温度场及材料混合流动研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(7): 2565-2572.
- [2] Kumar, N., Yuan, W. and Mishra, R.S. (2015) Chapter 7—Challenges and Opportunities for Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys and Materials. *Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys and Materials*, 2015, 123-126. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802418-8.00007-2>
- [3] 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.
- [4] 段亚雄. 基于 CEL 的 Al/Mg 搅拌摩擦焊温度场及流场的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌航空大学, 2022.
- [5] Zhao, Y., Jiang, S., Yang, S., Lu, Z. and Yan, K. (2016) Influence of Cooling Conditions on Joint Properties and Microstructures of Aluminum and Magnesium Dissimilar Alloys by Friction Stir Welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83, 673-679. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7624-y>
- [6] Mofid, M.A., Abdollah-Zadeh, A., Ghaini, F.M. and Gür, C.H. (2012) Submerged Friction-Stir Welding (SFSW) Underwater and under Liquid Nitrogen: An Improved Method to Join Al Alloys to Mg Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43, 5106-5114. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1314-2>
- [7] Benfer, S., Stra, B., Wagner, G. and Fürbeth, W. (2016) Manufacturing and Corrosion Properties of Ultrasound Supported Friction Stir Welded Al/Mg-Hybrid Joints: Manufacturing and Corrosion Properties of US-FSW Al/Mg-Hybrid Joints. *Surface and Interface Analysis*, 48, 843-852. <https://doi.org/10.1002/sia.5871>
- [8] Ji, S.D., Niu, S.Y. and Liu, J.G. (2019) Dissimilar Al/Mg Alloys Friction Stir Lap Welding with Zn Foil Assisted by Ultrasonic. *Journal of Materials Science & Technology*, 35, 1712-1718. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.03.033>
- [9] Zheng, B., Hu, X., Lv, Q., Zhao, L., Cai, D. and Dong, S. (2020) Study of Self-Reaction Assisted Friction Stir Welding of AZ31B Mg/5052 Al Alloys. *Materials Letters*, 261, Article 127138. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127138>
- [10] Ji, S.D., Niu, S.Y., Liu, J.G., et al. (2019) Friction Stir Lap Welding of Al to Mg Assisted by Ultrasound and a Zn Interlayer. *Journal of Materials Processing Technology*, 267, 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.010>
- [11] Wen, Q., Li, W.Y., Wang, W.B., Wang, F.F., Gao, Y.J. and Patel, V. (2019) Experimental and Numerical Investigations of Bonding Interface Behavior in Stationary Shoulder Friction Stir Lap Welding. *Journal of Materials Science & Technology*, 35, 192-200. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.028>
- [12] 孙汇彬, 袁秋, 杨阳, 等. 搅拌摩擦焊数值分析方法概述[J]. 电焊机, 2022, 52(2): 49-56.
- [13] Muhammad, N.A., Geng, P., Wu, C.S. and Ma, N.S (2023) Unravelling the Ultrasonic Effect on Residual Stress and Microstructure in Dissimilar Ultrasonic-Assisted Friction Stir Welding of Al/Mg Alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 186, Article 104004. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2023.104004>