

搅拌摩擦焊接的传热和力学计算模型

汪建华¹, 姚舜¹, 魏良武¹, 戚新海²

(1. 上海交通大学, 上海 200030; 2. 南加利福尼亚大学, 美国)

摘要: 搅拌摩擦焊接 (Friction Stir Welding) 是最近发展起来的一种新的固态连接技术。它主要用于铝合金, 可以得到小变形、低成本和高质量的焊接接头。本文提出一个基于三维热弹性有限元分析的传热和力学计算模型。利用该模型可以了解搅拌摩擦焊接过程中的温度分布和循环, 并预测焊后的残余应力和变形。对 6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊接进行了实例分析。传热分析表明, 铝合金搅拌摩擦焊接时的最高温度不超过材料熔点的 80%, 因而属固态连接, 同时为预测焊接接头的组织性能提供依据。力学计算结果表明, 搅拌摩擦焊接的残余应力与变形要比传统的熔化焊接方法小得多。工件中最大的残余应力大约只有母材屈服极限的 25%~30%。计算结果与试验数据相近, 可作为进一步研究搅拌摩擦焊接过程和优化焊接参数的有效工具。

关键词: 搅拌摩擦焊接; 传热; 残余应力和变形; 有限元

中图分类号: TG402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2000)04-61-04



汪建华

0 序 言

搅拌摩擦焊接 (FSW) 是最近发展起来的一种新的主要用于铝合金的固态连接方法。与传统的熔化焊接方法相比较, 避免了诸如凝固裂纹、气孔和氧化等缺陷, 因而可以获得较高质量的焊缝。图 1 为两块平板采用搅拌摩擦焊接时的示意图。工件放在一块底板上, 两侧用夹具固定防止焊接时移动。一个专门设计的肩部带有搅拌端头 (销子) 的圆柱形工具, 一面以一定速度 (每分钟几百转) 旋转, 一面缓慢地突入连接处。端头的直径大约是圆柱体直径的三分之一, 长度略小于工件厚度。端头压入工件直至圆柱体肩部与工件表面接触。接下去圆柱工具与工件的表面摩擦将产生附加的热, 并使环绕插入端头周围的那部分圆柱形金属以及与工具肩部接触的材料塑性流动 (“搅拌” 行为)。随着旋转工具沿着焊接界面的移动, 在一个狭窄区域的金属连续地被加热, 塑性 “搅拌”, 然后冷却, 从而使工件焊接在一起。通常焊缝将比母材原始厚度减薄约 3%~6%。由于产生的最高温度一般低于材料熔点的 80%, 因此搅拌摩擦焊接避免了熔化焊接所带来的缺陷。

关于搅拌摩擦焊接接头的组织性能已有若干研究^[1-3]。焊接接头由焊缝、热机械影响区 (TMAZ)、热影响区 (HAZ) 和母材金属组成。铝合金焊缝的

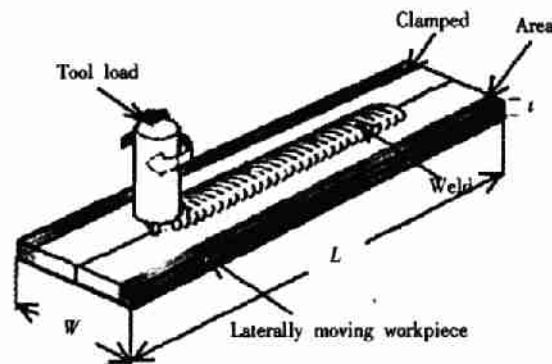


图 1 搅拌摩擦焊接示意图

Fig. 1 A schematic of FSW arrangement

显微组织呈动态再结晶化的细晶粒。各区的力学性能也不相同。人们很关心搅拌摩擦焊接后热处理铝合金焊缝及热影响区 (HAZ) 拉伸强度的降低程度。Mahoney 等^[1]对 7075-T651 铝合金的研究表明, 与母材相比, 焊缝的屈服极限降低 35%, 极限强度降低 18%, 对延伸率没有影响, 而热影响区 (HAZ) 的屈服极限降低 45%, 极限强度降低 25%, 延伸率降低 48%。Reynolds 和 Duvall 对 5454-H32 和 2195-T8 铝合金搅拌摩擦焊接接头的拉伸试验也表明焊缝和热影响区的强度有较大的降低。其原因被认为是位错的减少与细小硬化沉淀物的消失。然而令人感兴趣的是 Dawes 和 Thomas^[4]对非热处理铝合金的研究, 其搅拌摩擦焊接接头的强度和延伸率可与母材相当。接头拉伸破坏试验还表明, 非热处理铝合金断于母材处, 而热处理铝合金断于热影响区。

搅拌摩擦焊接作为一种新的焊接技术,至今尚缺乏较深入的基本理论研究。本文提出一个基于热弹塑性有限元分析的传热和力学计算模型。利用该模型可以了解搅拌摩擦焊接过程中的温度分布和循环,并预测焊后的残余应力和变形。对 6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊接进行了实例分析,并与 McClure 等^[5]的试验结果进行了比较。结果表明所采用的计算模型是合理的,可作为进一步研究搅拌摩擦焊接过程和优化焊接参数的有效工具。

1 有限元分析计算模型

由于搅拌摩擦焊接比较新,有关计算模型的研究很少。McClure^[6]等采用古典的 Rosenthal 解析方法对搅拌摩擦焊接的传热进行了初步的分析。这些工作由于是假定为一个半无穷大物体的导热问题,从而与实际情况有较大的出入。此外尚未见到有关焊接应力和变形的力学计算模型报道。

本文提出一个三维的搅拌摩擦焊接有限元计算模型。它分为两部分:第一部分是传热分析,第二部分是焊接应力变形分析。传热分析的结果将作为力学分析的一个数据文件。所采用的是作者与日本大阪大学共同研制开发的三维热弹塑性有限元计算程序(WTEPP3D)^[5]。该程序考虑了焊接的特点,提高了计算精度和稳定性,通过适当修正同样适合于搅拌摩擦焊接问题的分析。本研究材料为 6061-T6 铝合金。因工件对称取模型的一半进行单元网格划分,共 3 030 个节点,1 800 个八节点块体单元。

2 搅拌摩擦焊接的传热分析

在搅拌摩擦焊接时,热源来自于旋转工具与工件的摩擦以及旋转销子近旁金属的塑性变形。其中旋转工具与工件的摩擦是主要的,它包括旋转工具肩部与工件表面的摩擦和搅拌头(销子)与工件的摩擦。这里塑性变形热暂未计入。旋转工具肩部与工件表面的摩擦产生的热源强度(W/m^2),可用下式来描述,即

$$q(r) = \frac{3Qr}{2\pi(r_0^3 - r_i^3)}, \quad (1)$$

式中: Q ——输入工件总的热功率(W);

r_0, r_i ——旋转工具肩部的半径和销子的半径;

$$r_i \leq r \leq r_0.$$

假定旋转工具与工件表面的压力均匀,热量由摩擦力做功产生,上式可进一步写为:

$$q(r) = \frac{F\mu}{\pi(r_0^2 - r_i^2)} \frac{2\pi\omega r}{60}, \quad (2)$$

式中: F ——压力;

ω ——工具转速(r/min);

μ ——半径 r 处的摩擦系数。

输入工件总的热功率 Q 可表示为

$$Q = \int_{r_i}^{r_0} q(r) 2\pi r dr. \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可得

$$Q = \frac{\pi\omega\mu F(r_0^2 + r_0r_i + r_i^2)}{45(r_0 + r_i)}. \quad (4)$$

为了在上式中考虑搅拌头与工件之间摩擦产生的热量,分析时假定 $r_i = 0$ 。由式(4)描述的分布热源施加于工件的上表面,并以工具相同的速度(2 mm/s)沿焊接线移动。在进行传热有限元分析时,工件上表面和底面作为不同的换热表面。上表面为铝合金与空气的换热系数,设为 $30 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。总的热输入 Q 以及工件底面的换热系数的确定,则由上下表面实测的温度分布数据来进行校核。计算中时间步长仅为 0.05 s,以保证足够的计算精度。

3 残余应力和变形的分析

熔化焊接时,由于局部高温和温度不均匀性,焊后产生较大的残余应力和变形。搅拌摩擦焊接的优点之一就是温度较低,有利于降低残余应力和变形。将上述传热有限元计算得到的温度数据输入到热弹塑性应力分析程序上,便可进行搅拌摩擦焊接过程中动态的应力应变以及最后的残余应力与变形的分析。有限元分析时,离两侧边缘 34 mm 范围内作为夹具固定区域而设为零位移边界条件,然后在过程结束后给以释放,并计算得残余应力和变形。计算中考虑了材料性能随温度的变化以及焊接区屈服极限的降低。根据每个单元所经历的最高温度分三个区域:A区(大于 $300^\circ C$,包括焊缝、TMAZ 和部分 HAZ),屈服极限为母材的 60%;B区($200 \sim 300^\circ C$,包括部分 HAZ),屈服极限为母材的 80%;C区(小于 $200^\circ C$,未受影响区),屈服极限为母材的 100%。上述假定是在一些试验结果的基础上做出的。图 2 所示为各区屈服极限与温度的关系曲线。

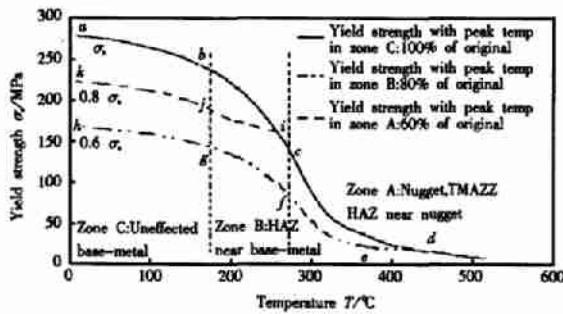


图2 不同区域的屈服极限假设

Fig. 2 Assumed yield strength during FSW in different zones

4 有限元计算与试验结果比较

为了将计算结果与实测进行比较,选择了 McClure 等^[6]的实例作为计算模型。如图1所示,两块材料为 6061-T6 铝合金连接板的长度、宽度和厚度分别为 450 mm × 100 mm × 6.4 mm。工件两侧由夹具固定于一块厚的低碳钢底板上。旋转工具肩部直径为 φ19 mm,端部销子长度为 5.5 mm。焊接时工具转速为 400 r/min,相对于工件移动速度为 2 mm/s。有限元计算时采用的总的热输入量 $Q = 1400 \text{ W}$,工件底面的换热系数设为 $200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ 。为测定搅拌摩擦焊接过程中的温度分布,在工件不同位置布置了 30 个测温点(热电偶)。测点深度(离上表面)分别为 1.58 mm、3.18 mm 和 4.76 mm。离焊缝中心线距离为 6 mm 和 14 mm。

图3所示为深度 3.18 mm(离焊缝中心线 6 mm)时,横向的最高温度分布计算和测定值的比较。图4为两个特殊点 $(X, Y, Z) = (225, 6, 3.18)$ 和 $(225, 14, 3.18)$ 温度循环的比较。可以看到计算和实测两者相当一致,表明所提出的搅拌摩擦焊接传热计算模型是合理的和可行的。研究还发现,由于旋转工具肩部与工件表面接触外圈处的线速度最

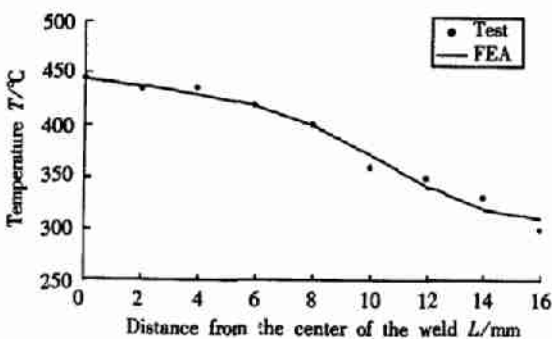


图3 深度 3.18 mm 时的横向最高温度分布

Fig. 3 Temperature distribution in transverse direction (3.18 from top surface)

大,因而摩擦产生的热能也最高。因此工件表面最高温度不在焊缝中心,而在离开焊缝中心约 3.5 mm 的地方,这与传统的熔化焊接方法不同。图5为 $X = 225 \text{ mm}$ 横截面内的峰值温度分布图。可见,通过传热分析可以得到焊缝、TMAZ、HAZ 等不同区域,从而为预测焊接接头的组织性能提供依据。

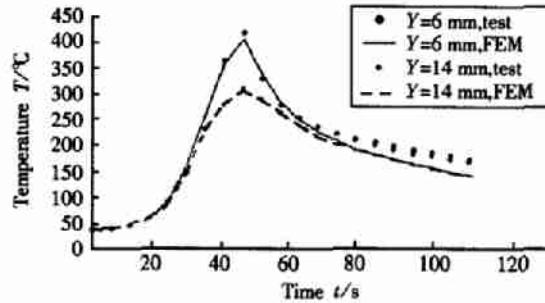


图4 焊接温度循环 $(X, Y, Z) = (225, 6, 3.18)$ 和 $(225, 14, 3.18)$

Fig. 4 Temperature history at $(X, Y, Z) = (225, 6, 3.18)$ and $(225, 14, 3.18)$

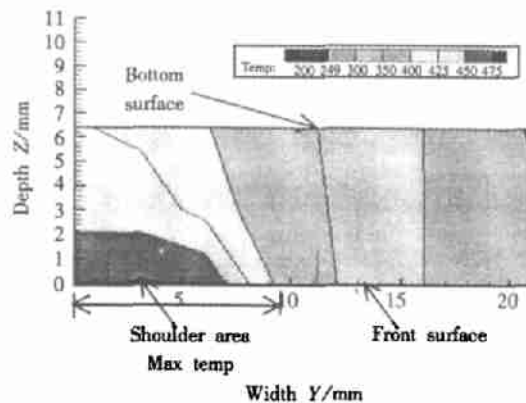


图5 $X = 225 \text{ mm}$ 横截面内的峰值温度分布图

Fig. 5 Peak temperature contour at cross-section $X = 225 \text{ mm}$

焊接应力与变形的分析,采用增量的热弹塑性有限元计算方法。搅拌摩擦焊接的特点是工件被夹具刚性固定。焊接冷却后夹具释放才能求得残余应力与变形。本研究采用的计算机程序具有固定点释放,工件内部应力重新平衡的计算功能。图6所示为工件中间层 $(225, Y, 1.5 \text{ mm})$ 处的残余应力 σ_x 和 σ_y 的分布图。可以看到,在夹固条件下焊接后横向残余应力 σ_y 最高,而夹具释放后几乎下降为零。同样纵向残余应力 σ_x 在夹具释放后也下降很多。工件中最大的残余应力大约只有母材屈服极限的 25% ~ 30%。这与一些研究者通过试验得到的结果一致。此外工件残余应力变形也很小,产生挠度仅 0.04 mm。计算分析表明,搅拌摩擦焊接的残余应

力与变形要比传统的熔化焊接方法小得多。

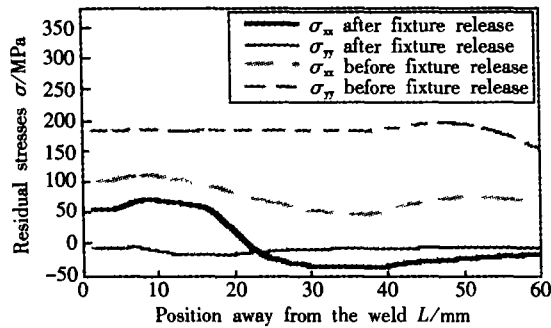


图 6 残余应力 σ_x 和 σ_y 的分布

Fig. 6 Distribution of residual stresses

5 结 论

(1) 本研究成功地引入了三维热弹塑性有限元分析方法,提出了一个搅拌摩擦焊接传热和应力变形的计算模型。实例分析表明,计算结果与试验数据相近,可作为进一步研究搅拌摩擦焊接过程和优化焊接参数的有效工具。

(2) 传热分析表明,铝合金搅拌摩擦焊接时的最高温度不超过材料熔点的 80%,因而属固态连接,避免了熔化焊接所带来的缺陷。通过传热分析可以得到焊缝、TMAZ、HAZ 等不同区域,从而为预测焊接接头的组织性能提供依据。

(3) 在焊接残余应力与变形的分析中,考虑到焊缝和热影响区屈服极限的降低、以及夹具固定与释放的影响。计算结果表明,搅拌摩擦焊接的残余

应力与变形比传统的熔化焊接方法小得多。焊后夹具松开后,工件中最大的残余应力大约只有母材屈服极限的 25% ~ 30%。

(4) 搅拌摩擦焊接中的“搅拌”所产生的塑性变形以及有关热力耦合问题比较复杂,在本研究中尚未引入计算模型。其作用和影响拟今后做进一步的研究。

参考文献:

- [1] Mahoney M W, Rhodes C G, Flintoff J G, *et al.* Properties of friction - stir - welded 7075 T651 aluminum [J]. *Metallurgical and Materials Transaction A*, 1998, 29A: 1955 ~ 1964.
- [2] Murr L E, Liu G, McClure J C. A TEM study of precipitation and related microstructures in friction - stir - welded 6061 aluminum [J]. *Journal of Material Science*, 1998, 33: 1243 ~ 1251.
- [3] Murr L E, Liu G, McClure J C. Dynamic recrystallization in friction - stir welding of aluminum alloy 1100 [J]. *Journal of Material Science Letters*, 1997, 16: 1801 ~ 1803.
- [4] Dawes C J, Thomas W M. Friction stir process welds aluminum alloys [J]. *Welding Journal*, 1996, 75(3): 41 ~ 45.
- [5] Wang J, Ueda Y, Murakawa H, *et al.* Improvement in numerical accuracy and stability of 3 - D FEM analysis in welding [J]. *Welding Journal*, 1996, 75(4): 129s ~ 134s.
- [6] McClure J C, Feng Z, Tang T, *et al.* A thermal model of friction stir welding, 5th international conference on trends in welding research [D]. Pine Mountain, GA. 1998.

作者简介: 汪建华,男,1939年8月出生,教授,博士生导师,中国焊接学会计算机应用技术专业委员会副主任。主要从事焊接力学和计算机在焊接中的应用研究。在国内外已发表著作和学术论文 100 余篇。

(责任编辑:董卫国)

欢迎订阅《焊接学报》(双月刊)

《焊接学报》是由中国科学技术协会主管,中国机械工程学会主办,哈尔滨焊接研究所承办并编辑出版的国内外公开发行的焊接学术刊物。本刊主要刊登焊接各专业学科理论研究的专题论文和反映焊接新材料、新设备、新工艺方法、新检测方法的专题论文。它代表了中国的焊接学术水平,具有一定的权威性,在国内外拥有广大的读者,在国际上享有一定的声誉。读者对象是国内外广大的焊接工作者。

《焊接学报》于 1980 年创刊,从 2000 年第一期起扩版为国际开本大 16 开,页码由 64 页增加到 96 页,并增设多项栏目,信息量增加一倍以上。2001 年由季刊改办双月刊。本刊曾多次被评为优秀科技期刊,曾先后被美国出版的《工程索引》(EI)、《科学引文索引》(SCI)等多家检索系统收录。本刊是首批被定为我国自然科学核心期刊的,是中国科技论文统计源期刊,也是《中国学术期刊(光盘版)》首批入录期刊。本刊现已加入了万方数据(Chinainfo)系统科技期刊群。本刊多次被中国科协、国家新闻出版署选中,代表中国期刊参加香港(地区)、新加坡、澳大利亚、意大利等国家的书刊展览。

欢迎广大读者订阅《焊接学报》,欢迎投稿!

本刊地址:哈尔滨市和兴路 111 号 《焊接学报》编辑部

负责人:王亚

传 真:0451 - 6325919

订 购 处:全国各地邮局

刊 号:ISSN0253 - 360X
CN23 - 1178/TG

定 价:15.00 元

邮 编:150080

电 话:0451 - 6325919

电子信箱:cwa@public.hr.hl.cn

邮发代号:14 - 17

国外代号:Q322