

引用格式:刘露涛,顾帛坤,卢正达,等.基于 DEFORM-3D 的纯铝快速冷却搅拌摩擦焊数值模拟和试验研究[J].热加工工艺,2024,53(13):79-84.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20221473

http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

基于 DEFORM-3D 的纯铝快速冷却搅拌摩擦焊数值模拟和试验研究

刘露涛, 顾帛坤, 卢正达, 许楠, 宋亓宁, 包晔峰

(河海大学机电工程学院, 江苏 常州 213022)

摘要:采用 DEFORM-3D 软件建立了 A1050 纯铝传统搅拌摩擦焊(FSW)和快速冷却 FSW 焊缝的有限元模型,分析了冷却介质对焊缝温度场和微观组织演变的影响规律,并采用电子背散射衍射技术对两种 FSW 试验的结果进行分析,以验证模拟结果。结果表明:在焊接过程中通过添加冷却介质,快速冷却 FSW 的峰值温度较传统 FSW 明显降低,在搅拌头后方快速冷却 FSW 的温度梯度明显大于传统 FSW。快速冷却 FSW 焊缝的晶粒尺寸减小、小角度晶界比例增加且位错密度更高。模拟结果与试验结果基本吻合。

关键词:纯铝;搅拌摩擦焊;温度场;微观组织

中图分类号: TG457.14; TG453.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)13-0079-06

Numerical Simulation and Experimental Study on Rapid Cooling Friction Stir Welding of Pure Aluminum Based on DEFORM-3D

LIU Lutao, GU Bokun, LU Zhengda, XU Nan, SONG Qining, BAO Yefeng

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract:The finite element model of conventional friction stir welding (FSW) and rapid cooling FSW of A1050 pure aluminum was established based on DEFORM-3D software, and the effect of the cooling medium on the temperature field and microstructure evolution of the weld was analyzed. The results of the two FSW tests were analyzed to verify the simulation results by using electron backscatter diffraction technique. The results show that the peak temperature of rapid cooling FSW is significantly lower than that of conventional FSW due to addition of cooling medium. The temperature gradient of rapid cooling FSW behind the tool is obviously bigger than that of conventional FSW. Compared with conventional FSW, the rapid cooling FSW weld has finer grains, and the ratio of low-angle grain boundary increases and the dislocation density is bigger. The simulation results are consistent with the experimental results.

Key words: pure aluminum; friction stir welding(FSW); temperature field; microstructure

搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)是英国焊接研究所(TWI)在1991年发明的一项固相连接技术^[1]。近年来,国内外学者针对铝合金的FSW开展了大量的基础研究,包括微观组织演变机制^[2]、材料流动^[3]和温度分布^[4]等,而关于纯铝FSW的研究鲜有报道。Sato等^[5]对1mm厚A1050纯铝进行FSW焊接,

发现随着热输入降低,焊缝晶粒尺寸可细化至1 μm 以下。虽然焊缝的晶粒尺寸较母材显著细化,但其力学性能仍远低于母材,焊接效率普遍较低。Xu等^[6]首先采用快速冷却FSW对2mm的T2纯铜进行焊接,即在焊接过程中利用液态CO₂(-78 $^{\circ}\text{C}$)对焊接过程进行强制冷却。由于消除了焊后退火效应,在焊缝中形成了具有高位错密度的超细晶组织,其力学性能显著提高。由此可以看到,在FSW过程中温度是决定能否获得良好焊接接头关键因素之一,因此对FSW温度分布及其变化规律的研究具有重要意义。然而仅通过试验很难获得焊接过程中完整的温度分布,于是数值模拟技术成为首选的研究方法之一^[7]。通过温度场和微观组织的模拟研究可以

收稿日期:2022-05-18

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20211076);国家自然科学基金资助项目(51805145);大学生创新创业训练计划项目(202210294149Y)

作者简介:刘露涛(1996-),男,山西长治人,在读硕士,研究方向为铝合金搅拌摩擦焊;E-mail:liulutao@hhu.edu.cn

通信作者:许楠(1985-),男,河南信阳人,博士,教授,研究方向为搅拌摩擦焊及加工;E-mail:xunan@hhu.edu.cn

进一步分析焊缝微观组织转变机制,对焊接参数的优化,进而获得更好力学性能的FSW接头具有重要指导意义。本试验以A1050纯铝为研究对象,采用DEFORM-3D有限元分析软件对不同焊接工艺参数下焊接的温度场和微观组织进行数值模拟,研究快速冷却FSW过程中焊缝的温度分布和微观组织转变规律。

1 有限元模型

1.1 网格划分

本模拟过程采用A1050纯铝作为研究对象,尺寸为200mm×100mm×2mm。图1为A1050纯铝FSW的几何模型和网格划分。FSW焊接模型由被焊工件、搅拌头组成。板材和搅拌头装配完成后,需要对其进行网格划分。由于本试验的研究对象重点是焊缝,垫板通过边界窗口代替,因此将垫板省略。将搅拌头材料定义为刚体,无需进行网格划分。被焊工件在进行网格划分过程中,选用四面体单元类型,最小单元尺寸0.2mm。为保证数值模拟结果的准确性,在搅拌头附近区域进行局部网格细化,局部网格单位数量为其他区域的10倍。同时定义局部网格运动参数和搅拌头保持一致。网格重划分标准为相对值0.7,整个板材共划分5383个节点和22542个单元。

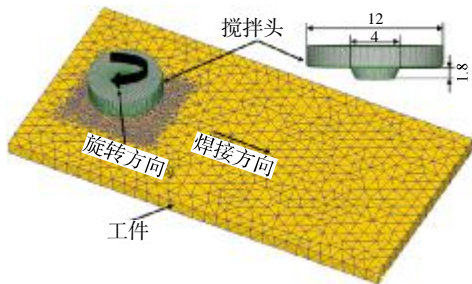


图1 几何模型和网格划分(mm)
Fig.1 Geometric model and the meshing (mm)

1.2 模拟计算参数

在传统FSW过程中,工件分别与空气和垫板直接接触。相较于冷媒介质,空气和垫板的冷却作用微乎其微,因此选用较小的热对流系数25W/(m²·℃)。而在实际快速冷却FSW焊接过程中,液态CO₂作用于搅拌头后侧的焊缝表面,经由喷嘴喷向焊缝,由于板材上表面与液态CO₂冷媒介质接触,因此必须设定大的热对流系数。相比于传统FSW,快速冷却FSW的数值模拟需要在温度边界条件上做出调整。本试验通过在搅拌头后方添加额外的冷却窗口,设

定较大的热对流系数25000W/(m²·℃),以模拟液态CO₂在快速冷却FSW焊接过程中的冷却作用。冷却窗口的运动速度和运动方向与焊接速度和焊接方向相同。焊接参数为:旋转速度800r/min,焊接速度300mm/min,下压量0.2mm,搅拌头倾角3°,冷媒介质分别为液态CO₂和空气,分析不同冷媒介质时焊缝的温度场和微观组织转变。

1.3 动态再结晶模型

通过模拟计算得到温度场后,使用DEFORM-3D提供的位错密度模型、回复模型、形核模型以及晶粒长大模型即可得到微观组织模拟结果。

位错密度模型为Laasroui-Jonas模型^[8]:

$$\frac{d\dot{\rho}}{d\dot{\varepsilon}} = h - r\dot{\rho} \quad (1)$$

$$h = h_0 \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^m \cdot \exp\left(\frac{mQ}{RT} \right) \quad (2)$$

$$r = r_0 \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{-m} \cdot \exp\left(\frac{-mQ}{RT} \right) \quad (3)$$

式中:h和r分别是硬化系数和软化系数;ε是应变;m是敏感系数,取0.2;h₀是硬化常数;r₀是回复常数;ε̇是应变速率;ε̇₀是ε̇的修正常数,取1;Q是再结晶激活能;R是气体常数;ρ̇是位错密度增长速率;T为A1050在FSW过程中的变形温度。

回复模型为Goetz模型^[9]:

$$\rho_{i,j}^1 = \rho_{i,j}^{t-1} / 2 \quad (4)$$

$$N = \left(\frac{\sqrt{2} M}{K} \right)^2 h(d\varepsilon)^{(1-2m)} \quad (5)$$

式中:ρ_{i,j}是位错密度;M是元胞数;K是常数,取6030;N是形核数。

形核率ṅ和应变速率之间存在以下关系:

$$\dot{n} = C \cdot \dot{\varepsilon}^\alpha \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT} \right) \quad (6)$$

式中:C是常数,取200;α是修正常数,取0.9。

晶粒长大速度和位错密度之间存在以下关系:

$$V_i = \frac{b}{KT} D \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT} \right) F_i / (4\pi r_i^2) \quad (7)$$

$$F_i = 2\pi r_i^2 G b^2 (\rho_m - \rho_i) - 8\pi r_i \gamma_i \quad (8)$$

式中:V_i是晶粒生长速度;K是玻尔兹曼常数;r_i是晶粒半径;b是伯氏矢量;D是扩散系数;G是剪切模量;γ_i是界面能;F_i是动态再结晶晶粒长大驱动

力; ρ_m 是初始晶粒的位错密度; ρ_i 是动态再结晶晶粒的位错密度。

A1050 纯铝的本构方程为^[10]:

$$\dot{\varepsilon} = e^{20.280} [\sinh(0.073\sigma)]^{3.818} \exp\left(-\frac{186970}{RT}\right) \quad (9)$$

2 模拟结果与分析

2.1 温度场

在 FSW 过程中,温度因素是导致材料微观组织演变的关键因素,进而影响其力学性能。为了更好对比快速冷却 FSW 与传统 FSW 的温度变化趋势,对比快速冷却 FSW 和传统 FSW 下同一测温点的热循环曲线,其峰值温度分别为 380、450℃,如图 2 所示。可见,通过液态 CO₂ 冷媒介质的加入,快速冷却 FSW 峰值温度明显降低。这是因为液态 CO₂ 在作用于工件时,保持远低于室温的工作温度,随着焊接过程的进行,迅速吸收搅拌头和工件摩擦所产生的部

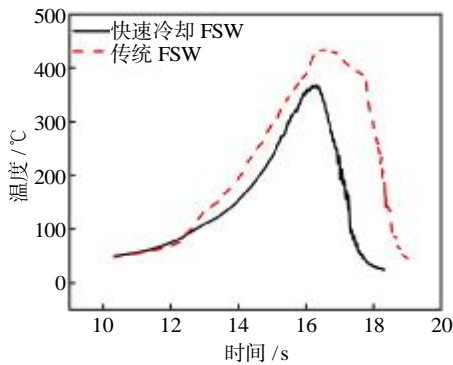


图 2 不同焊接条件下的焊缝中心温度变化曲线
Fig.2 Temperature history curves of the weld center under different welding conditions

分热量,同时,由于液态 CO₂ 喷嘴跟随在搅拌头后方,所以其冷却速度更快。

快速冷却 FSW 在不同时刻下的温度云图如图 3 所示(彩图见电子版,下同)。可以看到,在 11、13、15 和 18 s 时其对应峰值温度分别为 348、368、392 和 409℃。温度场在工件表面呈椭圆状分布,且搅拌头后端温度梯度比前端的温度梯度大。只是因为焊接过程中,在搅拌头后方添加了冷却介质,强制使得温度梯度变大,而搅拌头前方不受其影响,因此就形成上述所表现的温度分布特征。

为进一步分析快速冷却 FSW 前进阶段工件表面温度的具体变化规律,在表面焊缝中心处沿焊接方向选取四个特征点 P1~P4 进行分析。从图 4(a) 可以看到,温度云图中工件表面峰值温度为 405℃。搅拌针附近为高温区域,随着远离搅拌针,温度迅速降低,说明搅拌针与工件的摩擦是主要热量来源。从图 4(b) 温度变化曲线可以清楚看到,随着搅拌头的移动,特征点温度变化先快速升高到峰值,然后在冷媒介质的作用下急剧下降至室温附近,越靠近搅拌头温度峰值越高,与预期结果相似。

2.2 微观组织演变

在 DEFORM-3D 软件后处理模块中进行再结晶模型的建构,定义 A1050 纯铝初始晶粒尺寸为 30 μm。元胞半径定义为 1 μm,元胞空间 Rows 定义为 200,Columns 定义为 200,对焊缝中心进行微观组织模拟。元胞自动机对始晶粒的划分仅与晶粒尺寸的初始值定义有关,因此快速冷却 FSW 和传统

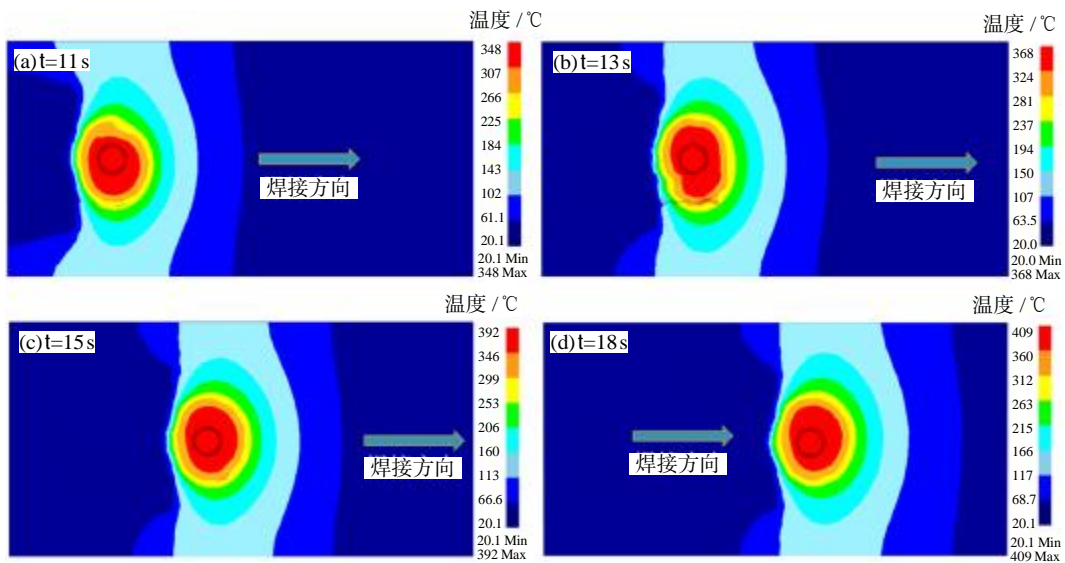


图 3 快速冷却 FSW 在不同时刻下的温度云图
Fig.3 Temperature nephograms at different time of rapid cooling FSW

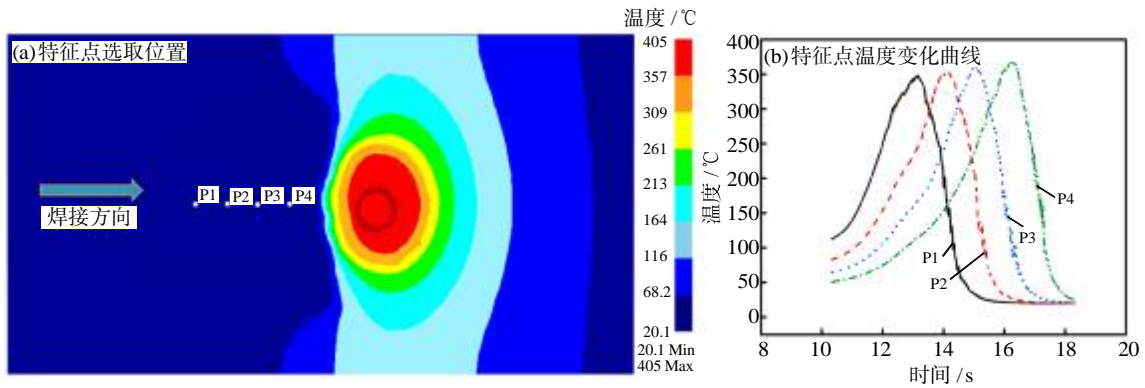
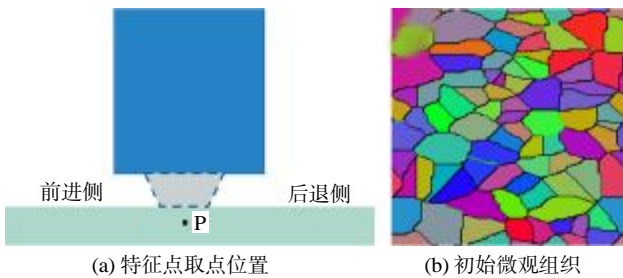


图 4 快速冷却 FSW 中工件表面的温度云图
Fig.4 Temperature nephogram of the workpiece surface during rapid cooling FSW



(a) 特征点取点位置 (b) 初始微观组织
图 5 A1050 纯铝焊缝初始晶粒形貌
Fig.5 Initial grain morphology of A1050 pure aluminum weld

FSW 的初始晶粒形貌相同。焊缝中心取点位置及初始晶粒形貌如图 5 所示。

图 6 为焊缝中心 P 点位置微观组织的模拟结果, P 点通过 x, y, z 坐标固定在焊缝中心。快速冷却和传统 FSW 焊缝中心均呈现出均匀的等轴晶组织, 其平均晶粒尺寸分别为 $3.9\mu\text{m}$ 和 $6.7\mu\text{m}$ 。图 7 为焊缝中心位错密度的模拟结果。黑色区域对应位错结构的存在, 且黑色区域颜色越深, 灰色区域越少, 表明位错密度越大。另外, 一般认为, 小角度晶界主要由位错结构组成。从图 6 也可以看到快速冷却 FSW 焊缝中心小角度晶界 (绿线) 占比明显高于传统 FSW, 进而证明快速冷却的方法确实可以使得 FSW

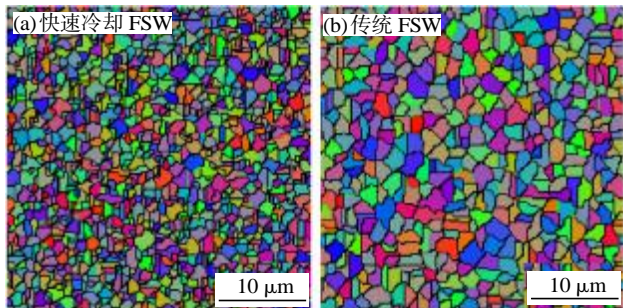


图 6 A1050 纯铝焊缝中心微观组织的模拟结果
Fig.6 Simulation results of microstructure of center of A1050 pure aluminum welds

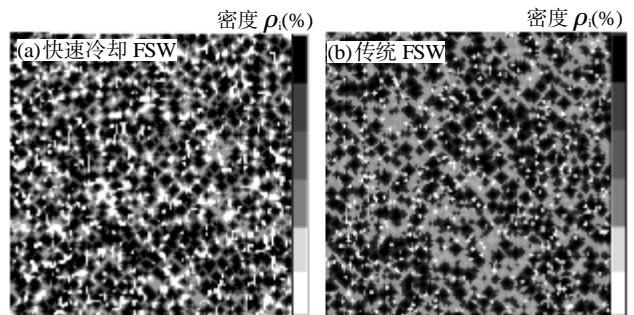


图 7 A1050 纯铝焊缝中心位错密度的模拟结果
Fig.7 Simulation results of dislocation density of center of A1050 pure aluminum welds

焊缝形成具有较高位错密度的细晶结构。

为更好地研究 A1050 纯铝焊缝中心在快速冷却 FSW 过程中的动态再结晶过程, 同样选择 P 点作为研究对象, P 点在整个焊接过程中完整的组织演变如图 8 所示。图 5(b) 为 P 点的初始晶粒形貌, 其温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 平均晶粒尺寸为 $30\mu\text{m}$ 。焊接开始后, 由于搅拌头高速旋转, 焊缝材料在轴肩和搅拌针的作用下摩擦生热, 焊缝局部温度升高。大量位错发生回复而形成位错胞, 并开始初始晶粒的晶界处积聚。随着搅拌头继续前进, 温度持续升高, 焊缝材料发生严重塑性变形。当搅拌头接近 P 点位置时, 其晶粒内部位错密度相对初始状态增大, 开始发生动态再结晶, 粗大的原始晶粒被细小的再结晶晶粒细分, 如图 8(a) 所示。随着搅拌头的不断前进, P 点温度开始下降, 直到动态再结晶过程完成, 此时 P 点平均晶粒尺寸约为 $2\mu\text{m}$, 如图 8(b) 所示。虽然在快速冷却 FSW 过程中通过液态 CO_2 的作用快速冷却, 但是从动态再结晶结束到室温仍然存在温度差, 在焊接完成后, 焊缝的平均晶粒尺寸略微增大, 达到 $3.9\mu\text{m}$ 左右, 如图 8(c) 所示。

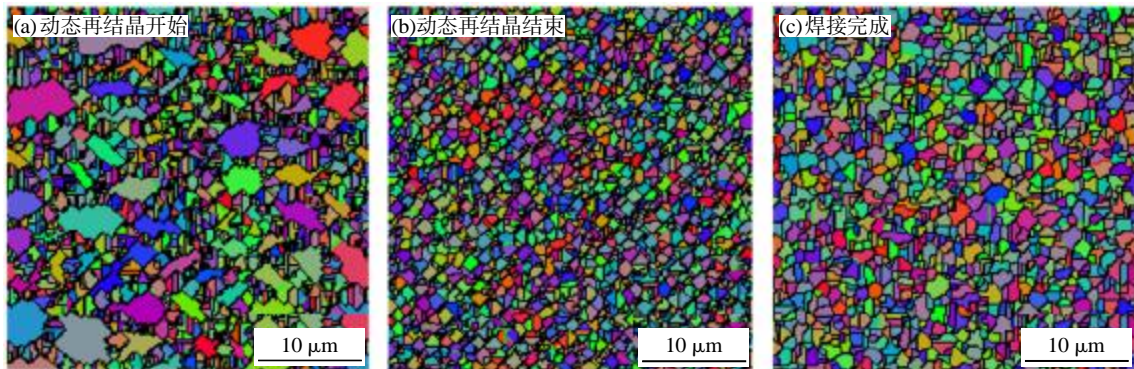


图8 快速冷却FSW过程中A1050纯铝焊缝中心P点的微观组织演变
Fig.8 Microstructure evolution of the A1050 pure aluminum weld center P point during rapid cooling FSW

3 A1050 纯铝 FSW 焊接试验

本试验采用 200 mm×100 mm×2 mm 的 A1050 纯铝板材作为研究对象,FSW 工艺示意图如图 9 所示。在传统 FSW 过程中,搅拌头轴线与焊机主轴夹角为 3°,搅拌头旋转速度为 800 r/min,焊接速度为 300 mm/min,压入深度为 0.2 mm。快速冷却 FSW 的焊接参数与传统 FSW 保持相同,仅在焊接过程中额外采用液态 CO₂ 对焊缝进行冷却。液态 CO₂ 喷嘴设置在搅拌头后方 50 mm 处,其移动速度和焊接速度相同,液态 CO₂ 流量为 15 L/min。两组试验焊接完成后,采用配有电子背散射衍射(electron backscattered diffraction,EBSD)系统的 JEOL JSM-7500 扫描电子显微镜分别对其焊缝中心微观组织进行表征,并利用 EDAX TSL OIM 软件对 EBSD 晶体数据进行处理和分析,EBSD 扫描步长为 0.2 μm。

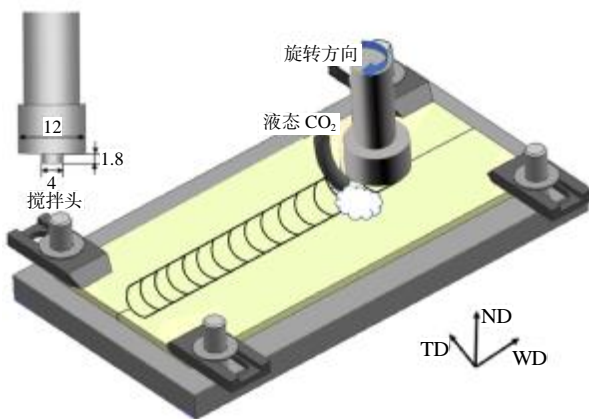


图9 FSW 工艺示意图(mm)
Fig.9 Schematic diagram of FSW process (mm)

图 10 为 A1050 纯铝焊缝中心微观组织的反极图(IPF)。快速冷却和传统 FSW 焊缝中心均呈现出均匀的等轴晶组织,其平均晶粒尺寸分别为 1.8 和 6.1 μm。可见,虽然快速冷却 FSW 和传统 FSW 采用

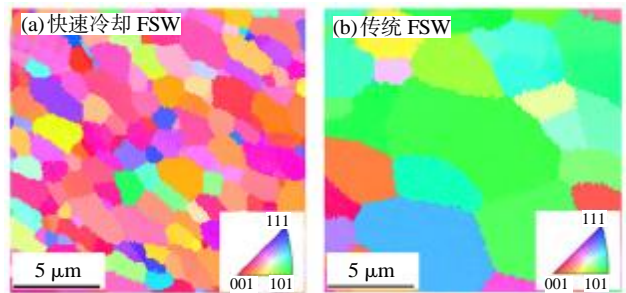


图 10 A1050 纯铝焊缝中心微观组织的 IPF
Fig.10 IPF of microstructure of center of A1050 pure aluminum welds

了相同的焊接参数,但传统 FSW 焊缝中心的晶粒尺寸明显大于快速冷却 FSW。这是因为在焊后余热引起的退火效应影响下,塑性变形过程中形成的超细晶发生了回复和晶粒长大。而对于快速冷却 FSW 来说,冷介质的强制作用,迫使晶界迁移速度降低,晶粒长大受到抑制,因此晶粒比较细小。图 11 为快速冷却 FSW 和传统 FSW 焊缝中心的平均取向差分布图(Kernel average misorientation, KAM)。KAM 图反映了焊缝中心塑性变形的均匀化程度,绿色区域占比越大,表示塑性变形程度越大或者位错密度越高^[11]。可见,快速冷却 FSW 焊缝中心晶粒的绿色区域所占比例较传统 FSW 大,证明快速冷却 FSW 焊缝具有相对较高的位错密度。

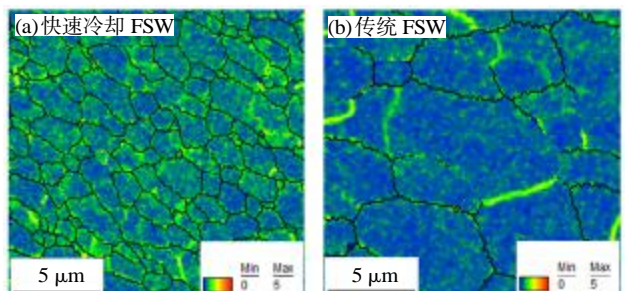


图 11 A1050 纯铝焊缝中心的平均取向差分布图
Fig.11 KAM images of center of A1050 pure aluminum welds


在FSW过程中,通过搅拌头与被焊材料之间的摩擦作用从而为焊接过程提供热输入。对于传统FSW来说,焊接完成后存在焊后退火效应,使得动态再结晶过程形成的细小晶粒发生长大,进而影响焊缝的整体力学性能。而在快速冷却FSW过程中,由于对焊缝施加冷媒介质,焊后冷却速度加快,并且强烈抑制焊后退火效应,使得动态再结晶形成的细小晶粒得以保留,焊缝整体力学性能可得到提升。焊接试验真实地验证了数值模拟结果的可靠性,为后续使用数值模拟技术对焊缝应力应变场和材料流动行为进行分析提供了前提保证,并且可为焊接试验参数优化提供了参考依据。

4 结论

(1) 相对于传统FSW来说,快速冷却FSW的峰值温度明显降低且焊后冷却速度显著提高;快速冷却FSW焊缝表面温度呈椭圆状分布,搅拌头后方的温度梯度相对于前方明显增大。

(2) 相对于传统FSW,快速冷却FSW中液态CO₂的冷却作用可明显消除焊后退火效应,其焊缝中心的平均晶粒尺寸较小且位错密度较大,有利于焊缝力学性能的提高。

参考文献:

- [1] Xu N, Feng R N, Ren Z K, et al. Improvement of microstructure and mechanical properties of AZ61 Mg alloys subjected to rapid cooling friction stir welding [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2021, 26(7): 503-512.
 - [2] 肖含月. 对搅拌摩擦焊T型2014-T651航空铝合金的微观组织的研究[J]. *世界有色金属*, 2021(15): 114-115.
 - [3] Guo Z H, Zhao G Y, Ke L M, et al. Finite element analysis of materials flow behavior in friction stir welding of 7075 aluminum alloy plate [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 117-119: 1621-1624.
 - [4] 周文静,杜柏松,卢小明. 铝合金搅拌摩擦焊温度场数值模拟及参数影响分析[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(7): 156-160.
 - [5] Sato Y S, Urata M, Kokawa H, et al. Retention of fine grained microstructure of equal channel angular pressed aluminum alloy 1050 by friction stir welding [J]. *Scripta Materialia*, 2001, 45: 109-114.
 - [6] Xu N, Ueji R, Morisada Y, et al. Modification of mechanical properties of friction stir welded Cu joint by additional liquid CO₂ cooling[J]. *Materials & Design*, 2014, 56: 20-25.
 - [7] 万胜强,吴运新,龚海,等. 2219铝合金搅拌摩擦焊温度与残余应力热力耦合模拟 [J]. *热加工工艺*, 2019, 48(13): 159-163.
 - [8] 王继业,陈学文,杨喜晴. Cr8钢动态再结晶行为及元胞自动机模拟[J]. *材料热处理学报*, 2019, 40(7): 149-155.
 - [9] Goetz R L, Seetharaman V. Modeling dynamic recrystallization using cellular automata [J]. *Scripta Materialia*, 1998, 38: 405-413.
 - [10] 湛利华. 工业纯铝高温流变行为的实验研究[J]. *热加工工艺*, 2006, 35(4): 7-11.
 - [11] Xu N, Song Q, Jiang Y, et al. Large load friction stir welding of Mg-6Al-0.4Mn-2Ca magnesium alloy [J]. *Materials Science and Technology*, 2018, 34: 1118-1130. 
-
- (上接第78页)
- [2] 陈俊豪,宁保群. P92钢高温蠕变过程中显微组织演变研究现状及强化途径[J]. *材料导报*, 2014, 28(9): 53-59.
 - [3] 王志成,叶有俊,王一宁,等. P92钢中Laves析出相演化规律研究[J]. *石油化工设备*, 2021, 50(1): 6-11.
 - [4] Maddi Lakshmi Prasad, Deshmukh G S, Ballal A R, et al. Effect of Laves phase on the creep rupture properties of P92 steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2016, 668: 215-223.
 - [5] Wang Xue, Pan Q G, Ren Y Y, et al. Microstructure and type IV cracking behavior of HAZ in P92 steel weldment [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 552: 493-501.
 - [6] Wang Xue, Xu Qiang, Yu S M, et al. Laves-phase evolution during aging in fine grained heat-affected zone of a tungsten-strengthened 9% Cr steel weldment [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 219: 60-69.
 - [7] 王学,潘乾刚,刘洪,等. 超超临界机组用P92钢焊接细晶区高温蠕变行为研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(2): 104-108.
 - [8] Wang Xue, Du C C, Liu Hong, et al. Effect of Laves phase on the toughness of P92 weld metals [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structure*, 2019, 42: 686-697.
 - [9] Fedoseeva A, Dudova N, Kaibyshev R. Creep strength breakdown and microstructure evolution in a 3% Co modified P92 steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2016, 654: 1-12. 