

HSn70-1 锡黄铜冷源辅助搅拌摩擦焊搅拌区的 强化机制和应变硬化行为

许楠, 张柏硕, 齐天祥, 刘朝阳, 徐玉缀, 宋元宁, 包晔峰

(河海大学, 常州, 213200)

摘要: 采用冷源辅助搅拌摩擦焊对 2 mm 厚的 HSn70-1 锡黄铜进行对接焊接, 并获得了无缺陷的焊接接头. 利用光学显微镜、电子背散射衍射、透射电子显微镜和拉伸试验, 分析搅拌区的微观组织及其对强化机制和应变硬化行为的影响. 结果表明, 干冰乙醇混合物的快速冷却作用不仅消除了热影响区, 还抑制了搅拌区的位错回复和晶粒长大. 搅拌区呈现具有较高位错密度的超细晶结构, 搅拌区的抗拉强度为 486 MPa, 比母材提高了 53.8%, 断后伸长率也达到了 30%, 搅拌区屈服强度较母材提高了 47.1%, 其强化机制主要为固溶强化和晶界强化, 但搅拌区的应变硬化行为主要受晶粒尺寸和位错密度的影响. 由拉伸过程中产生的纳米尺度变形孪晶可协调塑性变形, 并有效缓解应力集中, 使搅拌区强度提高的同时仍具有良好的延展性.

创新点: (1) 提出了在搅拌区制备具有高位错密度超细晶结构的工艺方法.

(2) 揭示了锡黄铜冷源辅助搅拌摩擦焊搅拌区的强塑化机制.

关键词: 锡黄铜; 搅拌摩擦焊; 微观组织; 强化机制; 应变硬化行为

中图分类号: TG 453.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230128001

0 序言

H70 黄铜 (Cu30%, Zn 合金) 在海洋环境中会出现严重的脱锌腐蚀现象, 在 H70 黄铜中添加 1%Sn 可防止脱锌腐蚀, 从而改善在海洋大气和海水中的耐腐蚀能力. HSn70-1 锡黄铜 (Cu29%, Zn1%, Sn) 在国际上被誉为“海军黄铜”, 常用来制造螺旋桨、冷凝器和接触腐蚀介质的容器等, 广泛应用于船舶、海水淡化、火力发电和石油化工等领域. 在 HSn70-1 锡黄铜结构件的制造过程中, 焊接是关键工艺环节, 接头的质量水平直接影响整个结构的力学性能和服役可靠性. 搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 是英国焊接研究所于 1991 年发明的一种固相连接技术^[1-2], FSW 的峰值温度低于母材熔点, 因此可避免裂纹和气孔等与熔化焊相关缺陷的产生. 由于 H70 黄铜和 HSn70-1 锡黄铜的物理性

质和力学性能相近, 国内外学者普遍针对 H70 黄铜开展 FSW 研究, 由于 H70 黄铜具有较高的导热系数, 焊接时需要采用较大的热输入, 虽然通过调整焊接参数 (增加焊接速度、降低搅拌头转速或提高轴向压力) 可使接头搅拌区的强度接近甚至超过母材, 但热力影响区晶粒发生粗化导致整个接头的焊接效率不高^[3-4].

冷源辅助 FSW 可显著改善铜合金 FSW 接头的力学性能^[5-6], 在 FSW 过程中使用外加冷媒可显著降低焊接峰值温度并提高焊后冷却速度, 由于冷媒的快速冷却作用, 热影响区消失, 搅拌区呈现高位错密度的超细晶结构. 横向拉伸试验中断裂发生在母材, 实现了铜合金的等强焊接, 另外, 搅拌区还具有良好的强度和塑性匹配, 由于搅拌区的强度和塑性与微观组织相关, 因此, 研究拉伸试验过程中, 搅拌区的强化机制以及应变硬化行为, 对揭示搅拌区微观组织与强度和塑性之间的关系具有重要意义.

Khodaverdizadeh 等人^[7]曾对纯铜 FSW 接头搅拌区的应变硬化行为进行了研究, 并指出搅拌区的应变硬化能力主要受晶粒尺寸影响, 但由于常规 FSW 的峰值温度高且焊后冷却速度慢, 搅拌区的位

收稿日期: 2023 - 01 - 28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51805145); 江苏省基础研究计划 (BK20211067); 江苏省高校“青蓝工程”资助项目; 大学生创新创业训练计划资助项目.

错密度很低,因此未考虑位错密度对应硬化行为的影响.文中采用冷源辅助 FSW 对 HSn70-1 锡黄铜进行焊接,在搅拌区制备具有较高位错密度的超细晶结构,研究搅拌区微观组织对强化机制和应变硬化行为的影响规律.

1 试验方法

文中采用退火态 HSn70-1 锡黄铜 (100 mm × 70 mm × 2 mm) 为研究对象,焊接前,用砂纸和无水乙醇彻底清理母材表面和对接面的杂质和污物,用夹具固定母材,在其下方放置钢制冷却垫板,搅拌头的轴肩直径 ϕ 为 15 mm,搅拌针直径和长度分别为 ϕ 4 mm 和 1.9 mm,采用冷源辅助 FSW 对母材进行对接焊接,冷媒为干冰和无水乙醇混合物.焊接参数为定值,即焊接速度为 200 mm/min,搅拌头转速为 600 r/min,轴肩压入深度为 0.1 mm,搅拌头倾角为 3°.前期研究中已证实采用上述焊接参数可获得无缺陷的铜合金 FSW 接头,焊接后,垂直于焊接方向切取横截面试样用于光学显微镜 (optical microscope, OM) 和电子背散射衍射 (electron back scatter diffraction, EBSD) 表征,首先对横截面样品进行机械研磨和抛光,用 5 g 三氯化铁、3 mL 盐酸和 50 mL 无水乙醇的混合溶液对其侵蚀后用于 OM 表征,再次使用砂纸对横截面试样进行研磨,采用 250 mL 磷酸和 250 mL 无水乙醇的混合溶液进行电解,抛光后进行 EBSD 表征,EBSD 扫描步长为 0.2 μ m. 根据国家标准 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》,分别在平行于焊接方向的搅拌区内部和母材中切取拉伸试样,其标距尺寸均为 12 mm × 4 mm × 1.8 mm. 利用 Instron 电子万能材料试验机在室温下以 1 mm/min 的速度进行拉伸试验,在拉伸试样断口附近取样,研磨至 50 μ m 以下后进行双喷减薄,最后采用透射电子显微镜 (transmission electron microscope, TEM) 对其进行表征.

2 结果与讨论

2.1 接头成形

HSn70-1 锡黄铜冷源辅助 FSW 接头表面和横截面形貌,如图 1 所示. HSn70-1 锡黄铜冷源辅助 FSW 接头表面的宏观形貌见图 1(a),由于干冰和无

水乙醇混合物的快速冷却作用,接头表面没有发生氧化,呈现出光滑且明亮的外观,接头横截面的图像见图 1(b),可见接头内部没有出现未焊合、孔洞和隧道等缺陷.FSW 接头通常包含 4 个典型的区域,即母材、热影响区、热力影响区和搅拌区,由于前进侧和后退侧的微观结构特征相似,文中只分析了前进侧不同区域的微观组织见图 1(c),热力影响区外侧的晶粒尺寸与母材的晶粒尺寸相似,这是因为干冰和无水乙醇混合物的冷却作用可加速热量扩散,并抑制热影响区的晶粒长大,因此接头没有形成明显的热影响区.在焊接过程中,热力影响区在较高温度下受到塑性变形而发生部分动态再结晶,其组织由较大的原始晶粒和细小的再结晶晶粒组成,与母材相比,搅拌区的晶粒显著细化,在 OM 下很难分辨出独立的晶粒结构.

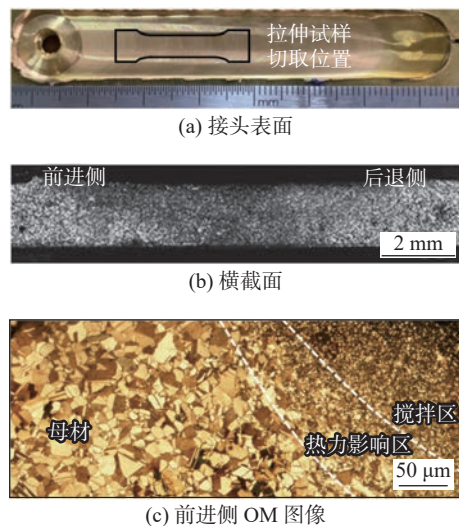


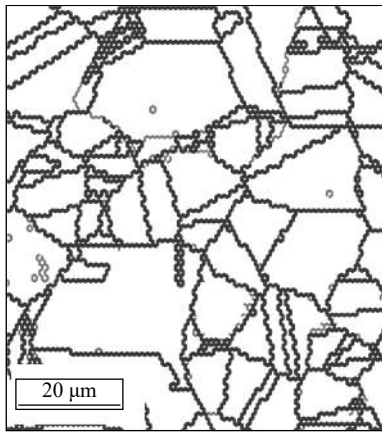
图 1 HSn70-1 锡黄铜冷源辅助 FSW 接头表面和横截面形貌

Fig. 1 Surface appearance and cross-sectional morphology of cold source assistant FSW HSn70-1 tin brass joint. (a) surface appearance; (b) cross-section; (c) OM image of advancing side

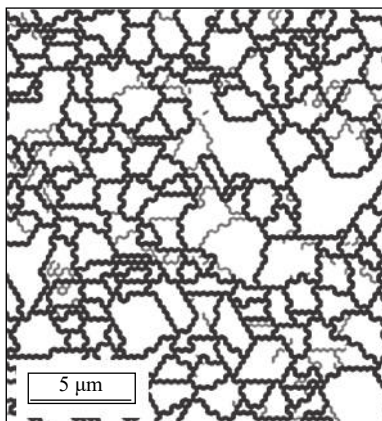
2.2 微观组织

图 2 为母材和搅拌区的 EBSD 表征结果,图中灰线和黑线分别表示小角度晶界 ($2^\circ \leq \theta < 15^\circ$) 和大角度晶界 ($\theta \geq 15^\circ$).母材的晶粒尺寸较大,其平均晶粒尺寸约为 23.6 μ m,大角度晶界和孪晶界的比例分别为 94% 和 55%,呈现出典型退火态的组织特征.在焊接过程中发生了动态再结晶,搅拌区的晶粒尺寸显著细化,其平均晶粒尺寸为 1.3 μ m,大角度晶界和孪晶界的比例分别为 81% 和 25%.前期研究表明,HSn70-1 锡黄铜 FSW 接头搅拌区晶粒细化的主导机制为,连续动态再结晶和不连续动态再

结晶,另外,搅拌区小角度晶界的比例达到 19%,表明晶粒内部具有较高的位错密度,由于快速冷却的作用,搅拌区晶粒长大和位错回复均受到抑制,因此搅拌区表现出高位错密度的超细晶结构。



(a) 母材



(b) 搅拌区

图 2 母材和搅拌区的 EBSD 表征结果

Fig. 2 The results of EBSD characterization. (a) base metal; (b) stir zone

2.3 强化机制

图 3 和表 1 分别为母材和搅拌区的工程应力—应变曲线和拉伸性能,可以看出,搅拌区屈服强度比母材提高了 47.1%,母材和搅拌区呈现出截然不同的微观组织特征,这是造成屈服强度存在较大差异的根本原因。根据微观组织表征结果,搅拌区屈服强度主要由晶界强化和位错强化决定,即

$$\sigma_y = \sigma_0 + \sqrt{\sigma_{gb}^2 + \sigma_p^2 + \sigma_{ss}^2} \quad (1)$$

式中: σ_y 表示屈服强度; σ_0 为退火状态下的流变应力,值为 25 MPa; σ_{gb} , σ_p 和 σ_{ss} 分别表示晶粒尺寸,位错密度和固溶元素对屈服强度的贡献。

(1) 晶界强化。细化晶粒对屈服强度的贡献通常用 Hall-Petch 关系来描述^[8],即

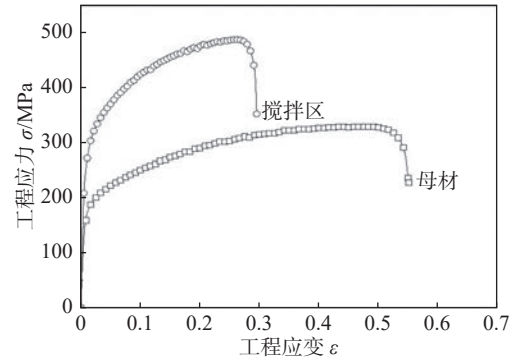


图 3 母材和搅拌区的工程应力—应变曲线

Fig. 3 Engineering stress—strain curves of base metal and stir zone

表 1 母材和搅拌区的拉伸性能

Table 1 Tensile properties of base metal and stir zone

区域	抗拉强度 σ_{UTS} /MPa	屈服强度 σ_y /MPa	断后伸长率 A (%)
母材	316	155	55
搅拌区	486	228	30

$$\sigma_{gb} = kd^{-1/2} \quad (2)$$

式中: k 为常数,值为 110 MPa· μm ; d 为平均晶粒尺寸,根据式 (2) 可计算出搅拌区的晶粒尺寸对屈服强度的贡献为 96 MPa。搅拌区中单位体积内的晶界数量较多,可有效阻碍位错运动,因此对屈服强度的贡献较为明显。

(2) 位错强化。在拉伸变形中,搅拌区较高的位错密度使位错的增殖和运动受阻。为克服位错缠结带来的阻力,必须提高外加应力,因此位错对搅拌区屈服强度也有一定的贡献,可用泰勒关系来描述^[9],即

$$\sigma_p = MaGb\sqrt{\rho} \quad (3)$$

式中: M 为泰勒因子,值为 3.1; G 为剪切模量 39 GPa; b 为伯格斯矢量 0.26 nm; a 为常数,值为 0.2。由于小角度晶界通常由位错构成,位错密度 ρ 为

$$\rho = 3(1-f)\bar{\theta}/bd \quad (4)$$

式中: $\bar{\theta}$ 为小角度晶界的平均取向角 ($\bar{\theta}=2.6^\circ$); f 为大角度晶界的比例,结合式 (3) 和式 (4) 可计算出位错密度对搅拌区屈服强度的贡献为 18 MPa。

(3) 固溶强化。固溶元素 (Zn 和 Sn) 对屈服强度的贡献可根据下式计算^[10],即

$$\sigma_{\text{Solid-solution}} = HC^m \quad (5)$$

式中: H 是固溶元素 Zn 引起的 Cu 屈服强度增量系

数, 值为 6.16 MPa/wt.%; C 是固溶元素的质量分数; 对于面心立方金属 m 为 1. 由于 Zn 和 Sn 的固溶, Cu 基体产生的晶格畸变可阻碍位错运动. 由式 (5) 计算得出固溶强化对屈服强度的贡献为 185 MPa, 最后根据式 (1) 可得出搅拌区屈服强度的计算值为 234 MPa, 结合表 1 可以看出搅拌区屈服强度的试验值和计算值较为吻合, 说明式 (1) 能够较好地预测搅拌区的屈服强度. 通过对搅拌区微观组织、拉伸性能和强化机制的分析, 发现固溶强化和晶界强化对搅拌区的屈服强度起到关键作用.

2.4 应变硬化行为

从图 3 和表 1 还可以看出搅拌区的抗拉强度比母材提高了 53.8%, 断后伸长率也达到了 30%, 搅拌区强度提高的同时仍保持较好的延展性, 这和拉伸过程中材料的应变硬化行为有关, 材料在均匀塑性变形阶段的应变硬化能力通常可利用硬化比 H_c , 应变硬化指数 n 以及加工硬化率 θ 这 3 个指标进行评定, H_c 为材料的抗拉强度与屈服强度之比

$$H_c = \frac{\sigma_{UTS} - \sigma_y}{\sigma_y} \quad (6)$$

式中: 搅拌区和母材的 H_c 分别为 1.13 和 1.04, 表明搅拌区具有较高的应变硬化能力, 从真应力—真应变曲线中均匀塑性变形阶段可拟合出 n 值, 均匀塑性变形阶段的流变应力常用 Hollomon 关系^[11] 来表示

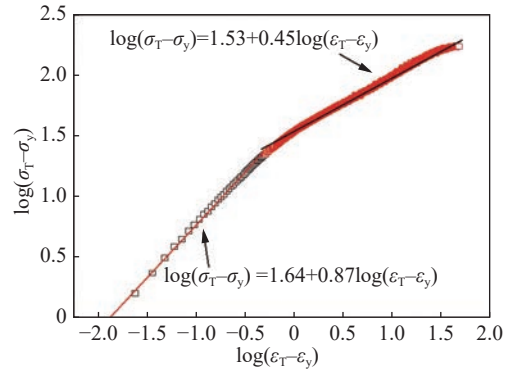
$$\sigma_T = K \varepsilon_T^n \quad (7)$$

式中: σ_T 为真应力; ε_T 为真应变; K 为强度系数. 为了更精确地计算出 n 值, Chen 等人^[12] 用 Ludwik 方程对 Hollomon 关系进行了修正, 即

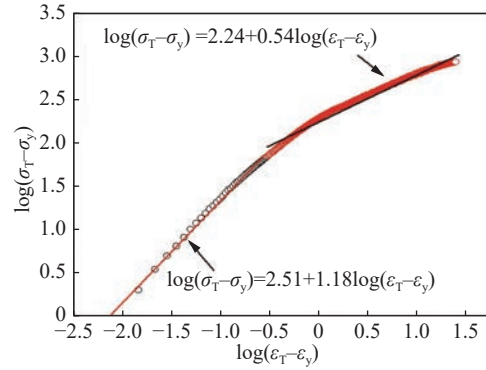
$$\log(\sigma_T - \sigma_y) = K + n \log(\varepsilon_T - \varepsilon_y) \quad (8)$$

采用式 (8) 对真应力—真应变曲线中均匀塑性变形阶段进行拟合即可得出 n 值, 所得结果如图 4 所示, 可以看出搅拌区的 n 值明显大于母材.

图 5 为母材和搅拌区加工硬化率 θ 值的变化曲线. 母材和搅拌区的 θ 值先是急剧下降然后缓慢下降, 这分别为应变硬化行为的第 III 阶段 (ε_T 为 0 ~ 0.02) 和第 IV 阶段 (ε_T 为 0.02 ~ 颈缩), 搅拌区的 θ 值高于母材表明搅拌区具有较高的应变硬化率. 在第 III 阶段, 搅拌区单位体积内较大的晶界面积和较高的位错密度可有效阻碍位错运动, 造成搅拌区的强度逐渐增加, 由于该阶段的应变较小, 只有部分晶粒发生变形, 随着应变的增加而新增殖的



(a) 母材



(b) 搅拌区

图 4 母材和搅拌区的应变硬化指数线性拟合结果

Fig. 4 Linear fitting results of strain hardening exponent of base metal and stir zone. (a) base metal; (b) stir zone

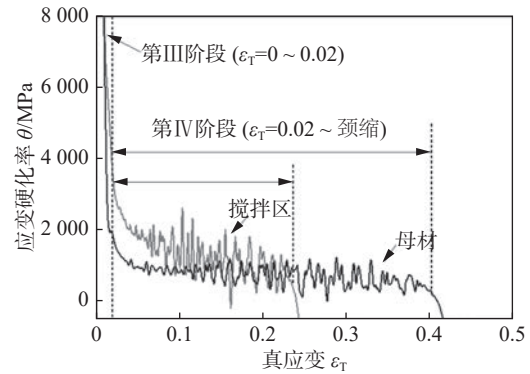


图 5 母材和搅拌区的应变硬化率曲线

Fig. 5 Strain hardening rate of base metal and stir zone.

位错在晶粒内部只有部分空间可进行滑移, 因此表现出 θ 值急剧下降的趋势; 在第 IV 阶段, 所有晶粒在高应力下发生塑性变形而出现扭转, 虽然位错在晶粒内部可继续增殖从而对搅拌区继续进行强化, 但强化速率逐渐变小, 导致 θ 值逐渐缓慢降低并达到稳定状态. 位错增殖速率 ($d\rho/d\varepsilon_T$) 是影响搅拌区应变硬化行为的重要参数, $d\rho/d\varepsilon_T$ 取决于初始位错密度和晶粒尺寸, 即

$$\frac{d\rho}{d\varepsilon_T} = M \left(k_1 \sqrt{\rho} - k_2 \rho + \frac{k_3}{bd} \right) \quad (9)$$

式中: k_1 , k_2 和 k_3 分别代表与加工硬化、动态回复和晶界位错密度相关的常数. 对式 (3) 进行微分处理后代入式 (9) 得到下式

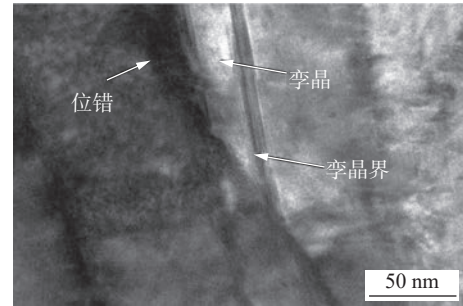
$$\theta = \frac{d\sigma_T}{d\varepsilon_T} = \frac{M\alpha Gb}{2} \left[k_1 - k_2\rho^{1/2} + \frac{k_3}{d\rho^{1/2}} \right] \quad (10)$$

θ 值与 $d\rho/d\varepsilon_T$ 正相关, 而 $d\rho/d\varepsilon_T$ 与晶粒尺寸和位错密度直接相关, 即位错密度越高、晶粒尺寸越小, $d\rho/d\varepsilon_T$ 就越大, 由于搅拌区呈现出高位错密度的超细晶结构, 因此其 θ 值较母材大.

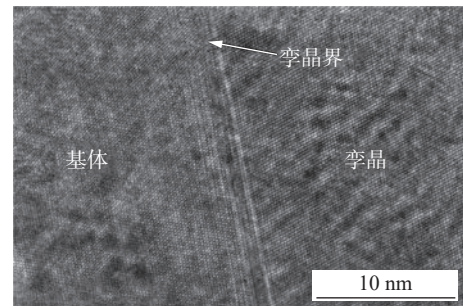
从以上分析可知, 搅拌区的强度和应变硬化能力均与晶粒尺寸和位错密度有关. 对于常规 FSW, 由焊后余热带来的退火效应对搅拌区的晶粒尺寸和位错密度有很大影响, 焊接过程中材料在高温下受到剧烈的塑性变形, 接头搅拌区诞生之初的组织为高位错密度的超细晶结构, 此时这种结构尚属于亚稳态, 具有较大的回复和再结晶驱动力, 由于常规 FSW 焊后冷却速度较慢, 搅拌区在焊后余热的影响下产生了退火效应, 出现了位错回复、再结晶和晶粒长大的现象. 先前的研究表明焊后退火效应是导致铜合金 FSW 接头力学性能下降的主要原因^[13], 冷源辅助 FSW 可消除上述退火效应, 搅拌区表现出具有大量位错的超细晶结构, 其屈服强度和抗拉强度均比母材具有较大幅度的提高, 另外, 由于冷源辅助 FSW 消除了热影响区, 因此, HSn70-1 锡青铜无论是退火态还是硬化态, 冷源辅助 FSW 均可实现等强焊接.

搅拌区强度提高的同时其断后伸长率仍可达 30%, 表明在拉伸过程中, 未过早发生严重的位错塞积而造成应力集中. 图 6 为拉伸试验后搅拌区的 TEM 表征结果, 搅拌区的晶粒非常细小并具有较高的位错密度, 拉伸过程中新增殖位错的滑移受到限制, 加之 HSn70-1 锡青铜的层错能很低, 当位错滑移受阻时会产生变形孪晶, 变形孪晶不同于退火孪晶, 其宽度通常在几个纳米和数十纳米之间, 变形孪晶可改变基体晶粒的位向, 使原来处于硬取向的位错滑移系转变为软取向, 从而有利于局部应力的松弛以维持塑性变形继续进行. 另外, 变形孪晶的界面还能吸收和分解位错, 为位错滑移提供一定的空间, 在拉伸过程中增殖的位错滑移至孪晶界时, 会分解为 2 个分位错, 其中一个分位错留在孪晶界继续滑移, 另一个分位错向孪晶内部滑移^[14]. 从图 6(a) 可以看出孪晶界面区域较宽, 这是分位错在界面上滑移造成的结果, 图 6(b) 和图 6(c) 为孪晶界和位错滑移交互作用的高分辨 TEM 表征结果,

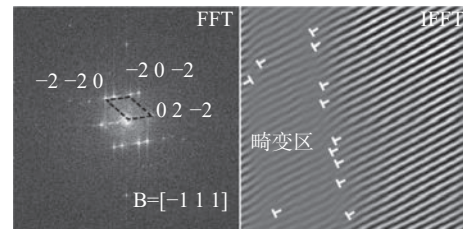
可见在孪晶界面处发生了严重的晶格畸变, 并且存在大量的位错, 也就是说, 位错向孪晶界滑移时不会在孪晶界处发生塞积, 因此在拉伸过程中可延缓由位错塞积引起的应力集中, 使得搅拌区在强度提高的同时仍具有较好的塑性.



(a) TEM 明场像



(b) 孪晶界的高分辨 TEM 图像



(c) 孪晶界选区傅里叶变换 (FFT) 和逆傅里叶变换 (IFFT)

图 6 拉伸试验后搅拌区 TEM 表征结果
Fig. 6 TEM characterization results of tensile tested stir zone. (a) bright-field TEM image; (b) high resolution TEM image of twin boundary; (c) fast fourier transform (FFT) and inverse fast fourier transform (IFFT) of selected twin boundary

3 结论

(1) 采用冷源辅助 FSW 制备了表面成形良好且内部无缺陷的 HSn70-1 锡青铜接头, 干冰乙醇混合物的快速冷却作用不仅消除了热影响区, 还抑制了搅拌区的位错回复和晶粒长大, 搅拌区呈现具有高位错密度的超细晶结构.

(2) 搅拌区屈服强度较母材提高了 47.1%, 其强化机制由固溶强化、晶界强化和位错强化共同决定, 其中固溶强化和晶界强化起主导作用.

(3) 搅拌区屈服后在均匀塑性变形阶段的应变硬化能力和晶粒尺寸和位错密度有关, 纳米尺度的变形孪晶可协调应变和缓解应力集中. 搅拌区抗拉强度为 486 MPa, 断后伸长率可达 30%, 表现出良好的强度和塑性匹配.

参考文献

- [1] 戴翔, 石磊, 武传松, 等. 2195-T6 铝锂合金搅拌摩擦焊接头微观组织结构与力学性能 [J]. *焊接学报*, 2022, 43(6): 25–34.
Dai Xiang, Shi Lei, Wu Chuansong, *et al.* Microstructure and mechanical properties of 2195-T6 Al-Li alloy joint prepared by friction stir welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(6): 25–34.
- [2] 周利, 张仁晓, 舒凤远, 等. Q235 钢搅拌摩擦焊接头微观组织与力学性能分析 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(3): 80–84.
Zhou Li, Zhang Renxiao, Shu Fengyuan, *et al.* Microstructure and mechanical properties of friction stir welded joint of Q235 steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(3): 80–84.
- [3] Moghaddam M S, Parvizi R, Haddad-Sabzevar M, *et al.* Microstructural and mechanical properties of friction stir welded Cu–30Zn brass alloy at various feed speeds: Influence of stir bands[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(5): 2749–2755.
- [4] Sun Y F, Xu N, Fujii H. The microstructure and mechanical properties of friction stir welded Cu–30Zn brass alloys[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2014, 589: 228–234.
- [5] Xu N, Song Q N, Bao Y F. Improvement of microstructure and mechanical properties of C44300 tin brass subjected to double-pass rapid cooling friction stir welding[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 834: 155052.
- [6] Xu N, Ueji R, Fujii H. Enhanced mechanical properties of 70/30 brass joint by rapid cooling friction stir welding[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 610: 132–138.
- [7] Khodaverdizadeh H, Mahmoudi A, Heidarzadeh A, *et al.* Effect of friction stir welding (FSW) parameters on strain hardening behavior of pure copper joints[J]. *Materials and Design*, 2012, 35: 330–334.
- [8] 栗宏伟, 赵志毅, 薛润东. 热输入对 SAF2507 超级双相不锈钢焊接接头显微组织及硬度的影响 [J]. *焊接学报*, 2022, 43(2): 20–26.
Li Hongwei, Zhao Zhiyi, Xue Rundong. Effect of heat input on the microstructure and hardness of SAF2507 super duplex stainless steel welded joints[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(2): 20–26.
- [9] Xu N, Shen J, Wang D, *et al.* Tensile property response of AZ91 Mg alloy subjected to pre-aging and high-force friction stir processing[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2022, 841: 143033.
- [10] Dasharath S M, Koch C C, Mula S. Effect of stacking fault energy on mechanical properties and strengthening mechanisms of brasses processed by cryorolling[J]. *Materials Characterization*, 2015, 110: 14–24.
- [11] 许楠, 冯若男, 宋元宁, 等. 微观组织对镁合金 FSW 焊缝应变硬化行为的影响 [J]. *焊接学报*, 2020, 41(11): 7–12.
Xu Nan, Feng Ruonan, Song Qining, *et al.* Effects of microstructure on strain hardening behavior of friction stir welded magnesium alloy. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(11): 7–12.
- [12] Chen X H, Lu L. Work hardening of ultrafine-grained copper with nanoscale twins[J]. *Scripta Materialia*, 2007, 57: 133–136.
- [13] Xu N, Ueji R, Fujii H. Dynamic and static change of grain size and texture of copper during friction stir welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 232: 90–99.
- [14] Shen Y F, Lu L, Lu Q H, *et al.* Tensile properties of copper with nano-scale twins[J]. *Scripta Materialia*, 2005, 52(10): 989–994.

第一作者: 许楠, 博士, 教授; 主要研究方向为搅拌摩擦焊接及加工; Email: xunan@hhu.edu.cn.

(编辑: 刘启明)

corresponding process parameters. The results show that with less simulation cost, the prediction result of multi-fidelity model is better. Under the same prediction accuracy, the number of high-precision sample points of the variable reliability model is only 1/4 of that of the single precision model. At the same time, compared with the neural network prediction model, it converges faster in the optimization process. This paper provides some reference for the research of reliability prediction of solder joint with multi-fidelity model.

Highlights: (1) A multi-fidelity model for predicting the reliability of solder joints is proposed. The required high-precision sample points have reduced by three-quarters compared to a single-precision model.

(2) Convergence tests were conducted on four mesh partitioning methods for finite element analysis of solder joints under temperature cycling conditions. Considering both accuracy and cost conditions, two partitioning methods with better accuracy are proposed.

Key words: solder joint reliability; life prediction; multi-fidelity model; NSGA

Strengthening mechanism and strain hardening behavior of the stir zone of cold source assistant friction stir welded HSn70-1 tin brass joint XU Nan, ZHANG Baishuo, QI Tianxiang, LIU Zhaoyang, XU Yuzhui, SONG Qining, BAO Yefeng(Hohai University, Changzhou, 213022, China). pp 17-22

Abstract: 2 mm thick HSn70-1 tin brass plates were joined using cold source assistant friction stir welding. Defect free welded joint was obtained. The microstructure and its effect on the strengthening mechanism and strain hardening behavior were studied by optical microscopy, electron backscatter diffraction, transmission electron microscopy, and tensile test. The obtained results showed that the rapid cooling effect of dry ice and ethanol mixture eliminated the heat-affected zone, and it also restrained dislocation recovery and grain growth in the stir zone. The stir zone exhibited ultra-fine grain structure with high dislocation density. The ultimate tensile strength of the stir zone was 486MPa, which was 53.8% higher than that of the base material, and the fracture elongation reached to 30%.

The yield strength of the stir zone also increased by 47.1% compared to that of the base material, and the yield strength of the stir zone was dominated by solid solution strengthening and grain boundary strengthening mechanisms, while the strain hardening behavior was mainly affected by grain size and dislocation density. The nano-scale deformation twins which generated during the tensile test effectively coordinated plastic deformation and alleviated stress concentration, so the strength of the stir zone was improved without remarkable ductility loss.

Highlights: (1) A method for preparing ultrafine grain structures with high dislocation density in the stir zone was proposed.

(2) The mechanism of enhancing strength and ductility in the stir zone of cold source assistant friction stir welded tin brass was revealed.

Key words: tin brass; friction stir welding; microstructure; strengthening mechanism; strain hardening behavior

Study on friction stir welding of magnesium alloy with backing plate REN Daxin, CONG Lingxiang, HAN Ronghao, SONG Gang, LIU Liming(Dalian University of Technology, Dalian, 116024, China). pp 23-30

Abstract: In conventional friction stir welding, the length of the stirring pin needs to be strictly matched with the thickness of the welded plate. A too-long or too-short stirring pin will adversely affect the welding effect. To solve this limitation, this paper proposes a new welding process that adds a backing plate of the same material with appropriate thickness to the back of the weld seam. In this process, the length of the stirring pin is greater than the thickness of the welded plate, and the backing plate is fused with the base metal. On the one hand, the requirement for stirring pin length is reduced. On the other hand, the adverse effects of weld seam thinning can be eliminated. The butt welding of 1.5 mm thick AZ31B magnesium alloy was studied by this method. The maximum tensile strength of the weld joint can reach 91.19% of the base metal. In addition, the microstructure and microhardness distribution of the weld beam cross-section were analyzed. The optimal process parameters were obtained by the established convolutional neural network model, and the distribution of joint