

根部加强的镁合金搅拌摩擦焊分析

任大鑫, 丛凌翔, 韩荣豪, 宋刚, 刘黎明
(大连理工大学, 大连, 116024)

摘要: 常规搅拌摩擦焊中, 不同厚度的材料所适配的最佳搅拌针长度也不相同, 搅拌针过长或过短都会对焊接效果产生不利影响。为了解决这一局限性, 提出了一种在焊缝背面添加适当厚度同种材料垫板的新型焊接工艺, 在该工艺中, 搅拌针长度大于被焊板材厚度, 将垫板与母材焊接在一起, 一方面, 降低了对搅拌针长度的要求; 另一方面, 可消除焊缝减薄产生的不利影响。结果表明, 采用该方法分析 1.5 mm 厚 AZ31B 镁合金的对接焊, 接头抗拉强度最大可达母材的 91.19%, 此外, 分析了焊缝横截面微观组织和显微硬度分布, 通过所建立的卷积神经网络模型, 对接头抗拉强度随参数变化的分布情况进行了预测, 获取了最佳工艺参数。

创新点: (1) 搅拌针可以穿透被焊板材, 消除了根部未熔合缺陷。
(2) 增加了搅拌针长度的可选范围, 拓宽了焊接工艺窗口。
(3) 焊缝背面形成加强结构, 抵消了焊缝正面减薄的不利影响。

关键词: 搅拌摩擦焊; AZ31B 镁合金; 垫板; 神经网络

中图分类号: TG 453 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20230104001

0 序言

镁合金具有密度小、比强度高和抗震性能好等优点, 是当前工业中最轻的应用型金属材料之一, 在航空航天、轨道交通、汽车制造等工业领域具有巨大的应用潜力^[1-3], 然而, 沸点低、蒸气压高、化学活性强等自身特性导致其焊接性相对较差^[4-5]。搅拌摩擦焊是典型的固相焊技术, 可在熔点以下实现材料连接^[6], 能够消除传统熔化焊中的凝固缺陷^[7]。国内外学者已经采用搅拌摩擦焊技术针对各种牌号的镁合金进行了研究, 通过工艺试验、数值模拟等方法, 对镁合金板材的焊接进行了分析^[8], 改善了接头微观组织, 并减少了焊接缺陷。在优化组织方面, 主要目标在于提高热影响区 (heated affected zone, HAZ) 性能和优化焊缝区的强度, 手段主要包括外加介质或能场, 结果表明, 采用水下焊接的方法可以实现焊接过程的快速冷却, 降低 HAZ 对力学性

能的影响^[9-10]。武传松等人^[11]通过添加超声振动辅助焊接, 有效增强了塑性材料流动性, 细化了晶粒, 从而提高了镁/铝异质金属焊接接头力学性能。在减少焊接缺陷方面, 静轴肩、回填、预热等方法配合工艺参数的优化, 可以减小表面塌陷、获取无匙孔接头、有效消除隧道缺陷, 实现了镁、铝等轻合金的高性能连接^[12-14]。

根部未熔合是搅拌摩擦焊的典型缺陷之一, 其形成的天然裂纹源极易恶化接头强度, 且焊后难以被发现, 产生这一缺陷的主要因素是搅拌针长度、下压量和板材厚度三者之间未能实现良好的匹配。搅拌针末端离板材下表面距离过大时, 板材底部金属流动不充分, 导致无法有效熔合^[15-16], 搅拌针末端距离下表面过近时, 焊缝背面与垫板易产生粘着现象, 甚至搅拌针与背面垫板发生碰撞, 对此, 一些学者采用较长的搅拌针, 并配合带有凹槽的垫板以避免形成未熔合缺陷^[17], 焊缝处缺乏支撑导致的弯曲变形是该工艺的难点。

如果在焊接过程中, 搅拌针完全穿透被焊母材, 并且下方仍然具有足够的反向支撑力, 那么就可以有效避免背面未熔合缺陷的产生, 因此, 提出了一种添加垫板的镁合金搅拌摩擦焊工艺, 旨在避

免搅拌摩擦焊根部未熔合这一缺陷的形成。焊接前,首先在对接板材待焊位置下方放置成分与其相同或相似的垫板,垫板厚度尽量小以减轻增重;母材与垫板形成倒立“品”字形对接—搭接复合结构;选取长度大于或等于母材厚度的搅拌针,结合下压量的影响实现焊接过程中搅拌针穿透被焊母材的效果;焊后,背面垫板与被焊材料三者焊接在一起。人工神经网络是一种处理变量间非线性映射关系的数据处理系统,可以充分逼近任意复杂的非线性关系,被广泛应用于人工智能、机器人、统计学等多个领域^[18-19]。在搅拌摩擦焊领域,人工神经网络模型被广泛用于不同焊接参数下的接头强度,以较少试验工作量,获得优化的焊接工艺参数。采用 Matlab 2018 建立了卷积神经网络模型(convolutional neural networks, CNN),预测了不同参数下的接头强度,优化了工艺参数,这种工艺存在以下潜在优点:①由于搅拌针可以完全穿透被焊板材,避免被焊板材根部未熔合缺陷的产生;②增加了搅拌针长度的可选范围,拓宽了焊接工艺窗口;③倒“品”字形结构使背面形成加强结构,焊缝厚度增加,抵消了焊缝正面减薄的不利影响;④焊后垫板可进行加工(减小厚度或者铣削平整),保证服役需求。针对添加垫板的工艺,选取镁合金作为研究对象,研究了焊接参数与接头抗拉强度的对应关系,建立卷积神经网络模型,获取最佳焊接工艺参数,并对微观组织进行观察,对显微硬度进行测试。

1 试验方法

试验选用 1.5 mm AZ31B 镁合金,其抗拉强度为 262 MPa,断后伸长率为 8.5%,焊接时板材尺寸为 80 mm × 40 mm。焊接示意图如图 1 所示,其中垫板与被焊板为相同厚度的同种材料,搅拌头轴肩和搅拌针直径分别为 10 mm 和 3 mm,搅拌针长 1.7 mm,为保证焊接质量,焊接前清除材料表面的氧化膜和污渍,在接头抗拉强度测试中保留背面垫板,拉伸试件如图 2 所示。制备焊缝横截面金相试样,观察其微观组织,显微硬度测试载荷为 5 N,负荷时间为 10 s,硬度测试点分布如图 3 所示,横向测试分为上、中、下三排,测试点间距 0.50 mm,三排测试点距板材上表面的距离分别为 0.75, 1.40, 2.25 mm,纵向测试点位于焊缝中心,间距 0.10 mm。

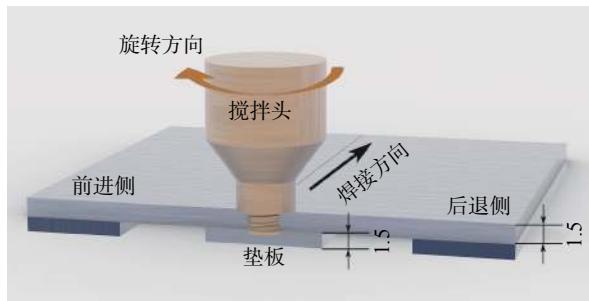


图 1 背面加垫板焊接示意图 (mm)
Fig. 1 Welding schematic with backing plate

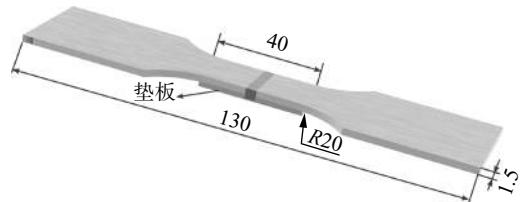


图 2 抗拉强度试验试件示意图 (mm)
Fig. 2 Tensile strength test specimen diagram

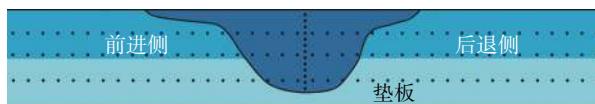


图 3 焊接接头硬度测试取点
Fig. 3 Welded joint hardness test points

2 试验结果与讨论

2.1 接头抗拉强度及其预测

进行预试验,以初步获取工艺参数区间。首先在下压量方面,由于对接—搭接的特殊结构,对下压量的要求显著提高。预试验结果显示,下压量在 0.15 ~ 0.20 mm 时,焊缝表面平整美观、未见宏观缺陷,且抗拉强度相对较高;当下压量低于 0.15 mm 时,压力不足导致无法形成有效连接;而下压量过大时,导致表面压痕过深、飞边缺陷过大等问题。此外,较大的焊接速度也难以获得良好的接头,当大于 35 mm/min 时,焊后成形较差,因此,根据预试验结果,设定下压量为 0.2 mm,探究焊接速度、转速对接头性能的影响规律。转速在 850 ~ 1 200 r/min 时,每隔 50 r/min 进行试验,焊接速度选取 25, 30, 35 mm/min 3 个参数,得到的试验结果如图 4 所示。结果表明,焊接速度一定时,转速在适当范围内均可获得具有较高抗拉强度的焊接接头,当焊接速度分别为 25, 30, 35 mm/min 时,对应的最佳转速分别为 1 000 ~ 1 100, 950 ~ 1 050, 1 050 ~

1150 r/min. 高性能接头参数的具体分布如图5所示,在匹配到合适的转速的情况下,不同的焊接速度均能获得具有较高抗拉强度的接头.

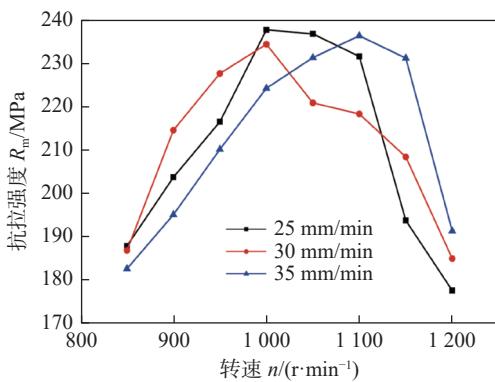


图4 焊接速度和转速对拉伸性能的影响
Fig. 4 Effect of welding speed and rotation speed on tensile properties

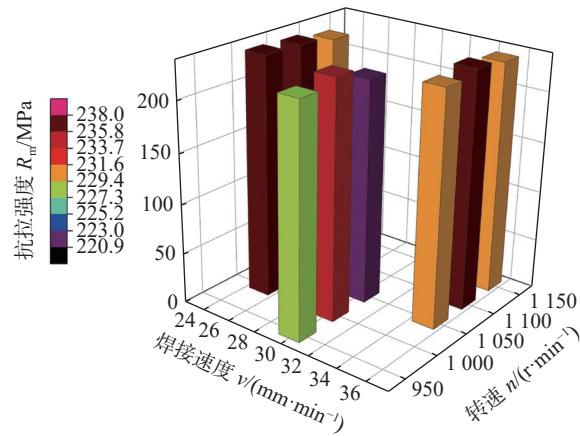


图5 高性能接头的焊接参数范围
Fig. 5 Range of welding parameters for high performance weld joints

在3种焊接速度下,试件的最高抗拉强度分别为237.94, 234.67, 236.03 MPa. 此外,随着转速的不断增大,接头抗拉强度均表现为先逐渐增高然后逐渐下降,当转速过低时在各个焊接速度下,接头抗拉强度都较低,这是因为过低的转速意味着热输入将是过低的,同时热塑性金属的流动性降低,易于产生隧道缺陷^[20],严重降低了接头的力学性能.但是,转速太大时将导致过大的焊接热输入,产生过量的热塑性金属材料,焊缝处热塑性材料流动不均匀,导致焊缝中产生气孔、隧道等缺陷,使得焊接接头的抗拉强度显著下降^[21],由图4可以发现,具有较高抗拉强度的接头,转速在1000~1100 r/min之间,因此,进一步缩小转速范围来研究不同参数下接头的拉伸性能.选取焊接速度(25, 30, 35 mm/min)、转速(1000, 1050, 1100 r/min)和下压量(0.15,

0.17, 0.20 mm)进行27组试验,试验结果见表1,接头抗拉强度分布如图6所示.根据试验结果可知,各个参数组合均能获得较好的接头力学性能,但仍然存在差异,其中,最佳参数为1000 r/min, 25 mm/min 和 0.17 mm, 其焊缝正反面形貌如图7所示,焊缝平整美观、无缺陷,接头抗拉强度为238.93 MPa,达到了母材的91.19%.

考虑到试验工作量和成本,不可能对所有参数

表1 焊接参数及抗拉强度

Table 1 Welding parameters and tensile strength

| 序号 | 转速 $n/(r\cdot min^{-1})$ | 焊接速度 $v/(mm\cdot min^{-1})$ | 下压量 d/mm | 抗拉强度 R_m/MPa |
|----|-----------------------------|--------------------------------|---------------|-------------------|
| 1 | 1 000 | 25 | 0.15 | 230.26 |
| 2 | 1 000 | 25 | 0.17 | 238.93 |
| 3 | 1 000 | 25 | 0.20 | 219.96 |
| 4 | 1 000 | 30 | 0.15 | 225.31 |
| 5 | 1 000 | 30 | 0.17 | 232.36 |
| 6 | 1 000 | 30 | 0.20 | 234.67 |
| 7 | 1 000 | 35 | 0.15 | 216.26 |
| 8 | 1 000 | 35 | 0.17 | 224.26 |
| 9 | 1 000 | 35 | 0.20 | 220.64 |
| 10 | 1 050 | 25 | 0.15 | 229.39 |
| 11 | 1 050 | 25 | 0.17 | 234.32 |
| 12 | 1 050 | 25 | 0.20 | 236.62 |
| 13 | 1 050 | 30 | 0.15 | 218.91 |
| 14 | 1 050 | 30 | 0.17 | 220.91 |
| 15 | 1 050 | 30 | 0.20 | 215.84 |
| 16 | 1 050 | 35 | 0.15 | 226.95 |
| 17 | 1 050 | 35 | 0.17 | 226.93 |
| 18 | 1 050 | 35 | 0.20 | 230.99 |
| 19 | 1 100 | 25 | 0.15 | 222.36 |
| 20 | 1 100 | 25 | 0.17 | 231.36 |
| 21 | 1 100 | 25 | 0.20 | 230.13 |
| 22 | 1 100 | 30 | 0.15 | 208.91 |
| 23 | 1 100 | 30 | 0.17 | 217.91 |
| 24 | 1 100 | 30 | 0.20 | 215.92 |
| 25 | 1 100 | 35 | 0.15 | 228.02 |
| 26 | 1 100 | 35 | 0.17 | 236.03 |
| 27 | 1 100 | 35 | 0.20 | 235.32 |

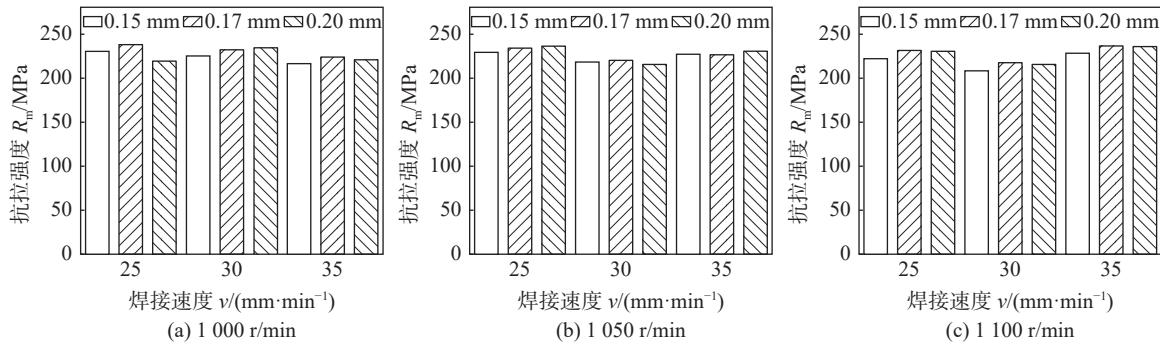


图 6 不同转速下接头抗拉强度分布直方图

Fig. 6 Joint tensile strength distribution histogram at different rotational speed. (a) 1 000 r/min; (b) 1 050 r/min; (c) 1 100 r/min

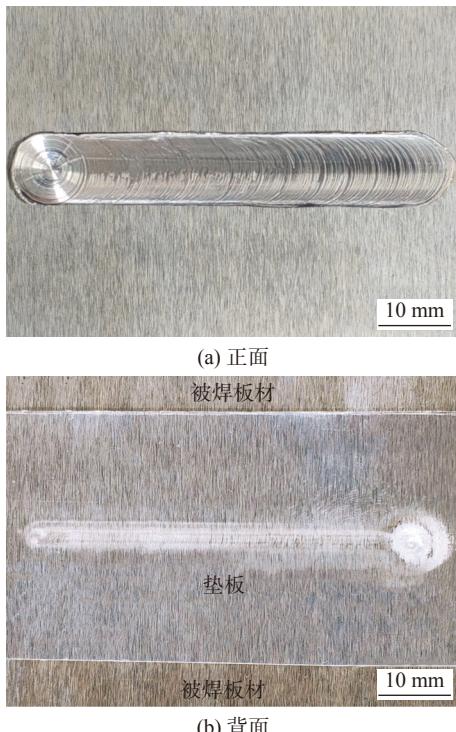


图 7 焊接接头宏观形貌

Fig. 7 Macroscopic morphology of welded joint. (a) front; (b) back

下接头的抗拉强度都进行试验分析,因此,为确立焊接参数与接头拉伸性能的关系,采用卷积神经网络模型实现对接头抗拉强度的预测。模型输入转速、焊接速度和下压量,响应值为接头抗拉强度,选取上述 27 组试验数据中的 18 组作为训练集,训练所建立卷积神经网络模型,选取 9 组试验数据作为验证集,验证所建立卷积神经网络模型的预测精度,此外,计算实测值和预测值的相关性,计算结果显示相关系数 R 为 0.94,表明试验结果与预测结果具有较高的显著性,对实测值和预测值进行回归分析,结果如图 8 和表 2 所示,采用此模型预测产生

的最大误差小于 6%,预测精度满足要求。图 9 为转速在 1 000 ~ 1 100 r/min、间隔 20 r/min 时,不同焊接速度、下压量条件下的接头强度的分布规律。然后借助该模型,获取了不同转速对应的最佳焊接速度和下压量的范围,其结果见表 3。

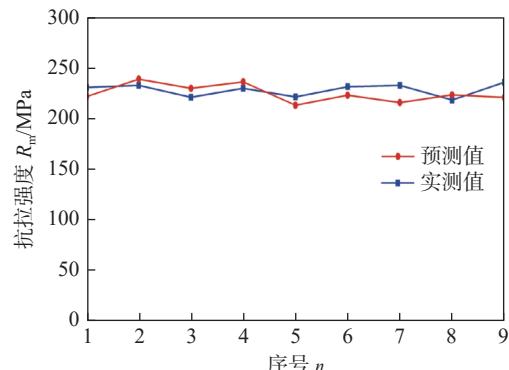


图 8 实测值预测值之间的回归分析

Fig. 8 Regression analysis between test and predicted values

2.2 焊缝横截面微观组织及硬度

工艺参数为 1 000 r/min, 30 mm/min 和 0.2 mm 时,焊接接头具有较高的抗拉强度,以该参数为例,观察接头横截面宏观形貌和微观组织,如图 10 和 11 所示。依照焊缝横截面各部位受到的不同的机械搅拌和热输入,焊缝可分为焊核区 (stir zone, SZ)、热力影响区 (thermal-mechanically affected zone, TMAZ) 和 HAZ。见图 11(a) 为接头各区域的组织分布,上部 SZ 受到热输入和机械搅拌作用见图 11(a),该部位发生了重结晶,变为较为细小的等轴晶组织,被焊板材与垫板结合处 SZ 的微观组织如图 11(b) 所示,晶粒尺寸比上部 SZ 更为细小。其原因,是在搅拌摩擦焊过程中,轴肩与材料的摩擦作用产生的热量占总热输入的 80%^[22],离轴肩越远,受到的热

表2 实测值与预测值对比结果
Table 2 Comparison of the predicted results with the actual experimental values

| 转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$ | 焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$ | 下压量 d/mm | 抗拉强度实测值 R_{m1}/MPa | 抗拉强度预测值 R_{m2}/MPa | 误差 $\delta/(\%)$ |
|-------------------------------------|---|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| 1 000 | 25 | 0.15 | 230.26 | 221.27 | -3.90 |
| 1 000 | 30 | 0.17 | 232.36 | 238.47 | 2.63 |
| 1 000 | 35 | 0.20 | 220.64 | 229.35 | 3.95 |
| 1 050 | 25 | 0.15 | 229.39 | 235.74 | 2.77 |
| 1 050 | 30 | 0.17 | 220.91 | 212.74 | -3.70 |
| 1 050 | 35 | 0.20 | 230.99 | 222.59 | -3.64 |
| 1 100 | 25 | 0.15 | 222.36 | 219.40 | -5.58 |
| 1 100 | 30 | 0.17 | 217.91 | 222.94 | 2.31 |
| 1 100 | 35 | 0.20 | 235.32 | 224.38 | -4.65 |

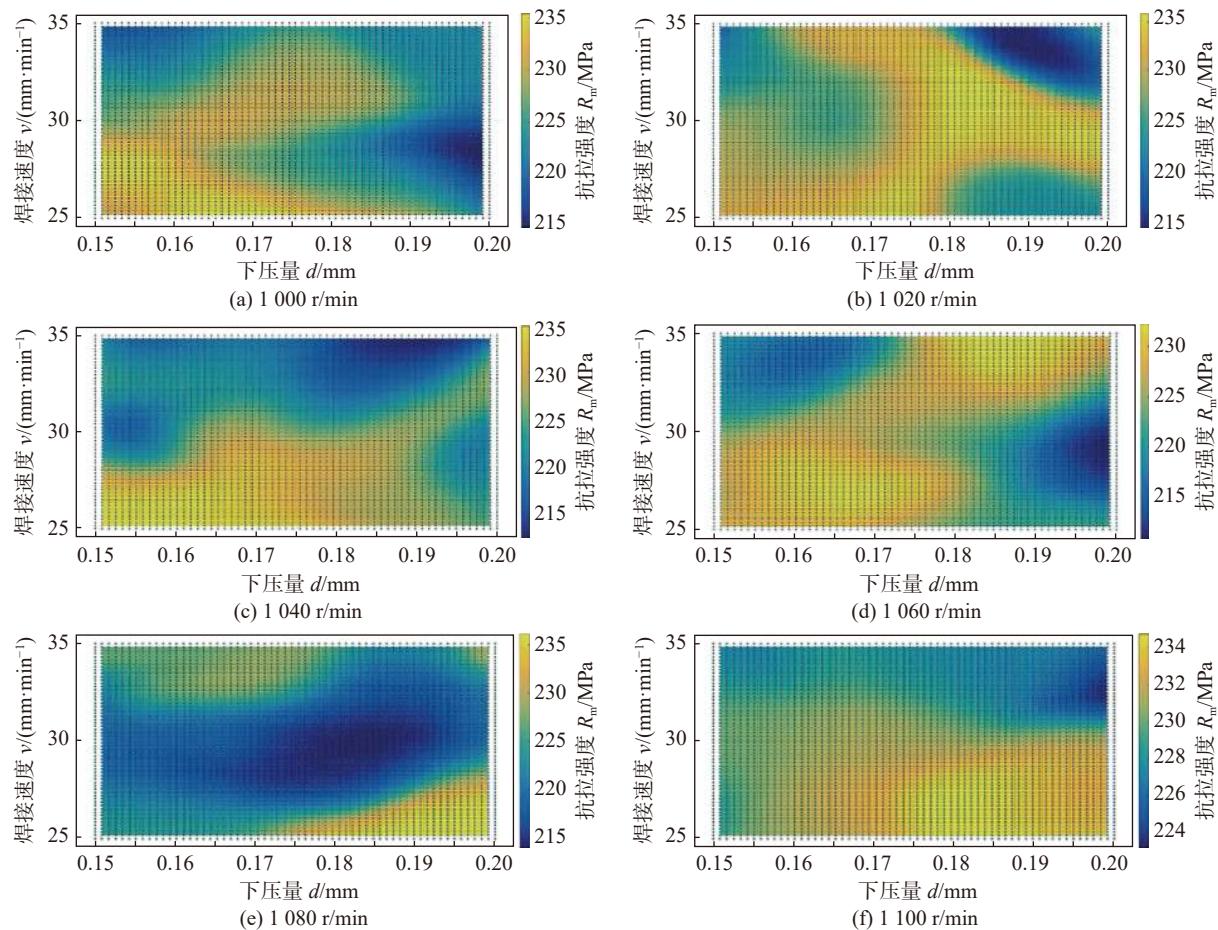


图9 不同转速下接头强度的分布

Fig. 9 Distribution of joint strength under different rotational speeds. (a) 1 000 r/min; (b) 1 020 r/min; (c) 1 040 r/min; (d) 1 060 r/min; (e) 1 080 r/min; (f) 1 100 r/min

输入越小,晶粒受热生长程度越小,因此,尽管SZ各部位均受到机械搅拌作用使得晶粒尺寸变

小,但各部位受到的热输入并不相同,致使晶粒尺寸不同.前进侧(AS)和后退侧(RS)的TMAZ都发

表 3 不同转速时的最佳参数范围

Table 3 Range of optimal parameters for different rotational speeds

| 转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$ | 焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$ | 下压量 d/mm | 最高抗拉强度 $R_{\text{max}}/\text{MPa}$ |
|-------------------------------------|---|----------------------|---------------------------------------|
| 1000 | 25~28 | 0.15~0.17 | 235.6 |
| 1020 | 28~33 | 0.175~0.19 | 236.1 |
| 1040 | 25~27 | 0.15~0.175 | 234.9 |
| 1060 | 33~35 | 0.18~0.19 | 232.3 |
| 1080 | 25~27 | 0.185~0.2 | 236.1 |
| 1100 | 25~29 | 0.175~0.19 | 234.7 |



图 10 焊缝横截面宏观形貌

Fig. 10 Macroscopic morphology of weld cross section

生了晶粒挤压破碎, 并在热输入作用下重结晶, 不同的是 TMAZ 与 SZ 的界限在 AS 更加明显, 其原因是 AS 金属被搅拌头挤压出去后, 该部分温度迅速降低使得与 HAZ 分界线明显, RS 金属有流动过程, 与别的区域存在温度过渡, 因此分界线不明显, 由于 HAZ 距离焊缝中心较远, 不受机械搅拌作用,

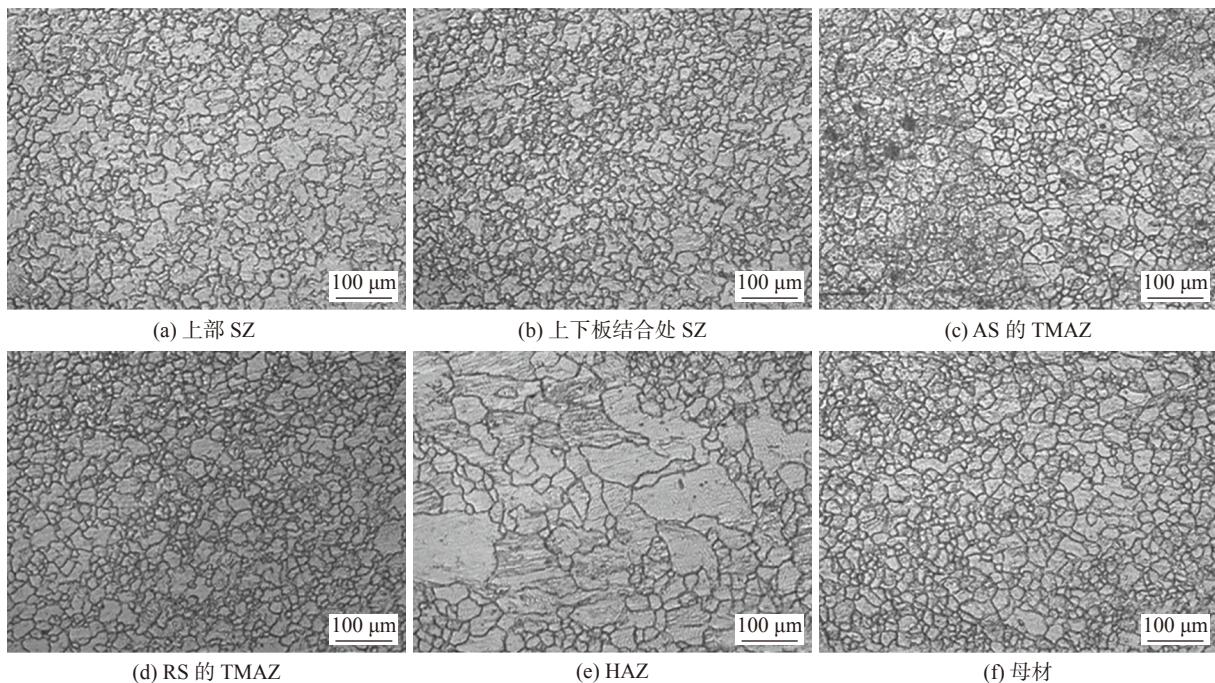


图 11 焊缝横截面各部位微观组织

Fig. 11 Microstructure of weld seam cross-section. (a) upper SZ; (b) SZ of base metal and backing plate junction; (c) TMAZ of AS; (d) TMAZ of RS; (e) HAZ (f) base metal

但是又受到了 SZ 处传递的热量, 晶粒受热增大.

图 12 为接头的微观硬度分布情况, 硬度曲线呈 W 形分布. 焊缝中心受到搅拌针强烈的搅拌挤压作用, 该处材料发生重结晶, 晶粒细化, 因此, 焊缝中心具有最大的硬度, 在 TMAZ 处硬度开始下降, 并在 HAZ 硬度降到最低, 在搅拌摩擦焊中, AS 热输入更大, 此处 HAZ 晶粒生长更明显、硬度更低, AS 的 HAZ 成为接头最薄弱的区域, 这与抗拉强度试验中, 拉伸性能较好的试样均断裂在 AS 的 HAZ 的现象也验证了这一点, 焊缝中心纵向硬度分布如图 13 所示. 在焊缝中心硬度从上至下逐渐增大, 这是因为离轴肩越近, 受到的热输入就越大, 晶粒生长越显著, 这与微观组织分析中 SZ 下

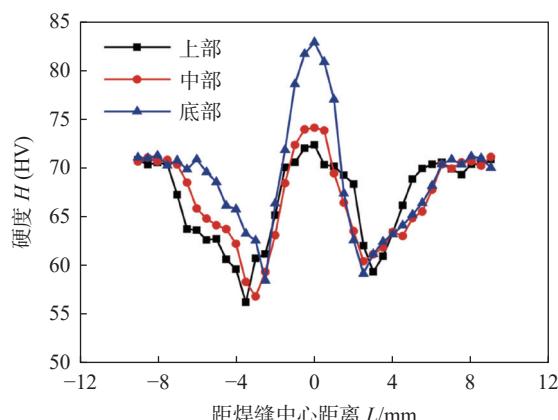


图 12 焊缝横截面横向硬度分布

Fig. 12 Horizontal hardness distribution of weld seam cross-section

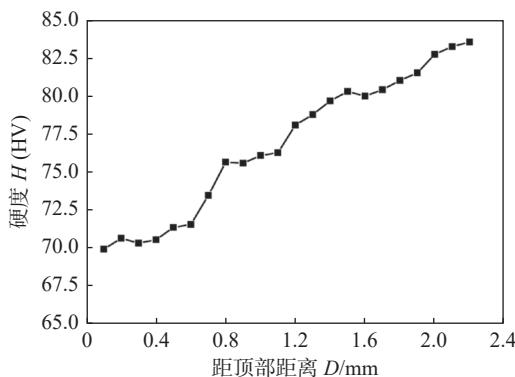


图 13 焊缝中心纵向硬度分布

Fig. 13 Longitudinal hardness distribution of weld center
部晶粒尺寸更为细小是相一致的。

3 结论

(1) 转速、焊接速度和下压量都会对接头性能产生影响,根据试验结果,确定了最佳工艺参数为1 000 r/min, 25 mm/min 和 0.17 mm, 其接头抗拉强度达到了母材的 91.19%。

(2) 建立了卷积神经网络模型,实现了对接头抗拉强度的较高精度的预测,确定了不同转速下接头抗拉强度随焊接速度和下压量的分布情况。

(3) SZ 晶粒发生动态再结晶,晶粒细化, TMAZ 部分晶粒发生动态再结晶,晶粒尺寸介于 SZ 和 HAZ 之间, HAZ 仅受热输入作用,晶粒尺寸变大。

(4) 焊缝横截面硬度分布呈 W 形, SZ 处硬度最高, AS 的 HAZ 硬度最低,该位置为整个接头的薄弱部位。

参考文献

- Cao H J, Li S Q, Zhang Y G, et al. Mg₂Sn-induced whisker growth on the surfaces of Mg/Sn/Mg ultrasonic-assisted soldering joints[J]. China Welding, 2022, 31(11): 47 – 59.
- 刘坤, 李洁, 王浩, 等. 镁合金焊接凝固裂纹敏感性评价及晶间液相回填规律分析 [J]. 焊接学报, 2023, 44(9): 9 – 15.
Liu Kun, Li Jie, Wang Hao, et al. Evaluating solidification cracking susceptibility of Mg alloys and intergranular liquid backfilling during welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(9): 9 – 15.
- 同志峰, 王卓然, 王树邦, 等. AZ31 镁合金双面对称搅拌摩擦焊接头疲劳性能 [J]. 焊接学报, 2022, 43(6): 61 – 68.
Yan Zhifeng, Wang Zhuoran, Wang Shubang, et al. Fatigue properties of AZ31 magnesium alloy welded joint by double-sided friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(6): 61 – 68.
- Wang S, Yan, Gu Z. Weld formation, microstructure evolution and mechanical property of laser-arc hybrid welded AZ31B magnesium alloy[J]. Metals (Basel), 2022, 12(4): 696.
- Lingampalli B, Dondapati S. Corrosion behaviour of friction stir welded ZM21 magnesium alloy[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 1464 – 1469.
- Sivashanmugam N, Harikrishna K L, Koteswara Rao S R, et al. Mechanical and corrosion characteristics of micro-arc oxidized magnesium alloy (ZE41) friction stir welds in modified SBF[J]. Physica Scripta, 2023, 98: 105901.
- Xu Y, Ke L M, Mao Y Q, et al. Friction stir welding of aluminum to magnesium: a critical review[J]. Materials Science and Technology, 2022, 38(9): 517 – 534.
- Tolun F. Evaluation of welding parameters effects in friction stir welding of AZ31B Mg alloy[J]. Kovove Materialy-Metallic Materials, 2022, 60(2): 109 – 120.
- Balaji S, Aadithya B S, Balachandar K. Conventional and underwater friction stir welded AA2024-T351 aluminium alloy - a comparative analysis[J]. World Journal of Engineering, 2020, 17(6): 795 – 801.
- Saravanakumar R, Rajasekaran T, Pandey C, et al. Mechanical and microstructural characteristics of underwater friction stir welded AA5083 Armor-Grade aluminum alloy joints[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31: 8459 – 8472.
- 武传松, 刘小超, 高嵩. 采用辅助能量的搅拌摩擦焊新工艺 [J]. 焊接, 2015(10): 9 – 17.
Wu Chuansong, Liu Xiaochao, Gao Song. New processes of secondary energy assisted friction stir welding[J]. Welding & Joining, 2015(10): 9 – 17.
- Zhou Z, Yue Y, Ji S, et al. Effect of rotating speed on joint morphology and lap shear properties of stationary shoulder friction stir lap welded 6061-T6 aluminum alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(5-8): 2135 – 2141.
- 邓黎鹏, 柯黎明, 刘金合. 基于压焊原理的搅拌摩擦焊匙孔填补技术 [J]. 焊接学报, 2019, 40(6): 107 – 111.
Deng Lipeng, Ke Liming, Liu Jinhe. A key-hole filling technology for friction stir welding based on the theory of pressure welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(6): 107 – 111.
- Deng Lipeng, Ke Liming, Liu Jinhe. A key-hole filling technology for friction stir welding based on the theory of pressure welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(6): 107 – 111.

- [14] Raj D, Biswas P. Experimental investigation of the effect of induction preheating on the microstructure evolution and corrosion behaviour of dissimilar FSW (IN718 and SS316L) joints[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 95(3): 143 – 159.
- [15] Zhou C, Yang X, Luan G. Effect of root flaws on the fatigue property of friction stir welds in 2024-T3 aluminum alloys[J]. *Materials Science & Engineering:A*, 2006, 418(1): 155 – 160.
- [16] 宋建岭, 赵英杰, 孙广达, 等. 搅拌针长度对 2A14 铝合金锁底结构搅拌摩擦焊接头组织和性能的影响 [J]. *机械工程材料*, 2020, 44(12): 18 – 23.
Song Jianling, Zhao Yingjie, Sun Guangda, *et al.* Effect of pin length on microstructure and properties of friction stir welded joint of 2A14 aluminum alloy lock bottom structure[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2020, 44(12): 18 – 23.
- [17] 郭超. 基于垫板/凹槽设计铝合金 FSW 接头完整性及力学性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019
Guo Chao. Research on integrity and mechanical properties of friction stir welding of aluminum alloy adopting upper sheet/grooved backing plate[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [18] Mengistie A K, Bogale T M. Development of automatic orbital pipe MIG welding system and process parameters' optimization of AISI 1020 mild steel pipe using hybrid artificial neural net-work and genetic algorithm[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 128: 2013: 2028.
- [19] Rawa J H, Dehkordi M H, Kholoud M J, *et al.* Using the numerical simulation and artificial neural network (ANN) to evaluate temperature distribution in pulsed laser welding of different alloys[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 126: 107025.
- [20] Kim Y G, Fujii H, Tsumura T, *et al.* Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy[J]. *Materials Science & Engineering:A*, 2006, 415(1): 250 – 254.
- [21] 孙国芹, 陈亚静, 曹方莉, 等. 2219-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头疲劳性能 [J]. *北京工业大学学报*, 2015, 41(11): 1670 – 1674.
Sun Guoqin, Chen Yajing, Cao Fangli, *et al.* Fatigue property research of friction stir welded joints for 2219-T6 aluminum alloy[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, 41(11): 1670 – 1674.
- [22] Neto D M, Neto P. Numerical modeling of friction stir welding process: a literature review[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 65(1-4): 115 – 126.

第一作者:任大鑫, 博士, 副教授; 主要从事智能化制造、增材制造、先进焊接/塑性成形技术研究; Email: rendx@dlut.edu.cn.

通信作者:宋刚, 博士, 教授; Email: songgang@dlut.edu.cn.

(编辑: 刘启明)