

磁场和 NiCl_2 联合作用下镁合金焊接接头的显微组织和力学性能

张桂清, 任英磊, 苏允海

(沈阳工业大学, 辽宁省先进焊接技术及自动化实验室, 沈阳, 110870)

摘要: 为了分析磁场和活性剂联合作用下镁合金焊接接头的显微组织和力学性能变化规律, 采用 A-TIG 焊接 AZ91 镁合金, 并在试验过程中引入纵向交流磁场, 实现磁场和活性剂联合作用下镁合金的 TIG 焊接。对不同活性剂涂覆量下焊接接头的成形性、物相组成、显微组织、力学性能进行检测, 分析磁场和活性剂联合作用下电弧形态和熔池金属结晶形核特点, 探讨其中的机理。试验结果表明, 磁场的引入对增加熔深、提高焊接效率产生负面影响, 但是对提高焊接接头力学性能作用效果十分明显, 在所选磁场参数下, 活性剂涂覆量为 3 mg/cm^2 时, 焊接接头的成形状态和组织性能达到了最佳匹配, 此时成形系数为 2.38, 焊缝抗拉强度和断后伸长率分别为 338 MPa 和 13.3%; 磁场和活性剂的联合作用下, 电弧呈螺旋下沉旋转运动, 并带动熔池运动, 改变晶体结晶条件, 促进细小等轴晶形成和孪晶的出现, 使得焊接接头的力学性能得到提升; 同时, 磁场的引入可以改变晶体的生长模式, 晶体沿 (0001) 晶面出现择优生长现象。

关键词: 纵向磁场; AZ91 镁合金; NiCl_2 活性剂; 晶粒细化; 力学性能

中图分类号: TG 406 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20200313001

0 序言

镁合金作为最轻的工程金属材料, 具有阻尼性好、比强度高、切削加工性能好、环保易回收等特点, 在航空航天、汽车工业及 3C 产品中被广泛的应用^[1-3]。但由于镁合金化学性质活泼、熔点低、热膨胀系数大, 在焊接时容易产生裂纹、气孔、变形等缺陷, 降低了焊接接头的力学性能^[4]。为了获得高质量的镁合金焊接接头, 近年来一些相对较为先进的焊接技术被陆续应用于镁合金的焊接中, 以便更好地解决其焊接性较差的问题。已报道的焊接方法包括电子束焊、激光焊、搅拌摩擦焊、钨极氩弧焊等^[5-8]。

由于 TIG 焊具有施焊工艺条件宽、设备价格低廉、焊接过程稳定等优点, 已发展成为工程上镁合金最常用的焊接方法^[9]。但 TIG 焊的热效率低、熔深浅限制了它的推广。鉴于此问题, 乌克兰巴顿焊接研究所开发出了 A-TIG 焊方法。与传统 TIG 焊

相比, A-TIG 焊可以提高生产效率, 降低生产成本, 减少焊接变形^[10]。张勇等人^[11]、张兆栋等人^[12]、高晓刚等人^[13]分别研究了高硅粉煤灰活性剂、氧化物活性剂及金属单质活性剂、氯化物活性剂对 A-TIG 焊的影响, 并分析了活性剂增加熔深的作用机理, 研究结果表明活性剂的施加可以增加熔深、提高施焊效率, 但是也发现涂覆活性剂的焊缝组织与未涂覆活性剂的焊缝组织相比, 略有粗化。Qin 等人^[14]对 AZ61/ZK60 异种镁合金 TIG 焊与 A-TIG 焊接头的组织及力学性能进行了分析, 发现在最佳电流下, TIG 焊和 A-TIG 焊的熔合区晶粒均出现细化现象, 焊接接头的抗拉强度增大, 但两种工艺条件下热影响区的晶粒尺寸无明显差异。由此可见, 关于活性剂增加熔深、提高效率这一观点, 研究学者的结论基本一致, 但是关于活性剂对焊接接头的力学性能的影响, 相关研究结果并不一致。焊接接头的力学性能是表征焊接结构服役能力的重要指标, 直接决定整个结构的安全性和应用环境, 因此, 改善镁合金的焊接性、提高焊接接头力学性能是焊接工作者首要关心的内容。磁控焊接技术由于工艺简单、成本低、耗能少已被深入研究^[15], 磁场的引入可以改变焊接电弧和熔池的运行形态, 影响熔池金

属的结晶形核特点, 具有良好地净化组织、细化晶粒、提高焊接接头力学功能的作用^[16-17]. 因此, 文中在镁合金 A-TIG 焊时引入纵向交流磁场, 对磁场作用下镁合金 A-TIG 焊焊接接头的成形状态、力学性能、物相构成、晶体特点等进行系统地研究, 分析熔池金属凝固特点和晶体生长规律, 以便指导后续试验.

表 1 AZ91 镁合金的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of AZ91

Al	Zn	Mn	Si	Cu	Fe	Mg
8.3~9.7	0.35~1	0.15~0.5	<0.01	<0.03	<0.005	余量

试验前, 采用机械方法将试板表面油污及氧化物去除. 将称量好的 NiCl_2 活性剂粉末溶入酒精配置悬浊液, 用毛刷均匀涂覆到镁板表面, 涂覆量分别为 1, 2, 3, 4, 5 mg/cm^2 , 常温下放置 24 h 后焊接. 使用 WSE-50 逆变焊机进行 A-TIG 焊, 焊接工艺参数为: 焊接电流 85 A, 焊接速度 300 mm/min , 焊丝伸出长度 2 mm, 电弧长度 2~3 mm, 氩气流量 10~15 L/min . 纵向交流磁场由安装在焊枪上的通电线圈产生, 磁场电流 3.5 A, 磁场频率 30 Hz. 为了验证磁场的作用效果, 选取前期试验中一组无磁场状态下力学性能最好的试样作为比对参照物 (该试样对应的活性剂涂覆量为 2 mg/cm^2).

焊接后, 首先对试件外观进行检测, 若无裂纹、气孔及其它严重影响后续测试分析的外观缺陷则进行加工取样. 取样方式是沿焊缝横截面取样, 分别制备金相试样和力学性能试样. 用体视显微镜测量焊缝宽度和深度, 并计算不同参数下的成形系数, 焊缝的成形及测试过程如图 1 所示. 采用日立 S-3400N 扫描电子显微镜观察微观组织; 利用 XRD-

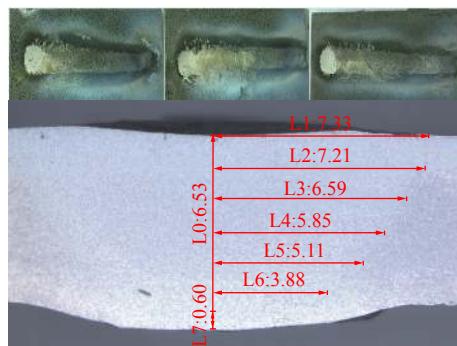


图 1 焊缝成形及测试实物图

Fig. 1 Physical map of weld forming and testing

1 试验方法

选用商用 AZ91 镁合金板作为试验母材, 加工成 100 mm × 100 mm × 5 mm 的试板. AZ91 镁合金母材的化学成分见表 1, 其抗拉强度为 280 MPa, 屈服强度为 160 MPa, 断后伸长率为 8%, 硬度为 64.5 HV.

7000 射线衍射分析仪进行物相分析; 采用 ZEISS 300 型 EBSD 设备对焊接接头的晶粒尺寸及晶粒取向进行分析. 拉伸试验在 WAW-300C 万能试验机上开展, 加载速率为 3 mm/min , 每个参数下制备 3 个, 试验结果取平均值. 由于试板尺寸较小无法按照 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》加工成标准试样, 故采用非标试样, 具体的拉伸试样尺寸如图 2 所示.

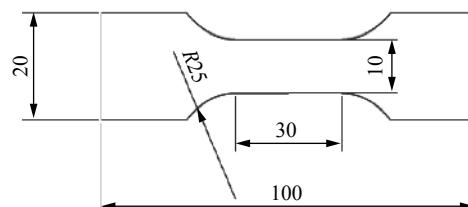


图 2 拉伸试样尺寸示意图 (mm)

Fig. 2 Schematic diagram of the tension specimen size

2 试验结果

2.1 焊缝成形

焊缝成形状态如图 3 所示. 对于无磁场状态而言, 焊缝熔宽随活性剂涂覆量增加先减小后增大, 活性剂涂覆量为 3 mg/cm^2 时熔宽达到最小值; 焊缝熔深的变化规律与熔宽相反, 随活性剂涂覆量增大焊缝熔深呈现出先增加后减小, 在涂覆量为 3 mg/cm^2 时, 熔深值最大, 熔深比无活性剂状态下增加幅度达到 150%, 见图 3a; 而焊缝的成形系数则呈现出先减小后增大的变化趋势, 在涂覆量为 3 mg/cm^2 处取得了最小值. 对比有无磁场状态后, 发现磁场的施加对焊缝的熔深、熔宽以及成形系数的变化规律基本没有影响, 最大熔深值和最小成形系数也在活性

剂涂覆量为 3 mg/cm^2 时获得, 这说明磁场和活性剂联合作用时, 能够保证增加熔深、提高生产效率的效果。但是对比有无磁场两种状态的数值, 则发现有磁场状态的焊缝成形系数要明显大于无磁场状态的, 这说明磁场的引入对提高生产效率是不利的。外加磁场使电弧中的带电粒子受到洛伦兹力的作用发生旋转^[18], 改变电弧形态, 形成上部收缩、下部扩张的“钟罩形”^[19], 这是熔宽增加的原因。而对于 NiCl_2 活性剂, 在焊接高温电弧的作用下将发生蒸发、电离, 其中的电子捕捉电弧中的原子形成大质量的负离子, 对电弧起到收缩作用, 进而实现熔深增大的目的^[13]; 但是 NiCl_2 本身的导电性差, 蒸发、电离时需要吸收大量的热, 这些热量必然有一部分被镁板吸收, 并且 NiCl_2 的高阻抗和低热传导率将进一步加剧基材的过热, 这也是活性剂过多时焊缝熔宽增大的原因^[20]。鉴于上述分析, 磁场和活性剂虽然作用效果不尽相同, 甚至有所背离, 但是两种作用介质都是电弧, 在两者共同作用下, 电弧的旋转半径有减小的趋势, 而转速则有增大的趋势, 这对改善焊接接头的力学性能是有利的。

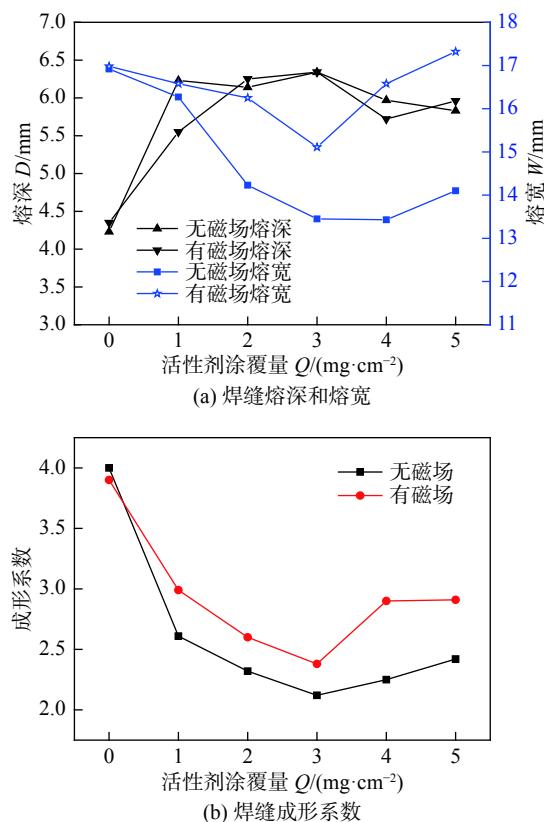
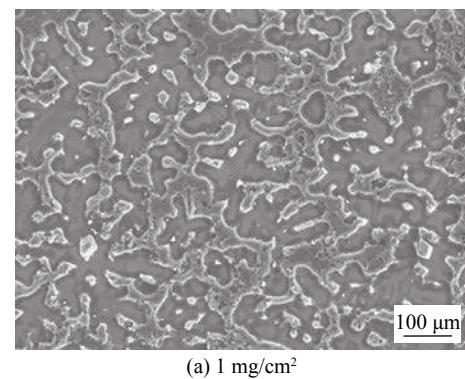


图 3 焊缝成形参数随活性剂涂覆量变化曲线

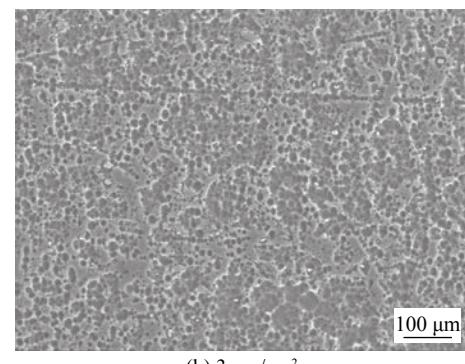
Fig. 3 Variation curves of weld forming parameters with different activated flux coating amounts. (a) weld penetration and width; (b) weld forming factor

2.2 微观组织

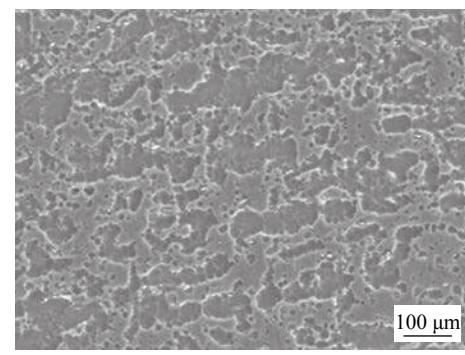
图 4 为磁场作用下不同活性剂涂覆量时焊缝区的微观组织。由图 4 可见, 随着活性剂涂覆量的增加, 晶粒尺寸先减小, 在活性剂涂覆量为 3 mg/cm^2 时达到最小值, 而后晶粒尺寸增大。为了分析磁场和活性剂联合作用对晶粒细化能力的影响, 选取无磁场单独活性剂作用时晶粒尺寸最小的微观组织(在活性剂涂覆量为 2 mg/cm^2 时获得)进行对比, 如图 5 所示。



(a) 1 mg/cm^2



(b) 3 mg/cm^2



(c) 5 mg/cm^2

图 4 施加纵向磁场时焊缝的微观组织

Fig. 4 Microstructure of weld seam under different activated flux coating amounts with the application of longitudinal magnetic field. (a) 1 mg/cm^2 ; (b) 3 mg/cm^2 ; (c) 5 mg/cm^2

对比有、无磁场最佳参数下的显微组织照片可以发现, 磁场的施加对焊缝区的组织形态并无明显改变, 暗灰色区域为 α -Mg 基体, 灰白色区域为晶

界, 并有一定量的第二相分布于晶界; 但从晶粒尺寸来看, 施加磁场对焊缝区晶粒尺寸有一定的细化作用。这是因为在纵向交变磁场和氯化物的耦合作用下, 电弧将呈现出压缩旋转模式, 这将有效地带动熔池也进行相应的运动。高速运动的熔池将对枝晶结晶前沿产生冲刷作用, 抑制了柱状晶长大, 促进等轴晶形成; 此外, 冲刷对流使一次枝晶受到较大剪切力, 并使一部分枝晶臂折断, 未被熔合的枝晶将重新进入熔池, 作为新的形核质点, 促进异质形核、提高形核率, 起到了细化晶粒的作用, 这对提高焊接接头的综合力学性能是有积极作用的。

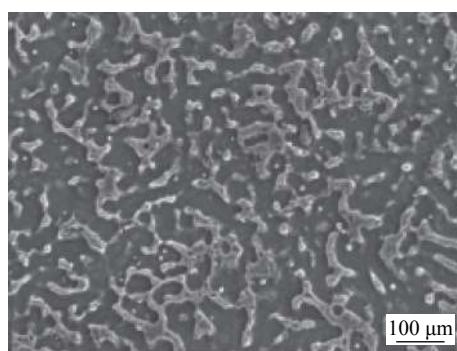


图 5 无磁场时焊缝微观组织

Fig. 5 Microstructure of weld seam without magnetic field

为了进一步明确焊缝区的物相组成, 对有、无磁场时最佳活性剂涂覆量下的焊缝进行物相测试, 结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 无论是否引入磁场, 焊缝区均是由 α -Mg, Al_2Mg , MgZn 和 MgO 组成的, 其中 α -Mg 为基体, Al_2Mg 和 MgZn 为焊接过程中产生的第二相, MgO 则是由于焊接时保护不良而形成的一种夹杂物。对比衍射峰强度发现, 有磁场时焊接接头中的 MgO 含量比无磁场时的含量高, 这主要是由于焊接过程中的电弧偏吹形成紊流, 导致部分空气卷入, 致使保护效果不良而造成的。

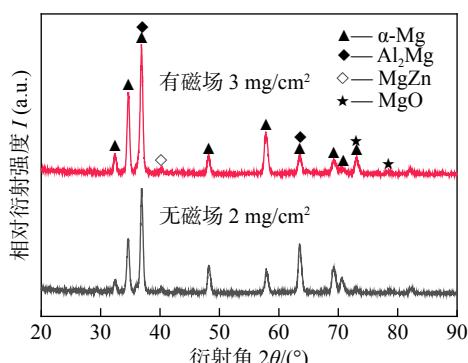


图 6 焊缝区的 XRD 分析

Fig. 6 XRD analysis of weld seam

2.3 力学性能

为了分析不同参数对焊接接头拉伸性能的影响规律, 按图 2 将试板加工制备成拉伸试样并进行拉伸性能测试, 结果如图 7 所示。无磁场时, 抗拉强度随活性剂涂覆量的增加先升高后降低, 在活性剂涂覆量为 2 mg/cm^2 时达到最大值 312 MPa。施加磁场后, 抗拉强度的变化趋势与无磁场状态下基本一致, 也呈现先升高而后下降的变化, 但最大抗拉强度在活性剂涂覆量为 3 mg/cm^2 处取得, 此时抗拉强度为 338 MPa。对于断后伸长率而言, 变化规律与抗拉强度基本一致, 有磁场状态下, 在活性剂涂覆量为 3 mg/cm^2 时达到了最大值, 而无磁场状态下, 在活性剂涂覆量为 2 mg/cm^2 时取得最大值, 具体的数值分别为 13.3% 和 12.3%。由此可见, 磁场的施加对提高焊接接头的拉伸性能作用效果明显, 抗拉强度提升幅度达 7.7%, 断后伸长率提升了 7.5%; 但是活性剂最佳涂覆量发生了变化, 这说明磁场的施加与活性剂是存在交互作用的。参照不同参数下焊缝的显微组织, 可以发现, 拉伸性能的变化规律与显微组织晶粒尺寸变化高度吻合, 这也证实了前面的相关分析, 说明磁场的施加对显微组织的作用主要体现在细晶强化上。

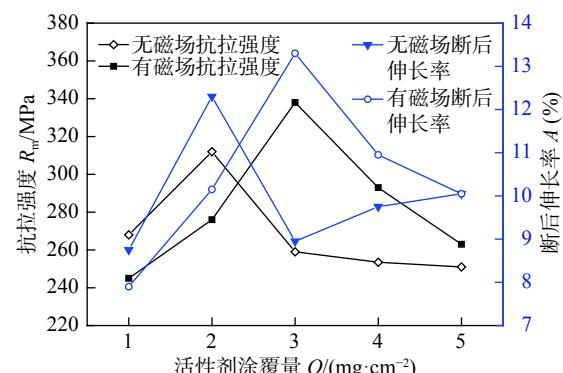


图 7 抗拉性能随活性剂涂覆量变化曲线

Fig. 7 Tensile properties of welded joint under different activated flux amounts

3 讨论

焊接电弧一般会受到电磁收缩力、等离子流力、斑点压力、爆破力和细熔滴冲击力等作用, 将电弧能量源源不断输送到被焊材料使其熔化形成熔池, 但是对于 TIG 焊这种非接触型电弧而言, 电弧不受爆破力和细熔滴冲击力的作用, 仅受电磁收缩力、等离子流力、斑点压力的作用。文中是在传统

的 TIG 焊基础上引入了磁场和活性剂, 其原有的受力模式将发生改变。对于交流 TIG 焊而言, 电弧本身就是交流电, 根据电磁理论, 在其周围就存在一个交变的磁场; 而外加磁场的引入, 将使电弧等离子体受到一个外加磁场的作用, 整个系统中有两个磁场的作用, 具体受力模型如图 8 所示^[21]。

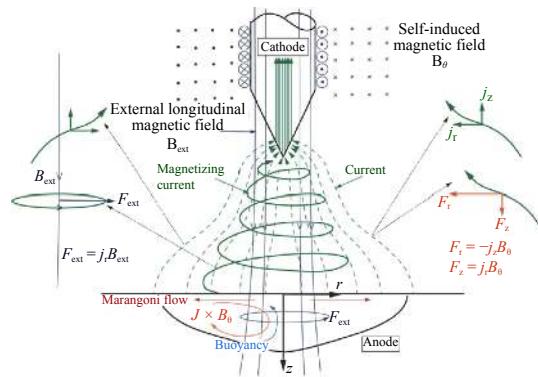


图 8 电弧等离子体受力示意图
Fig. 8 Force mode of the arc plasma

从受力分析的角度来看, 可以分为两部分: 一部分是焊接电流与自磁场相互作用而形成自发电磁力, 此力分解成轴向与径向分量分别为 $j_r B_0$, $-j_z B_0$; 由于外加磁场为纵向磁场, 方向平行于电弧轴线, 这使得电弧电流只有径向分量与外加磁场产生作用 (轴向与磁力线平行无作用), 形成促使电弧中带电粒子高速旋转的向心力, 此力通过推导为 $S_{ext} = F_{ext} = j_r B_{ext}$, 其中 B_{ext} 为外加磁场强度, 单位为 T, 由于其来自通电线圈产生的感应磁场, 其强度与励磁电流的关系可由毕奥-萨法尔定律推导求得, 即

$$B_{ext} = \frac{\mu_0 N I_c}{2} \left[\frac{l - 2z}{\sqrt{(l - 2z)^2 + 4a^2}} + \frac{l + 2z}{\sqrt{(l + 2z)^2 + 4a^2}} \right] \quad (1)$$

式中: I_c 为励磁电流; N 为线圈匝数, 文中采用的线圈匝数为 720 匝; l 为线圈长度, 为 125 mm; z 为距线圈中心的轴向距离; μ_0 为真空磁导率; a 为线圈半径。

基于上述受力模型, 结合相应的边界条件, 对电弧形态进行了分析, 发现磁场的施加使得电弧的形态由原有的“圆台形”向“钟罩形”转变, 电弧下端出现了真空区、甚至出现“磁抽吸”现象^[21], 这严重影响正常施焊过程的顺利开展。 NiCl_2 活性剂虽然不易电离, 但是 Cl^- 离子具有较大的亲和能, 能吸附原子形成负离子分布于电弧外侧, 对电弧起到压缩作用, 使得电弧底部“钟罩”直径减小, 减弱“磁抽吸”现象, 提高电弧挺度; 同时外加磁场带动电弧中的带电离子以及 Cl^- 离子高速旋转, 使电弧整体呈“钻头式”螺旋下沉, 并带动熔池进行相应的螺旋运动, 冲刷熔池壁的结晶前沿, 使熔池中的浓度起伏、成分起伏和温度起伏均有所降低, 促进细小等轴晶的形成。此外, 熔池作为整个导电回路的一部分, 也是磁流体的一部分, 同样受到洛伦兹力的作用, 这使得熔池金属在磁场环境下结晶、形核并长大, 这对焊缝区组织净化和晶粒生长也有积极的作用^[18, 20]。

为了揭示磁场对晶体生长规律的影响, 对有磁场时活性剂涂覆量为 3 mg/cm^2 和无磁场时活性剂涂覆量为 2 mg/cm^2 的金相试样进行 EBSD 测试, 结果如图 9 和图 10 所示。

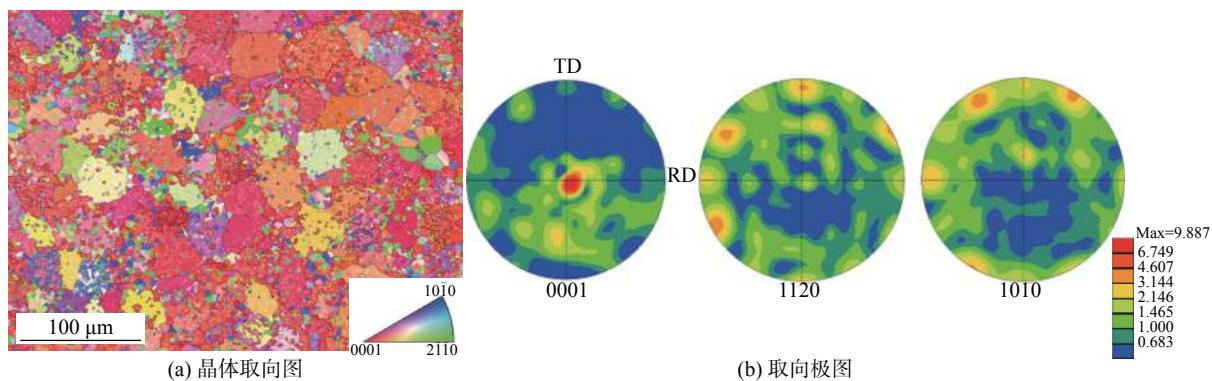
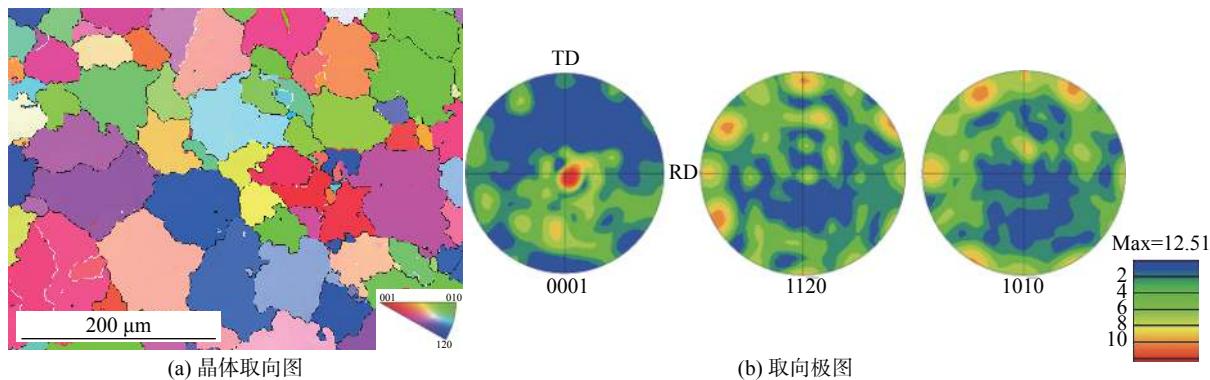


图 9 有磁场活性剂涂覆量为 3 mg/cm^2 时焊缝的 EBSD 结果

Fig. 9 EBSD results of weld with magnetic field at the flux coating amount of 3 mg/cm^2 . (a) grain orientation figure; (b) pole figure

对比有无磁场状态下焊缝区的晶体取向图可以发现, 无磁场状态下, 焊缝区晶粒清晰, 析出物相

对较少, 晶界分明; 有磁场状态下, 焊缝区晶粒分布比较凌乱, 晶界析出物明显增加。对晶粒尺寸进行

图 10 无磁场活性剂涂覆量为 2 mg/cm^2 时焊缝的 EBSD 结果Fig. 10 EBSD results of weld without magnetic field at the flux coating amount of 2 mg/cm^2 . (a) grain orientation figure; (b) pole figure

统计分析得出,有、无磁场时,晶粒平均尺寸分别为 12.9248 和 $17.176 \mu\text{m}$,由此可见磁场的施加对晶粒细化的效果明显,细化率达到 24.8% ,这与前面的分析相一致,说明拉伸性能的提升主要得益于细晶强化。此外,经解析分析发现,图 9a 和图 10a 中红色的晶粒为孪晶,而对比两种工艺条件可以发现有磁场焊缝中孪晶数量比无磁场焊缝中的孪晶多。孪晶的增加对焊缝的力学性能有正向影响,一方面,因为孪晶可以释放应力,减少裂纹的形核,钝化裂纹尖端,控制裂纹的扩展,防止热裂纹的产生;另一方面,孪晶的增加导致孪晶界的增加,从而使原始晶粒分离,进而细化晶粒。对比图 9b 和图 10b 的极图发现,无磁场时,极图密度的分布较为均匀,说明晶体生长没有明显的取向行为;而施加磁场后,晶粒取向行为发生变化,晶体在 (0001) 晶面极密度显著增加,可见此晶面存在择优生长,这说明磁场的施加除了可以细化晶粒尺寸外,还可以促进晶体择优生长,这对改善焊接接头性能具有一定的实用意义。

4 结论

(1) 在 A-TIG 焊过程中引入磁场,磁场参数与活性剂参数匹配时,能够保证熔深增加的效果,但成形系数明显大于无磁场时的成形系数。

(2) 在磁场作用下,活性剂涂覆量为 3 mg/cm^2 时,焊缝区的晶粒明显细化,并使焊接接头的拉伸性能达到最佳状态,此时抗拉强度和断后伸长率分别为 338 MPa 和 13.3% 。

(3) 磁场的引入不改变焊缝组织中的物相构成,但可显著增加焊缝区内孪晶的数量,促进晶粒

生长方式发生改变,使晶体在 (0001) 晶面有择优生长行为。

参考文献

- [1] Zhao X H, Zhang Y J, Liu Y. Surface characteristics and fatigue behavior of gradient nano-structured magnesium alloy[J]. Metals, 2017, 7(2): 62 – 73.
- [2] Chang W, Shen Y P, Su Y Y, et al. Grain refinement of AZ91 magnesium alloy induced by Al-V-B master alloy[J]. Metals, 2019, 7: 1333 – 1344.
- [3] Karakulak E. A review: past, present and future of grain refining of magnesium castings[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2019, 7: 355 – 369.
- [4] Zhang D T, Mayumi S, Kouichi M. Microstructural evolution of a heat-resistant magnesium alloy due to friction stir welding[J]. Scripta Materialia, 2005, 52: 899 – 903.
- [5] Liu H T, Zhou J X, Zhao D Q, et al. Characteristics of AZ31 Mg alloy joint using automatic TIG welding[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2017, 24(1): 102 – 108.
- [6] Munitz A, Cotler C. Electron beam welding of magnesium AZ91D plates[J]. Welding Journal, 2000, 79(7): 202 – 208.
- [7] Zhao X Y, Tan C W, Meng S H, et al. Fiber laser welding-brazing characteristics of dissimilar metals AZ31B Mg alloys to copper with Mg-based filler[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27: 1427 – 1439.
- [8] Sevvel P, Jaiganesh V. Impact of process parameters during friction stir welding of AZ80A Mg alloy[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2016, 21: 83 – 90.
- [9] 胡耀波,赵冲,邓娟.镁合金焊接技术的研究现状与展望[J].热加工工艺,2010,39(13): 124 – 128.
Hu Yaobo, Zhao Chong, Deng Juan. Research status and prospects of magnesium alloys welding technology[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(13): 124 – 128.
- [10] 彭小洋,凌泽民,廖娟,等.活性 TIG 焊的研究进展 [J]. 机械工

- 程材料, 2013, 37(8): 1 – 4.
- Peng Xiaoyang, Ling Zemin, Liao Juan, *et al.* Research progress of A-TIG welding[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2013, 37(8): 1 – 4.
- [11] 张勇, 孙琳琳, 唐家成, 等. 高硅粉煤灰活性剂对 Q235 钢液态金属表面张力及 TIG 焊缝的影响 [J]. 焊接学报, 2018, 39(5): 92 – 96.
- Zhang Yong, Sun Linlin, Tang Jiacheng, *et al.* Effect on liquid metal surface tension and TIG weld bead properties of Q235 steel by high silicon flyash[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(5): 92 – 96.
- [12] 张兆栋, 曹全金. 金属单质活性剂对镁合金 A-TIG 焊的影响 [J]. 焊接学报, 2011, 32(9): 37 – 40.
- Zhang Zhaodong, Cao Quanjin. Effects of metal activating fluxes on A-TIG welding of magnesium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(9): 37 – 40.
- [13] 高晓刚, 董俊慧, 韩旭, 等. 氟化物 A-TIG 焊接 Ti6Al4V 的电弧行为 [J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 6 – 10.
- Gao Xiaogang, Dong Junhui, Han Xu, *et al.* Arc behavior of fluoride effects in the A-TIG welding of Ti6Al4V[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(10): 6 – 10.
- [14] Qin B, Ying F C, Zeng C Z, *et al.* Microstructure and mechanical properties of TIG/A-TIG welded AZ61/ZK60 magnesium alloy joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society, 2019, 29: 1864 – 1872.
- [15] Demchenko V L, Yurhenko M V. Structure and properties of the welded joints of single-type polyethylenes formed under the action of constant magnetic fields[J]. Materials Science, 2017, 53(2): 186 – 193.
- [16] Hu S P, Chen L P, Zhou Q, *et al.* Effects of compound magnetic field of pulsed and alternate field on solidified structure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018, 38: 303 – 308.
- [17] 苏允海, 温小波, 刘锋, 等. 磁场电流对镁合金焊接接头疲劳性能的影响 [J]. 焊接学报, 2011, 32(4): 79 – 82.
- Su Yunhai, Wen Xiaobo, Liu Duo, *et al.* Effect of magnetic field current on fatigue properties of magnesium alloy welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(4): 79 – 82.
- [18] 苏允海, 蒋焕文, 秦昊, 等. 磁场作用下镁合金焊接接头力学性能的变化 [J]. 焊接学报, 2013, 34(3): 85 – 88.
- Su Yunhai, Jiang Huanwen, Qin Hao, *et al.* Forming characteristics, microstructure and properties of magnesium alloy during TIG welding under magnetic field[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(3): 85 – 88.
- [19] 罗键, 贾涛, 殷咸青, 等. GTAW 外加间歇交变纵向磁场的数值计算及其对焊接行为的影响 [J]. 金属学报, 1993, 35(3): 330 – 333.
- Luo Jian, Jia Tao, Yin Xianqing, *et al.* Numerical calculation and influence of the external intermittent and alternative longitudinal magnetic field in stainless steel GTA welding[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1993, 35(3): 330 – 333.
- [20] Marya M, Edwards G R. Chloride contribution in flux assisted GTA welding of magnesium alloys[J]. Welding Journal, 2002(12): 291 – 298.
- [21] 李宇航. 纵向磁场作用下镁合金焊接电弧与熔池的传热及流动特性的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
- Li Yuhang. The heat transfer and fluid flow characteristics of welding arc and weld pool for magnesium alloy under applied longitudinal magnetic field[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.

第一作者简介: 张桂清, 1982 年出生, 博士研究生; 主要从事镁合金焊接方面研究; 发表论文 7 篇; Email: 44384244@qq.com.

通信作者简介: 苏允海, 副教授, 博士研究生导师; Email: su_yunhai@sut.edu.cn.

(编辑: 高忠梅)