

基于纵向磁场控制的大直径空心螺柱焊接工艺

张德库, 何思源, 殷宏宇, 王克鸿

(南京理工大学, 南京, 210094)

摘要: 采用电弧螺柱焊方法对外径 20 mm、内径 10 mm 的空心螺柱与 45 钢板材进行焊接, 研究了旋弧磁场对接头显微组织特征及力学性能的影响。结果表明, 在纵向旋弧磁场作用下, 电弧中电荷受洛伦兹力作用呈螺旋运动, 接头外观成形得到改善。受磁场控制的电弧持续搅拌熔池, 改善了焊接热循环条件, 影响了熔池凝固结晶过程。接头中先共析铁素体呈有规律的网状分布, 珠光体也变得细化。接头温度梯度减小使得固态相变时间增长, 母材侧热影响区马氏体数量显著下降, 热影响区宽度变小。但旋弧磁场电流过大时焊接过程飞溅倾向明显增大, 焊缝中气孔增多。在焊接时间 1 400 ms、焊接电流 800 A、旋弧磁场电流 0.43 A 时, 电弧在空心螺柱端面充分燃烧, 接头抗剪强度可达到 325 MPa。

创新点: (1) 采用纵向磁场对螺柱焊电弧进行控制, 使其在螺柱端面均匀燃烧, 解决大直径空心螺柱焊接偏弧问题。
(2) 在磁场作用下电弧在螺柱端面运动搅拌熔池, 改善了接头热循环过程。
(3) 在磁场作用下接头组织得到细化, 缺陷减少, 接头性能得到明显提升。

关键词: 电弧螺柱焊; 空心螺柱; 旋弧磁场; 电弧

中图分类号: TG 430

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20210514002

0 序言

电弧螺柱焊是一种高效、稳定的焊接方法, 在工业中起着不可替代的作用, 广泛应用于汽车制造、航空航天、医疗器械、锅炉化工设备等行业^[1-4]。螺柱一般包括空心螺柱与实心螺柱两种, 其中空心螺柱在焊接过程中往往存在偏弧现象, 导致焊接接头存在未熔合等缺陷, 对于中大直径空心螺柱而言尤其严重^[5]。空心螺柱端面无法同实心螺柱一样设置引弧结, 焊接过程中电弧产生的位置存在随机性和不可控性, 加上焊接时间较短一般不超过 2 s, 容易造成中大直径空心螺柱电弧无法蔓延至整个环形端面, 难以形成完整的焊缝。

针对空心螺柱焊接难点, 研究者提出通过外加磁场方法来影响电弧形态, 起到电磁搅拌熔池的作用, 改变熔池金属结晶过程中的传质和传热过程, 改善晶粒形态和取向并减少显微偏析^[6-8]。姚猛^[9]研究发现在焊接直径 12 mm 的空心螺柱时施加纵

向的磁场, 能有效消除焊接偏弧现象。Egry 等人^[10]和孙莉等人^[11]研究发现活性元素的引入能影响焊接过程中电弧的蔓延和液态熔滴过渡状态, 进而影响熔池和液态熔滴之间的表面张力差, 对即将落入熔池的熔滴产生向下拉的作用力, 从而促进熔滴过渡, 减小飞溅。

目前国内外针对中大直径空心螺柱焊接工艺少有研究。采用电弧螺柱焊对低碳钢大直径空心螺柱与 45 钢板材进行焊接, 采用外加磁场对焊接电弧进行控制, 研究其对焊接接头成形、微观组织形貌和力学性能的影响, 为空心螺柱焊在工业上的应用提供一定的理论依据。

1 试验方法

试验母材选用 45 钢板材, 尺寸为 120 mm × 120 mm × 12 mm, 空心螺柱材料选用 Q235 低碳钢, 尺寸为 $\phi 20$ mm × 30 mm, 内径为 $\phi 10$ mm, 45 钢板材的化学成分如表 1 所示。

在自主研发的自动螺柱焊系统上进行试验, 螺柱焊机采用德国 soyer 公司的 BMH-22SV3000A 拉弧式螺柱焊机, 电磁铁及焊枪搭载在安川

表 1 45 钢的化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of 45 steel

| C | Si | Mn | Cr+Ni+Cu | P | S | Fe |
|-----------|-----------|---------|----------|-------|-------|----|
| 0.42~0.50 | 0.17~0.37 | 0.5~0.8 | 0.7 | 0.035 | 0.035 | 余量 |

MOTOMAN-ES165N 机器人上. 为进一步提高引弧几率及焊接过程中对熔池的保护, 在陶瓷成形模内部预置自研发引弧剂. 焊接过程如图 1 所示, 焊接工艺参数如表 2 所示.

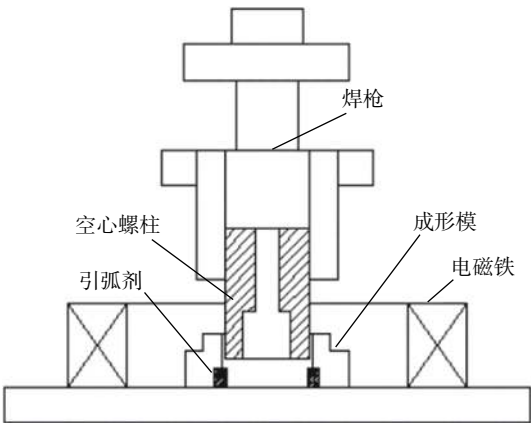


图 1 空心螺柱焊接过程示意图
Fig. 1 Sketch of hollow stud welding process

表 2 焊接工艺参数及接头抗剪强度
Table 2 Welding process parameters and shear strength of joints

| 编号 | 焊接电流 I/A | 焊接时间 t/ms | 旋弧电流 I/A | 抗剪强度 R_t/MPa |
|----|---------------|----------------|---------------|-------------------|
| 1 | 800 | 1 400 | 0 | 278 |
| 2 | 800 | 1 400 | 0.25 | 302 |
| 3 | 800 | 1 400 | 0.43 | 325 |
| 4 | 800 | 1 400 | 0.61 | 310 |

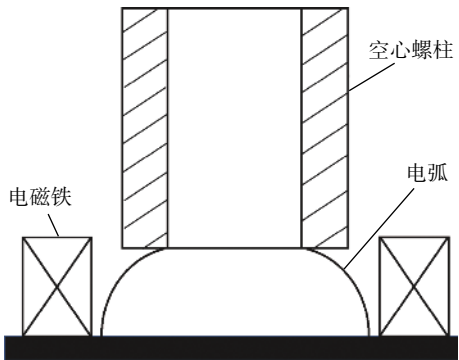
采用浓度为 4% 的硝酸酒精溶液对空心螺柱焊试样进行腐蚀, 通过金相显微镜和场发射环境扫描电镜对空心螺柱焊焊接接头显微结构进行观察, 使用 YAW-2000F 型微机控制点液伺服压力万能试验机进行焊后剪切试验.

2 试验结果与讨论

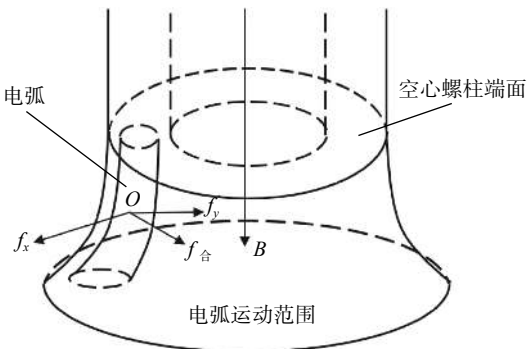
2.1 外加纵向磁场对螺柱焊接头成形的影响

图 2 为磁场控制电弧螺柱焊接过程示意图. 在图 2a 中, 采用相同规格的导线缠绕而成旋弧线圈, 在恒流电源提供的恒定电流条件下, 产生近似均匀且恒定的纵向磁场. 从图 2b 可以看出, 焊接过程中

由于受到外部电场的作用, 电弧中运动电荷将切割磁力线, 产生的洛伦兹力将使电荷运动在水平方向发生偏转, 其偏转方向为 f_x 与 f_y 的合力 $f_{\text{合}}$, 结合电弧原本在竖直方向存在的速度, 最终形成沿螺柱端面螺旋向下的圆周运动轨迹, 这有助于电弧扩散蔓延, 减少因为偏弧导致的未熔合等缺陷. 通过控制旋弧线圈的电流大小来调整磁场强度 B 的大小, 改变带电粒子在磁场中所受洛伦兹力的大小, 进而控制电弧在磁场中的运动, 实现将空心螺柱端面完全燃烧, 得到力学性能显著提升以及成形美观的空心螺柱焊接头.



(a) 空心螺柱焊旋弧示意图

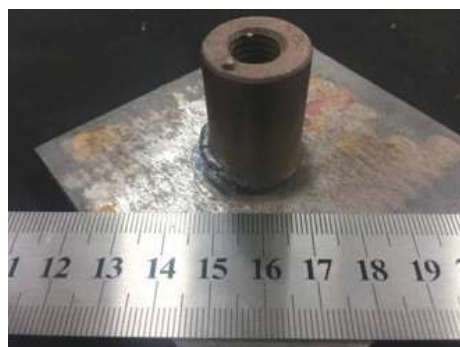


(b) 电弧受力模型

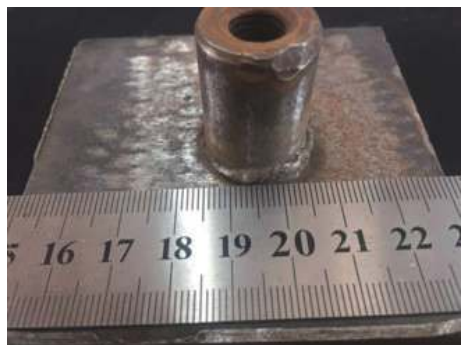
图 2 旋转电弧模型

Fig. 2 Rotating arc model. (a) schematic diagram of hollow stud welding rotating arc; (b) arc force model

图 3 为不同旋弧电流条件下螺柱焊接头的外观形貌. 从图 3a 可以看出, 未加纵向磁场时电弧在螺柱端面上随机起弧燃烧, 由于端面面积较大, 电弧只能在符合最小电压原理区域燃烧, 电弧在空心螺柱起弧点区域驻留时间较长, 金属熔化量多, 而



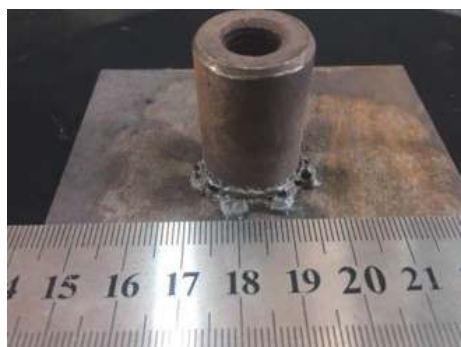
(a) 0 A



(b) 0.25 A



(c) 0.43 A



(d) 0.61 A

图 3 不同旋弧电流条件下接头的外观成形

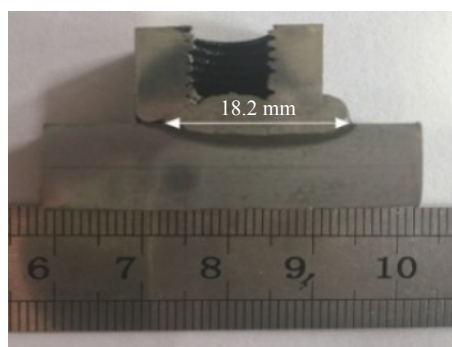
Fig. 3 Appearance form of joints at different rotating arc current. (a) 0 A; (b) 0.25 A; (c) 0.43 A; (d) 0.61 A

与起弧点相对的区域, 接头存在未熔合缺陷, 整个端面燃烧不均匀, 1/3 以上端面未熔化. 从图 3b 可以看出, 施加外加纵向磁场后, 接头成形得到改善. 这是由于在外加磁场的作用下, 电弧由于受到电磁力的作用而强制在整个端面运动, 电弧只能在较小

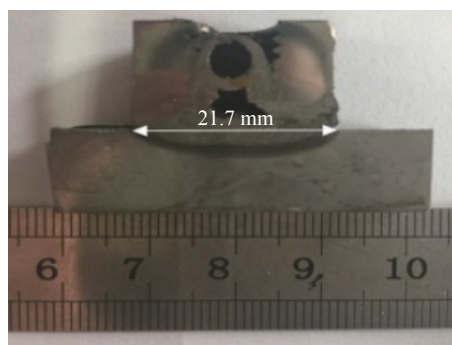
区域燃烧, 偏弧问题得到改善. 但由于外加磁场较弱, 使得金属在起弧点燃烧量较多, 与起弧点相对的一侧燃烧量较少, 空心螺柱焊接头燃烧了 3/4 的端面. 从图 3c 可以看出, 随着旋弧电流的增大, 电弧运动驱动力增大, 电弧在螺柱端面上的运动频率增加, 使得电弧在整个螺柱端面燃烧均匀, 接头成形良好且凸台饱满有光泽. 而当旋弧电流过大、外加磁场过强时, 由于熔池搅拌作用过大、焊接过程中熔池和空气的接触面积增加, 焊接过程不稳定, 飞溅增多, 接头成形差, 存在较多气孔, 力学性能下降, 如图 3d 所示.

2.2 外加纵向磁场对焊接接头成形及组织影响

图 4 为不同旋弧电流条件下空心螺柱焊接头的宏观照片. 由于旋弧电流较小, 电弧未能在螺柱端面充分燃烧, 熔池向右偏转, 接头熔宽为 18.2 mm, 左侧存在未熔合现象, 如图 4a 所示. 从图 4b 可以看出, 在较强外加磁场的洛伦兹力作用下, 电弧向四周运动, 熔池向四周扩张, 加上外加磁场对熔池的电磁搅拌作用, 接头熔宽增加, 达到 21.7 mm.



(a) 0.25 A



(b) 0.43 A

图 4 不同旋弧电流条件下接头宏观照片

Fig. 4 Macrograph of joints with different rotating arc current. (a) 0.25 A; (b) 0.43 A

图 5 为外加磁场作用下螺柱焊接头显微组织. 采用的工艺参数为焊接电流 800 A、焊接时间 1 400 ms、旋弧电流 0.43 A. 对比图 5a 和图 5b 可

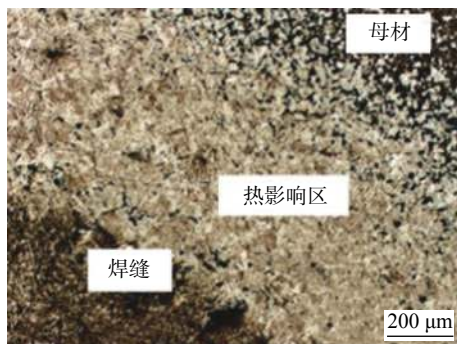
以看出,两者均由先共析的铁素体和晶内的珠光体组织区组成,并且由于受到过热及螺柱材料的影



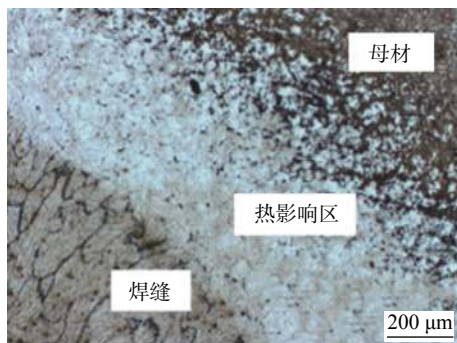
(a) 无磁场螺柱焊焊缝



(b) 旋弧螺柱焊焊缝组织



(c) 无磁场螺柱焊熔合线



(d) 旋弧螺柱焊熔合线

图5 旋弧磁场对空心螺柱焊接头组织的影响

Fig. 5 Effects of rotating arc magnetic field on the microstructure of hollow stud welded joints. (a) non-magnetic field stud welding seam; (b) weld microstructure of rotating arc stud welding; (c) non-magnetic field stud welding fusion line; (d) rotating arc stud welding fusion line

响,产生了上贝氏体组织和魏氏组织.图5a中晶粒粗大,出现羽毛状组织,先共析的铁素体呈粗大的片条状.图5b中的先共析铁素体呈有规律的网状分布,并分布有小块的珠光体.这是由于图5b中较大的外加磁场对熔池起到明显的电磁搅拌作用,并持续至冷却结晶过程初期,破碎了新生成的柱状晶.破碎的晶粒将会作为新的结晶形核的核心,冷却凝固时新相依附其表面,极大降低了形核的势垒,结晶时固液界面能下降促进形核,细化了焊缝晶粒,从而起到了细晶强化的作用.在图5c和图5d中右部母材主要是由白色不规则分布的网状白色铁素体和块状的黑色珠光体组成;在中部的热影响区,由于45钢板材具有良好的导热性,该区域获得较快的冷却速度,元素来不及扩散,奥氏体通过切变型转变形成马氏体,而原来未奥氏体化的铁素体有不同程度的长大,焊后该区组织主要为铁素体和马氏体的混合组织,此区域硬度大且存在大量板条状马氏体,施加载荷时裂纹容易在此处萌发,从而影响接头的力学性能.外加纵向磁场控制电弧运动也改变了接头中的温度梯度,导致图5d中热影响区域宽度明显小于图5c中热影响区宽度.在焊接过程中自主研发的引弧剂中的铝与氧化物发生置换反应,生成低密度的反应物漂浮在熔池表面使熔池表面张力发生改变,形成了熔池边缘指向熔池中心的对流.焊缝边缘的液态金属更易被拉向熔池中心,有利于将更多的热量带入熔池底部,促进熔深增加,并且在一定程度上改善了熔滴过渡状态,减小飞溅,并对熔池起到保护作用.图5a和图5d中的显微组织中均未发现较大气孔、裂纹等缺陷.另外,阴极斑点所发射的电子在剧烈碰撞表层氧化物的同时,也会以场致发射的形式向外发射,撞击螺柱端面,使电弧作用在螺柱端面的面积有一定增加.

磁场的强度影响着电弧搅拌熔池的效果,进而影响了熔池的凝固结晶.在热输入一定的条件下,熔池表面铺展面积越大,冷却速度越慢^[12],熔池内温度梯度减小,固态相变时间变长促进元素充分扩散.由JMAK (Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov) 理论可知,铁素体的体积分数计算公式为^[13]

$$F_{\delta}(T) = \frac{f_y(T)}{[1 - \exp(-kt^n)]} \quad (1)$$

$$k(T) = k_0 \exp\left(-\frac{\Delta H}{k_B T}\right) \quad (2)$$

式中: F_{δ} 为铁素体体积分数; k 为速率系数; k_0 为 JMAK 参数; k_B 为 Boltzman 常数; ΔH 为有效激活能; T 为相变时间; n 为 Avrami 指数.

从式 (1)~式 (2) 可知, 铁素体含量和相变时间的 n 次方成反比, 而磁场强度越大相变时间越长, 导致铁素体含量显著下降, 粗大的条状和片状铁素体将会均匀化. 从图 6 可以看出, 在一定范围内, 提高旋弧电流有助于降低熔池温度梯度和冷却速率, 促进 δ 相向 γ 相转变, 使铁素体含量下降, 组织更加致密. 另外, 随着磁场强度提高, 熔池冷却相变过程中因搅拌而破碎的树枝晶也明显增多, 其作为异质形核的基底, 降低形核势垒细化晶粒. 但是当磁场强度超过界限时, 如 2.1 节所述, 容易导致焊接过程稳定性变差. 图 7 为不同旋弧电流下接头过渡区域 SEM 照片. 从图 7a 可以看到, 在合适的磁场电流下, 焊缝边缘仅存在个别气孔, 而在 7b 中焊缝边缘杂乱分布着大量的微小气孔, 在承载过程中裂纹容易在此处萌发, 降低了空心螺柱焊的力学性能.

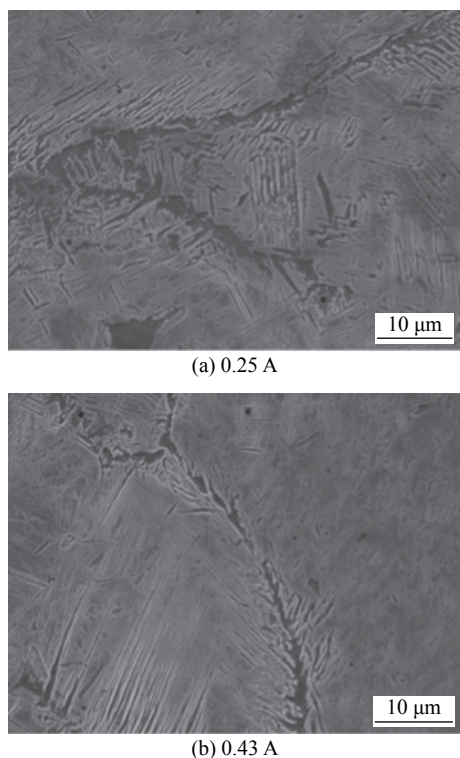


图 6 不同旋弧电流下接头中树枝晶 SEM 照片
Fig. 6 SEM micrographs of joint dendrites at different rotating arc current. (a) 0.25 A; (b) 0.43 A

图 8 为磁场控制空心螺柱焊接头 EDS 分析元素分布图, 线扫描区位于焊缝熔合线附近区域, 如图 8a 所示. 在图 8b 中 Si 元素、Mn 元素和 Cr 元素的曲线呈现出上、下较小的波动, Si 元素的含量约为 0.27%, Mn 元素的含量约为 0.78%, Cr 元素的

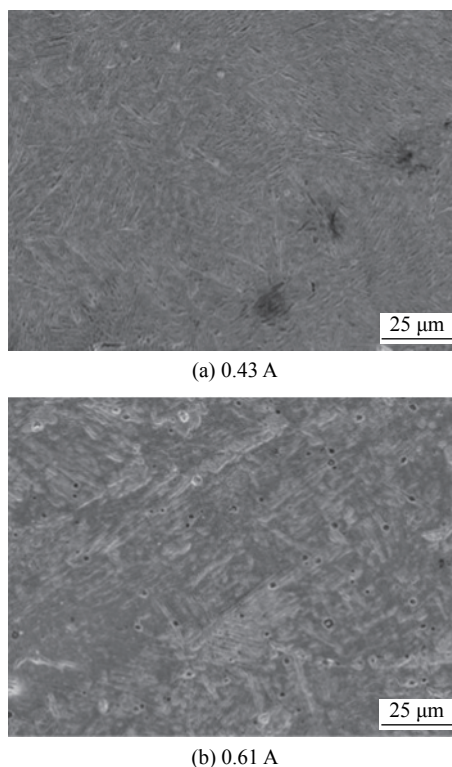


图 7 不同旋弧电流下接头过渡区域 SEM 照片
Fig. 7 SEM micrographs of transition region of joint at different rotating arc currents. (a) 0.43 A; (b) 0.61 A

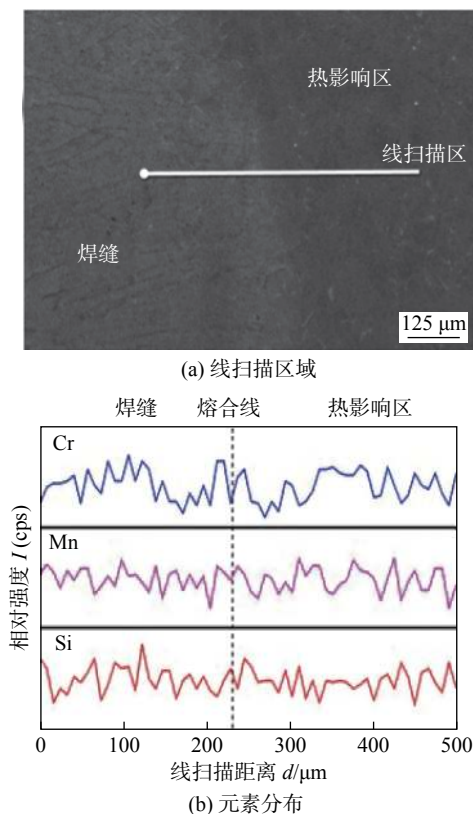


图 8 接头线扫描区的元素分布
Fig. 8 Element distribution at the line scanning area of joint. (a) line scanning area; (b) element distribution

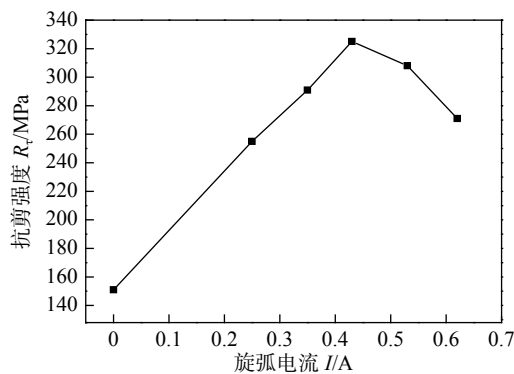
含量约为 0.2%。从表 1 可以看出,焊缝边缘与母材各元素分布在宏观上相差不大,这是由于靠近熔合线,母材 45 钢板材的熔合比高,且存在较强的电磁搅拌作用,加速了元素的扩散。这也表明,外部纵向磁场的施加所引起的熔池搅拌作用,不会加剧螺柱焊接过程中金属元素的蒸发与烧损。

2.3 空心螺柱焊接头的力学性能检测

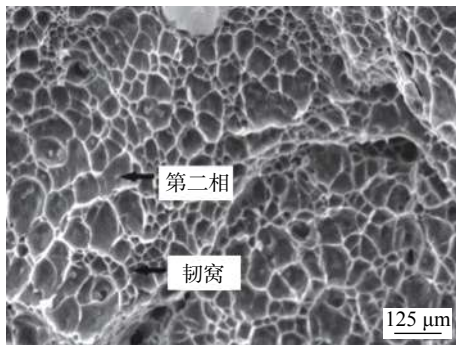
对施加不同旋弧磁场的空心螺柱焊接头进行剪切试验,结果如图 9 所示。从图 9a 可以看出,未施加外加磁场时 (0 A),由于焊接电弧不能在整个环形端面燃烧,容易出现未熔合缺陷,焊缝组织晶粒粗大,接头抗剪强度较低,仅达到 278 MPa。随着旋弧电流即外加磁场强度的增加,由于电弧在螺柱端面的运动及电磁搅拌带来的细化晶粒作用,接头的抗剪强度也随之增加,在旋弧电流为 0.43 A 时接头的抗剪强度达到 325 MPa。进一步增加旋弧电流即增大外加磁场强度时,由于焊接过程不稳定,内部容易出现气孔、夹渣等缺陷,接头的抗剪强度有所降低。对编号 3 的断口形貌进行观察,如图 9b 所示。尺寸较大的韧窝附近分布尺寸较小的韧窝,少部分韧窝底部存在氧化铝的第二相,基体塑性变

形较大时,第二相产生的空穴附近出现众多新生成的细小显微空穴,生长过程中新生成的空穴与相邻的空穴发生联结,在大韧窝附近形成密布的小韧窝,最后产生图 9b 所示的大小不一的韧窝形貌,断裂形式为韧性断裂。

图 10 为接头显微硬度分布曲线。曲线左侧是 45 钢,右侧是螺柱,从左至右存在 4 个区域,在 45 钢熔合区附近有一个明显的硬度突变区,该区生成的组织主要为板条状马氏体组织,硬度值的范围在 500~700 HV。施加旋弧磁场时,该区域范围明显变窄,由 2.2 节分析可知,熔池发生扩张,冷却速度和温度梯度下降,固态相变时间增长,导致生成的马氏体含量下降。当旋弧电流为 0 A 时,硬度值在硬度突变区达到最大值 676.9 HV。由于两侧母材含碳量不同,45 钢侧热影响区硬度值明显高于螺柱侧热影响区硬度值。焊缝冷却速度比母材热影响区慢,导致焊缝组织中马氏体数量较 45 钢侧热影响区少,硬度值下降。施加磁场时焊缝硬度值的范围在 250~390 HV,未加磁场时焊缝硬度值的范围在 310~420 HV,说明无磁场螺柱焊生成的马氏体含量较多。由于螺柱侧热影响区在焊接过程中加热温度很高且升温速率很快,高温停留的时间较短,奥氏体晶粒有一定长大,该处硬度明显低于焊缝,但大于螺柱母材。



(a) 焊接接头抗剪强度曲线



(b) 断口 SEM

图 9 空心螺柱焊接头的剪切试验结果

Fig. 9 Shear strength test of hollow stud welded joints. (a) shear strength curve of welded joint; (b) SEM of fracture surface

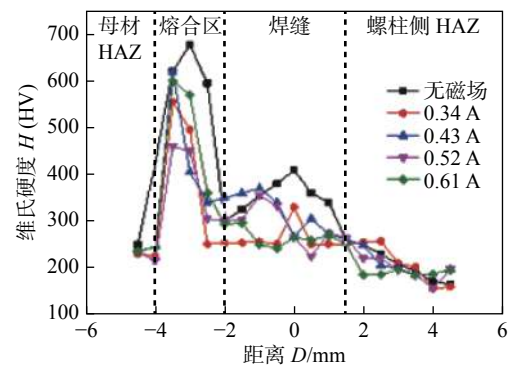


图 10 空心螺柱焊接头的硬度分布曲线

Fig. 10 Hardness distribution of hollow stud welded joints

3 结论

(1) 施加旋弧磁场时,空心螺柱焊接头的力学性能显著提升,在焊接时间 1 400 ms、焊接电流 800 A、旋弧电流为 0.43 A 的条件下,抗剪强度可达到 325 MPa,达到母材抗剪强度的 95.5%。

(2) 与无磁场作用的空心螺柱焊相比,在旋弧

磁场作用下,母材热影响区侧主要通过奥氏体切变型转变成马氏体,焊缝中的先共析的铁素体组织呈规律网格状分布,旋弧磁场促进 δ 相向 γ 相转变,铁素体含量下降,粗大的条状和羽毛状铁素体将会均质化。

(3) 采取旋弧磁场和引弧剂时,外加纵向磁场对熔池起到明显的电磁搅拌作用,细化了焊缝晶粒,进而起到了细晶强化的作用。外加纵向磁场不会加剧螺柱焊过程中金属元素的蒸发与烧损。

参考文献

- [1] Harada Y, Sada Y, Kumai S. Dissimilar joining of AA2024 aluminum studs and AZ80 magnesium plates by high-speed solid-state welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(2): 477 – 484.
- [2] 王克鸿, 张德库, 薛鹏飞, 等. 复合热源螺柱焊方法[J]. *焊接学报*, 2008, 29(11): 45 – 48.
Wang Kehong, Zhang Deku, Xue Pengfei, *et al.* Compound heat source stud welding method[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(11): 45 – 48.
- [3] 顾艳红, 马慧娟, 高辉, 等. 16Mn 钢摩擦螺柱焊接头的微观组织与局部腐蚀[J]. *上海交通大学学报*, 2017, 51(11): 1348 – 1354.
Gu Yanhong, Ma Huijuan, Gao Hui, *et al.* Microstructure and local corrosion behavior of friction stud welding of 16Mn steel[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2017, 51(11): 1348 – 1354.
- [4] 高辉, 焦向东, 周灿丰, 等. 基于 Abaqus 的水下摩擦螺柱焊焊接过程仿真[J]. *焊接学报*, 2014, 35(12): 50 – 54.
Gao Hui, Jiao Xiangdong, Zhou Canfeng, *et al.* Simulation of underwater friction stud welding process based on Abaqus[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(12): 50 – 54.
- [5] 王克鸿, 张德库, 郑石雄, 等. 空心螺柱旋弧焊接方法[J]. *焊接学报*, 2008, 29(12): 101 – 103.
Wang Kehong, Zhang Deku, Zheng Shixiong, *et al.* Rotating arc welding method of hollow stud[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(12): 101 – 103.
- [6] 艾星宇. 纵向磁场与活性剂联合下镁合金焊接接头组织性能的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
Ai Xingyu. Study on microstructure property of magnesium alloy welded joint under the longitudinal magnetic field associated with active agents[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.
- [7] Kamikawa S, Ishii I, Takezawa K, *et al.* Elastic softening due to the quadrupole interaction and anomalous magnetic phase diagram under the magnetic field in HoRu₂Al₁₀[J]. *Physical Review B*, 2017, 96(15): 155131.
- [8] Zhang Xun, Zhao Zeyang, Mi Gaoyang, *et al.* Effect of external longitudinal magnetic field on arc plasma characteristics and droplet transfer during laser-MIG hybrid welding[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(5-8): 2185 – 2195.
- [9] 姚猛. 空心螺柱焊接工程化质量控制研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
Yao Meng. Study on quality control of hollow stud welding engineering[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [10] Egly I, Ricci E, Novakovic R, *et al.* Surface tension of liquid metals and alloys recent developments[J]. *Advances in Colloid & Interface Science*, 2010, 159(2): 198 – 212.
- [11] 孙莉, 张腾, 刘晨曦, 等. 单组分活性剂对二氧化碳气体保护焊熔池形态的影响[J]. *天津科技*, 2017, 44(6): 29 – 34.
Sun Li, Zhang Teng, Liu Chenxi, *et al.* Effect of single component active flux on weld pool for carbon dioxide welding[J]. *Tianjin Science and Technology*, 2017, 44(6): 29 – 34.
- [12] 陈荣. 磁场辅助激光_MIG 复合焊接对 316L 焊缝组织与性能影响的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
Chen Rong. Research on influence of microstructure and properties of 316L welds via magnetic field assisted laser-MIG hybrid welding[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [13] Kohout J. An alternative to the JMAK equation for a better description of phase transformation kinetics[J]. *Journal of Materials Science*, 2008, 43(4): 1334 – 1339.

第一作者: 张德库, 博士, 副教授; 主要研究方向为材料先进焊接工艺; Email: zdk@njust.edu.cn.

(编辑: 戴红)