

根部螺纹搅拌针对搭接接头钩状缺陷和性能的影响

吴双连¹, 毛镇东¹, 刘雪松²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 青岛 266111;

2. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 选用 3 mm 厚的 7075-T6 铝合金为研究对象, 研究了根部带有螺纹的搅拌针对搅拌摩擦焊接接头钩状缺陷及拉剪载荷的影响。结果表明, 搅拌针上的螺纹可明显改变焊接过程中的材料流动; 塑性材料在搭接面上部集中, 挤压搭接界面, 焊后搭接接头的钩状缺陷向下弯曲; 搭接面处焊核区的宽度较搅拌针的直径明显增大。因搅拌针端部无螺纹, 焊接速度较大时接头底部会由于材料无法及时填充而产生孔洞缺陷。随着搅拌头焊接速度的升高, 搭接接头的拉剪载荷先上升后下降, 最高载荷在焊接速度为 40 mm/min 时取得, 为 23.333 kN。

关键词: 螺纹; 搅拌针; 搅拌摩擦焊接; 钩状缺陷; 拉剪载荷

中图分类号: TG 453

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.2019400068

0 序 言

作为影响焊接过程中材料流动的最主要因素之一, 搅拌头的形状特征对搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 接头的形貌和性能有着至关重要的影响^[1]。传统搅拌头一般由内凹轴肩和带螺纹的锥形搅拌针两部分组成^[2], 利用此搅拌头所得的接头缺陷较少且性能较高。

众所周知, FSW 接头的性能与焊核区 (stir zone, SZ) 形貌和特征紧密相关。近年来, 广大学者使用了不同形貌的搅拌头进行焊接, 以期获得拥有良好力学性能的接头。Cantin 等人^[3]使用一种名为 A-Skew 的搅拌头对 5083-O 铝合金进行搭接焊, 得到了拥有更宽 SZ 和更好疲劳寿命的接头。Salari 等人^[4]对上下板分别为 5 和 2.5 mm 的 5456 铝合金进行焊接, 结果发现使用阶梯状圆锥形螺纹搅拌针可获得高度更小的钩状缺陷。Yue 等人^[5]发现使用带有反向螺纹的搅拌针所得接头的 SZ 更宽且拉剪性能更高。

搅拌针上的螺纹对焊接过程中的材料流动有着不可忽视的影响^[6]。螺纹对材料流动的影响可大致总结如下, 带有左(右)旋螺纹的搅拌头顺(逆)时针旋转, 搅拌针附近的塑性材料则会沿着螺纹向下

流动; 流动至搅拌针尖端的材料从螺纹槽释放, 形成一材料聚集区^[7]。随着焊接过程的进行, 此材料聚集区的面积逐渐变大, 它会进一步推动距离搅拌针较远的塑性材料向上移动; 上下板之间的原始搭接面也会随着此部分材料的上移而呈向上弯曲的趋势, 从而形成钩状缺陷。由于向上弯曲, 钩状缺陷会减小上板的有效承载面积; 当接头受外力时, 钩状缺陷也往往是裂纹的起源位置^[8]。因此, 对于搭接接头来讲, 应当采取相应的措施来减小或消除钩状缺陷。

目前, 一些学者通过对搅拌针上螺纹的优化而减小钩状缺陷。Yin 等人^[9]发现搅拌针上螺纹的位置能够影响钩状缺陷形貌和接头断裂载荷。Li 等人^[10]研究结果表明, 与全螺纹搅拌针相比, 只有尖端带螺纹的搅拌针利于降低搅拌摩擦点焊接头的钩状缺陷高度, 增大 SZ 宽度。

文中提出一种仅搅拌针根部带有螺纹的搅拌头。利用 7075-T6 铝合金为研究材料, 重点研究了搭接接头的钩状缺陷和拉剪载荷。

1 试验方法

试验过程中用厚度为 3 mm 的 7075-T6 铝合金作为母材, 其尺寸为 300 mm × 140 mm。焊前将板材表面用 400 号的砂纸打磨去除母材表面杂质。焊接过程中两板材搭接放置, 搭接宽度为 50 mm。

焊接试验在型号为 FSW-3LM-4012 的焊机上进行. 试验过程中所用的搅拌头由同心圆轴肩和锥形搅拌针组成, 其中搅拌针只有根部带有螺纹, 其形貌如图 1 所示. 轴肩的直径为 13.5 mm; 搅拌针端部和根部直径分别为 3 和 5 mm. 焊接过程中使用的焊接速度为 20, 40, 60, 80, 100 mm/min; 搅拌头逆时针旋转, 转速为 800 r/min; 轴肩下压量为 0.2 mm. 试验结束后, 用电火花线切割机沿垂直焊缝的方向切割金相试样和拉伸试样. 经打磨、抛光、腐蚀后, 金相试样在型号为 OLYMPUS-GX71 的光学显微镜进行显微组织观察. 拉伸试样的宽度为 20 mm. 在型号为 INSTRON-8801 的万能拉伸试验机进行拉伸试验, 拉伸速度为 3 mm/min.



图 1 搅拌头形貌
Fig. 1 Tool morphology

2 试验结果及讨论

2.1 接头横截面形貌

图 2 所示为使用根部带螺纹搅拌针所得搭接接头的横截面形貌. 从图中可以看出, 由于搅拌针的锥形特征, 接头的 SZ 呈现上宽下窄的形貌. 与使用传统搅拌头所得接头形貌不同的是, SZ 在搭接面附近的宽度明显较大. 如图 2 所示, SZ 的宽度达到了 5.1 mm, 而此处搅拌针的宽度仅为 3.9 mm. 此结果可说明使用根部带螺纹的搅拌头能够明显增大接头的有效搭接宽度; 对于搭接接头来说, 较大的搭接宽度有利于接头性能的提高.

2.2 接头内部缺陷和显微组织

图 3 所示为使用根部带螺纹搅拌针所得搭接接头的钩状缺陷的形貌. 从图中可以看出, 钩状缺陷较平, 甚至在靠近 SZ 呈向下弯曲的趋势. 一般来讲, 搭接接头的钩状缺陷因受到焊接过程中塑性材料在接头底部堆积的挤压作用而呈向上弯曲的

趋势, 向上弯曲的钩状缺陷使得上板的有效板材厚度降低, 对接头性能有不利影响. 而使用根部带螺纹搅拌针所得的接头的钩状缺陷较平, 其可导致较大的有效板厚, 从而利于接头性能的提高.

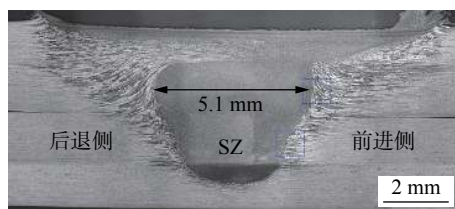


图 2 接头横截面形貌
Fig. 2 Joint cross section morphology

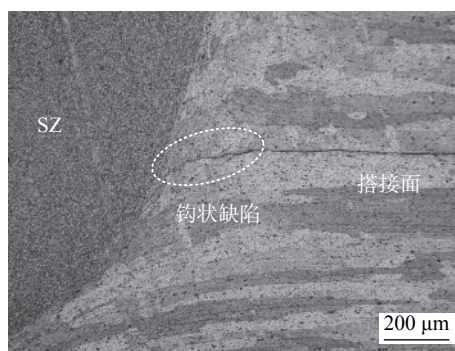
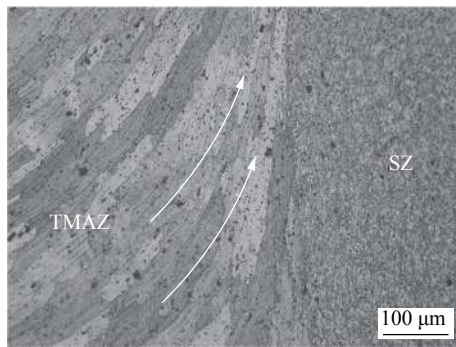


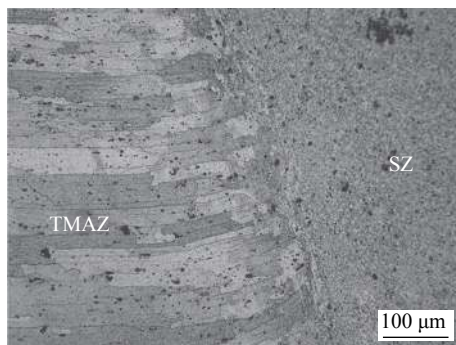
图 3 钩状缺陷形貌
Fig. 3 Hook morphology

与常规搭接接头相似, 使用根部带螺纹搅拌针所得接头也可分为 SZ、热力影响区 (thermally-mechanically affected zone, TMAZ)、热影响区 (heat affected zone, HAZ) 和母材区 (base material, BM). 不同区域的组织呈现不同的形貌, 文中不做过多赘述. 然而, 与常规接头形貌不同的是, 图 2 中 TMAZ 的组织在上、下板处呈现明显不同的形貌. 图 4 所示为接头上、下板处的 TMAZ 的显微组织形貌. 如图 4a 所示, 上板处 TMAZ 的组织呈明显的向上流动的形貌, 该形貌特征与常规搭接接头 TMAZ 区的组织相类似. 而下板处 TMAZ 处的组织较平, 几乎不存在向上流动的趋势. 究其原因, 是由于搅拌针的端部并无螺纹存在, 此区域附近的塑性材料主要随着搅拌针的转动而做水平流动, 因此焊接过程结束后呈图 4b 所示较平的形貌.

综上, 使用根部带螺纹搅拌针焊接过程中的材料流动行为如图 5 所示. 当带有右旋螺纹的搅拌针逆时针旋转时, 塑性材料会沿着螺纹从接头的上方往下流动. 由于右旋螺纹的末端位于搭接面附近, 因此塑性材料会在搭接面处从螺纹末端释放并集



(a) 上板



(b) 下板

图4 热力影响区的组织形貌

Fig. 4 Microstructure at TMAZ

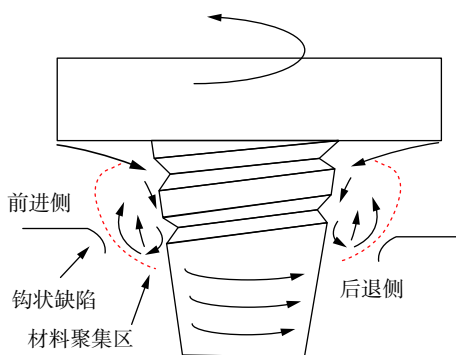


图5 接头成形机理

Fig. 5 Schematic of joint formation

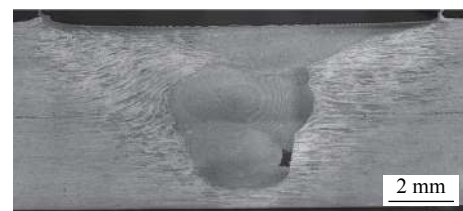
中,在此处形成材料聚集区.随着焊接过程的进行,此材料集中区的面积逐渐增大.位于搭接面的材料聚集区有两个作用,第一是此材料聚集区的存在可以使得搭接界面向下弯曲,因此焊后钩状缺陷呈向下弯曲的特征.其次,由于塑性材料在搭接面处集中,因此可扩大SZ宽度.除此之外,由于搅拌针的尖端没有螺纹,焊接过程中塑性材料会随着搅拌针的移动从前进侧流向后退侧.然而,由于缺少螺纹的带动作用,后退侧的材料可能无法及时填充前进侧由于搅拌头向前移动而留下的空腔,因此在搅拌针的尖端附近易产生孔洞缺陷.

为进一步验证焊接过程中的材料流动行为,对

不同焊接速度下所得接头的横截面形貌进行观察,结果如图6所示.当焊接速度为40 mm/min时,接头的横截面形貌与焊接速度为20 mm/min时相似,但搭接面处SZ的宽度稍窄,搭接面处宽度减小为4.6 mm,这是由于焊接速度较高时流向搭接面处的材料较少.随着焊接速度的升高,搭接面处SZ的宽度则进一步减小,分别为4.5, 4.3和4.1 mm,如图6b, c, d所示.当焊接速度为60 mm/min时,接头前进侧靠近SZ底部区域出现孔洞缺陷,此孔洞缺陷是由于后退侧的材料未及时填充前进侧流失的材料所形成的.从图中可以看出,随着焊接速度的增大,孔洞缺陷的尺寸逐渐增大,当焊接速度为100 mm/min时,孔洞缺陷的尺寸超过0.5 mm.



(a) 40 mm/min



(b) 60 mm/min



(c) 80 mm/min



(d) 100 mm/min

图6 不同焊接速度的横截面形貌

Fig. 6 Cross sections using different welding speeds

2.3 拉断载荷

图7为不同焊接速度时所得接头的拉断载荷.从图中可以看出,随着焊接速度的增加,接头的拉断载荷先上升后下降,最高拉断载荷在焊接速度为

40 mm/min 时取得, 为 23.333 kN; 最低拉断载荷在焊接速度为 100 mm/min 时取得, 为 16.513 kN. 拉伸试验的结果表明, 无论焊接速度高低, 接头均呈剪切断裂模式, 即裂纹不穿过孔洞缺陷, 仅沿原始搭接面扩展. 因此搭接界面处的 SZ 强度与宽度决定了接头性能的高低. 通过图 2 与图 6 的分析可知, 搭接界面处的 SZ 宽度随焊接速度的减小而增加, 这利于增加接头拉断载荷. 然而, 随焊接速度减小, 搅拌头所产生的摩擦热增加, 加剧 SZ 的软化程度, 不利于接头强度的升高. 当焊接速度较小 (20 mm/min) 时, 接头的拉断载荷最小, 说明此参数下起主导作用的是软化作用. 当焊接速度较大 (80 与 100 mm/min) 时, SZ 的软化程度较小, 但接头的拉断载荷也较小, 这说明此参数下起主导作用的是 SZ 宽度. 当焊接速度最优 (40 mm/min) 时, SZ 软化程度与宽度取得较好的匹配, 接头拉断载荷达到最大值 (23.333 kN).

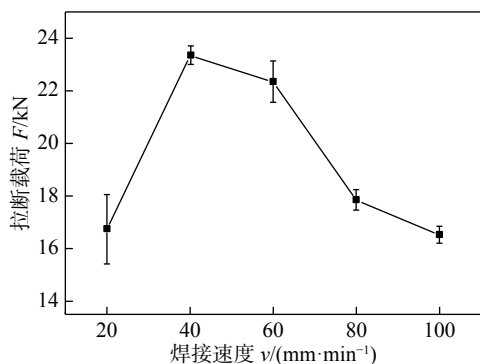


图 7 拉断载荷

Fig. 7 Lap shear failure loads

3 结 论

(1) 使用根部带螺纹搅拌针时, 塑性材料在搭接界面上部集中, 形成材料聚集区, 使搭接接头钩状缺陷向下弯曲且有效增加搅拌区宽度. 但搅拌针尖端无螺纹易使搅拌区底部的前进侧出现孔洞缺陷.

(2) 随着焊接速度的增加, 接头的拉断载荷先上升后下降. 接头的最高拉断载荷在焊接速度为 40 mm/min 时取得, 其值为 23.333 kN.

参考文献:

[1] 岳玉梅, 周振鲁, 姬书得, 等. 半螺纹搅拌针对 2024 铝合金搅拌

摩擦搭接焊力学性能的影响 [J]. 焊接学报, 2016, 37(10): 69 – 72.

Yue Yumei, Zhou Zhenlu, Ji Shude, *et al.* Effect of half-threaded pin on mechanical properties of friction stir lap welded alclad 2024 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(10): 69 – 72.

[2] Li Z, Yue Y, Ma L, *et al.* Effects of pin geometry on the material flow behavior of friction stir spot welded 2A12 aluminum alloy[J]. China Welding, 2015, 24(2): 25 – 29.

[3] Cantin G, David S, Thomas W, *et al.* Friction Skew-stir welding of lap joints in 5083-O aluminum[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(3): 268 – 280.

[4] Salari E, Jahazi M, Khodabandeh A, *et al.* Influence of tool geometry and rotational speed on mechanical properties and defect formation in friction stir lap welded 5456 aluminum alloy sheets[J]. Materials & Design, 2014, 58: 381 – 389.

[5] Yue Y, Li Z, Ji S, *et al.* Effect of reverse-threaded pin on mechanical properties of friction stir lap welded alclad 2024 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2016, 32(7): 671 – 675.

[6] 刘 建, 刘雪松, 邢艳双. 针针对异种铝合金 FSLW 接头成形及力学性能影 [J]. 焊接学报, 2018, 39(6): 91 – 95.

Liu Jian, Liu Xuesong, Xing Yanshuang. Influence of pin length on formation and shear failure load of dissimilar Al alloys FSLW joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(6): 91 – 95.

[7] 王春桂, 赵运强, 董春林, 等. 6063-T6 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头组织及力学性能分析 [J]. 焊接学报, 2018, 39(10): 108 – 112.

Wang Chungui, Zhao Yunqiang, Dong Chunlin, *et al.* Analysis on microstructure and mechanical properties of 6063-T6 self-reacting friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(10): 108 – 112.

[8] Yin Y H, Sun N, North T H, *et al.* Hook formation and mechanical properties in AZ31 friction stir spot welds[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210: 2062 – 2070.

[9] Yin Y H, Sun N, North T H, *et al.* Microstructures and mechanical properties in dissimilar AZ91/AZ31 spot welds[J]. Materials Characterization, 2010, 61: 1018 – 1028.

[10] Li Z, Yue Y, Ji S, *et al.* Optimal design of thread geometry and its performance in friction stir spot welding[J]. Materials & Design, 2016, 94(15): 368 – 376.

第一作者简介: 吴双连, 男, 1984 年出生, 硕士. 主要从事高速列车车体设计、焊接制造技术及工艺研究. Email: wulianshuang2018@126.com

通信作者简介: 刘雪松, 男, 教授. Email: liuxuesong@hit.edu.cn