

7050 高强铝合金搅拌摩擦焊典型宏观缺陷 试验研究

赵华夏, 董继红, 孟强

(中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

摘要: **目的** 研究 7050 铝合金搅拌摩擦焊接头中隧道缺陷及未焊透缺陷的行程规律及其对接头性能的影响。**方法** 采用预制间隙、改变搅拌针长度等方法获得了搅拌摩擦焊隧道缺陷及未焊透缺陷, 通过金相分析、力学性能测试对缺陷及接头性能进行了分析。**结果** 相比隧道缺陷, 根部未焊透缺陷对接头性能的影响更大, 压入量对隧道、未焊透缺陷有重要影响, 板厚 5 mm, 搅拌针长度小于 4.8 mm 时, 未焊透缺陷对接头性能将产生显著影响。**结论** 应严格控制搅拌针长度及压入量, 避免根部未焊透缺陷对接头性能的影响。

关键词: 搅拌摩擦焊; 高强铝合金; 缺陷

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.06.021

中图分类号: TG453 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)06-0141-08

Experimental Study on Typical Macroscopic Defects of 7050 High Strength Aluminum Alloy Friction Stir Welding

ZHAO Hua-xia, DONG Ji-hong, MENG Qiang

(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the stroke rule of tunnel defect and incomplete welding of 7050 high strength aluminum alloy friction stir welding and their influences on the joint property. The defects of friction stir welding tunnel and incomplete welding were obtained by means of prefabricating gap and changing the length of probe. The defect and performance of joint were analyzed through metallographic analysis and mechanical property test. The results showed that, compared with tunnel defects, lack of penetration had a greater impact on the joint performance; and the amount of pressure had an important impact on the tunnel and lack of penetration defects. When the plate thickness was 5 mm and the length of probe was less than 4.8 mm, lack of penetration defects would have a significant impact on the joint performance. The results show that the length of stirring needle and the amount of pressing should be strictly controlled to avoid the influence of root defect on joint performance.

KEY WORDS: friction stir welding; high strength aluminum alloy; defect

搅拌摩擦焊 (Friction stir welding, FSW) 技术是 1991 年英国焊接研究所研发的一种新型固相连接技术^[1]。该技术有效避免了传统焊接技术在焊接铝合金材料时产生的气孔、裂纹等缺陷, 提高了焊缝质量,

减小了焊接变形。搅拌摩擦焊技术已被认为是继激光焊后焊接技术的又一重大突破^[2]。

铝合金具有高比强度、良好的加工成形性, 广泛应用于航空、海运和铁路行业^[2], 搅拌摩擦焊作为一

收稿日期: 2019-09-05

作者简介: 赵华夏 (1980—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为搅拌摩擦焊。

种新型的铝合金固相焊接技术,具有接头性能好、焊接过程不需气体保护、无烟尘及飞溅等优点^[3-7]。

研究发现,当焊接工艺控制不当时,搅拌摩擦焊接头中会出现飞边、毛刺、沟槽等表面缺陷,以及孔洞、未焊透和 Z 型线等内部缺陷^[8]。搅拌摩擦焊接缺陷与焊接过程中塑性金属流动行为密切相关,因此,国外学者针对 FSW 塑性金属流动行为开展了大量研究工作,采用的研究方法包括示踪法^[9]、急停法^[10]、微观组织观察^[11]或者多种方法相结合^[12]。国内也对塑性金属流动行为开展了大量研究工作。文献^[13-14]构建了 FSW 塑性金属的层状流动模型。文献^[15]通过示踪试验研究得出“抽吸-挤压”理论。文献^[16]采用紫铜作为示踪材料研究了 FSW 焊接过程中塑性金属在水平面上的二维流动行为。文献^[17]采用铝箔示踪法研究了 FSW 洋葱环形成机制。已有的研究成果主要从接头形成机制的角度开展研究,而关于搅拌摩擦焊接缺陷对接头性能的影响研究较少。力学性能是评价搅拌摩擦焊接头服役能力的重要因素,因此透彻分析和研究搅拌摩擦焊接头的宏观缺陷特征及

与焊接工艺、接头性能的关系,可以有针对性地改善工艺,进而有效提高搅拌摩擦焊接头性能。

1 材料及方法

试验材料为 7050-T7451 高强铝合金板材,材料厚度为 5 mm,接头形式为搅拌摩擦焊对接接头。通过预制对接间隙获得不同程度的搅拌摩擦焊隧道缺陷,通过调整搅拌针长度获得不同程度的未焊透缺陷。采用金相观察、力学性能测试等手段分析隧道缺陷、未焊透缺陷及其对接头性能的影响规律。

2 7050 铝合金搅拌摩擦焊隧道缺陷研究

图 1 为 3 种不同间隙下搅拌摩擦焊的试板图片,在试板两端放入等厚度的铜箔制造不同宽度的间隙,铜箔理论厚度为 0.1 mm,其中 n 为铜箔张数。 $n=4$ 和 $n=8$ 时焊缝宏观组织良好,弧纹光滑没有缺陷, $n=12$ 时在尾孔处出现明显的空洞, $n=16$ 时焊缝表面前进侧出现裂纹。

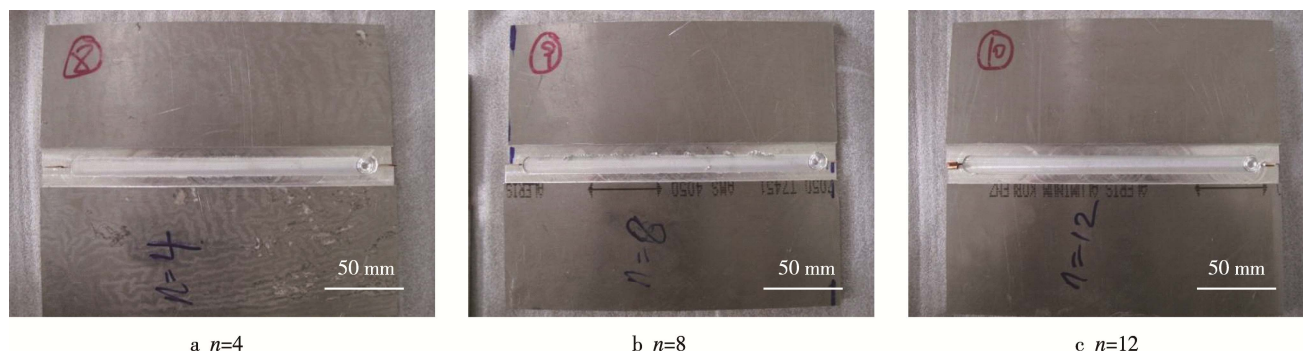


图 1 不同对接间隙的 7050-T7451 搅拌摩擦焊试验件

Fig.1 Friction stir welding specimen of 7050-T7451 with different butt clearance

表 1 不同预制间隙条件下接头性能

Tab.1 Joint performance with different prefabricated clearance

间隙	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
$n=4$	407	253	1.0
$n=8$	388	239	0.6
$n=12$	210	199	0.06
$n=16$			

图 2 是 1.2 mm 预制间隙搅拌摩擦焊接头形貌,可以看到前进侧轴肩作用区与焊核作用区交界位置存在较为严重的隧道缺陷,该缺陷造成了接头强度的显著下降。0.4 mm 及 0.8 mm 预制缺陷接头中未出现隧道缺陷,图 3 是上述两种接头中发现的根部未焊透缺陷,可以看到 0.8 mm 预制间隙接头根部未焊透范围相对更大,这是其接头强度低于 0.4 mm 预制间隙接头强度的重要原因。

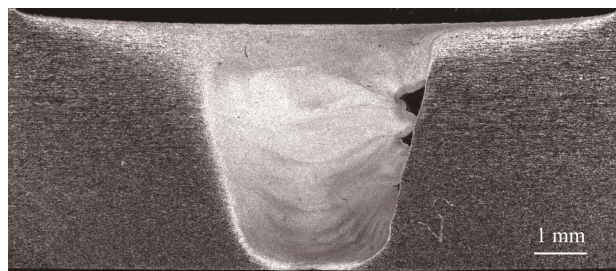


图 2 1.2 mm 预制间隙搅拌摩擦焊接头形貌

Fig.2 Appearance of 1.2 mm prefabricated clearance friction stir welding joint

图 4 是梯形间隙隧道缺陷搅拌摩擦焊试件,其对接头不同位置取样获得的力学性能如表 2 所示,其间隙宽度为 0~2.0 mm,取样位置如图 4 所示。从图 5 可以看出,距离尾孔最近的两个试样力学性能非常低,从第 3 个试样开始力学性能迅速升高,到第 4 点力学性能达到最大,从第 5 点开始力学性能反而开始

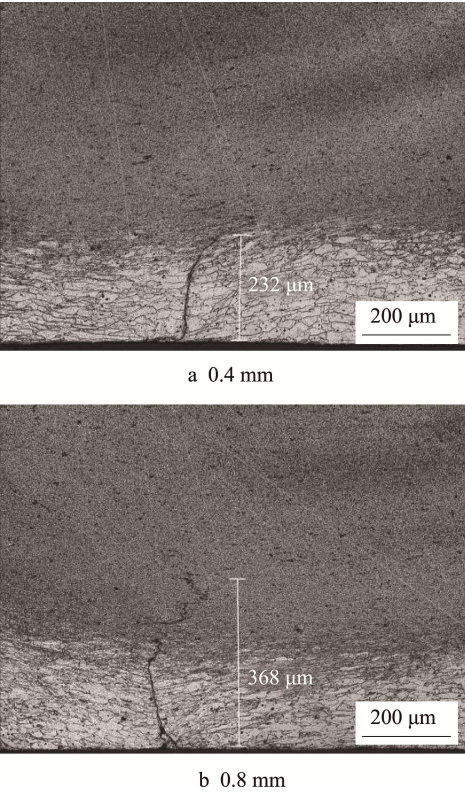


图 3 不同预制间隙下搅拌摩擦焊接头根部未焊透缺陷
Fig.3 Lack of penetration at the root of friction stir welding with different prefabricated clearance

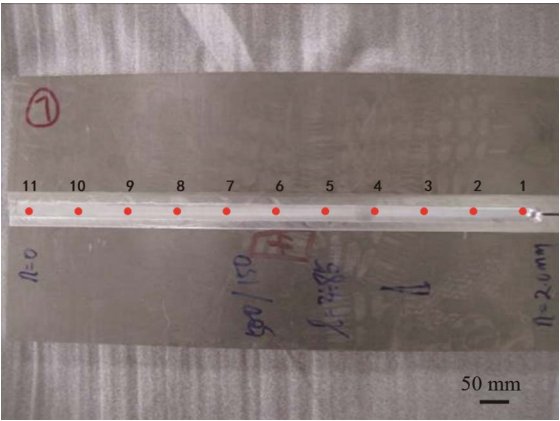


图 4 7050-T7451 梯形间隙隧道试件及力学性能测试位置
Fig.4 FSW specimen for 7050-T7451 trapezoidal clearance and test location of mechanical property

回落，但此后各点力学性能逐渐趋于稳定。

从图 6 梯形隧道缺陷接头不同位置断面形貌可以看出，在最靠近尾孔位置也就是预留间隙最大的位置存在明显的隧道缺陷，由此可以解释该位置强度急剧下降的原因。而第 2 和第 3 点位置未发现隧道孔洞，第 4 和第 5 点位置再次出现微小的隧道孔洞(见图 7)，表明在相同的工艺参数下隧道孔洞的出现并不完全取决于对接间隙，还与压入量有关。第 3 和第 4 点位置抗拉强度可以达到母材强度的 90%以上，表明静强度已经可以满足实际应用要求，5—11 点预制间隙相

表 2 7050-T7451 梯形间隙隧道缺陷不同位置接头性能
Tab.2 Performance of joints with different positions of 7050-T7451 trapezoidal clearance

编号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
1 (尾孔)	48		
2	289	264	0.7
3	449	223	7.1
4	452	300	7.5
5	416	276	3.7
6	393	283	3.6
7	397	254	3.2
8	396	263	3.0
9	391	315	2.8
10	404	302	3.3
11 (起焊)	389	294	2.7

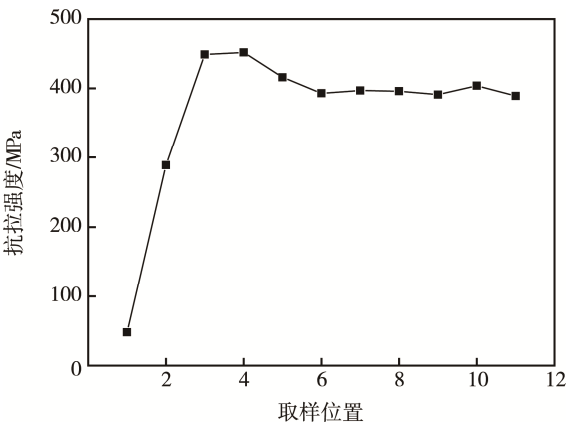


图 5 梯形隧道缺陷接头抗拉强度曲线
Fig.5 Tensile strength curve of trapezoidal clearance joints

对第 3 和 4 点要小，但接头强度反而降低，观察不同位置根部未焊透情况(见图 8)可以发现，由于 5—11 点位置对接间隙较小，试验过程中通过观察飞边大小控制压入量导致压入量相对第 3 和 4 点位置较小，由此造成较为严重的根部未焊透，而第 3 和 4 点位置虽然对接间隙较大，但由于压入量也随之增大，完全消除了根部未焊透，导致接头强度反而提高。由此可以得出结论，根部未焊透对接头强度的影响要大于微小隧道缺陷对接头强度的影响。

3 7050 铝合金搅拌摩擦焊根部未焊透缺陷研究

基于上述研究结果，进一步针对 7050 铝合金搅拌摩擦焊根部未焊透缺陷开展了研究。图 9 为 7050 未焊透缺陷焊缝宏观照片，针长从 4.9 mm 逐渐减小到 4.4 mm，参数 500 r/min、150 mm/min 时，焊缝表面弧纹成形良好，没有缺陷，表明搅拌针长度的改变对接头上表面形貌没有影响。

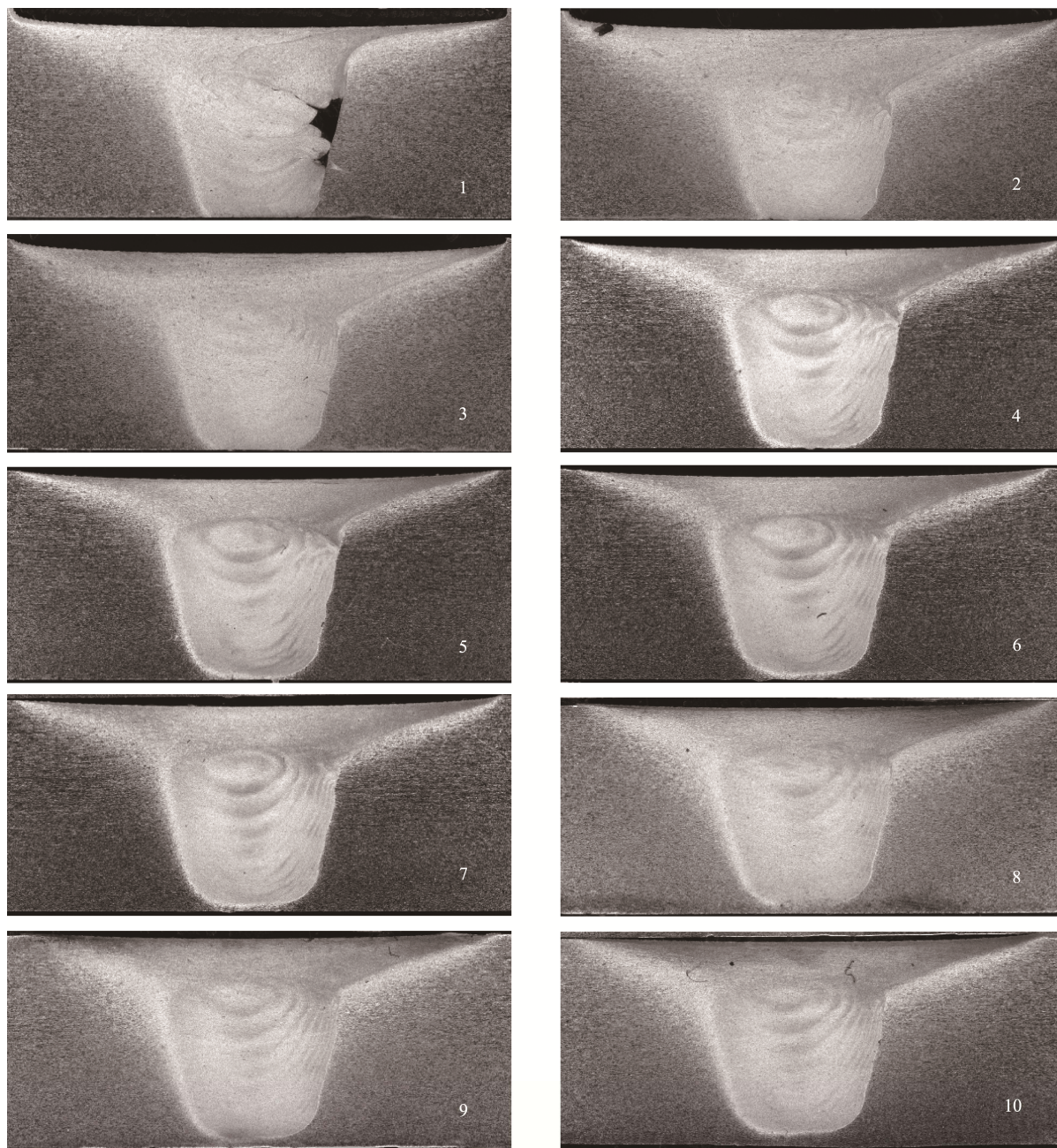


图6 7050-T7451 梯形间隙隧道缺陷不同位置截面宏观形貌 (1到10位置间隙逐渐减小)
Fig.6 Macro morphologies of cross sections at different positions of 7050-T7451 trapezoid clearance

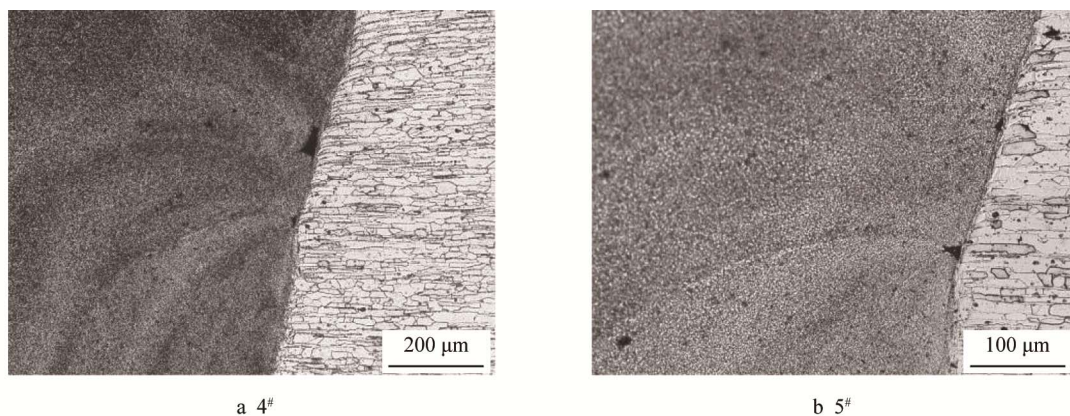


图7 4#和5#位置的隧道缺陷
Fig.7 Channel defects at positions 4# and 5#

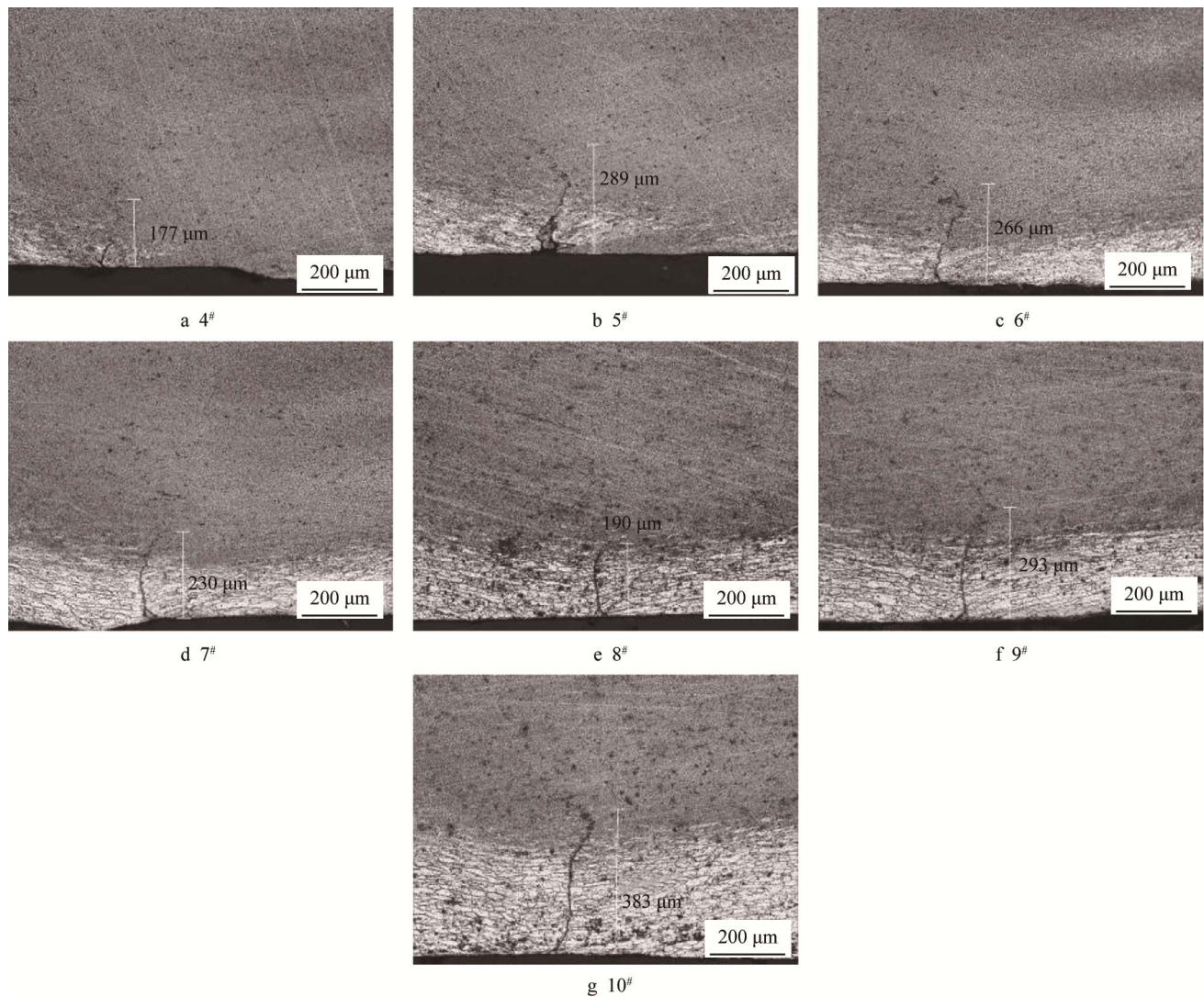


图 8 7050-T7451 梯形隧道缺陷不同位置根部未焊透
Fig.8 Lack of penetration in different clearance of 7050-T7451 trapezoid tunnel defect

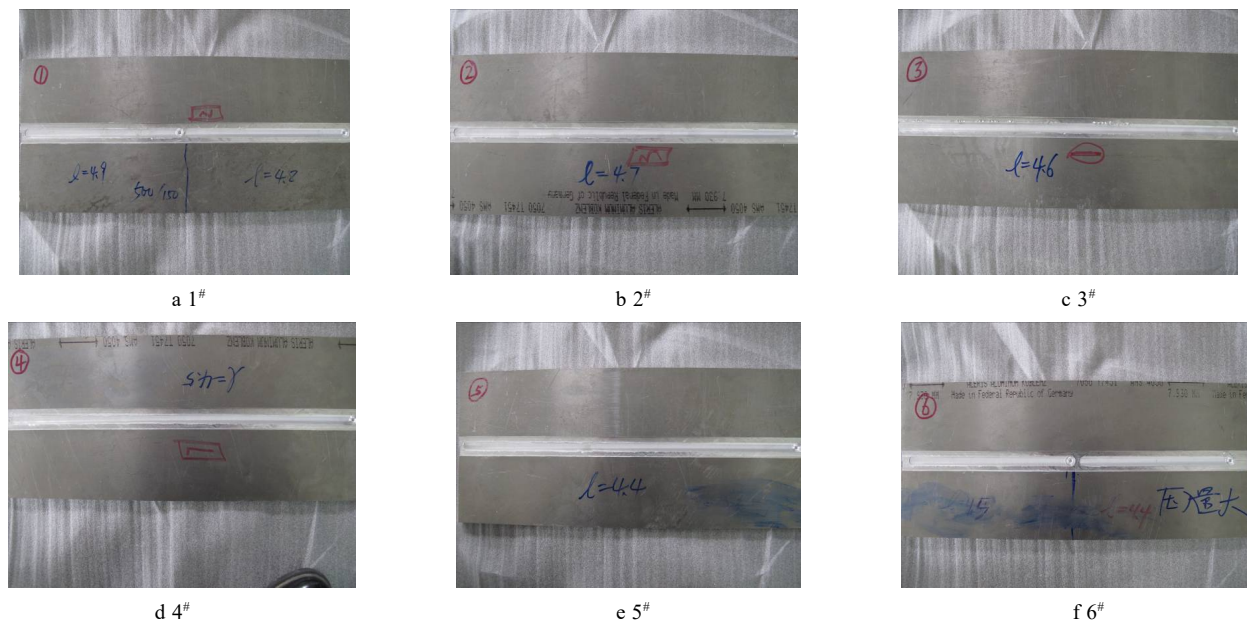


图 9 7050-T7451 搅拌摩擦焊根部未焊透试验件
Fig.9 7050-T7451 FSW specimens with lack of penetration

图 10 为未焊透接头的形貌，可以看到随着搅拌针的逐渐变短，未焊透程度逐渐增加。图 11 给出了针长为 4.5 mm 及 4.4 mm 时增大压入量后未焊透接头形貌。与图 10 相比未焊透程度有所降低，说明压入量的增加导致未焊透缺陷有所减轻。

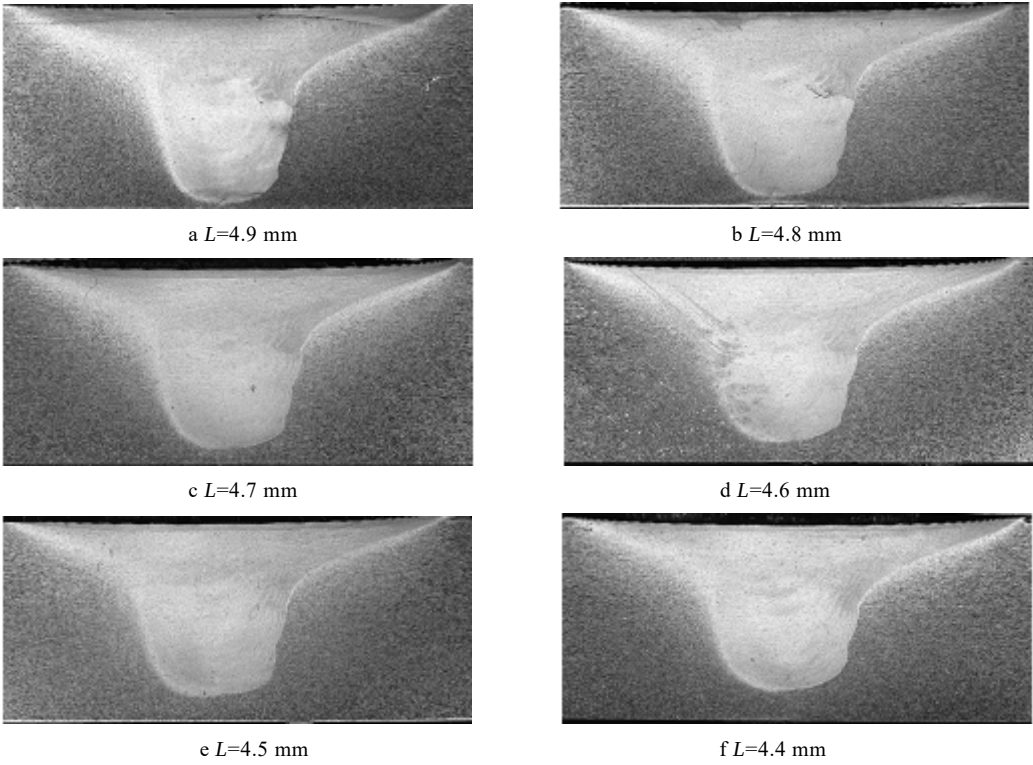


图 10 不同程度未焊透接头形貌
Fig.10 Morphologies of joints with different lack of penetration

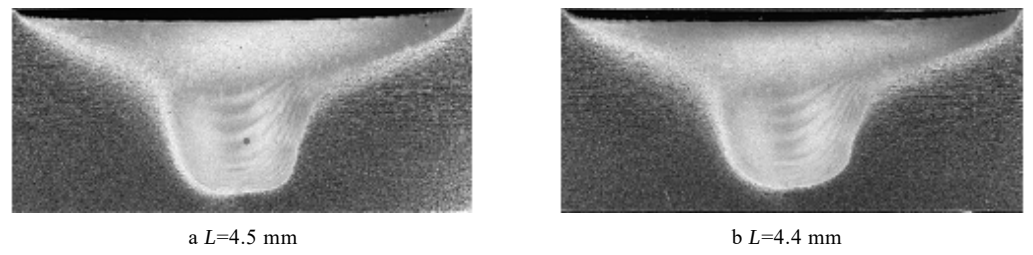


图 11 增大压入量后接头形貌
Fig.11 Macro profiles after increasing the lunge depth

大而增大，出现这种情况的原因是因为搅拌针长度增大，未焊透的深度减小，接头的有效承载面积增大，抗拉强度增强。随着未焊透程度的增加，抗拉强度逐渐降低，表 4 对比了不同压入量与抗拉强度之间的关系。保持搅拌针长度不变，通过改变下压量研究对未焊透力学性能的影响。当搅拌针长度为 4.4 mm 和 4.5 mm，焊接时采用正常下压量，焊后接头的拉伸强度分别为 328 MPa 和 352 MPa，当增大下压量后，搅拌针长 4.4 mm 和 4.5 mm 的焊接接头的抗拉强度增加到 348 MPa 和 372 MPa，从而可以看出压入量可以改善接头强度，较大的压入量使抗拉强度增加 20 MPa。

表 3 列出了未焊透缺陷程度与抗拉强度之间的关系。首先，未焊透缺陷的存在严重降低了搅拌摩擦焊接头强度，而不同程度的未焊透缺陷对接头强度的影响如图 12 所示，在板厚不变的情况下加大搅拌针的长度，可以发现接头的抗拉强度随搅拌针长度的增

表 3 7050-T7451 不同针长搅拌摩擦焊接头力学性能
Tab.3 Mechanical properties of 7050-T7451 welded joints with different probe lengths

针长L/mm	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
4.9	395	289	2.8
4.8	387	277	2.5
4.7	361	288	2.0
4.6	353	275	1.9
4.5	352	280	2.3
4.4	328	259	2.2

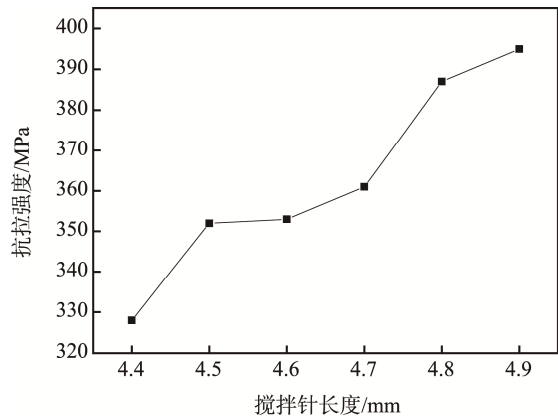


图 12 7050-T7451 搅拌摩擦焊接头强度与搅拌针长度之间的关系曲线

Fig.12 Relation curve between the strength of 7050-T7451 joints and the lengths of probe

表 4 不同压入量对搅拌摩擦焊接头强度的影响

Tab.4 Influence of different lunge depths on the strength of friction stir welded joint

针长L/mm	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
4.5（常规压入量）	352	280	2.3
4.4（常规压入量）	328	259	2.2
4.5（增大压入量）	372	263	3.2
4.4（增大压入量）	348	252	2.4

从图 13 可以看到，搅拌针长度为 4.8 mm 时，前进侧焊核边缘出现了微小的隧道缺陷，从图 14 可以看到，搅拌针长度为 4.9 mm 时，前进侧所出现的隧道型孔洞缺陷更加严重。相比之下，针长小于 4.8 mm 时除了根部未焊透缺陷外接头成形良好。但 4.8 mm 及 4.9 mm 针长时接头强度远远优于其他接头，表明焊核中出现的微小隧道缺陷对接头强度的影响远小于根部未焊透缺陷。但搅拌针长度增大，接头中反而出现隧道型孔洞缺陷，该现象的出现是由于针长增大后搅拌针挤出的材料增多，再加上压入量不足，导致回填阶段材料不能很好地填充前进侧后部空隙，从而形成隧道缺陷。

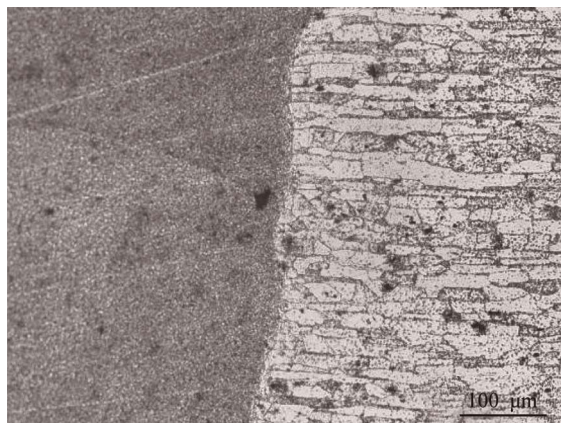


图 13 针长 4.8 mm 搅拌摩擦焊接头隧道缺陷

Fig.13 Tunnel defect of friction stir welded joint with 4.8 mm probe length

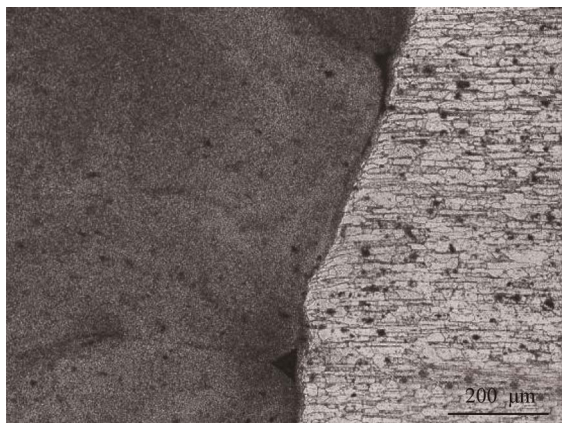


图 14 针长 4.9 mm 搅拌摩擦焊接头隧道缺陷

Fig.14 Tunnel defect of friction stir welded joint with 4.9 mm probe length

5 结论

- 1) 根部未焊透对接头性能的影响要大于微小隧道缺陷对接头性能的影响。
- 2) 在相同的工艺参数下隧道孔洞的出现并不完全取决于对接间隙，还与压入量有关。
- 3) 板厚为 5 mm，搅拌针长度大于 4.8 mm 时，焊缝抗拉强度较高且变化不大，当搅拌针长度小于 4.8 mm 时，未焊透缺陷对接头性能将产生显著影响。

参考文献：

[1] THOMAS W M. Friction Stir Butt Welding: International Patent Application: UK, PCT/GB92/0220[P]. 1991.

[2] ADAMUS K, ADAMUS J, LACKI J. Ultrasonic Testing of Thin Walled Components Made of Aluminum Based Laminates[J]. Composite Structures, 2017, 12(7): 1—7.

[3] KINCHEN D G, ALDAHIR E. NDE of Friction Stir Welds in Aerospace Applications[R]. New Orleans: Lockheed Martin Michoud Space Systems, 2002.

[4] 徐国富, 段雨露, 钱健, 等. Al-Mg-Mn-Sc-Zr 合金搅拌摩擦焊接头显微组织、力学性能及腐蚀性能[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(2): 225—233.

XU Guo-fu, DUAN Yu-lu, QIAN Jian, et al. Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behaviors of Al-Mg-Mn-Sc-Zr Alloy Friction Stir Welded Joints[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(2): 225—233.

[5] 刘会杰, 李金全, 段卫军. 静止轴肩搅拌摩擦焊的研究进展[J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 18—22.

LIU Hui-jie, LI Jin-quan, DUAN Wei-jun. Progress in the Stationary Shoulder Friction Stir Welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(5): 18—22.

[6] 赵雪梅. 铝合金搅拌摩擦焊接头超声信号特征与质量评价方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

- ZHAO Xue-mei. Ultrasonic Signal Features and Quality Evaluation Method of Friction Stir Welded Joint of Aluminum Alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [7] KHAN N Z, KHAN Z A, SIDDIQUEE A N, et al. Analysis of Defects in Clean Fabrication Process of Friction Stir Welding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(7): 1507—1516.
- [8] 曹丽杰. 铝合金搅拌摩擦焊接缺陷的研究进展[J]. 表面技术, 2009, 38(3): 68—71.
CAO Li-jie. Research Progress on Friction Stir Welding Defects of Aluminum Alloy[J]. Surface Technology, 2009, 38(3): 68—71.
- [9] LORRAIN O, FAVIER V, ZAHROUNI H, et al. Understanding the Material Flow Path of Friction Stir Welding Process Using Unthreaded Tools[J]. Journal of Material Processing Technology, 2010, 210: 603—609.
- [10] SILVA A A M, ARRUTI E, JANEIRO G, et al. Material Flow and Mechanical Behavior of Dissimilar AA2024-T3 and AA7075-T6 Aluminium Alloys Friction Stir Welds[J]. Materials and Design Mater, 2011, 32(4): 2021—2027.
- [11] CUI Song, CHEN Zhan. Effect of Tool Speeds and Corresponding Torque/Energy on Stir Zone Formation during Friction Stir Welding/Processing[J]. Material Science and Engineering, 2009, 4(1):1—5.
- [12] SCHMIDT H N B, DICKERSON T L, HATTEL J H. Material Flow in Butt Friction Stir Welds in AA2024-T3[J]. Acta Materialia, 2006, 54(4): 1199—1209.
- [13] 王大勇, 冯吉才, 狄欧, 等. 铝合金搅拌摩擦焊接头焊核区等轴再结晶组织的形成机制[J]. 焊接学报, 2003, 24(4): 33—35.
- WANG Da-yong, FENG Ji-cai, DI Ou, et al. Forming Process Analysis of Equiaxed Grain in Weld Nugget Zone during Friction-stir Welding of Aluminum Alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(4): 33—35.
- [14] 王大勇, 冯吉才. 搅拌摩擦焊接三维流动模型[J]. 焊接学报, 2004, 25(4): 46—50.
WANG Da-yong, FENG Ji-cai. 3 Dimensional Flow Modeling of Friction Stir Welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(4): 46—50.
- [15] 柯黎明, 潘际銮, 邢丽, 等. 搅拌摩擦焊缝金属塑性流动的抽吸-挤压理论[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 89—94.
KE Li-ming, PAN Ji-luan, XING Li, et al. Suck-ing-extruding Theory for the Material Flow in Friction Stir Welds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 89—94.
- [16] 柯黎明, 邢丽, 黄奉安. 搅拌摩擦焊接头形成过程的二维观察与分析[J]. 焊接学报, 2005, 26(3): 1—4.
KE Li-ming, XING Li, HUANG Feng-an. Two-dimensional Flow of Plasticized Materials in Friction Stir Welded Joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(3): 1—4.
- [17] 李宝华, 唐众民, 鄢江武, 等. 搅拌头形状对搅拌摩擦焊接头中洋葱环形成影响[J]. 热加工工艺, 2010, 39(19): 156—158.
LI Bao-hua, TANG Zhong-min, YAN Jiang-wu, et al. Influence of Tool Shape on Morphology of Onion Rings in Welded Joint during Friction Stir Welding[J]. Hot Wording Technology, 2010, 39(19): 156—158.