

文章编号:1001-4888(2017)06-0811-07

铝合金焊接接头力学性能实验研究^{*}

杜家政¹, 赵振洋^{1,2}, 黄诚³, 吴会强³, 张晓颖³

(1. 北京工业大学, 北京 100124; 2. 北京新能源汽车股份有限公司, 北京 102606; 3. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 铝合金焊接结构是航天领域的常用结构。实验过程中焊接接头出现了低强度破坏, 主要是由焊接接头变形不协调引起的。为了更好地研究焊接接头的破坏机理, 采用纳米压痕实验和微拉伸实验对焊接接头的微区材料力学性能进行实验研究, 得到焊接接头不同区域的弹性模量、屈服极限、强度极限、延伸率的分布规律。分析了自焊缝中心向母材区域过渡时各力学性能的变化趋势, 本文结果可为焊接接头破坏机理的研究提供数据基础。

关键词: 铝合金; 焊接接头; 力学性能; 纳米压痕实验; 微拉伸实验

中图分类号: TG407 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-066

0 引言

铝合金材料具有强度高、质量轻、可塑性好、抗腐蚀等优点, 被广泛应用于航空航天、汽车制造、机械加工、船舶生产等领域^[1-3], 是现代工业生产中最常用的材料之一。焊接是铝合金结构的主要连接方式, 具有接头密闭性好、连接灵活度高等优点, 有着良好的综合性能, 但由于焊接时的热循环作用, 组织结构发生变化, 焊接接头内合金性能发生改变, 导致各区域材料力学性能不同, 严重影响焊接接头的整体强度^[4], 因此针对铝合金焊接接头各微区材料力学性能进行研究有十分重要的意义。

许多学者尝试了多种测试焊接接头微区材料性能的方法, 王元良等^[5]采用微剪切实验方法对铝合金焊接接头的微区性能进行测试, 得到了材料的剪切强度、剪切变形率等; 雷斌隆等^[6,7]对微剪切实验与拉伸实验、断裂力学实验等参数之间的对应关系进行了理论分析和深入研究; 王志成等^[8]采用微冲压实验对 5052 铝合金焊接接头局部力学性能进行了测试, 得到了接头各微区的硬度分布情况; 车洪艳等^[9]将双孔微剪切实验与有限元计算相结合, 使用反推法获取了焊接接头中各区域的局部力学性能参数; Ambriz 等^[10]采用微拉伸实验方法, 对 6061-T6 铝合金焊缝区、热影响区和母材区的力学性能进行了测量, 得到了焊缝区到热影响区硬度和弹性模量的变化情况; 汤忠斌等^[11]分别利用微拉伸实验、微剪切实验和维氏硬度实验三种方法对微区材料力学性能进行测试, 对比实验结果得出了微拉伸实验方法测定微区材料的力学性能更加准确可靠的结论。

在对由铝合金材料焊接而成的贮箱进行加压实验的过程中, 在贮箱的焊缝区域出现低强度破坏的情况。为了研究焊接接头的破坏机理, 需要测量焊接接头详细的力学性能参数, 本文采用纳米压痕实验和微拉伸实验方法, 对铝合金焊接接头不同区域的弹性模量、屈服极限、强度极限、延伸率等进行实验测试, 分析数据规律, 所得结果可为焊接接头破坏机理的研究提供数据基础。

1 纳米压痕实验

1.1 实验原理概述

纳米压痕技术是最简单的测试材料力学性质的方法之一, 可以在纳米尺度上测量材料的弹性模量、

^{*} 收稿日期: 2016-04-14; 修回日期: 2016-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(11472020)资助; 北京市科协金桥工程种子资金(基金项目代号: ZZ16001)

通讯作者: 杜家政(1975—), 男, 博士, 副教授。主要从事计算力学及结构优化方面的研究。Email: djz@bjut.edu.cn

硬度、断裂韧度、蠕变行为等力学性质。采用“Nano Indenter® G200 纳米压痕系统”进行实验测试,可以在试件上指定测点的指定深度测试弹性模量数值。

参考纳米压痕系统的操作标准,热漂移参数设定在 $0.3\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 以内,以保证实验过程中数据的稳定性。选用连续刚度法进行实验,该方法可以连续记录测点随压入深度变化的弹性模量值。通过观察随深度变化的弹性模量值,选取受表面硬化现象影响较小且变化平顺的数据段,将求解的均值,作为该测点的弹性模量值。

1.2 试样制备和测点选取

实验用焊接接头由 2219-MCS 铝合金拼接,采用搅拌摩擦焊(FSW)方式制得,焊缝尺寸如图 1 所示。由于两侧母材材料相同,试样制备时选择一侧材料。

根据纳米压痕系统的夹具大小,设计合理的试样尺寸,取样位置如图 2 所示,对取出的试样按照实验要求进行打磨、抛光,最终试样如图 3 所示。

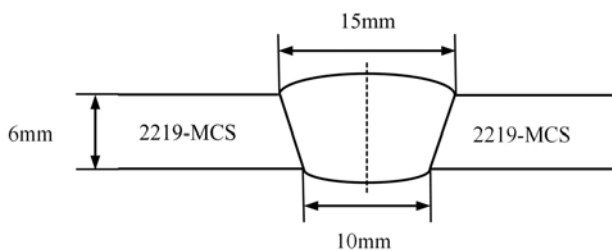


图 1 焊缝尺寸示意图

Fig. 1 Dimensions of weld

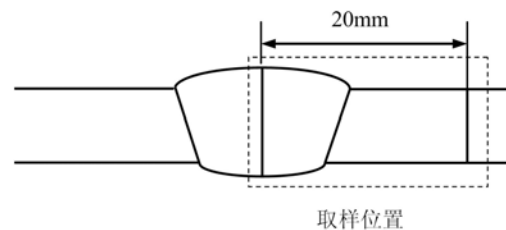


图 2 纳米压痕实验取样位置图

Fig. 2 Sampling position for nano-indentation test

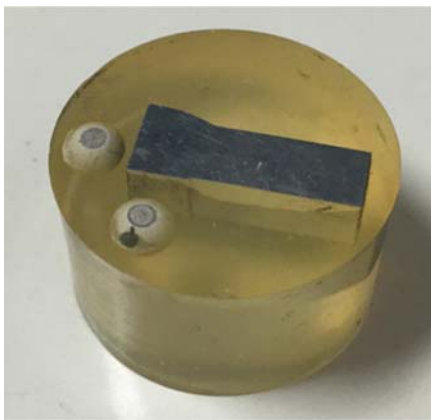


图 3 纳米压痕试样

Fig. 3 Sample used in nano-indentation test

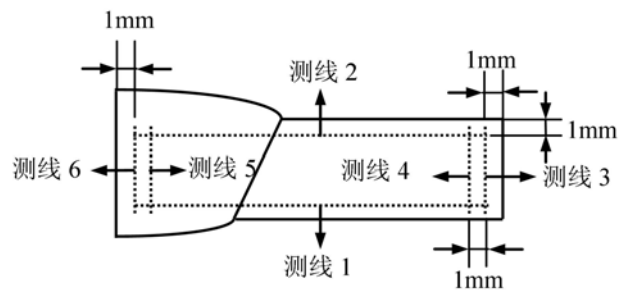


图 4 纳米压痕实验测线选取示意图

Fig. 4 The schematic diagram of the test line selection for the nano-indentation test

测点设计时要尽量避开焊缝表面的硬化区域,预先设定测线位置,然后在测线上均匀采点,如图 4 所示。为观察弹性模量自焊缝中心区至母材的变化趋势,设定测线 1、2,每条测线设置 120 个间隔均匀的自焊缝中心向母材过渡的测点;为观察母材区和焊缝区分别沿厚度方向弹性模量的变化趋势,在母材区和焊缝区分别设置两条测线(测线 3、4 和测线 5、6),母材区的每条测线设置 33 个间隔均匀的自底部向顶部过渡的测点,焊缝区的每条测线设置 47 个间隔均匀的自底部向顶部过渡的测点。

1.3 实验结果与分析

通过对 6 条测线上的测点进行纳米压痕实验,得到每个测点的弹性模量数值,经数据处理得到母材区域沿厚度方向上弹性模量的变化分布,如图 5 所示,弹性模量的平均值是 65.4GPa ;焊缝区域沿厚度方向上弹性模量的变化分布,如图 6 所示,弹性模量的平均值是 72.2GPa 。由图 5 和图 6 可以得知,无

论在焊缝区域还是在母材区域,沿厚度方向弹性模量的变化趋势不明显。同时为了观察水平方向上弹性模量的变化趋势,将测线1、2上各自的120个测点分别分为12组,并计算每组10个测点数据的平均值,得到自焊缝中心至母材区域弹性模量的变化趋势,如图7所示,焊接接头在厚度方向上弹性模量的变化不明显,焊缝中心弹性模量较小,随着向母材区域过渡,整体呈现“先增大,后减小”的趋势。

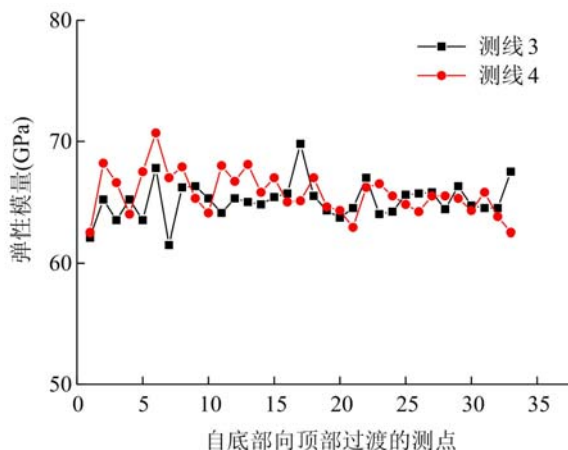


图5 母材区域沿厚度方向弹性模量的变化

Fig. 5 The elastic modulus change of base material region along the thickness direction

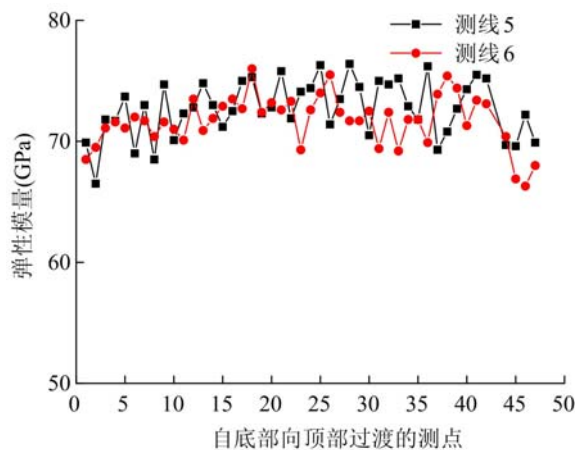


图6 焊缝区域沿厚度方向弹性模量的变化

Fig. 6 The elastic modulus change of weld material region along the thickness direction

对于应用纳米压痕方法测试的材料,一般需要满足均匀、无缺陷、各项同性和无限大弹性半空间的假设,且测试结果极易受压痕设备和实验过程复杂性的影响,造成结论的不确定性,因此开展微拉伸实验对其结果进行验证比对。

2 微拉伸实验

2.1 实验原理概述

微拉伸实验是最直接测试微区材料力学性能的方法,在焊接接头的不同位置取出微试样,采用“Instron 5848 MicroTester 材料试验机”进行实验测试,加载量程0~2kN,载荷精度 $\leq 0.5\%$,位移最大行程110mm,位移精度 $\leq 6\mu\text{m}$ 。通过力传感器、位移传感器和引伸计获得数据,通过数据处理获得材料的力学性能,包括弹性模量、屈服极限、强度极限、延伸率等。

根据 GB/T22315—2008 规定,选择应变在 $0.25\% \sim 0.5\%$ 之间的数据,采用最小二乘法将数据对拟合成轴向应力—轴向应变直线,得到材料的弹性模量。根据 GB/T228—2002,铝合金没有明显的屈服阶段,取塑性应变为 0.2% 时的应力为屈服极限,即“条件屈服极限”。强度极限为试样承受的最大载荷与试样原始横截面积的比值。延伸率为试样拉伸断裂后标距段的总变形与原标距长度之比的百分数。

2.2 试样制备

实验用焊接接头同纳米压痕实验的相同,具体尺寸见图1。试样制备过程中,首先沿图8所示的轮廓线取出跨焊缝、熔合线、热影响区和母材的8块试样块,然后把每个试样块均分为上、中、下3层,对每

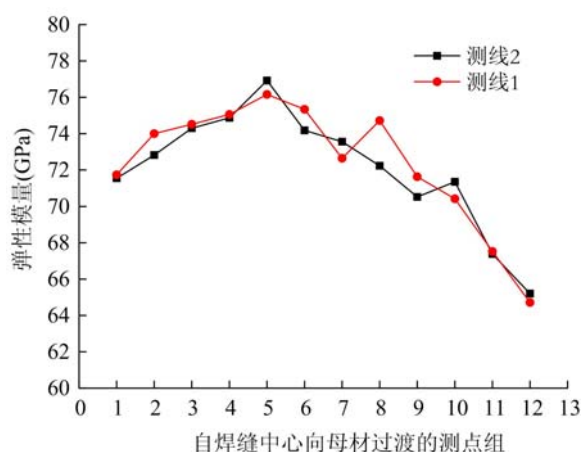


图7 焊缝中心至母材区域弹性模量的变化

Fig. 7 The elastic modulus change of the region from the weld center to the base material

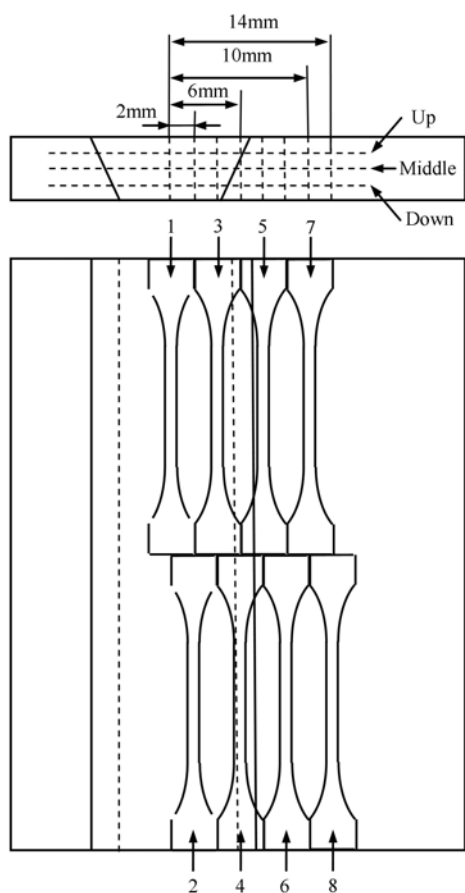


图 8 微拉伸实验取样位置图

Fig. 8 Sampling position of micro tensile test

290MPa 左右,而 12mm 以外的区域强度极限值持续增大至母材强度值;图 13 给出了延伸率的变化趋势,呈现自焊缝中心至母材区域“增大—减小—增大—减小”的规律:在焊缝中心区域延伸率较低,只有 8% 左右,随着向焊缝两侧延伸,延伸率逐渐增加,在 2mm 处达到 13% 左右,2mm 至 4mm 范围内逐渐降低,在 4mm 处降到最低 5.4% 左右,6mm 至 10mm 范围内逐渐增加,在 10mm 处增到最高 15.2% 左右,而 12mm 以外的区域延伸率逐渐降低,基本趋于母材 10% 左右的延伸率。

表 1 不同区域材料的弹性模量(GPa)

Tab. 1 Elastic modulus in different regions(GPa)

试样序号	1	2	3	4	5	6	7	8
距焊缝中心距离(mm)	0	2	4	6	8	10	12	14
Up	77.68	71.73	64.45	67.79	69.86	77.24	67.27	58.98
Middle	65.18	69.37	72.88	60.39	64.65	58.98	68.92	60.50
Down	64.05	69.31	66.89	70.59	66.21	60.11	61.20	58.19
Average	68.97	70.14	68.07	66.26	66.91	65.44	65.79	59.22

层试片采用慢走丝线切割加工,双面打磨至 1mm 厚度,以消除线切割加工对试样材料的热影响,最终根据 GB/T228—2002,将试样设计成应力集中较小、方便夹持的狗骨形状,如图 9 所示的试样,横截面为正方形,标距段初始截面面积 $A_0=1\text{mm}^2$,标距段长度 $L_0=10\text{mm}$,用于安置引伸计,平行长度 20mm,试样总长度 $L=40\text{mm}$ 。

不同区域材料的弹性模量如表 1 所示,屈服极限如表 2 所示,强度极限如表 3 所示,延伸率如表 4 所示。根据对称性画出焊接接头不同区域各参数的变化情况,图 10 给出了弹性模量的变化趋势,大体呈现焊缝中心高两侧低的规律:距离焊缝中心 6mm 范围内,弹性模量相对较大,均值达到 70GPa 左右,6mm 至 12mm 范围内均值可达 66GPa 左右,而 12mm 以外的区域弹性模量数值则靠近母材的 60GPa 左右;图 11 给出了屈服极限的变化趋势,呈现焊缝中心低两侧高的规律:距离焊缝中心 6mm 范围内,屈服极限相对较低,在 2mm 处达到最低只有 112.42MPa,6mm 至 10mm 范围内屈服极限值有所增加,均值达到 147MPa 左右,而 10mm 以外的区域屈服极限值持续增加至母材屈服值;图 12 给出了强度极限的变化趋势,呈现焊缝中心低两侧高的规律:距离焊缝中心 6mm 范围内,强度极限相对较低,在 3mm 处达到最低只有 210.05MPa,6mm 至 12mm 范围内强度极限值有所增加,均值达到

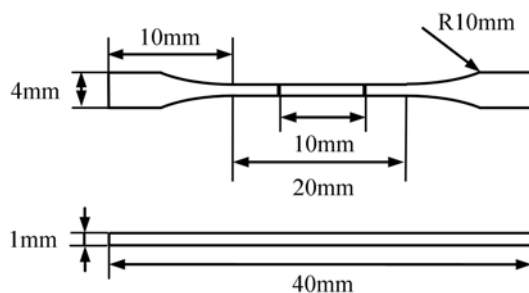


图 9 微拉伸试样尺寸图

Fig. 9 Dimensions of micro tensile specimen

表 2 不同区域材料的屈服极限(MPa)
Tab. 2 Yield limit in different regions(MPa)

试样序号	1	2	3	4	5	6	7	8
距焊缝中心距离(mm)	0	2	4	6	8	10	12	14
Up	132.90	115.47	116.82	128.61	160.40	145.08	170.19	194.23
Middle	134.93	109.00	116.13	152.58	151.99	139.64	169.52	193.92
Down	130.67	112.80	121.33	159.16	147.22	141.40	173.78	198.06
Average	132.84	112.42	118.09	146.78	153.20	142.04	171.16	195.40

表 3 不同区域材料的强度极限(MPa)
Tab. 3 Tensile strength in different regions(MPa)

试样序号	1	2	3	4	5	6	7	8
距焊缝中心距离(mm)	0	2	4	6	8	10	12	14
Up	227.22	226.72	207.13	212.48	291.28	284.52	292.60	309.34
Middle	222.80	220.33	205.02	291.93	297.31	278.62	288.60	306.04
Down	226.35	223.08	218.02	304.93	293.05	284.25	293.49	311.42
Average	225.46	223.38	210.05	269.78	293.88	282.46	291.56	308.93

表 4 不同区域材料的延伸率(%)
Tab. 4 Elongation in different regions(%)

试样序号	1	2	3	4	5	6	7	8
距焊缝中心距离(mm)	0	2	4	6	8	10	12	14
Up	7.370	13.13	5.750	4.580	11.24	15.12	10.73	9.950
Middle	10.52	13.81	5.490	14.48	15.73	15.21	10.21	9.290
Down	7.670	12.38	5.690	13.70	14.09	15.33	9.960	10.12
Average	8.520	13.11	5.640	10.92	13.69	15.22	10.30	9.790

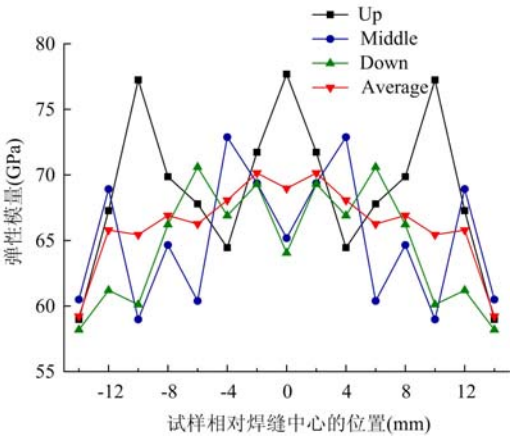


图 10 弹性模量分布规律

Fig. 10 Distribution law of elastic modulus

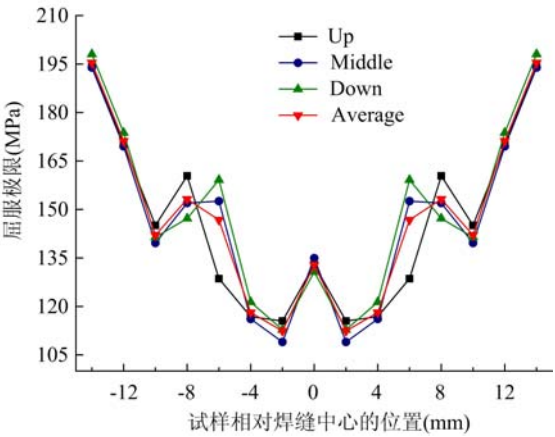


图 11 屈服极限分布规律

Fig. 11 Distribution law of yield limit

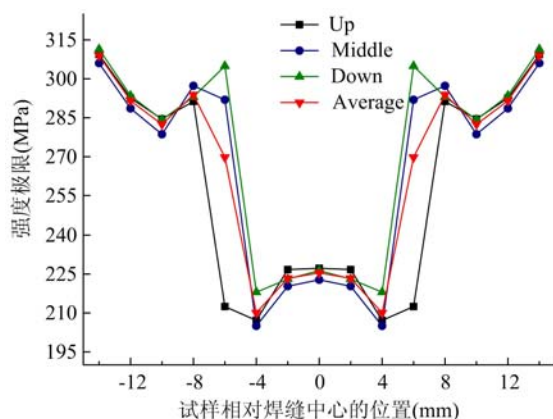


图 12 强度极限分布规律

Fig. 12 Distribution law of tensile strength

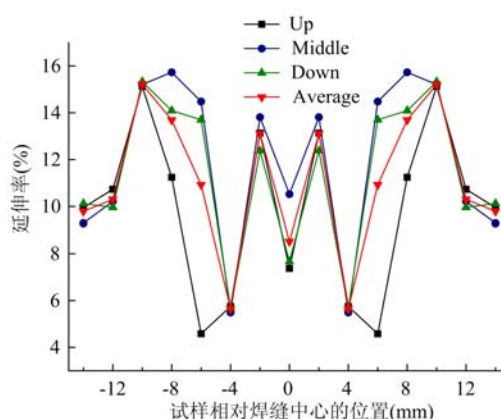


图 13 延伸率分布规律

Fig. 13 Distribution law of elongation

2.3 实验结果与分析

根据 GB/T228.1—2010, 对 24 个试样进行微拉伸实验, 得到焊接接头 24 个不同区域的力学性能参数, 包括弹性模量、屈服极限、强度极限和延伸率等。

3 实验结果分析及结论

通过对实验数据的分析, 得出如下结论:

(1) 纳米压痕实验和微拉伸实验都可以用来测试铝合金焊接接头的弹性模量, 且测试得到的弹性模量变化趋势和数值基本相同, 两个实验可以相互验证。厚度方向上弹性模量变化不显著, 水平方向上整体呈现焊缝区域和热影响区弹性模量比母材区域要高, 由于接头在焊制过程中, 焊缝区域产生塑性变形后再结晶, 出现硬核导致弹性模量较高。

(2) 由图 10~13 可以知道, 铝合金焊接接头各区域材料的力学性能不相同, 主要是因为 2219 铝合金材料在进行搅拌摩擦焊(FSW)过程中, 接头不同部位受到不同的热力作用而形成互不相同的微观组织, 不同的微观组织对焊缝不同区域的力学性能有非常显著的影响。

(3) 典型的铝合金 FSW 焊接接头, 由焊缝中心向外依次划分为焊核区(WNZ)、热机械影响区(TMAZ)、热影响区(HAZ)和母材区(BM)四个区域。其中焊核区与热机械影响区统称为焊缝中心区(WZ)。

距焊缝中心线 2mm 的范围内属焊核区, 该区域材料在焊制过程中, 受焊机搅拌头强烈的搅拌摩擦作用发生严重的塑性变形, 温度较高且应变速率大, 不断地形成再结晶晶核, 并发生有限长大; 此外在焊接过程中, 搅拌头对晶粒有一定的破坏作用, 晶粒细小且均匀, 不易生成明显的焊接缺陷。距焊缝中心线 2~6mm 的范围内属热机械影响区, 该区域是临近焊核区的外围区域, 在搅拌头的热力作用下发生不同程度的塑性变形和部分再结晶, 晶粒被拉长产生高度变形, 晶粒粗大, 易出现焊接缺陷。因此热机械影响区的屈服极限、强度极限和延伸率等力学性能会有明显的降低, 而焊核区的这些性能比热机械影响区稍微偏高。

距焊缝中心线 6~12mm 的范围内属热影响区, 该区域是热机影响区以外的部分区域, 没有受到搅拌头的机械搅拌作用, 仅受到摩擦热的影响, 晶粒尺寸稍微长大, 并没有发生塑性变形, 保持与母材相同的晶粒结构, 略微表现出粗化现象, 因此该区域材料的屈服极限和强度极限等性能比母材低。由于受到摩擦热作用影响, 相邻晶粒间的结合更为紧密, 所以延伸率稍高于母材。

(4) 通过实验获得了焊缝区域的详细材料参数, 为焊接接头破坏机理的研究提供了数据基础。

参考文献:

- [1] Ashley S. Steel cars face a weighty decision[J]. Mechanical Engineering, 1997, 119(2):56-61.

- [2] Preston R V, Shercliff H R, Withers P J, et al. Physically-based constitutive modeling of residual stress development in welding of aluminum alloy 2024[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(17):4973—4983.
- [3] James J F, Lawrence S K, Joseph R P. Aluminum alloy 2519 in military vehicles [J]. *Advanced Materials and Process*, 2002, 160(9):43—46.
- [4] Zhang J, Perez R J, Gupta M, et al. Damping behavior of particulate reinforced 2519 Al metal matrix composites [J]. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1993, 28(1):91—96.
- [5] 王元良, 孙鸿, 刘静安. 铝合金焊接接头微区性能试验研究[J]. *铝加工*, 1997, 19(3):35—38 (WANG Yuanliang, SUN Hong, LIU Jinan. Experimental study on micro region of aluminum alloy welded joints[J]. *Aluminium Fabrication*, 1997, 19(3):35—38(in Chinese))
- [6] 雷斌隆. 微型剪切试验与常规试验之间的关系[J]. *西南交通大学学报*, 1992, 3:67—73 (LEI Binlong. Correlation between the micro shear test and conventional test[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 1992, 3:67—73(in Chinese))
- [7] Lei B, Dorn L. Derivation of the characteristic virtues of the tensile and fracture mechanics test from the results of the microshear test[J]. *Sehweiseen and Schneiden*, 1992, 44(8):145—147.
- [8] 王志成, 乔及森, 陈剑虹, 等. 微冲压法评定铝合金焊接接头局部力学性能[J]. *金属锻压焊技术*, 2008, 37(1):82—85 (WANG Zhicheng, QIAO Jisen, CHEN Jianhong, et al. Assessment on local mechanical property of aluminium alloy welded joint by small ball punch test[J]. *Casting Forging Welding*, 2008, 37(1):82—85(in Chinese))
- [9] 车洪艳, 朱亮, 陈剑虹, 等. 6061 铝合金平板对接焊接接头拉伸性能研究[J]. *兰州理工大学学报*, 2008, 34(2):27—30 (CHE Hongyan, ZHU Liang, CHEN Hongyan, et al. Investigation of tension behavior of butt weld on plate of aluminum alloy 6061 [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2008, 34(2):27—30 (in Chinese))
- [10] Ambriz R R, Chicot D, Benseddq N, et al. Local mechanical properties of the 6061-T6 aluminum weld using micro-traction and instrumented indentation[J]. *European Journal of Mechanics*, 2011, 30(3):307—315.
- [11] 汤忠斌, 徐绯, 许泽建, 等. 焊缝结构微区材料力学性能研究[J]. *机械强度*, 2010, 32(1):58—63 (TANG Zhongbin, XU Fei, XU Zejian, et al. Research on Mechanical Properties of Micro-zones of Welding line[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2010, 32(1):58—63(in Chinese))

Experimental Study of Mechanical Properties of Aluminum Alloy Welded Joint

DU Jia-zheng¹, ZHAO Zhen-yang^{1,2}, HUANG Cheng³, WU Hui-qiang³, ZHANG Xiao-ying³

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. BAIC BJEV, Beijing 102606, China;

3. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: Aluminum alloy welded structure is a common structure in aerospace field. In experimental process, low strength failure appeared at the welded joint, which is mainly caused by the incompatible deformation of welded joint. In order to better study the failure mechanism of welded joint, nano-indentation experiment and micro tensile experiment were adopted to study the mechanical properties of material in welded joint micro-zone. The distribution of elastic modulus, yield limit, ultimate strength and ductibility in different areas of welded joint was obtained, the variation tendency of mechanical property in the transition area from weld center to base material was analyzed, which provides the data base for study of welded joint failure mechanism.

Keywords: aluminum alloy; welded joint; mechanical properties; nano-indentation experiment; micro tensile experiment