第 31 卷第 5 期 Volume 31 Number 5 2021 年 5 月 May 2021

DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37816

5182-O 铝合金板材自冲铆接工艺参数 对接头组织和性能的影响



毛晓东,刘庆永,李 利,谷宁杰,傅 垒,赵丕植 (中铝材料应用研究院有限公司,北京 102209)

摘 要:在 D、F两种底模作用下,采用4种长度的铆钉(5.0 mm、5.5 mm、6.0 mm和6.5 mm)对5182-O铝合金板材1.5 mm+1.5 mm组合接头进行自冲铆接试验,对接头剖切面进行关键特征值测量,利用EBSD、硬度测试及拉伸试验对接头的组织和强度、吸能进行了研究;并基于5182-O板材在不同应变速率下的本构模型及Johnson-Cook损伤模型,建立自冲铆接成形过程模型,并与试验结果进行对比验证。结果表明:随着铆钉长度的增加,接头的强度、吸能呈先提高后降低的变化趋势,铆钉长度为6.0 mm时,接头性能最佳;在相同铆钉长度下,D组接头力学性能明显高于F组,原因是D组接头板材变形程度明显大于F组,加工硬化程度更高。利用DEFORM-2D软件对自冲铆接成形过程进行模拟,仿真结果与真实试验误差在15%以内,验证了模型的准确性。

关键词: 5182-O 铝合金; 自冲铆接; 力学性能; 电子背散射衍射; 变形组织 文章编号: 1004-0609(2021)-05-1239-14 中图分类号: TG146.2 文献标志码: A

引文格式: 毛晓东,刘庆永,李 利,等. 5182-O 铝合金板材自冲铆接工艺参数对接头组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(5): 1239-1252. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37816 MAO Xiao-dong, LIU Qing-yong, LI Li, et al. Effect of technological parameters on microstructure and properties of self-piercing riveting joints of 5182-O aluminum alloy sheets[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(5): 1239-1252. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37816

随着汽车工业技术的不断发展,对汽车的经济 性提出了更高的要求,这使得汽车制造商更加重视 车辆轻量化技术的研究,轻型材料(如铝合金)的应 用是减轻车身质量的一种有效方法^[1]。然而,许多 轻型材料的焊接性能并不理想,甚至无法焊接,给 材料的连接工艺带来了巨大挑战^[2–3]。因此,板材 自冲铆接技术为轻型薄板材料的连接提供了一种 解决办法。图 1 所示为自冲铆接工艺过程示意 图^[4–5],整个过程分为压紧、冲裁、扩展和冲铆完 成四个阶段。

目前自冲铆接技术广泛应用在铝合金、钢铝混 合接头的连接,是一种可靠的板材连接技术。针对 该技术,国内外研究学者进行了一系列大量研究, 主要集中在铆接工艺和接头性能的试验和模拟仿 真等方面。MA 等^[6]通过对不同铆模比组合研究, 研究铆钉和模具尺寸对铝合金 6061-T6 铆接性能的 影响;HAN 等^[7]系统研究了涂层对铝合金与钢板自 穿刺铆接接头质量和性能的影响;JEONG 等^[8]通过 对铝合金板材本身强度对自冲铆接强度影响规律 研究,表明自冲铆接接头强度随着板材本身强度的 提高而明显提高;李晓静等^[9]针对自冲铆接技术, 研究了不同规格铆钉对不同厚度异种板材连接性 能的影响;庄蔚敏等^[10]通过对 5754 铝合金及 Q235 钢铝异质自冲铆接头的剥离性能研究,并基于 MMC 失效准则,利用 LS-DYNA 建立了钢铝异种 材料自冲铆接有限元失效模型;邓成江等^[11]开展了

基金项目:国家新材料生产应用示范平台资助项目(TC180A6MR)

收稿日期: 2020-07-22; 修订日期: 2020-12-04

通信作者: 毛晓东, 工程师, 硕士; 电话: 010-66600113; E-mail: Maoxiaodong@cmari.com



图1 自冲铆接工艺过程示意图

Fig. 1 Diagram of process of self-piercing riveting: (a) Preload; (b) Penetration; (c) Expansion; (d) Seated; 1—Punch; 2—Rivet; 3—Riveting die; 4—Blank holder

自冲铆接头失效机理研究,发现接头失效与材料力 学性能、材料厚度及摩擦条件有关。

随着铝合金材料在车身上的应用越来越广 泛,国内外科研机构及汽车制造商对自冲铆接技术 的研究也越来越深入,但对于铆钉参数、底模参数 对接头性能的影响规律及铆接过程材料的变形行 为研究缺乏,对成形接头缺少相应的质量分析方 法^[12-14]。本文以5182-O态1.5 mm 厚度的铝合金板 材为研究对象,系统开展铆钉长度及底模类型对接 头性能影响规律的研究,深入分析冲铆过程母材的 变形行为;并采用 DEFORM-2D 软件,基于不同应 变速率下的材料本构模型及 Johnson-Cook 损伤模 型,建立自冲铆接成形仿真模型,并将关键几何参 数与真实试验值进行比较,验证模型的准确性,实 现自冲铆接成形工艺的仿真预测。

1 实验

1.1 试验材料及铆接方法

试验材料为 5182-O 铝合金板材,上下板厚度 均为 1.5 mm,其化学成分及力学性能如表 1、2 所 示。待铆接板材规格为 120 mm×40 mm×1.5 mm(厚度),选择德国 bollholf 公司生产的镀锌钢铆 钉,直径为 *d* 5.3 mm,硬度为(41±2)HRC,根据板 材厚度,铆钉长度选择 5 mm、5.5 mm、6.0 mm 以 及 6.5 mm 四种规格;底模选择如图 2 所示的 D 和 F 两种类型。

自冲铆接设备(型号: SWX-DSF2019)采用行程 控制,试验中调整冲头行程,保证铆钉压入板材后 钉帽与上板材平齐;保压2s后释放,可保证铆接

	1	5			
Element —	Mass fraction/%				
	Standard value	Measured value			
Si	≪0.2	0.054			
Fe	≤0.35	0.16			
Cu	≪0.15	0.039			
Mn	0.2-0.5	0.24			
Mg	4.0-5.0	4.84			
Cr	≤0.1	0.021			
Ti	≪0.1	0.02			
Other	≪0.20	0.018			
Al	Bal.	Bal.			

 Table 1
 Chemical components of 5182-O aluminum alloy

表2 5182-O 铝合金力学性能

表1 5182-O 铝合金化学成分

Table 2	Mechanical properties of 5182-O aluminum alloy	

Hardness, HV	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_{\rm b}/{ m MPa}$	Elongation/%		
75	140	278	25		

质量的稳定;铆接速度设置为60mm/s。

1.2 组织及性能评价方法

试样铆接完成后,将铆接接头沿铆钉子午面切 取样品,经砂纸打磨、机械抛光后用体式显微镜观 察接头横断面的宏观形貌,并测量接头的关键几何 尺寸,主要有钉脚张开值 D、自锁值 u、钉头高度 h 及底厚值 s,如图 3 所示,用于评价接头质量的合 格性。

采用显微维氏硬度仪对接头剖切面不同位置 的显微硬度进行测量;采用如图4所示的两种接头 试样,分别测试接头的抗剪强度和抗拉强度,测试



图2 铆钉、底模剖面图

Fig. 2 Cross-section draw of rivet and dies (Unit: mm): (a) Rivet; (b) D-die; (c) F-die





Fig. 3 Key geometric dimensions of self-piercing riveting







速度为 10 mm/min,记录接头的失效载荷以及最大 载荷处的失效位移,用于评价接头的力学性能;采 用扫描电子显微镜对接头失效处的断口进行显微 观察。将抛光后的接头横断面试样在体积分数为 10%的高氯酸无水乙醇溶液中进行电解抛光,抛光 液温度 0~5 ℃,抛光电压 20 V,抛光时间 20 s; 采 用带有电子背散射衍射(EBSD)探头的 TESCAN MIR3 场发射扫描电子显微镜进行电子背散射衍射 试验,测试电压 20 kV,标定步长 0.9 µm,利用软 件 HKL Channel 5 对采集的数据进行处理。

2 结果与讨论

2.1 截面形貌

图 5 所示为两种底模作用下不同铆钉长度自冲 铆接头横断面宏观形貌,并测量了接头关键几何参 数。由图 5 可以看出,各组接头横断面均呈轴对称 分布,未产生开裂、自锁破坏等缺陷。这表明在相 同的驱动设备参数参数下,各组接头钉头高度均控 制在 0.3~0.5 mm 之间,钉脚未刺穿下板材,外观质 量良好。

图6所示为两种底模接头钉脚张开值D与自锁

值 u 随铆钉长度的变化规律,可以看出,对于 D 型 底模,随着铆钉长度 L 的增加,钉脚张开值 D 与自 锁值 u 逐渐增大;当铆钉长度增大到 6.5 mm 时(见 图 5(d)),铆钉管脚发生了一定程度的弯曲变形,这 是由于铆钉长度过长,铆接过程中在冲头和底模的 作用下发生剧烈的挤压作用而发生变形失稳。对于 F 型底模,随着铆钉长度 L 的增加,钉脚张开值 D 逐渐增大,而自锁值 u 呈先增加后减小的变化;当 铆钉长度为 6.0 mm(见图 5(g))时,自锁值达到最大; 继续增加铆钉长度后,自锁值大幅减小,并且铆钉 管脚与下板结合处产生了缝隙,表明当铆钉过长 时,钉脚的张开未形成有效的机械自锁,降低了接



图 5 不同铆钉长度下接头的横断面形貌

Fig. 5 Specimens for mechanical properties and die of cross drawing: (a) D-L5.0 mm; (b) D-L5.5 mm; (c) D-L6.0 mm; (d) D-L6.5 mm; (e) F-L5.0 mm; (f) F-L5.5 mm; (g) F-L6.0 mm; (h) F-L6.5 mm



图6 横断面关键几何尺寸

Fig. 6 Key geometric dimensions of all cross sections

头质量。从图 6 中还可以发现,两种接头的钉脚张 开值 D 与自锁值 u 呈明显的正相关,表明铆接过程 中钉脚的张开程度对接头质量影响较大。

2.2 力学性能

自冲铆接接头的力学性能主要涉及最大剪切 力、最大抗拉力以及相应条件下的失效吸能值。采 用图 4 所示的力学性能试样对不同参数下的接头力 学性能进行测试,进行 5 组重复试验并取平均值, 相应的载荷-位移曲线如图 7 所示。通过对比可以 看出,不同底模的接头在弹性失效阶段表现出显著 差异,对于 D 型底模,在弹性阶段,不同铆钉长度 的接头失效曲线接近重合,表明接头自锁质量良 好;而对于 F 型底模,在弹性失效阶段,不同长度 的铆钉接头表现出较大差异,随着铆钉长度提高, 曲线斜率呈先增大后减小的变化趋势,表明 F 型底 模对钉长因素敏感性较高,当铆钉长度较小时,接 头自锁质量较差。

将以上各组接头的失效载荷及失效吸能值进 行对比分析,如图 8 所示。对于两种类型底模接头, 接头的剪切失效载荷随着铆钉长度的增加呈先增 加后减小的变化规律,当铆钉长度 *L*=6.0 mm 时, 两组接头剪切失效载荷均达到最大值,分别为 6918 N和 5425 N;接头的抗拉失效载荷则呈现先提高后 趋于稳定的变化规律,当铆钉长度 *L*=6.0 mm 时, 两组接头抗拉失效载荷达到较高水平,分别为 3034 N和 2568 N,接头性能较好。从图中还可以看出,



图 7 接头载荷-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of joints: (a) D-shear load; (b) D-tensile load; (c) F-shear load; (d) F-tensile load



Fig. 8 Mechanical properties of joints

D型底模接头的失效载荷与失效吸能值均明显高于 F组,说明D型底模有利于提高铆钉张角而形成更 好的机械自锁结构,提高接头力学性能。

图 9 所示为两组底模不同参数下接头的失效形式。结果表明,对于 D 型底模,当铆钉长度为 5.0 mm时,接头的剪切失效为自锁结构破坏,铆钉从下板脱落,上下板未撕裂;接头的抗拉失效表现为铆钉从下板拉出;当铆钉长度提高到 5.5 mm 时,接头同样发生相同的破坏形式,此时上板材被轻微撕裂;当铆钉长度继续增加到 6.0 mm 时,剪切接头的破坏发生在上板从钉帽出拉脱撕裂,自锁结构未破坏,抗拉接头同样发生钉帽从上板拉出,下层自

锁结构未破坏,说明此时接头成形质量较好,自锁 强度较大;当继续增加铆钉长度到 6.5 mm 时,剪 切接头发生组合失效,自锁结构破坏并将下板撕 裂,上板发生撕裂破坏,这是由于铆钉过长使得下 板剩余厚度较小,在剪切作用下铆钉产生一定程度 的翻转将下板剩余厚度撕裂,加速了自锁结构的破 坏,使接头强度明显降低。

对于 F 型底模,接头的失效规律表现出与 D 型 底模相同的变化趋势,随着铆钉长度的提高,接头 的失效位置逐渐从接头的机械自锁结构破坏变为 钉帽从上板脱落、上板材被撕裂。

2.3 硬度

力学性能研究结果表明,两组底模下,当铆钉 规格为*d*5.3 mm×6.0 mm时,接头性能均最佳。对 两种底模下接头的母材硬度进行测试,测试位置如 图 10 所示。结果显示,接头处上下板材硬度大致 呈"M"型分布,且以铆钉中轴线呈轴对称分布。 原始板材硬度约为 75HV,铆接过程中接头处板材 由于变形产生了不同程度的加工硬化。在铆钉临近 位置(上板:±2、±3;下板:±3、±4)硬度值最大, 最高可达 139HV;这是由于板材在铆钉刺穿过程中 受到剧烈的剪切作用而产生应变硬化。从图 10 中 还可以明显看出,在铆钉管脚内部,D型底模接头



图9 接头失效形式

Fig. 9 Failure mode of joints: (a) D-shear load; (b) D-tensile load; (c) F-shear load; (d) F-tensile load



图 10 硬度测试位置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of hardness test locations: (a) D-die; (b) F-die



图 11 接头的硬度值

Fig. 11 Hardness values of joints

的上下板硬度明显高于 F 型,这是由于铆接过程中 受 D 型底模凸锥的挤压作用,滞留在管脚内部的母 材受到强烈的挤压作用而产生形变硬化,使硬度值 明显上升。

2.4 显微组织

自冲铆接工艺在铆钉刺穿上板材并与下板形 成自锁结构的过程中,与铆钉附近位置的板材发生 剧烈的剪切作用,同时承受底模的挤压作用,导致 接头处板材的力学性能和组织发生变化。选择铆钉 规格为 *d* 5.3 mm×6.0 mm、D 和 F 两种底模接头, 对上下板材不同位置进行 EBSD 测试,选择接头处 典型的六个位置进行组织观察,分别是:上板铆钉 外侧区(I₁)、上板铆钉内侧区(I₂)、上板铆钉中间 区(I₃);下板铆钉外侧区(II₁)、下板铆钉内侧区(II₂) 和下板铆钉中间区(II₃),如图 12 所示。



图 12 显微组织测试位置示意图

Fig. 12 Schematic diagrams of testing positions for microstructure: (a) D-die; (b) F-die

图 13(a)所示为 5182-O 原始板材晶粒取向分布 图,图中黑色细线代表低角度晶界(Low angle grain boundaries,LAGBs, 2°~15°),黑色粗线代表高角度 晶界(High angle grain boundaries,HAGBs, >15°)。 可以看出,5182-O 原始板材为完全再结晶组织,晶 粒成等轴状分布,晶粒大小约 20~30 µm。从图 13(b) 中的 {111} 极图可以看出,原始母材主要为 {001} 〈100〉 Cube 再结晶织构。由晶界统计分布图 13(c)可以看出,组织中主要为高角度再结晶晶界, HAGBs 约为 89.2%,LAGBs 约为 10.8%。

图 14 所示为两组底模接头上板铆接变形区组 织形貌。从晶粒取向分布图可以明显看出,相比于 母材,剪切变形区(见图 14(a)和(b)、(d)和(e))组织 由最初的等轴晶变为细长的变形组织,晶粒拉长、 破碎,且越接近铆钉侧,晶粒越细长。两组底模下 铆钉中心位置(见图 14(c)和(f))主要受不同程度的垂 直压力而发生一定程度的变形,D型底模由于凸锥 的作用导致上板压缩变形程度较大,晶粒更扁平; 从晶粒取向分布图中还可以看出,两组接头变形区





图 13 原始母材晶粒取向分布图、{111} 极图及晶界统计分布图

Fig. 13 Orientation distribution map (a), {111} pole figure (b) and misorientation angle distributions of initial sheet (c)



图 14 上板变形区晶粒取向分布图

Fig. 14 Orientation distribution maps in deformation zones of upper sheets: (a) D- I₁; (b) D- I₂; (c) D- I₃; (d) F- I₁; (e) F- I₂; (f) F- I₃

晶粒内部出现了大量低角度晶界。将上板变形区不同位置高低角度晶界比例进行统计,如图 15 所示。 结果表明,两组接头的 I₂区 ω(LAGBs)比例最大, 分别达到了 37.3%和 35.2%, I₁次之, I₃最小, 表明 I₂ 区板材受铆钉剪切以及内腔挤压的双重作 用,晶粒内部产生大量的位错和亚结构(见图 14 中 黑色细线),使得 ω(LAGBs)显著提高^[15-18];而 I₁ 区主要受铆钉的剪切作用,产生的位错和亚结构较



图 15 上板变形区晶界比例图



少, 晶粒也相对粗大; I₃ 区板材在铆接过程中主 要受下板与铆钉内腔的挤压作用而发生轻微变形, 晶粒未发生破碎, 只在晶粒内部产生了亚结构, ω(LAGBs)较原始板材有少量提高; 对比两组底模 下的 I₃ 区(见图 14(c)和(f)), 可以明显看出, 由于 D 型底模凸锥的挤压作用, 上板 I₃ 区产生较大变形, 产生的位错和亚结构显著增多, 相比 F 型底模产生 了较大的形变硬化作用。

图 16 所示为两组底模接头下板材变形位置晶 粒取向分布图。在铆钉外侧剪切变形区 II₁(见图 16(a)和(d)),下板材组织沿铆接变形方向被轻微拉 长, 晶粒内部出现大量低角度晶界; 在铆钉内侧剪 切变形区 II₂, 板材受铆钉钉脚的剪切和内腔的挤 压作用, 晶粒显著拉长, 并产生破碎; 而在铆钉中 心位置 II₃区, 下板材在铆接过程受到底模的挤压 作用而变形, 晶粒内部产生了大量亚结构。由图 17 晶界种类统计图中可以发现, 变形区不同位置 低角度晶界百分比相对原始板材均有不同程度的 提高, 且随着变形程度的提高, 低角度晶界百分比 呈逐渐提高的趋势, 这是由于铆接过程的剪切应变 和底模的挤压作用, 晶粒发生了变形、拉长甚至破 碎, 产生了位错和亚结构, 导致低角度晶界百分含 量提高。

3 5182-O 自冲铆接成形有限元分析

自冲铆接成形模型涉及板材、铆钉、冲头、压 边圈与底模等,建立如图 18(a)所示的 3D 几何模型, 并基于自冲铆接工艺的对称性,利用 DEFORM 软 件建立 5182-O 铝合金板材自冲铆接成形 1/2 对称 2D 模型,如图 18(b)所示。根据上述研究结果,对 于 5182-O 板材 1.5 mm+1.5 mm 厚度组合接头,采 用 *d* 5.3 mm×6.0 mm 规格铆钉,在两种底模作用下 的铆接成形过程进行仿真分析,研究其变形过程, 并与真实试验结果进行对比,验证模型的准确性。



图 16 下板变形区晶粒取向分布图

Fig. 16 Orientation distribution maps in deformation zones of bottom sheets: (a) D-II₁; (b) D-II₂; (c) D-II₃; (d) F-II₁; (e) F-II₂; (f) F-II₃



图 17 下板变形区晶界比例图

Fig. 17 Grain boundaries ratio statistical chart in deformation zones of bottom sheets



图 18 自冲铆接几何模型

Fig. 18 Geometric model of self-piercing riveting: (a) 3D model; (b) 2D model; 1—Punch; 2—Blank holder; 3—Rivet; 4—Upper sheet; 5—Bottom sheet; 6—Die

3.1 材料本构关系

依据国家标准《GBT 228—2002 金属材料室温 拉伸试验方法》,对 5182-O 板材进行不同速度单向 拉伸试验,获得材料基于不同加载速率下多应变率 水平的力学特性,确定 5182-O 在不同应变速率下 的本构模型。试验结果如图 19 所示。结果表明, 5182-O 板材应变率效应不明显,在真应变在 0.1 以 下阶段,不同应变速率下的硬化曲线相近;随着应 变速率的提高下,材料的断后伸长率明显提高。

3.2 材料损伤模型

在实际工程中,材料的受力情况通常比较复 杂,变形常常不只是简单的拉、压、扭转等基本变 形。而是两种或两种以上基本变形的组合,其应力 状态为复杂应力状态。



图 19 5182-O 应力-应变曲线

Fig. 19 Stress-strain curves of 5182-O sheet: (a) Eng stress-eng strain curves; (b) True stress-true strain curves

材料所受应力状态不同时,材料内产生的塑性 变形及应力集中程度将不同,材料断裂机理也将发 生变化,通常以应力三轴度(Stress triaxiality) η 作为 复杂应力状态参数,即静水压力p与 Mises 等效应 力q比值的负数,见式(1)。

$$\eta = -\frac{p}{q} = -\frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3}{\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}}$$
(1)

Johnson-Cook 损伤模型是以应变为标准的失效 准则^[19-20],但该模型的失效应变除了是应力三轴 度、应变率的函数,也是温度的函数,由特定的公 式表达,参见式(2)。其中 d₁、d₂和 d₃是考虑了失 效应变受应力三轴度影响的参数;d₄为考虑了失效 应变受应变率影响的参数;d₅则是考虑了失效应变 受温度变化影响的参数。其中 d₃与原公式有所不 同,带有一个负号,主要是考虑到大多数材料的失 效应变伴随着应力三轴度的增长而降低。自冲铆接 (2)

过程可视为温度恒定,并且采用准静态拉伸, $d_4 = d_5$ 均为 0,因此公式可简化为式(3)的形式。 $\overline{\varepsilon}_{\rm D}^{\rm pl} = [d_1 + d_2 \exp(-d_3\eta)] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\overline{\dot{\varepsilon}}^{\rm pl}}{\overline{\dot{\varepsilon}_0}} \right) \right] (1 + d_5 \hat{\theta})$

$$\overline{\varepsilon}_{\mathrm{D}}^{\mathrm{pl}} = [d_1 + d_2 \exp(-d_3\eta)] \tag{3}$$

3.3 失效参数的确定

采用准静态穿孔、缺口等试验获得 5182-O 铝 合金板材在不同应力状态下的力学性能及失效参 数,如图 20 所示。通过仿真模拟结果与试验结果 进行验证,两者吻合良好,如图 21 所示。

3.4 结果分析

图 22 所示为两种底模作用下板材的应变结果。 可以发现,对于 D 型底模,在铆接过程中收到凸台



的挤压作用而使铆钉内下板材发生剧烈变形,产生 较大塑性应变,为变形最大位置;而对于F型底模, 板材的最大应变点发生在上板切断位置。

对铆接成形后的接头,测量钉脚直径(D)、自锁 量(u)以及底部厚度(s),并与实际接头进行对比,如 表 3 所示。结果表明,对于 D 型底模,钉脚直径 D、 自锁量 u 以及底部厚度 s 的模拟值与实际值之间的 误差分别为 14.2%、4.9%和 5.7%; F 型底模,钉脚 直径 D、自锁量 u 以及底部厚度 s 的模拟值与实际 值之间的误差分别为 2.4%、10.9%和 8.0%,模拟结 果与试验值之间的相对误差均在 15%以内,满足工 程设计精确度要求。

两种底模模拟接头的关键几何参数与实际接 头接近,误差均控制在15%以内,从而验证了仿真 结果的正确性与可靠性,其对铆接工艺选择及铆 钉、底模的选择设计具有重要的指导意义。



图 20 穿孔、缺口试样几何尺寸





图 21 5182-O 板材失效模型

Fig. 21 Failure models of 5182-Osheet: (a) Tensile perforated specimen; (b) Tensile notched specimen



图 22 两种底模下 5182-O 板材自冲铆接过程应变云图

Table3 Comparison of simulated and actual results

Fig. 22 Strain contours of 5182-O sheet under two kinds of bottom dies during self-piercing riveting process: (a) D-penetration; (b) D-seated; (c) F-penetration; (d) F-seated

Die	D/mm		u/mm		s/mm				
type	Simulated value	Actual value	Error/ %	Simulated value	Actual value	Error/ %	Simulated value	Actual value	Error/ %
D	7.643	7.75	14.2	0.618	0.65	4.9	0.365	0.35	5.7
F	7.094	7.27	2.4	0.454	0.51	10.9	0.276	0.30	8.0

表3 模拟与实际对比

4 结论

对 5182-O 态 1.5 mm+1.5 mm 板材接头组
 6,随着铆钉长度的增加,接头的强度及吸能呈先
 提高后降低的变化趋势;当铆钉长度为 6.0 mm 时,接头强度及吸能最佳;接头的失效方式逐渐从机械
 自锁结构破坏变为钉帽从上板脱落、上板材被撕裂;在相同铆钉长度下,D 型底模接头的钉脚张开值及
 自锁值较 F 组大,有利于提高接头的强度及吸量。

2) 铆接接头变形区上下板硬度大致呈"M"型分布,越靠近铆钉位置,剪切作用越强烈,硬度 值较原始板材显著提高,最大可达139HV;D型底 模由于凸锥的挤压作用,铆钉内部变形区板材硬度 显著高于 F 型底模,有利于提高强度及吸量。

3) 铆接接头变形区上下板材受到铆钉强烈的 剪切作用,板材组织由最初的等轴晶变为细长的变 形组织,晶粒发生拉长、破碎,产生不同程度的位 错和亚结构,使得低角度晶界比例提高;D型底模 铆钉内部挤压变形区板材的低角度晶界比例明显 大于F组,加工硬化程度更高。

4) 采用拉伸及缺口试验获得了 5182-O 态铝合 金板材的本构模型及失效参数,并基于 Johnson-Cook 损伤模型成功建立了两种底模下的自冲铆接 成形模型,接头关键几何参数与真实试验误差在

第31卷第5期

1251

15%以内,从而验证了模型的准确性,为实际工艺选择提供理论支撑。

REFERENCES

- [1] 高阳.汽车轻量化技术方案及应用实例[J].汽车工程学报, 2018, 8(1): 1-9.
 GAO Yang. Technical schemes and implementation examples of automobile lightweight[J]. Journal of Automotive Engineering, 2018, 8(1): 1-9.
- [2] 李 报,陈思杰,赵丕峰. 汽车轻量化先进焊接技术研究进展[J]. 热加工工艺, 2018, 47(3): 13-17, 22.
 LI Bao, CHEN Si-jie, ZHAO Pi-feng. Research progress of advanced welding technology for automobile lightweight[J].
 Hot Working Technology, 2018, 47(3): 13-17, 22.
- [3] 陈晓辉,钟志平,陆 辛. 车用铝合金连接技术的研究进展与应用[J]. 热加工工艺, 2016, 45(11): 5-8.
 CHEN Xiao-hui, ZHONG Zhi-ping, LU Xin. Research progress and application of joining technology of aluminum alloy for automobile[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(11): 5-8.
- [4] HUANG H, DU D, CHANG B H, et al. Distortion analysis for self-piercing riveting of aluminium alloy sheets[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2007, 12(1): 73-78.
- [5] 万淑敏, HU S Jack, 李双义, 等. 半空心自冲铆接的工艺 参数及铆接质量判定[J]. 天津大学学报, 2007, 40(4): 494-498.
 WAN Shu-min, HU S Jack, LI Shuang-yi, et al. Process parameters and joint evaluation of self-piercing riveting with

half-hollow rivets[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(4): 494-498.

- [6] MA Y W, LOU M, LI Y B, et al. Effect of rivet and die on self-piercing rivetability of AA6061-T6 and mild steel CR4 of different gauges[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 251: 282–294.
- [7] HAN L, CHRYSANTHOU A. Evaluation of quality and behaviour of self-piercing riveted aluminium to high strength low alloy sheets with different surface coatings[J]. Materials & Design, 2008, 29(2): 458–468.
- [8] JEONG T, KIM M, HUN R, et al. Joint quality study of self-piercing riveted aluminum and steel joints depending on the thickness and strength of base metal[J]. Journal of Welding and Joining, 2019, 37(3): 212–219.

[9] 李晓静,李双义,张连洪,等. 自冲铆接工艺的研究及改

进措施[J]. 天津理工大学学报, 2005, 21(5): 61-64.

LI Xiao-jing, LI Shuang-yi, ZHANG Lian-hong, et al. Study of technology of self-piercing riveting and improved approach[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2005, 21(5): 61–64

- [10] 庄蔚敏, 刘 洋, 王鹏跃, 等. 钢铝异质自冲铆接头剥离失效仿真[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(6): 1826–1835.
 ZHUANG Wei-min, LIU Yang, WANG Peng-yue, et al. Simulation on peeling failure of self-piercing riveted joints in steel and aluminum alloy dissimilar sheets[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2019, 49(6): 1826–1835.
- [11] 邓成江,何晓聪,邢保英,等. 基于试验的自冲铆接头失效机理分析[J]. 热加工工艺, 2013, 42(17): 220-223.
 DENG Cheng-jiang, HE Xiao-cong, XING Bao-ying, et al. Analysis on failure mechanism of self-piercing riveted joints based on tests[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(17): 220-223.
- [12] 万淑敏,胡仕新,张连洪,等.模具工艺参数对自冲铆接
 工艺过程及铆接质量的影响[J].机械设计,2008,25(4):
 62-65.

WAN Shu-min, HU Shi-xin, ZHANG Lian-hong, et al. Influence of die process parameters on the process and quality of self-piercing riveting[J]. Journal of Machine Design, 2008, 25(4): 62–65.

[13] 黄舒彦. 铝钢异种金属自冲铆接工艺与质量评价研究[D].
 上海: 上海交通大学, 2011.
 HUANG Shu-yan. Process and quality evaluation research on

self-piercing riveting for dissimilar metal aluminum/steel[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.

- [14] HOANG N H, LANGSETH M. Aluminium self-piercing rivet's failure: Testing and numerical analyses[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 541/542: 1355–1359.
- [15] 茹祥坤, 刘延光, 夏 爽, 等. 形变及热处理对白铜 B10 合金晶界特征分布的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(8): 2176-2181.
 RU Xiang-kun, LIU Yan-guang, XIA Shuang, et al. Effect of deformation and heat-treatment on grain boundary distribution character of cupronickel B10 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(8): 2176-2181.
- [16] 廖荣跃, 叶凌英, 陈明安, 等. 7B04 铝合金超塑性变形的 组织演变与变形机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(12): 2931-2938.
 LIAO Rong-yue, YE Ling-ying, CHEN Ming-an, et al. Microstructure evolution and deformation mechanism of

7B04 aluminum alloy under superplastic deformation[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2018, 49(12): 2931–2938.

- [17] XIA Shuang, ZHOU Bang-xin, CHEN Wen-jue. Grain cluster microstructure and grain boundary character distribution in alloy 690[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009, 40(12): 3016.
- [18] 张成行,曹 字,曹玲飞,等.异种铝合金搅拌摩擦焊接 头的显微组织、力学及腐蚀性能[J].中国有色金属学报, 2019, 29(10): 2255-2265.

ZHANG Cheng-hang, CAO Yu, CAO Ling-fei, et al. Microstructure, mechanical and corrosion properties of dissimilar friction stir welded aluminum alloys joints[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(10): 2255–2265.

- [19] 季玉辉. 基于 Johnson-Cook 模型的硬物损伤数值模拟研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
 JI Yu-hui. Numerical simulation of hard-body foreign object damage based on Johnson-Cook model[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [20] 朱 浩. 车用铝合金变形损伤和断裂机理研究与材料表 征及有限元模拟[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008. ZHU Hao. Study on deformation damage and fracture mechanism and materials characterization for alumimum automotive with FEM simulation[D]. Lanzhou University of Technology, 2008.

Effects of technological parameters on microstructure and properties of self-piercing riveting joints of 5182-O aluminum alloy sheets

MAO Xiao-dong, LIU Qing-yong, LI Li, GU Ning-jie, YANG Hao, FU Lei, ZHAO Pi-zhi

(CHINALCO Materials and Application Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: Under the actions of D-die and F-die, four lengths of rivets (5.0 mm, 5.5 mm, 6.0 mm and 6.5 mm) were used to conduct self-piercing riveting tests on the joints of 1.5 mm+1.5 mm 5182-O aluminum alloy plates. The key characteristic values were measured on the profiles of the joints. The microstructure and mechanical properties of the joints were studied by using EBSD, hardness tests and tensile tests. Based on the constitutive models of 5182-O plates under different strain rates and the Johnson-Cook damage model, the forming process of self-piercing riveting was established and the simulation results were compared with the experimental results for verification. The results show that the mechanical properties of the joints increase firstly and then decrease with the increase of rivet length. When the length is 6.0mm, the mechanical properties of the joints are optimum. Under the same length of rivet, the mechanical properties of joints in group D are significantly higher than those in group F. The degree of deformation in group D is obviously higher than that in group F, resulting in higher work-hardening capacity. Software DEFORM-2D was adopted to establish the forming model of self-piercing riveting. The simulation results show an error of less than 15%, compared with the results by experiment, which verifies the accuracy of the model.

Key words: 5182-O aluminum alloy; self-piercing riveting; mechanical properties; EBSD; deformation microstructure

(编辑 何学锋)

Foundation item: Project(TC180A6MR) supported by the National New Material Production and Application Demonstration Platform of China

Received date: 2020-07-22; Accepted date: 2020-12-04

Corresponding author: MAO Xiao-dong; Tel: +86-10-66600113; E-mail: Maoxiaodong@cmari.com