

国产 7B50 铝合金大规格厚板喷丸成形曲率变化规律研究

欧阳轶¹ 邢少敏¹ 张万瑜²

(1.中航西飞民用飞机有限责任公司; 2.西安飞机工业集团股份有限公司)

摘 要 采用喷丸成形工艺对国产 7B50 铝合金进行成形工艺研究,通过对平板件和单筋试验件进行不同参数的喷丸成形基础测试,获得曲率半径与喷丸成形工艺参数的对应关系,并在三筋试验件上验证,获得三筋试验件展向最小曲率半径及其对应的弦向曲率半径。结果表明,随着平板厚度和移动速度的增加,平板试验件弦向曲率半径递增;随着气压增大,平板试验件弦向曲率半径递减。不论是自由状态还是预应力状态,随着移动速度增加,单筋试验件展向曲率半径递增。采用预应力方式获得展向最大曲率变化的马鞍形面,三筋试验件展向最小曲率半径达到 37 692 mm,相应的弦向曲率半径为 5 385 mm。

关键词 7B50 铝合金;喷丸成形;正交试验;曲率半径

中图分类号 TG156;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.02.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Curvature Variation Law of Large-size Thick Plate Shot Peening for Domestic 7B50 Aluminum Alloy

Ouyang Yi¹,Xing Shaomin¹,Zhang Wanyu²

[1. AVIC XAC Commercial Aircraft Co., Ltd.; 2. AVIC Xi'an Aircraft Industry(Group) Co., Ltd.]

Abstract: The domestic 7B50 aluminum alloy was investigated by shot peening process, and the corresponding relationship between the curvature radius and the shot peening process parameters was obtained through the basic test of shot peening with different parameters on the flat plate and the single-rib test piece, which was verified on the tri-rib test piece to acquire the minimum span-direction curvature radius and corresponding chord-direction curvature radius. The results indicate that: ① for flat test pieces, as the thickness of the wall and the moving speed increase, the curvature radius in the chord direction is increased. With the increase of pressure, the radius of curvature in the chord direction is decreased. ② for single-reinforced test pieces, as the moving speed increases, the curvature radius in the span-wise direction is increased whether in free state or pre-stressed state. ③ for the tri-rib test piece, the pre-stressing method was adopted to obtain a saddle-shaped surface with the maximum span-wise curvature variation, where the span-wise minimum curvature radius is 37 692 mm, and the corresponding chord-wise curvature radius is 5 385 mm.

Key Words: 7B50 Aluminum Alloy, Shot Peening, Orthogonal Test, Curvature Radius

收稿日期:2022-05-18;修改稿收到日期:2022-06-15

第一作者简介:欧阳轶,女,1969 年出生,正高级工程师,西安(710089),E-mail: 975981651@qq.com

通信作者:邢少敏,女,1990 年出生,工程师,西安(710089),E-mail: xaxingsm@163.com

引用格式:欧阳轶,邢少敏,张万瑜. 国产 7B50 铝合金大规格厚板喷丸成形曲率变化规律研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(2):196-199.

OUYANG Y,XING S M,ZHANG W Y. Curvaturevariation law of large-size thick plate shot peening for domestic 7B50 aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(2):196-199.

[2] JUÁREZ-ISLAS J A, PEREZ R, LENGSELD P, et al. Micro-structural and mechanical evaluations of spray-deposited 7XXX Al-alloys after conventional consolidation[J]. Materials Science and Engineering, 1994, A179: 614-618.

[3] ODUSOTE J K, ADELEKE A A, MURAINA S A, et al. Magnesium inclusion effect on Al-Zn-Cu alloys: A study on microstructure and mechanical properties[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 5 914-5 921.

[4] BABU A P, HUANG A, BIRBILIS N. On the heat treatment and mechanical properties of a high solute Al-Zn-Mg alloy processed through laser powder bed fusion process[J]. Materials Science and Engineering, 2021, A807: 140 857.

[5] HASHIMOTO T, ZHANG X, ZHOU X, et al. Investigation of dealloying of S phase (Al₂CuMg) in AA 2024-T3 aluminium alloy using high resolution 2D and 3D electron imaging[J]. Corrosion Science, 2016, 103: 157-164.

[6] MONDAL C, MUKHOPADHYAY A K. On the nature of T (Al₂Mg₃Zn₃) and S(Al₂CuMg) phases present in as-cast and annealed 7055 aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2005, A391(1-2): 367-376.

[7] 徐春杰, 马东, 李岩, 等. 多级时效对 7055 铝合金组织及力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(5): 66-71.

[8] 黄超群, 赵天生, 高飞. 热处理对 7XXX 系铝合金组织及性能影响的研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(23): 98-102, 107.

[9] 郭伟, 王渠东. 大塑性变形制备超细晶复合材料的研究进展[J]. 锻压技术, 2010, 35(1): 4-9.

[10] WANG Z, CHEN M, JIANG H, et al. Effect of artificial ageing on strength and ductility of an Al-Cu-Mg-Mn alloy subjected to solutionizing and room-temperature rolling[J]. Materials Characterization, 2020, 165: 110 383.

[11] SUN R, SUN Q, XIE Y, et al. Enhancing corrosion resistance of 7150 Al alloy using novel three-step aging process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(5): 1 201-1 210.

[12] WANG K, YIN D, ZHAO Y C, et al. Microstructural evolution upon heat treatments and its effect on corrosion in Al-Zn-Mg alloys containing Sc and Zr[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(3): 5 077-5 089.

(编辑:栗万仲)

7150 铝合金的综合性能较好,同时具有良好的抗腐蚀性能和强度,适用于生产大规格厚板和锻件^[1-2]。目前,制造大型运输机和客机的机翼壁板需要长度 20 m 以上的 7150-T7751 合金板材^[3-4]。国产 7B50 合金属于 Al-Zn-Mg-Cu 系超高强铝合金,其是在 7050 铝合金的基础上,通过提高 Zn 和 Mg 含量,降低 Cu 含量,控制 Zn、Mg 质量比以及减少 Fe、Si 杂质等方法开发的,具有高比强度、高韧性、优异的淬透性和良好的热加工性等综合性能,与 7150 合金性能相当,主要应用于飞机的整体框、梁、接头等主承力结构件^[5-6]。

铝合金喷丸成形工艺是在喷丸强化工艺基础上发展起来的一种新工艺,是飞机制造中整体壁板和整体厚蒙皮零件成形的最主要方法之一^[7],其借助高速弹丸流撞击金属构件表面,使构件产生变形。与喷丸强化不同,喷丸成形的弹丸尺寸和喷丸气压等一般比喷丸强化大。喷丸成形对覆盖率没有要求,只需要达到外形要求,一般用于较厚板。国外在大量飞机机翼下蒙皮制造中都采用了该工艺,如 B707-B777、A310-A340 等^[8]。国内某大型飞机外翼上壁板首次采用厚度为 80 mm 的 7B50 大规格厚板进行喷丸成形。整体壁板不仅具有复杂双曲率外形,同时还具有复杂的内部结构,如整体加强凸台、口框及筋条等。

7B50 铝合金作为国产新研材料,其大规格厚板喷丸成形工艺技术需要解决,尤其是要突破作为关键工艺技术的大规格典型件喷丸成形工艺技术。本研究采用 7B50-T7751 铝合金大规格厚板,选取带筋整体壁板典型结构和典型曲率为对象,重点解决复合形典型结构曲率的壁板成形问题,为工程化稳定生产提供依据。

1 试验方法与材料

试验材料为国产 7B50-T7751 铝合金厚板,合金成分见表 1。试验采用平板件、单筋试验件、三筋试验件对国产 7B50-T7751 铝合金进行试验,获得曲率半径与喷丸成形工艺参数的对应关系。

表 1 7B50-T7751 铝合金的化学成分

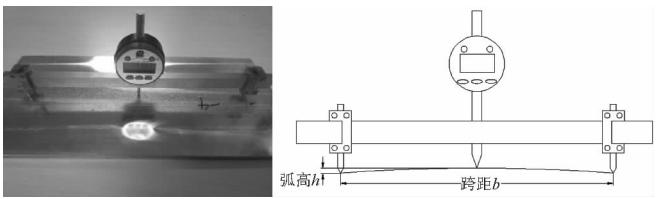
Tab.1 Chemical composition of 7B50-T7751 aluminum alloy %

w/B								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zr	Zn	Al
0.04	0.1	2.14	0.05	2.18	0.04	0.11	6.38	余量

试验结束后,分别对平板件、单筋试验件、三筋试验件通过弧高测试仪进行变形后的弧高值测量。测试仪头部测针,采用标准校验块校正后使用,测量精度为 0.001 mm。弧高测试仪测试过程见图 1。测出跨距和弧高数值,成形曲率半径由计算得出:

$$R = bh$$

式中, R 为曲率半径; b 为跨距; h 为弧高。



(a) 实物图 (b) 弧高测试示意图
图 1 弧高测试仪及弧高测试示意图

Fig.1 Arc height tester

2 试验结果与讨论

2.1 平板件

如何根据零件的曲率半径和厚度确定所需的喷丸工艺参数是实现壁板喷丸成形需要解决的一个关键问题,需要建立壁板材料喷丸成形时曲率半径和厚度与喷丸工艺参数之间的对应关系。

针对 7B50-T7751 合金,开展不同厚度平板件自由状态喷丸成形基础试验研究,获得弦向曲率半径和厚度与喷丸工艺参数的对应关系。采用正交试验方法,进行三因子三水平正交试验,工艺参数见表 2。不同厚度平板件共 9 件,尺寸见表 3。

表 2 试件正交试验因素

Tab.2 Orthogonal test factor comparison of test pieces

水平	因素 A(气压)/MPa	因素 B(移动速度)/(mm · min ⁻¹)	因素 C(厚度)/mm
1	0.1	1 000	5
2	0.3	5 000	10
3	0.5	9 000	15

表 3 试件尺寸

Tab.3 Dimension of test pieces

材料	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	数量/件
7B50	400	200	5	3
	400	200	10	3
	400	200	15	3

选取弹丸的直径为 $\phi 3.18$ mm(渗碳钢丸),喷嘴数 1 个,喷嘴内径为 10 mm,喷射距离为 300 mm,喷射角度为 90°,测量跨距为 70 mm,喷丸成形后的试件见图 2,试验结果见表 4。

通过计算极差判断不同试验因素对弦向曲率半径的影响程度。计算出的极差值越大,对应的试验因素对

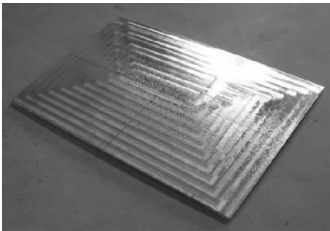


图 2 喷丸成形后的试件

Fig.2 Test pieces after shot peening

表 4 平板件正交试验结果及极差分析计算
Tab.4 Orthogonal test results and range analysis calculation
of flat pieces

试验	因素 A/MPa	因素 B/(mm·min ⁻¹)	因素 C/mm	弦向曲率半径/mm
1	0.1	1 000	5	2 865
2	0.1	5 000	10	28 824
3	0.1	9 000	15	49 000
4	0.3	1 000	15	10 426
5	0.3	5 000	5	2 379
6	0.3	9 000	10	12 250
7	0.5	1 000	10	2 722
8	0.5	5 000	15	10 000
9	0.5	9 000	5	2 849
K ₁	80 689	16 013	8 093	
K ₂	25 055	41 203	436 796	
K ₃	15 571	64 099	69 426	
k ₁	26 896.33	5 337.67	2 697.67	
k ₂	8 351.67	13 734.33	14 598.67	
k ₃	5 190.33	21 366.33	23 142	
R	21 705.97	16 028.66	20 444.33	

弦向曲率半径的影响就越大。由表 4 可知,因素 A(气压)所对应的极差值最大,说明气压的影响程度最大;因素 C(厚度)、因素 B(移动速度)对于平板件喷丸成形后的弦向曲率半径影响最小。

为了更直观地观察试验中因素水平与弦向曲率半径的变化关系,得出试验因素水平与弦向曲率半径关系曲线图,见图 3。从喷丸气压、移动速度和厚度对平板件喷丸成形后的弦向曲率半径影响程度来看,随着喷丸气压增大,弦向曲率半径递减;随着平板移动速度增加,弦向曲率半径递增;随着平板厚度增加,弦向曲率半径递增。

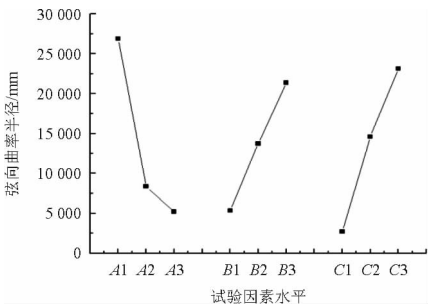


图 3 试验因素水平与弦向曲率半径的关系
Fig.3 Relationship between the test factor level and the chord-wise curvature radius

2.2 单筋试件

针对 7B50-T7751 合金,开展单筋试件自由状态和预应力状态喷丸成形基础试验研究,获得展向曲率半径与喷丸工艺参数的对应关系。单筋试件尺寸均为 1 200 mm×160 mm×70 mm,见图 4。采用两因素四水平试验设计,试验设计参数见表 5。

预应力喷丸成形是在对零件喷丸之前,通过特定的工装夹具对零件施加一预定的载荷,从而使零件预先产

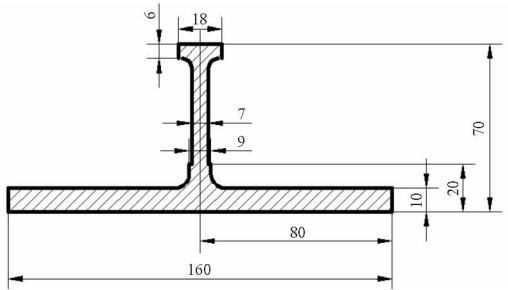


图 4 单筋试件截面图
Fig.4 Section diagram of single-reinforced test piece

表 5 试验因素水平
Tab.5 Test factor levels

水平	因素 A(预应力)/MPa	因素 B(移动速度)/(mm·min ⁻¹)
1		2 000
2		4 000
3	260	6 000
4		8 000

生一定的弹性变形,然后再对受拉表面进行喷丸成形。在相同喷丸强度和覆盖率条件下,预应力喷丸的成形极限是自由状态喷丸的 2~3 倍,同时还可以有效控制沿喷丸路线方向的附加弯曲变形^[9,10]。

选取弹丸直径为 3.18 mm(渗碳钢丸),喷嘴数为 3 个,喷嘴内径为 10 mm,喷射距离为 300 mm,喷射角度为 90°,见图 5。展向曲率半径与移动速度和预应力之间的关系见图 6。可以看出,不论是自由状态还是预应力状态,随着移动速度增加,展向曲率半径递增,且预应力状态的展向曲率半径明显小于自由状态。

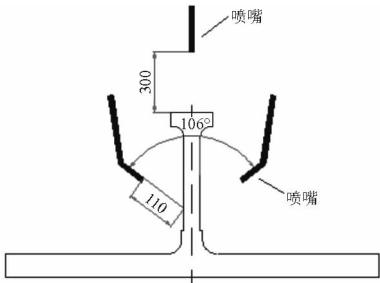


图 5 喷丸成形示意图
Fig.5 Schematic diagram of shot peening forming

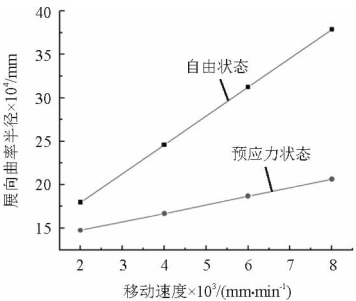


图 6 自由状态和预应力状态下移动速度对展向曲率半径的影响
Fig.6 Influence of moving speed on the spanwise curvature radius in free state and pre-stressing state

由于飞机外翼壁板展向曲率变化大且长度长,成形难度很大,只能采用预应力喷丸成形方法才能使零件所

产生的变形量达到设计外形的要求,其作用是提高喷丸成形极限,以及控制壁板材料喷丸变形的材料流动方向。

2.3 三筋试件件

依据平板件和单筋试件喷丸成形试验结果,开展 7B50-T7751 合金三筋试件的喷丸成形试验,获得特定工艺参数下弦向和展向的曲率半径,三筋试件尺寸均为 1 200 mm×480 mm×70 mm,见图 7。采用先成形弦向后成形展向的喷丸成形工艺以获得马鞍形型面,采用预应力方式,并且一次装夹。采用 2 组喷丸参数进行试验,弦向和展向喷丸参数分别见表 6 和表 7。

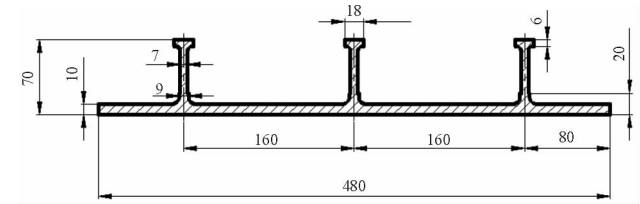


图 7 三筋试件截面示意图

Fig.7 Schematic diagram of cross section of tri-bar test piece

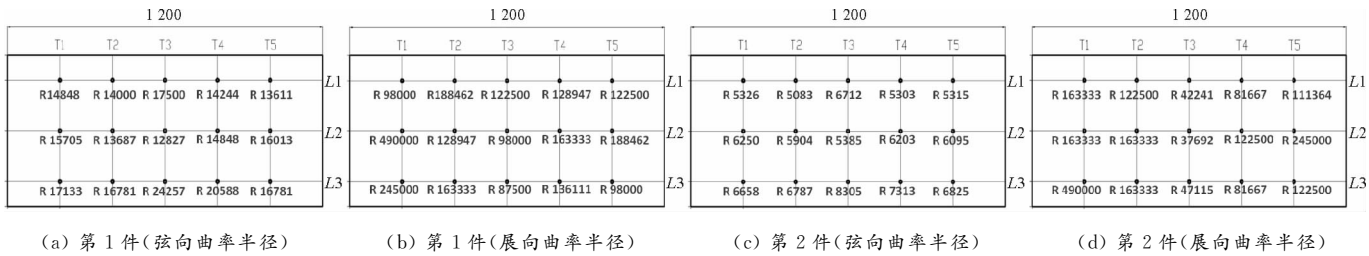


图 8 三筋试件弦向和展向曲率半径

Fig.8 Chord and spanwise curvature radius of tri-bar test piece

获得展向最大曲率的马鞍形型面,其对应的最小曲率半径为 37 692 mm,相应得到其弦向曲率半径为 5 385 mm。

3 结 论

- (1)针对 7B50-T7751 合金,通过喷丸基础工艺试验获得试件曲率半径与厚度、喷丸气压和移动速度之间的关系。以平板件为研究对象,随着平板厚度和移动速度的增加,弦向曲率半径递增;随着喷丸气压增大,弦向曲率半径递减。
- (2)通过研究自由喷丸成形和预应力喷丸成形的不同效果,以单筋试验件为研究对象,不论是自由状态还是预应力状态,随着移动速度增加,展向曲率半径递增,且预应力状态的弦向曲率半径明显小于自由状态。相比自由喷丸,预应力喷丸更易使零件所产生的变形量达到外形设计的要求。
- (3)采用预应力方式,通过不同喷丸参数对国产 7B50-T7751 合金进行三筋试件的喷丸试验,获得试验件展向最小曲率半径及其对应的弦向曲率半径。

表 6 弦向成形喷丸参数

Tab.6 Shot peening parameters for chord forming		
编号	喷丸气压/MPa	移动速度/(mm·min ⁻¹)
SJ-1	0.3	8 000
SJ-2	0.45	6 000

表 7 展向成形喷丸参数

Tab.7 Shot peening parameters for spanwise forming					
编号	位置	预应力/MPa	预弯半径/mm	气压/MPa	移动速度/(mm·min ⁻¹)
SJ-1	筋 1	260	18 692	0.45	8 000
	筋 2	260	18 692	0.45	10 000
	筋 3	260	18 692	0.45	8 000
SJ-2	筋 1	520	10 565	0.45	4 000
	筋 2	520	10 565	0.45	6 000
	筋 3	520	10 565	0.45	4 000

喷丸成形后三筋试件弦向和展向曲率半径试验结果见图 8。可以看出,第 2 件试件的曲率半径明显低于第 1 件,这是由于第 2 件施加的预应力、喷丸气压与移动速度都要高于第 1 件,这一结果符合喷丸成形参数对曲率半径的影响规律。通过不同喷丸参数对国产 7B50-T7751 合金进行三筋试件的预应力喷丸试验,以

参 考 文 献

[1] 刘兵,彭超群,王日初,等.大飞机用铝合金的研究现状及展望[J].中国有色金属学报,2010,20(9):1 705-1 715.

[2] NAKAI M, TAKEHIKO E. New aspects of development of high strength aluminum alloys for aerospace applications[J]. Materials Science and Engineering, 2000, A285(1): 62-68.

[3] CURTISS A, ROMERO J S, DELOSRIOS E R, et al. Predicting the interfaces between fatigue crack growth regimes in 7150-T651 aluminum alloy using the fatigue damage map[J]. Materials Science and Engineering, 2003, A344(1): 79-85.

[4] LI Z H, XIONG B Q, ZHANG Y A, et al. Research on multi-artificial aging applied to aluminum alloy 7150 plate[J]. Materials Science Forum, 2012, 706-709: 340-345.

[5] 龚澎,郑林斌,张坤,等.7B50-T7451 铝合金板材挤压机性能研究[J].航空材料学报,2011,31(4):45-50.

[6] 刘蛟蛟,武岳,赖永秋,等.固溶温度对 7B50 铝合金组织与性能的影响[J].中国有色金属学报,2013,23(11):3 100-3 106.

[7] 彭艳敏,陈金平,杨亮,等.大型飞机整体壁板喷丸成形延展变形分析[J].航空制造技术,2017(9):97-105.

[8] 刘存,李健,赵谋周.喷丸处理对机翼加筋壁板压缩强度的影响[J].中国表面工程,2016,29(1):111-117.

[9] 李国祥.喷丸成形[M].北京:国防工业出版社,1982.

[10] 尚建勤.预应力对喷丸成形的影响[J].锻压技术,2000(1):43-44.

(编辑:栗万仲)