

大尺寸弹丸喷丸成形 2024-T351 铝合金表面质量研究

Research on Surface Quality of 2024-T351 Aluminum Alloy by Peen Forming With Large Ball

中航工业北京航空制造工程研究所 王明涛 曾元松 黄 遐

[摘要] 针对 2024-T351 铝合金进行直径 3mm 大弹丸喷丸成形及直径 0.58mm 小弹丸喷丸强化试验, 观测试样在不同喷丸参数下的表面形貌, 并对表层显微硬度及残余应力分布进行测试, 为整体壁板喷丸成形的工艺设计提供重要依据。

关键词: 喷丸成形 大尺寸弹丸 2024-T351 铝合金 表面质量 残余应力

[ABSTRACT] Peen forming with 3mm diameter balls and shot peening with 0.58mm diameter balls are processed based on 2024-T351 aluminum alloy. The surface topography, microhardness and residual stress distribution are tested in order to provide the peen forming design of the integral panels with significant data.

Keywords: Peen forming Large ball 2024-T351 aluminum alloy Surface quality Residual stress

喷丸成形是一种从喷丸强化工艺衍生出来的钣金成形方法。其基本原理是: 高速弹丸流撞击金属板材表面, 使受撞击的表层材料围绕弹坑向四周延伸, 从而产生塑性变形, 表层材料的延伸又带动内层材料发生变形, 由于材料为一整体, 内外层之间相互牵制作用使板材发生弯曲变形^[1]。喷丸成形工艺装备简单, 无需专用模具和压力机, 成形方法灵活多变, 可以成形型面复杂的零件, 非常适合于小批量生产, 是飞机机翼、机身整体壁板成形的首选方法^[2-3]。为了提高喷丸成形变形能力与效率, 大尺寸弹丸(直径大于 2mm)喷丸成形技术得到应用。然而, 弹丸尺寸的增大在满足成形需要的同时, 会使受喷材料表面质量状态发生较大变化, 甚至会影响到成形零件的力学性能。

目前, 国内外学者对小弹丸喷丸强化后材料表面形貌、表面粗糙度及表层残余应力的变化研究较多^[4-11], 但针对喷丸成形, 特别是大弹丸喷丸成形后材料表面质量的研究很少。因此, 开展大弹丸喷丸成形后材料表面状态变化规律研究, 对改进壁板零件喷丸成形工艺具有积极意义。本文针对 2024-T351 铝合金进行直径 3mm 大弹丸喷丸成形试验, 研究材料表面质量的变化规律。

1 试验材料及方法

本试验使用材料为美国进口的 2024-T351 铝合金板材, 厚度为 12.7mm。将原始板材加工成大小为 400mm × 160mm × 10mm 的板状试样, 利用 MP20000 数控喷丸机进行喷丸成形及强化工艺试验。喷丸成形的弹丸选择直径为 3mm 的钢珠, 喷丸强化弹丸规格为 S230, 直径为 0.58mm。具体喷丸成形及强化参数如表 1 所示, 其中喷丸强化的喷丸强度为 0.18mmA。表 2 为本文试样编号与喷丸状态的对应关系。

表1 喷丸成形及强化工艺参数

试验工艺	弹丸直径 / mm	弹丸流量 / (kg·min ⁻¹)	喷射距 / mm	气压 / MPa	移动速度 / (mm·min ⁻¹)
喷丸成形	3	12	500	0.3/0.5	3000
喷丸强化	0.58	12	500	0.18	500

表2 试样编号与喷丸状态对应关系

试样编号	喷丸状态
1#	喷丸强化
2#	0.3MPa 气压喷丸成形
3#	0.5MPa 气压喷丸成形
4#	0.3MPa 气压喷丸成形 + 喷丸强化
5#	0.5MPa 气压喷丸成形 + 喷丸强化

使用触针式表面粗糙度检查仪对喷丸强化后试样表面进行粗糙度测定。利用 Wolpert-401mvd 显微维氏硬度计测定试样维氏硬度沿厚度方向分布, 施加载荷为 25g, 保载时间为 15s, 每个深度位置测量 3 个点, 然后取平均值。残余应力测试采用 PSPC-MSF3MX 射线衍射仪, 测量方法为侧倾固定 Ψ 法, 定峰方法为半高法, X 射线管高压为 40kV, 管电流为 250mA, X 射线照射面直径为 6mm。采用电化学的剥层方法, 由于剥除部分的残余应力的释放, 将导致剩余材料体积内残余应力的重新分布, 根据以下校正公式进行修正:

$$\sigma = \sigma' + [1/(h - Z)] \int_0^{\infty} \sigma'(\zeta) d\zeta - [6/(h - Z)^2]$$

$$\int_0^{\infty} [(h - \zeta)/2] \sigma'(\zeta) d\zeta。$$

2 试验结果与讨论

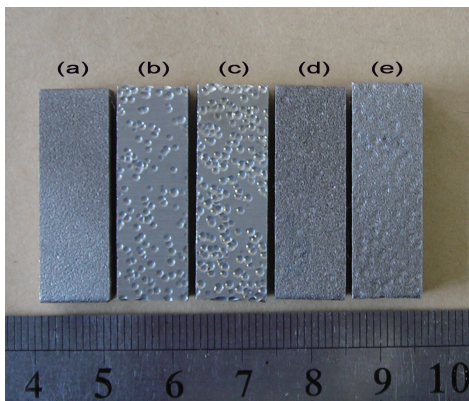
2.1 喷丸后表面形貌

表2中五种不同喷丸状态下2024-T351铝合金表面宏观形貌如图1所示。使用不同弹丸尺寸喷丸造成试样表面宏观形貌差异显著。图1(a)为使用直径为0.58mm弹丸喷丸强化后试样表面宏观形貌,可以看到喷丸覆盖率达到100%,没有明显的表面缺陷;(b)和(c)分别为0.3MPa和0.5MPa气压下喷丸成形后的表面宏观形貌,这两种状态下的覆盖率未达到100%,由于使用直径3mm的大弹丸,表面存在明显的弹坑,而且0.5MPa气压喷丸下弹坑比0.3MPa的大;(d)和(e)分别为(b)和(c)状态下再经喷丸强化处理后的形貌,此时弹坑附近表面趋于平整,而且小弹丸已经覆盖到全表面。

对喷丸强化后试样表面进行粗糙度测定, R_a 值为 $7.1 \mu\text{m}$, 比未喷丸时的 $2.1 \mu\text{m}$ 增加 $5 \mu\text{m}$ 。由于试样在喷丸成形后弹坑痕迹明显,且喷丸覆盖率不到100%,表面状态无法用粗糙度概念定义,故对两种参数喷丸成形后的试样(2#和3#)分别随机选取3个弹坑,测量其深度和直径并取平均值进行对比,如表3所示。由表可知,0.5MPa气压喷丸成形产生弹坑的深度和直径分别为0.1mm和1.19mm,比0.3MPa气压时分别增加37%和12.3%。测得图1中(d)和(e)试样表面粗糙度值为 $7.2 \mu\text{m}$ 和 $16.1 \mu\text{m}$,这说明在喷丸成形后进行喷丸强化处理可以明显改善表面粗糙度,从而提高表面质量。

2.2 显微硬度测定

图2为3种喷丸状态下2024-T351铝合金试样(1#、



(a) 喷丸强化;(b)0.3MPa气压喷丸成形;(c)0.5MPa气压喷丸成形;(d)0.3MPa气压喷丸成形+喷丸强化;(e)0.5MPa气压喷丸成形+喷丸强化

图1 不同喷丸状态下2024-T351表面宏观形貌
Fig.1 Surface topography of 2024-T351

表3 喷丸成形后试样表面弹坑尺寸

喷丸状态	弹坑深度/mm	弹丸直径/mm
0.3MPa气压喷丸成形(2#)	0.073	1.06
0.5MPa气压喷丸成形(3#)	0.1	1.19

2#和4#)显微硬度沿深度方向的分布曲线。3条曲线变化趋势都是由高到低然后趋于平缓,说明喷丸成形及喷丸强化均对试样表层材料有硬化作用,其中喷丸成形再经喷丸强化处理后,材料表面硬度达到192HV,比原始状态提高37.1%。这是由于随着受喷表层金属发生塑性变形,晶粒产生滑移。滑移的结果是在亚晶粒内增加位错密度,产生晶格畸变,使表层晶粒的形状和排列都发生变化,从而提高了表面硬度。

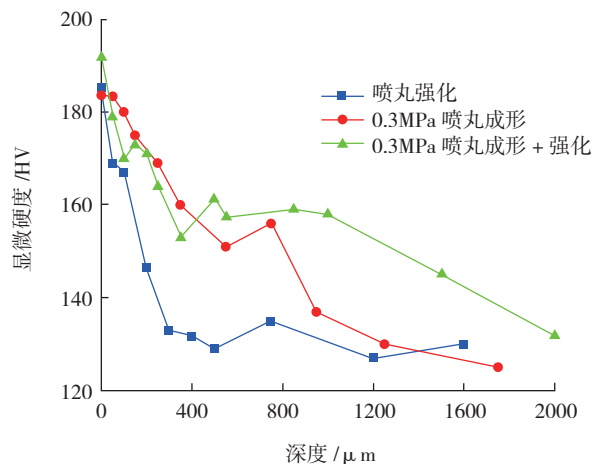


图2 不同状态下2024-T351显微硬度沿深度方向分布
Fig.2 Microhardness distribution of 2024-T351 along depth after different processes

经喷丸成形后试样(2#)表面硬化层深度达到1.2mm,比仅经过喷丸强化处理后试样(1#)硬化层增厚0.7mm。分析其原因为:喷丸成形使用大尺寸弹丸,增大了喷丸能量,使板材产生更大塑性变形。大弹丸对板材的撞击使弹坑附近材料位错密度增加,引起加工硬化效应程度要高于小弹丸的喷丸强化。从图2中还能看出,喷丸成形后再经过喷丸强化处理,表层显微硬度仍有少量提高,这说明喷丸成形过程未使材料硬化达到饱和状态,进一步的喷丸强化仍能继续产生加工硬化作用。

2.3 残余应力测定

将3种喷丸状态下板件试样(1#、4#和5#)线切割成大小为 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的块状试样,对其残余应力沿深度方向分布进行测定。由于喷丸成形覆盖率没有达到100%,测量位置离弹坑远近会对结果产生影

响,为了更准确地表示试样残余应力,4#、5# 试样每层选取 5 个点进行测量,然后取平均值。1# 试样进行了全表面喷丸强化,因此只测试中心位置。

图 3 为不同喷丸工艺下 2024-T351 铝合金表层残余应力分布曲线。从图中可以看出,试样表面均为残余压应力,且随着深度的增加残余压应力先增大后减小,最后逐步减小到零,然后转为拉应力。表 4 列出了残余应力分布的 3 个特征值(表层残余压应力、最大残余压应力和残余压应力层深度)的大小。

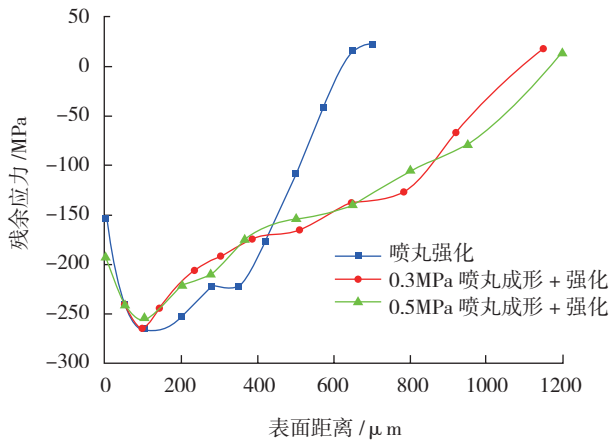


图3 不同状态下2024-T351残余应力分布对比
Fig.3 Residual stress distribution of 2024-T351 after different processes

由表 4 可知,经过喷丸强化处理后,2024-T351 铝合金材料表面形成深度为 626 μm 的残余压应力层,残余压应力最大值为 265MPa。0.3MPa 和 0.5MPa 气压喷丸成形再强化后形成的残余压应力层深度分别达到 1103 μm 和 1170 μm,比仅喷丸强化后提高 76.2% 和 86.9%,但最大残余应力值分别为 277MPa 和 254MPa,与仅喷丸强化的相比并无明显差别。分析其原因为:相比于喷丸强化,大弹丸喷丸成形提高了铝板表层材料塑性变形程度,使发生塑性变形区域向内部延伸,更深的弹坑下方材料产生不均匀变形,从而提高残余压应力层深度;而残余压应力值与材料屈服强度有关,因此同种材料不同喷丸工艺下产生的残余应力值差别不显著。

表4 残余应力特征参数值

喷丸状态	表层残余应力 /MPa	最大残余压应力 /MPa	残余压应力层深度 / μm
喷丸强化(1#)	154	265	626
0.3MPa 喷丸成形 + 强化(4#)	251	277	1103
0.5MPa 喷丸成形 + 强化(5#)	193	254	1170

3 结论

(1) 不同喷丸工艺后 2024-T351 铝合金表面形貌及粗糙度受到不同程度影响:直径 0.58mm 弹丸喷丸强化后表面粗糙度比未喷丸表面提高 5 μm;直径 3mm 弹丸喷丸成形后表面形成明显弹坑,弹坑尺寸随喷丸气压的增大而增大,0.5MPa 气压喷丸成形弹坑深度和直径分别为 0.1mm 和 1.19mm;喷丸成形后再经喷丸强化处理,可以有效改善表面粗糙度。

(2) 喷丸成形及喷丸强化均对 2024-T351 铝合金试件表层材料有硬化作用,0.3MPa 气压喷丸成形再经 0.18mmA 强度喷丸强化后,材料表面硬度达到 192HV,比原始状态提高 37.1%。喷丸成形后试样表面硬化层深度为 1.2mm,比仅经过喷丸强化处理后硬化层增厚 0.7mm。

(3) 不同喷丸工艺后 2024-T351 铝合金试样表层残余应力分布基本一致。0.18mmA 强度喷丸强化处理后,材料表面形成深度为 626 μm 的残余压应力层。0.3MPa 和 0.5MPa 气压喷丸成形再强化后形成的残余压应力层深度分别达到 1103 μm 和 1170 μm,比仅喷丸强化后提高 76.2% 和 86.9%;最大残余应力值与仅喷丸强化的相比差别不大。

参考文献

- [1] 李国祥. 喷丸成形. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [2] Kulkarni K M, Schey J A, Badger D V. Investigation of shot peening as a forming process for aircraft wing skins. American society for metals, 1981,1(4):34-44.
- [3] 尚建勤, 曾元松. 喷丸成形技术及未来发展与思考. 航空制造技术, 2010(16):26-29.
- [4] Miao H Y, Demers D, Larose S, et al. Experimental study of shot peening and stress peen forming. Journal of Materials Processing Technology, 2010,210:2089-2102.
- [5] 高玉魁, 殷源发, 李向斌, 赵宇新. GH909 合金喷丸强化残余应力场的研究. 材料工程, 2002(4):40-42.
- [6] 高玉魁. 喷丸强化对 TC4 钛合金组织结构的影响. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(9): 1536-1539.
- [7] Rodopoulos C A, Romero J S, Curtis S A, et al. Effect of controlled shot peening and laser shock peening on the fatigue performance of 2024-T351 aluminum alloy. JMEPEG, 2003,12: 414-419.
- [8] 张新华, 曾元松, 王东坡, 王婷. 超声喷丸强化 7075-T651 铝合金表面性能研究. 航空制造技术, 2008(13):78-90.
- [9] 静永娟, 王新英, 张继. 喷丸处理对 TiAl 合金拉伸性能的影响. 稀有金属, 2010,5(1):4-7.
- [10] 李伟, 李沛勇, 何晓磊. 喷丸强化对 SiC 颗粒增强铝基复合材料疲劳性能的影响. 材料工程, 2009(1):98-101.
- [11] Asquith D T, Yerokhin A L, Yates J R, et al. Effect of combined shot-peening and PEO treatment on fatigue life of 2024 Al alloy. Thin Solid Films, 2007, 515: 1187-1191.

(责编 亦非)