

喷丸处理对高强度 7150 铝合金弯曲形变的影响

Effect of Shot Peening Processing on Bending Deformation of High Strength 7150 Aluminum Alloy

王 强¹, 张 炜², 乔明杰²

(1 北京航空材料研究院, 北京 100095;

2 中航飞机股份有限公司, 西安 710089)

WANG Qiang¹, ZHANG Wei², QIAO Ming-jie²

(1 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2 Xi'an Aircraft International Corporation, Xi'an 710089, China)

摘要: 采用 X 射线衍射残余应力分析和衍射峰半高宽研究喷丸残余压应力和塑性变形对 7150 铝合金薄壁试样弯曲形变的影响。结果表明: 喷丸时间 0~60s 时, 由于喷丸残余应力的引入和塑性变形的累积, 试样弯曲形变速率较大, 对于喷射压力为 0.05MPa 的试样, 其值可达 10.3 μ m/s; 喷丸时间超过 60s 后, 残余压应力场饱和, 试样形变主要依靠喷丸表面的塑性变形, 而试样弯曲形变速率降低到 1.3 μ m/s。增大喷射压力将使试样的弯曲形变速率和相对弯曲形变总量增大。

关键词: 7150 铝合金; 喷丸处理; 残余压应力; 塑性变形; 弯曲形变

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.12.011

中图分类号: TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)12-0059-04

Abstract: The effect of compressive residual stress and plastic strain induced by shot peening processing on bending deformation (BD) of 7150 aluminum alloy was studied using the XRD residual stress testing and the FWHM value. The results indicate that BD rate is higher when the shot time is less than 60s, and the BD rate reaches 10.3 μ m/s when shot pressure is 0.05MPa, due to the compressive residual stress and plastic strain induced by shot peening processing. When the shot time is more than 60s, the compressive residual stress field reaches saturated, and the BD rate reduces to 1.3 μ m/s which only depends on the surface plastic deformation induced by shot peening processing. The BD rate and total amount of BD increase with the increasing of shot pressure.

Key words: 7150 aluminum alloy; shot peening processing; compressive residual stress; plastic deformation; bending deformation

Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金因比强度高、密度小以及力学性能优良而作为结构材料被广泛应用于航空航天、交通运输和其他工业部门^[1,2]。随着航空航天领域对材料提出的更高要求, 在具有较高强度的同时材料应有较好的韧度和耐腐蚀性能^[3,4]。7150 合金是美国铝业公司于 20 世纪 70 年代开发的一种超高强铝合金, 被广泛应用于航空领域, 如 7150 合金板材和挤压材大量用于飞机框架、舱壁等结构件^[5,6]。

在国内, 大型整体薄壁零件的数控加工变形问题已经成为几乎所有飞机制造企业研制与生产的最大障碍。引起工件变形的原因可以分为弹性变形、塑性变形、热变形和残余应力变形^[7,8]。文献[9,10]对导致产生加工变形的诸多因素进行了分析, 其中残余应力

的释放与重分布对薄壁构件的影响较大。由于大型薄壁件普遍为弱刚性零件, 传统的校形会导致额外残余应力的增加和降低飞机服役的可靠性。

近年来, 残余应力的作用引起包括机械行业在内的许多领域的广泛关注, 残余应力存在于工件变形的产生到变形校正结束的全过程。工件内存在初始残余应力, 在外加校正载荷的作用下, 产生新的应力必然与原有残余应力产生耦合作用, 从而对校正精度造成影响^[11-13]。喷丸技术通过大量弹丸撞击工件表面, 引发弹塑性变形, 在表层引入残余压应力场, 利用喷丸技术, 改变零件内部残余应力分布状态, 可实现对由于加工或喷丸强化造成的变形进行校正。本工作利用 X 射线衍射技术, 通过测定衍射峰位置和半高宽的变化,

定量计算和定性分析喷丸引发残余应力和塑性变形,研究残余压应力和塑性变形对喷丸变形的影响程度及其规律,为抑制薄壁件喷丸变形和利用喷丸技术进行喷丸矫形提供支持。

1 实验材料与方法

实验材料为高强度铝合金 7150 厚板,线切割和铣削加工为 200mm×100mm×1.5mm 的薄板试样。残余应力和 X 射线衍射峰半高宽 FWHM 测试位置为试样中心,为正确反映喷丸表面的残余应力值,对残余应力测试点位置进行电解抛光处理,电解去除量 0.01mm,电解液:高氯酸+甲醇,电解电压 8V,电流 4A;使用 X-3000 型 X 射线衍射应力测定仪,测定电解抛光后试样表面残余应力及其 FWHM 值,测试条件:CrK_α 靶材,(311)衍射晶面,交相关定峰法,准直管直径为 φ3.0mm,管电流 6.67mA,电压 30kV。试样在气动式数控喷丸机上进行喷丸处理(图 1)。试样固定方式如图 2 所示。在底面约束情况下对单面薄板试样

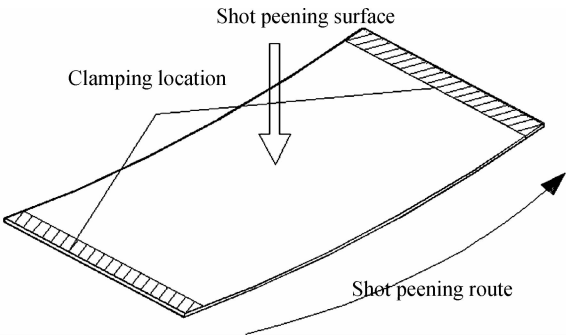


图 1 薄板试样喷丸示意图

Fig. 1 Thin-wall sample sketch of shot peening

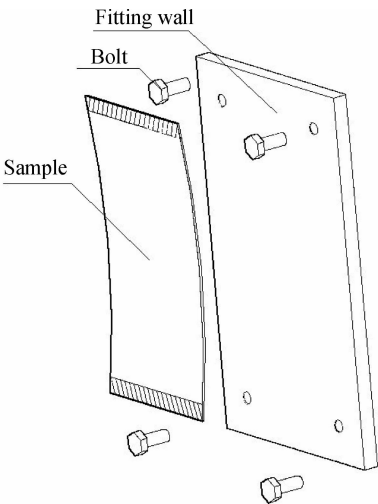


图 2 薄壁试样装夹方式

Fig. 2 Clamping sketch of thin-wall sample

进行喷丸处理,喷射压力分别为 0.05,0.15MPa 和 0.25MPa,使用直径 0.3mm 的陶瓷弹丸,弹丸流量 5kg/min;本工作所用 7150 铝合金薄板试样加工形变以一维弯曲形变为主,以最大弯曲量来表征试样的变形程度,试样弯曲形变量测试方法如图 3 所示,并将其定义为弯曲形变量,将试样的弯曲形变量的差值定义为相对形变量,单位时间内弯曲变形量的差值定义为弯曲形变速率。

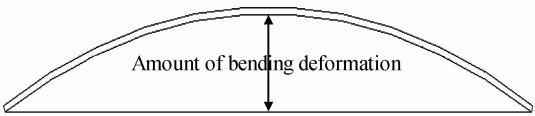


图 3 薄壁试样弯曲形变量的测试方法

Fig. 3 Bending deformation measurement of thin-wall sample

2 结果与讨论

实验用 7150 薄板试样喷前弯曲形变量为 1000μm 左右,喷丸后试样的弯曲形变规律如图 4 所示。可见,不同喷丸压力下,试样变形的总体规律是相似的,0~60s 时,试样反向变形的速率较快,喷丸时间超过 60s 后,试样弯曲状态基本达到稳定。对于初始变形量达到 1000μm 的 7150 铝合金铣削加工试样,0.05MPa 喷射压力下,通过延长喷丸时间,提高喷丸覆盖率,无法使试样的加工形变完全恢复;当喷射压力达到 0.25MPa 时,喷丸时间在 20s 内试样加工形变即可得到完全恢复,但是,如在此压力下继续喷丸处理,则试样将发生反向弯曲形变,且最大反向弯曲形变可达到 600μm;当喷射压力为 0.15MPa 时,试样喷丸稳定状态下弯曲形变量较小,仅 0~50μm。

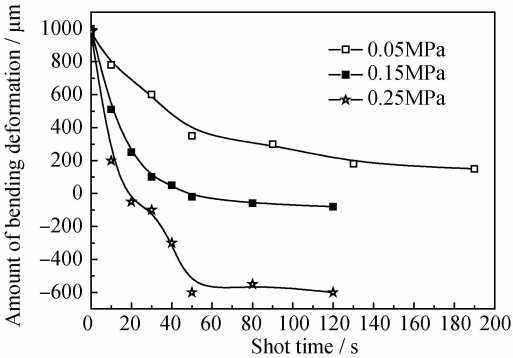


图 4 不同喷丸压力下喷射时间对试样弯曲形变量的影响

Fig. 4 Effect of shot time on the amount of bending deformation with different shot pressure

喷丸处理造成金属板材发生弯曲形变的原因有两方面:(一)大量弹丸高速冲击金属材料表层,表层发生

塑性变形造成金属延伸,受喷表面面积增大,从而产生弯曲的趋势;(二)表层产生不可恢复的塑性变形阻挡了内部已发生的弹性变形恢复,因此而引入的残余压应力场打破了原有内应力的平衡,必然在其心部产生残余拉应力,由于残余应力厚度方向上的不均匀分布产生了使试样弯曲形变的弯矩^[14]。从以上变形原因分析可知,喷丸形变的产生及其大小取决于喷丸在金属材料表层造成的塑性变形的大小和残余压应力的状态,残余应力大小通过 X 射线衍射方法能够较为准确测量,喷丸表面塑性变形量却没有标准的定量分析方法,但是由于塑性变形能引起金属材料 X 射线衍射峰半高宽的变化,相关文献^[15,16]表明,喷丸表面塑性变形量与其 X 射线衍射峰半高宽呈线性关系,本工作中用 X 射线衍射峰半高宽值来间接表征其表面喷丸塑性变形量的大小。

图 5 是喷丸压力为 0.15MPa 时,不同喷丸时间下 7150 试样的残余压应力场特征曲线。可知,对于铣削加工试样,残余压应力场较浅,仅 15 μm ,而随着喷丸时间的延长,残余压应力值和深度逐渐增加,特别是残余压应力场深度的增大尤为显著,而喷丸时间 60s 和 100s 试样的压应力场特征基本相同,说明喷丸时间达到 60s 后,其残余压应力场已达到饱和。

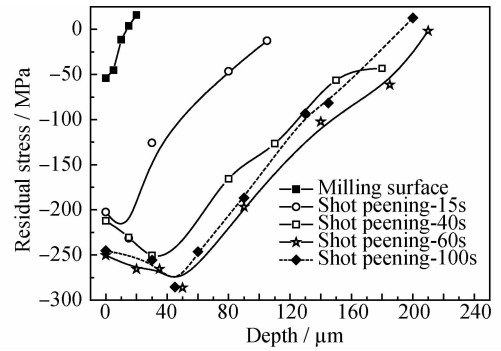


图 5 不同喷丸时间下 7150 试样的残余应力场(喷射压力:0.15MPa)

Fig. 5 Effect of shot time on compressive residual stress field of 7150 thin-wall sample (shot pressure: 0.15MPa)

图 6 为 0.05, 0.15MPa 和 0.25MPa 喷射压力下, 7150 铝合金薄板试样处于不同弯曲形变状态时的表面残余应力值和 FWHM 值。可知,由于试样加工过程中弯曲形变的作用,凹面为残余压应力,而凸面为残余拉应力,经过喷丸处理,喷丸面(凹面)残余压应力值逐渐增大,而非喷丸面(凸面)由于喷丸造成的弯曲形变作用,拉应力值逐渐减小,最终转变为压应力。结合图 4,分析图 6(a)中残余应力和 FWHM 值的变化,可将其过程分为两个阶段:第一阶段,喷丸时间 0~60s,试样弯曲形变量从 1000 μm 降低到 380 μm ,弯曲形变速

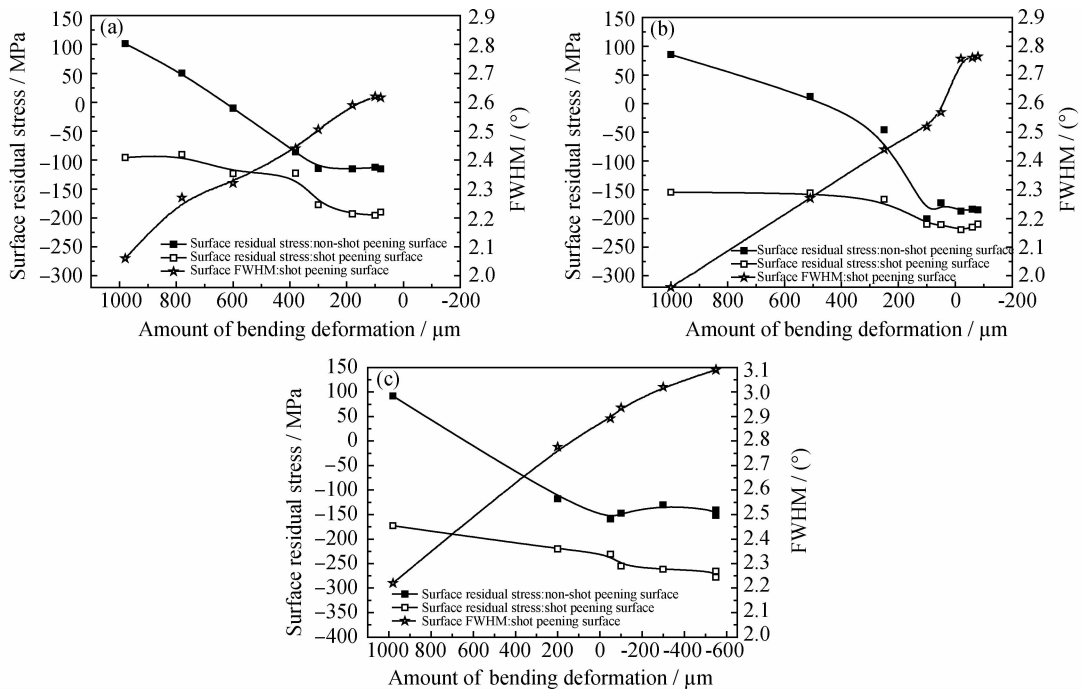


图 6 7150 铝合金薄板在不同喷射压力下的表面残余应力和衍射峰半高宽
(a) 0.05MPa; (b) 0.15MPa; (c) 0.25MPa

Fig. 6 Surface residual stress and FWHM of 7150 thin-wall sample with different shot pressure
(a) 0.05MPa; (b) 0.15MPa; (c) 0.25MPa

率达到 $10.3\mu\text{m/s}$, 喷丸面残余应力为 -122MPa , 非喷丸面残余应力 -85MPa , 喷丸面 FWHM 值由 2.051° 增加到 2.495° ; 第二阶段, 喷丸时间 $60\sim 200\text{s}$, 试样弯曲形变量从 $380\mu\text{m}$ 降低到 $200\mu\text{m}$, 弯曲形变速率仅为 $1.3\mu\text{m/s}$, 残余应力基本稳定, 喷丸面 FWHM 值由 2.495° 增加到 2.650° 。以上结果说明, 喷丸第一阶段中, 由于喷丸残余压应力和塑性变形的作用, 试样弯曲形变速率较大, 弯曲形变量快速减小; 喷丸第二阶段中, 喷丸残余压应力场已达到饱和, 弯曲形变速率大幅度降低, 说明喷丸残余压应力是弯曲形变的主要动力, 此后弯曲形变量的增大主要是依靠喷丸不断累积而增大的塑性形变量。由图 6(b) 和图 6(c) 可知, 对于喷丸压力为 0.15MPa 和 0.25MPa 的 7150 薄板试样, 其变化规律与 0.05MPa 喷丸试样相似, 而不同在于其试样喷丸弯曲形变速率更高, 0.15MPa 喷丸试样第一阶段的弯曲形变速率为 $16.7\mu\text{m/s}$, 0.25MPa 喷丸试样第一阶段的弯曲形变速率达到 $31.5\mu\text{m/s}$ 。

3 结论

(1) $0.05, 0.15\text{MPa}$ 和 0.25MPa 三种喷丸压力下, 试样弯曲形变的总体规律相同, $0\sim 60\text{s}$ 内(第一阶段), 试样反向变形速率较快, 喷丸时间超过 60s 后(第二阶段), 试样弯曲形变量基本稳定, 0.15MPa 喷丸处理后, 试样弯曲形变量较小。

(2) 试样喷丸第一阶段, 喷丸残余压应力场是试样弯曲形变的主要成因, 对于 0.05MPa 喷射压力的试样, 其弯曲形变速率达到 $10.3\mu\text{m/s}$ 。

(3) 试样喷丸第二阶段, 喷丸残余压应力场已达到饱和, 弯曲形变速率大幅度降低, 对于 0.05MPa 喷射压力的试样, 其弯曲形变速率仅 $1.3\mu\text{m/s}$, 相对弯曲形变量的进一步增加主要依靠喷丸不断累积而增大的塑性形变量。

(4) 喷射压力的增大可提高喷丸弯曲形变速率, 0.15MPa 喷丸试样第一阶段的弯曲形变速率为 $16.7\mu\text{m/s}$, 0.25MPa 喷丸试样第一阶段的弯曲形变速率达到 $31.5\mu\text{m/s}$ 。

参考文献

- [1] HEINZ A, HASZLER A. Recent development in aluminum alloys for aerospace applications[J]. *Material Science and Engineering: A*, 2000, 280: 102—110.
- [2] 王洪斌, 黄进峰, 杨滨, 等. Al-Zn-Mg-Cu 系超高强铝合金的研究现状与发展趋势[J]. *材料导报*, 2003, 17(9): 1—3.
WANG Hong-bin, HUANG Jin-feng, YANG Bin, et al. Current status and future directions of ultrahigh strength Al-Zn-Mg-Cu

- aluminum alloys[J]. *Material Review*, 2003, 17(9): 1—3.
- [3] SRIVATSAN T S, SRIRAM S. Microstructure tensile deformation and fracture behavior of aluminum alloy 7055[J]. *Journal of Material Science*, 1997, 32: 2883—2894.
- [4] GANG S. Early-stage precipitation in Al-Zn-Mg-Cu alloy (7050) [J]. *Acta Materialia*, 2004, 52: 4503—4516.
- [5] 吴一雷, 李永伟, 强俊, 等. 超高强度铝合金的发展与应用[J]. *航空材料学报*, 1994, 14(1): 49—55.
WU Yi-lei, LI Yong-wei, QIANG Jun, et al. Development and application of super-high strength aluminum alloys[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 1994, 14(1): 49—55.
- [6] 田荣章, 王祝堂. 铝合金及其加工手册[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2000.
- [7] 梅中义, 高红. 飞机铝合金结构件数控加工变形分析与控制[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(2): 146—150.
MEI Zhong-yi, GAO Hong. Analyzing and controlling distortion of aircraft aluminium alloy structural part in NC machining[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(2): 146—150.
- [8] WANG Zhao-jun, CHEN Wu-yi, ZHANG Yi-du, et al. Study on the machining distortion of thin-walled part caused by redistribution of residual stress[J]. *Chinese Journal Aeronautics*, 2005, 18(2): 175—179.
- [9] LIN Z C, LAI W L, LIN H Y, et al. The study of ultra-precision machining and residual stress for NiP alloy with different cutting speeds and depth of cut[J]. *Journal of Material Technology*, 2000, 97(1): 200—210.
- [10] 孙杰, 柯映林, 吴群, 等. 大型整体结构件数控加工变形校正的关键技术研究[J]. *机械工程学报*, 2003, 39(8): 120—124.
SUN J, KE Y L, WU Q, et al. Study on key technologies of straightening large-scale integrated parts' distortion due to machining[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(8): 120—124.
- [11] STARKE Jr E A, STALEY J T. Application of modern aluminum alloys to aircraft[J]. *Computational Material Science*, 1996, 32(1—2): 131—172.
- [12] HEINZ A, HASZLER A, KEIDEL C, et al. Recent development in aluminum alloys for aerospace applications[J]. *Material Science and Engineering: A*, 2000, 280: 102—107.
- [13] 张洪伟, 张以都, 吴琼, 等. 航空整体结构件加工变形校正技术研究[J]. *兵工学报*, 2010, 31(8): 1072—1077.
ZHANG Hong-wei, ZHANG Yi-du, WU Qiong, et al. Research on deformation straightening for aeronautical monolithic components[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(8): 1072—1077.
- [14] 刘鸿文. 板壳理论[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987.
- [15] PREVEY P. Residual Stress in Design, Process and Material Selection[M]. Ohio: ASM International, 1987. 11—19.
- [16] PREVEY P. ASM Metals Handbook, Volume 10[M]. Ohio: ASM International, 1986. 780—798.

收稿日期: 2012-02-10; 修订日期: 2013-05-16

作者简介: 王强(1983—), 男, 工程师, 主要从事金属材料表面强化抗疲劳制造技术应用研究, 联系地址: 北京市 81 信箱 5 分箱(100095), E-mail: akqiangwang@aliyun.com