

铝锂合金喷丸强化数值模拟及试验

王永军¹, 孙宝龙¹, 张 炜², 高国强², 乔明杰²

(1. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072;

2. 中航飞机股份有限公司 西安飞机分公司, 西安 710089)

摘 要: 根据喷丸强化工艺过程的特点, 利用 ABAQUS 有限元计算软件建立了模拟喷丸残余应力场的三维有限元模型. 在此模型基础上研究了喷丸速度、弹丸直径及弹丸数量等因素对铝锂合金喷丸残余应力场的影响规律, 进而对比了单弹丸模型、均布式阵列弹丸模型和随机弹丸模型下残余应力场的分布规律. 采用 X 射线残余应力仪和电解抛光方法得到喷丸强化后沿铝锂合金试件厚度方向的残余应力分布规律. 残余应力层深度约为 0.24 mm, 最大残余应力出现在 0.08 mm 处, 验证了有限元模型的有效性.

关 键 词: 铝锂合金; 喷丸强化; 有限元模拟; 残余应力; 弹丸模型

中图分类号: V261; TG178

文献标志码: A

Numerical simulation and experiment on shot peening of Al-Li alloy

WANG Yong-jun¹, SUN Bao-long¹, ZHANG Wei²,

GAO Guo-qiang², QIAO Ming-jie²

(1. School of Mechanical Engineering,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Xi'an Aircraft Company, Aircraft Limited by Share Limited,

Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

Abstract: According to the characteristics of shot peening process, a three-dimensional finite element model was established by using ABAQUS finite element software to simulate the residual stress field in shot peening process. Based on this model, the effects of shot of Al-Li alloy process parameters such as velocity, diameter and number of projectiles on residual stress field of Al-Li alloy was studied respectively. Then the distributions of the residual stress field between single shot model, uniform arrays shot model and random shot model of projectiles were compared. Furthermore, the residual stress distribution in Al-Li alloy specimen thickness direction was measured by using X-ray residual stress analyzer and electrolytic polishing method. The depth of residual compressive stress layer is 0.24 mm. The maximum compressive residual stress occurs at 0.08 mm. It verifies the validity of the finite element model.

Key words: Al-Li alloy; shot peening; finite element simulation; residual stress; shot model

铝锂合金是一种新型的航空航天结构材料, 在铝合金中加入锂之后, 可以降低合金的比重, 增加刚度, 同时仍然保持较高的强度、较好的抗腐蚀

性和抗疲劳性以及适宜的延展性. 在铝合金中每加入 1% (质量分数) 的锂, 可使合金的密度降低约 3% 的同时使合金的弹性模量增加约 6%, 与普

收稿日期: 2013-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(51275420)

作者简介: 王永军(1968—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 博士, 主要研究方向为先进钣金成形工艺及装备、先进复合材料成形工艺及装备技术. E-mail: wyongjun@nwpu.edu.cn

通铝合金相比,可使结构件的质量减少 10%~15%,刚度提高 15%~20%^[1-3]. 因此,现代航空航天飞行器大量使用铝锂合金以减少飞行器的结构质量,节约能源.

喷丸强化是利用高速弹丸流对金属构件表面进行撞击,使试件表面产生残余应力场,以提高零件的疲劳性能和改变零件的表面状态^[4],与其他表面处理工艺相比,喷丸强化工艺具有实施过程简便、强化效果明显、消耗成本低等特点^[5-6],广泛应用于航空航天、军事工业以及汽车工业等高精尖技术领域.

影响喷丸强化效果的工艺参数主要有喷丸速度、弹丸直径以及弹丸流量等. 为了研究不同工艺参数对喷丸强化效果的影响规律,国内外学者相继提出了多种喷丸有限元模型. Meguid 等提出了有限元法准静态模型^[7-8]模拟喷丸残余应力场; Baragetti 等用轴对称二维和三维模型对单个弹丸喷丸过程进行模拟^[9-10]; Majzoubi 等提出均布式阵列弹丸模型^[11-12]; Miao 等^[13]采用随机弹丸模型模拟喷丸残余应力场;国内学者凌祥、张洪伟等^[14-15]也采用均布式阵列弹丸模型对弹丸垂直撞击试件过程进行了三维有限元模拟;李源等^[16]采用随机弹丸模型模拟及试验研究多弹丸喷丸过程.

目前国内外主要针对钢材或常规铝合金材料进行喷丸强化过程的数值模拟及试验研究,而对于航空用铝锂合金材料喷丸强化过程的相关研究文献较少,尤其是喷丸强化工艺参数对铝锂合金材料残余应力场影响规律的研究更少.

本文采用商业有限元计算软件 ABAQUS 对铝锂合金喷丸强化过程进行数值模拟,分析了均布式弹丸阵列模型与随机弹丸模型下铝锂合金材料内部的残余应力场分布规律,并使用 X 射线残余应力分析仪,逐层测定对铝锂合金试件喷丸后残余应力场.

1 喷丸强化过程数值模拟

由于喷丸过程弹丸流速度高,垂直于接触界面的弹丸速度是瞬时不连续的,因此是高速瞬态冲击动力学接触问题,其接触和碰撞过程中力学响应是不平滑的. 因此采用显式动力有限元算法,以获得最终形成的残余应力场.

要直接模拟成千上万个弹丸反复撞击靶材表面的物理过程是非常困难的,可以采用模拟有限个弹丸在局部撞击靶材的物理过程间接模拟整体试件的实际喷丸过程.

试验材料为 2196-T8511 铝锂合金,受喷板材模型为边长为 1 mm 的正方形,厚度为 1 mm. 弹丸直径为 0.28 mm,覆盖率近乎 100%. 表 1 为 2196-T8511 铝锂合金板材和弹丸的材料性能参数,图 1 为 2196-T8511 铝锂合金板材应力应变关系. 在实际喷丸强化过程中,由于所采用的钢弹丸在强度和硬度上都要高于受喷板材,不会发生较大的变形,因此,在模拟过程中将弹丸约束成刚性体.

表 1 材料相关性能参数			
Table 1 Performance parameters of materials			
材料	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
2196-T8511 铝锂合金	2 660	76.26	0.33
弹丸	7 810	206	0.30

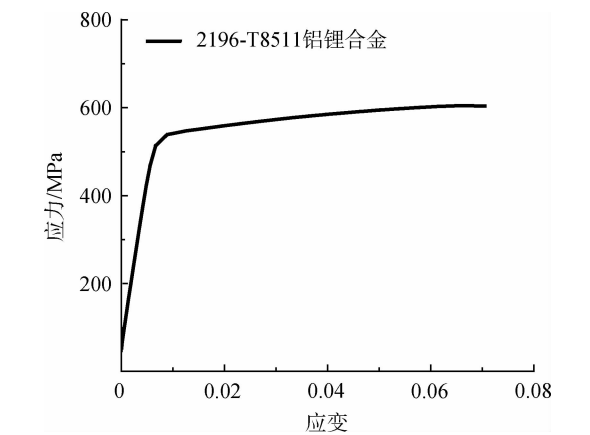


图 1 2196-T8511 铝锂合金材料真实应力应变曲线
Fig. 1 Curve of true stress and strain of 2196-T8511 Al-Li alloy

1.1 单弹丸模型

弹丸以一定的喷射速度撞击受喷试件表面,从而对受喷试件表面施加冲击载荷. 在 ABAQUS 中通过定义弹丸的初始速度来模拟弹丸与受喷试件表面撞击过程中所产生的冲击载荷. 设定弹丸运动方向为 Z 轴方向. 采用库仑摩擦模型来描述弹丸和板材之间的接触,以减少两接触面的切向运动,使计算结果更加稳定,摩擦因数定为 0.2^[17]. 设定板材单元类型为 C3D8R,在弹丸撞击区域采用局部细化网格方式划分单元.

1.2 均布式阵列弹丸模型

在实际喷丸强化过程中,受喷试件的表面近乎处处受到弹丸的冲击作用,以保证接近 100%的喷丸覆盖率. 为了达到较高的喷丸覆盖率,应尽可能减少喷丸有限元模型的盲点区域,这样会使后续弹丸

与先前弹丸的冲击区域发生一定程度重叠. 因此, 弹丸数目越多, 表示覆盖率越高. 本文建立 13 弹丸喷丸强化有限元模型, 将 13 个弹丸分 4 排放置, 每排球心所在平面间距为 1 倍球的直径. 以同样的速度依次撞击试件表面. 有限元模型见图 2.

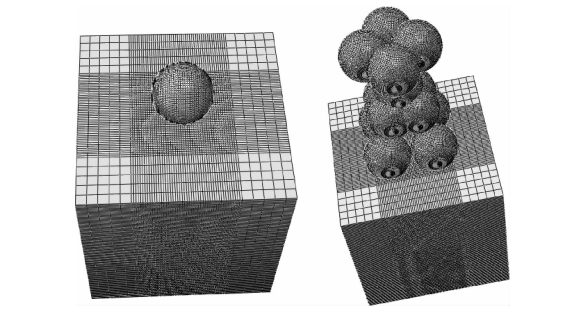


图 2 单弹丸模型与均布式阵列弹丸模型

Fig. 2 Models of single shot and uniform array shots

1.3 随机弹丸模型

为充分考虑到实际喷丸过程中弹丸打击位置具有的随机性, 采用空间位置随机分布的弹丸来模拟实际喷丸过程. 弹丸的位置采用 MATLAB 软件提供的 rand 随机函数产生, 并保证每两个弹丸中心之间的距离大于弹丸直径 D , 以达到更真实的模拟效果. 设定受喷试件表面上弹丸的弹着点所在区域范围 $(-0.14\text{ mm} \leq X \leq 0.14\text{ mm}, -0.14\text{ mm} \leq Y \leq 0.14\text{ mm})$, 可以保证喷丸后形成的弹坑位于设定的弹丸撞击区域内, 坐标系的原点位于该铝锂合金板上表面的中心. Z 轴沿铝锂合金板的厚度方向, N 为弹丸数量, 每个弹丸的三维坐标由下式确定.

$$\begin{cases} X = -0.14 + 0.28 \times \text{rand}(1,1) \\ Y = -0.14 + 0.28 \times \text{rand}(1,1) \\ Z = -0.2 - N \times 0.2 \times \text{rand}(1,1) \end{cases}$$

随机弹丸模型见图 3 所示, MATLAB 程序流程如图 4 所示.

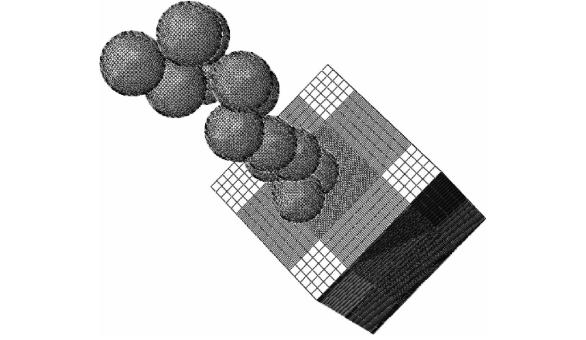


图 3 随机弹丸模型

Fig. 3 Model of random shot

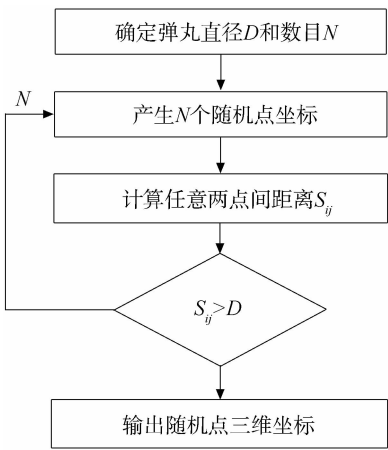


图 4 弹丸随机位置计算流程

Fig. 4 Calculation flow chart for random position of shots

2 喷丸残余应力分布规律

在喷丸过程中, 弹丸的撞击作用使受喷试件发生不均匀的塑性变形, 从而使受喷试件的表面及内部产生残余应力. 弹丸运动方向与 Z 轴方向一致, 试件受喷表面平行于 XOY 平面, 阻碍试件表面疲劳裂纹生成和扩展起主要作用的是平行于试件表面 (即平行于 XOY 平面) 方向的横向残余应力, 因此本文研究的残余应力特指的是横向残余应力, 选择 YOZ 平面法向方向的正应力 S_{xx} 代表残余应力. 为了更加准确地反映试件沿厚度方向上模拟计算的残余应力分布, 采用弹丸撞击区域内的残余应力的平均值作为残余应力的度量. 为提取模拟结果撞击区域内的平均残余应力分布, 在撞击区域内沿厚度方向定义 $49(7 \times 7)$ 条路径, 取 49 条路径的残余应力的平均值作为整个撞击区域内残余应力的度量. 路径规划如图 5 所示. 其中路径规划区域的边长为 0.2 mm , 即路径规划点所在区域范围为 $(-0.1\text{ mm} \leq X \leq 0.1\text{ mm}, -0.1\text{ mm} \leq Y \leq 0.1\text{ mm})$.

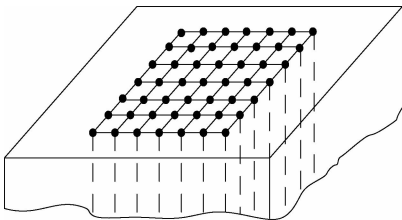


图 5 残余应力提取路径规划

Fig. 5 Planning of residual stress extraction path

2.1 不同弹丸直径对残余应力分布的影响

利用单弹丸模型研究不同弹丸直径对试件喷丸后沿厚度方向残余应力分布的影响规律. 弹丸直径大小选取 0.10, 0.28, 0.58, 0.80 mm 四种, 喷丸速度为 30 m/s. 模拟结果如图 6 所示.

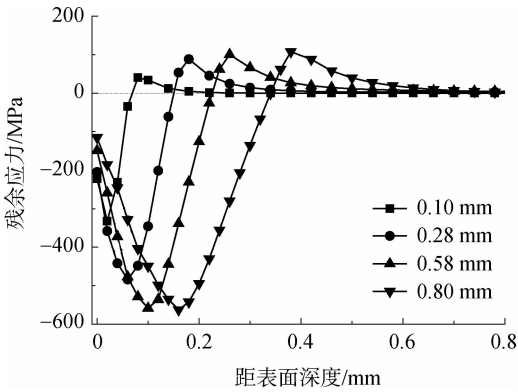


图 6 弹丸直径对残余应力分布的影响
Fig. 6 Effect of shot diameter on the residual stress distribution

由图 6 可知,随着弹丸直径的增加,残余应力层厚度明显增加,而且应力峰值的数值和深度也随之增加. 这表明弹丸直径对于残余应力的影响比较显著.

2.2 不同喷丸速度对残余应力分布的影响

利用均布式阵列弹丸模型研究不同喷丸速度对试件喷丸后沿厚度方向残余应力分布的影响规律,弹丸直径大小选取 0.28 mm,模拟不同喷丸速度 30, 40, 50, 60 m/s 的情况下喷丸后,残余应力的分布,如图 7 所示. 其模拟的弹坑形貌如图 8 所示.

由图 7 可知,随着喷丸速度的提高,残余应力峰值增大,且残余应力层深度也随之增加,但残余

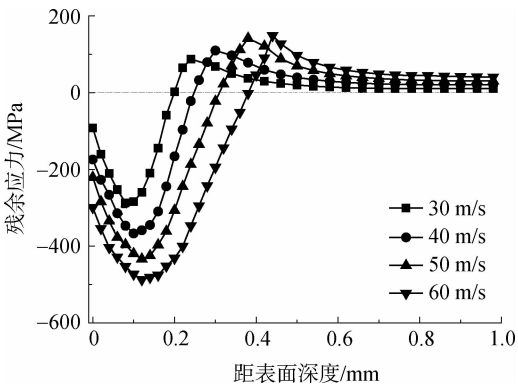


图 7 喷丸速度对残余应力分布的影响
Fig. 7 Effects of shot velocity on the residual stress distribution

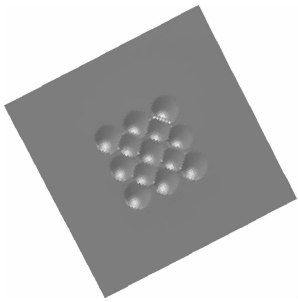


图 8 均布式阵列弹丸模型模拟的弹坑形貌
Fig. 8 Crater morphology simulated by uniform array shot model

应力峰值的深度变化很小.

2.3 不同弹丸数量对残余应力分布的影响

利用随机弹丸模型研究不同弹丸数量对试件喷丸后沿厚度方向残余应力分布的影响规律,弹丸直径大小选取 0.28 mm,弹丸数量选取 13, 16, 19 和 22 四种,喷丸速度选取 30 m/s. 计算结果如图 9 所示. 其模拟的弹坑形貌如图 10 所示.

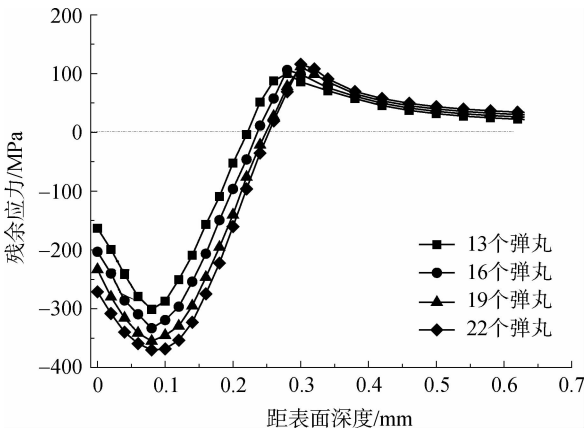


图 9 弹丸数量对残余应力分布的影响
Fig. 9 Effects of shot number on the residual stress distribution

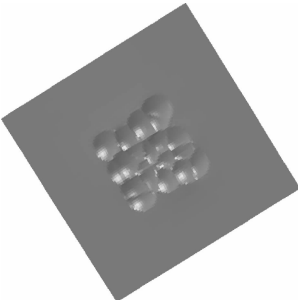


图 10 随机弹丸模型模拟的弹坑形貌
Fig. 10 Crater morphology simulated by random shot model

由图 9 可知,随着弹丸数量的增加,残余应力峰值和残余应力层的厚度逐渐增加,另外,残余应力峰值的深度变化不大。

3 喷丸强度验证

阿尔门试片是用来表征喷丸效果的一种标准样块,材质为 SAE1070 弹簧钢。对其进行单面喷丸,夹具撤除后,试片中由于有残余应力的存在会发生弯曲变形产生一定的弧度,使用弧高度测试仪可以测得弧高度 h ,以此弧高度定义为喷丸强度^[18]。图 11 为喷丸强度试验示意图。

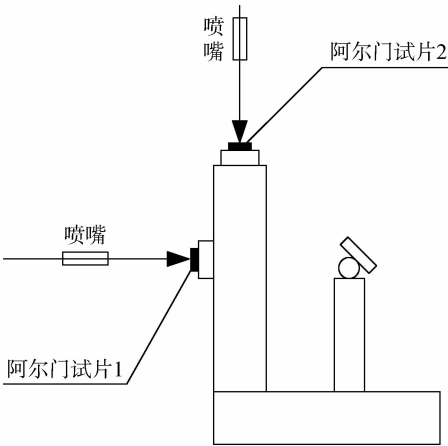


图 11 喷丸强度试验示意图

Fig. 11 Schematic diagram of shot peening strength experiment

阿尔门试片主要有 A 型、C 型和 N 型 3 种: N 型阿尔门试片,厚度为 0.031”(0.79 mm); A 型阿尔门试片,厚度为 0.051”(1.29 mm); C 型阿尔门试片,厚度为 0.094”(2.39 mm),本文试验采用的是 A 型阿尔门试片。

根据文献[19],A 型阿尔门试片屈服强度为 1120 MPa,抗拉强度为 1270 MPa,密度为 7380 kg/m³,弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.31。有限元模拟的相关参数根据试验喷丸工艺参数确定,喷丸速度 $V=30$ m/s(通过对已测得的不同喷丸压力和弹丸流量下的喷丸速度数据进行插值得到),弹丸直径 $D=0.28$ mm,代入均布式阵列弹丸模型。A 型阿尔门试片喷丸后的残余应力分布如图 12 所示。

为了计算弧高度值,假设残余应力 σ_{es} 均匀分布在 A 型阿尔门试片的上表面,喷丸强度的计算公式^[17]为

$$h = \frac{3L^2 \int_A \sigma_{es}(y) y dA}{2Eb\delta^3}$$

(1)

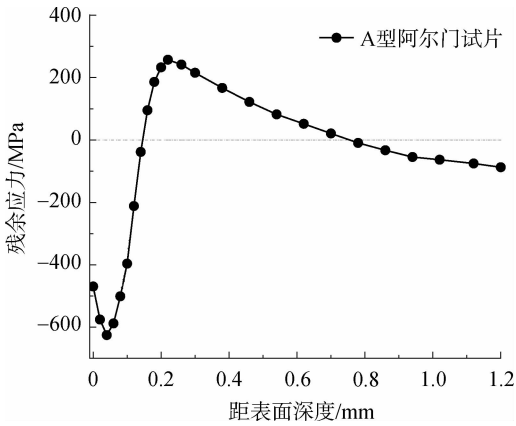


图 12 A 型阿尔门试片残余应力分布

Fig. 12 Residual stress distribution of A Almen piece

式中阿尔门试片弹性模量 E 为 200 GPa,试片的宽度 b 为 19 mm,试片厚度 δ 为 1.27 mm,弧高度测量仪支撑点之间距离的一半 L 为 31.75 mm,A 为垂直于试片长度方向的横截面积。

将图 12 中的残余应力数据点进行数据拟合后得到残余应力曲线,按照式(1)在 MATLAB 软件中编程进行积分运算,得到弧高度值为 0.17 mm,而现场试验测得的弧高度为 0.16 mm,偏差为 $\epsilon=(0.17-0.16)/0.16=6.3\%$,说明两者吻合得较好,验证了本文中有限元建模方法的有效性。

4 喷丸强化试验研究

利用 WSL(MP2500)数控喷丸机对 2196-T8511 铝锂合金挤压型材进行喷丸强化试验,该喷丸机为气动式喷射,喷丸参数如表 2 所示。

表 2 喷丸强化试验工艺参数

Table 2 Processing parameters of shot peening experiment

参数	数值
弹丸直径/mm	0.28
喷丸压力/MPa	0.18
弹丸流量/(kg/min)	8
机床速度/(mm/min)	404

试验材料为 2196-T8511 铝锂合金,屈服强度 $\sigma_s=527.14$ MPa,抗拉强度 $\sigma_b=592.83$ MPa,喷丸强化后采用 X 射线残余应力分析仪和电解抛光法进行残余应力测量,得到沿试件厚度方向不同深度的残余应力值分布情况。

采用 JCM-6000 台式扫描电镜观察铝锂合金试件喷丸强化后的表面弹坑形貌,见图 13 所示。

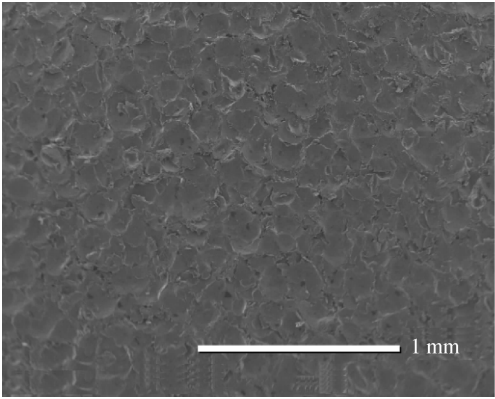


图 13 试件喷丸强化后的表面弹坑形貌
Fig. 13 Crater morphology on surface of specimen after shot peening

由图 13 可知,弹坑呈现不规则分布,并且每个弹坑的大小也不相同,这与随机模型模拟的弹坑结果较为相似。

4.1 喷丸速度的测量

在开展喷丸试验过程中,由于喷丸管路对弹丸的限制作用,使得每个弹丸的速度存在差异.因此,将特定条件下弹丸的平均喷射速度看作其理论喷丸速度进行研究.在测量时,采用喷丸设备自带的高速摄像弹丸速度测量系统,在每种特定的喷丸压力和弹丸流量条件下随机取 9 个弹丸进行速度测量,并取平均值,试验测量数据如图 14 所示,可见,喷丸速度随喷丸压力增大而增大;随弹丸流量增大而减小。

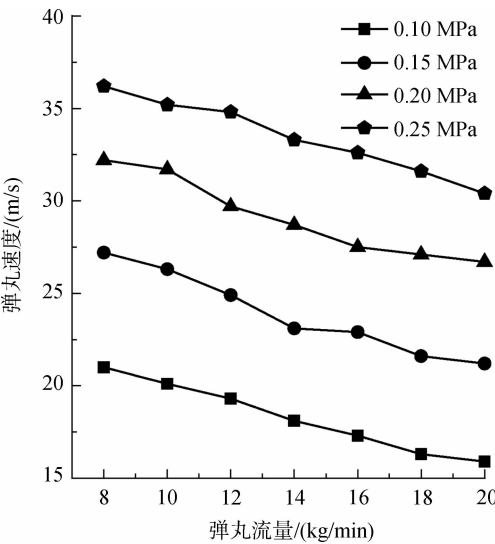


图 14 不同喷丸压力和弹丸流量下的喷丸速度
Fig. 14 Shot velocity under different shot pressure and flow rate

4.2 喷丸后残余应力的测量

残余应力测量设备为加拿大 PROTO 公司的 iXRD 组合式 X 射线残余应力分析仪,功率为 300 W,X 射线残余应力分析仪测试深度有限,一般距离金属表层 10~30 μm,为了得到沿试件厚度方向不同深度的残余应力值,需要采用电解抛光法进行剥层,来保证在剥层过程中不产生附加的应力,提高测量结果的可靠性.电解抛光设备为 PROTO 公司生产的与 iXRD 组合式 X 射线残余应力分析仪相配套的产品,电解液由 60 mL 高氯酸、590 mL 甲醇和 350 mL 乙二醇单丁醚混合而成.试件如图 15 所示,试件截面厚度为 2 mm。

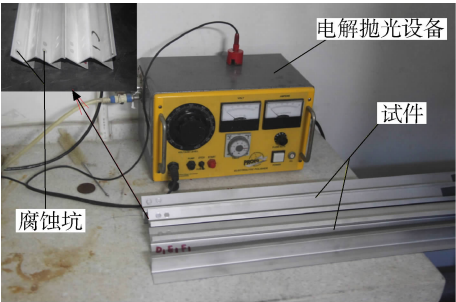


图 15 喷丸试件
Fig. 15 Specimens after shot peening

由于在残余应力测量过程中存在测量误差的影响,为了使测量结果更加准确,在同一深度时需要进行多次测量取平均值,并将测量结果进行数据拟合,得到沿试件厚度方向不同深度下的残余应力曲线,如图 16 所示.残余应力层深度约为 0.24 mm,最大残余应力出现在距离表面深度 0.08 mm 处。

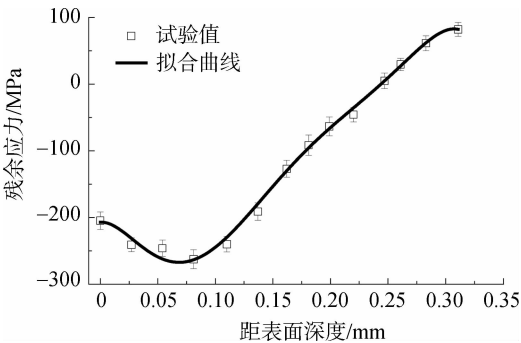


图 16 铝锂合金残余应力测试结果
Fig. 16 Residual stress experiment results of Al-Li alloy

为了验证了本文有限元模型的可靠性,将试验测得的残余应力分布与有限元模拟结果进行对比,分析不同弹丸模型模拟结果和试验值之间的

差别。3种弹丸模型下模拟结果和试验结果对比情况见图17所示。

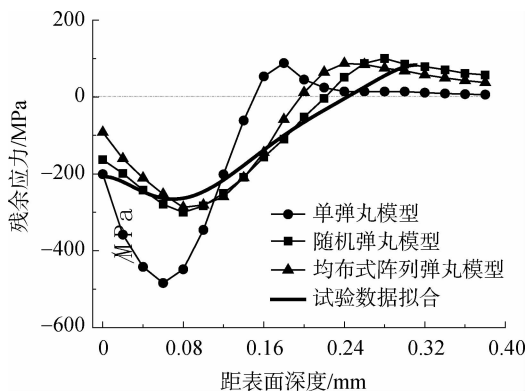


图17 模拟结果与试验结果对比

Fig. 17 Comparison of simulation results and experimental results

由图17可知,单弹丸模型模拟结果的残余应力峰值与试验测试结果相比偏大86%,而残余应力层厚度与试验结果相比偏小39%,残余应力峰值的深度与试验测试结果相比偏小26%。均布式阵列弹丸模型模拟结果的残余应力峰值与试验测试结果相比偏大8%,而残余应力层厚度与试验结果相比偏小19%,而残余应力峰值的深度与试验测试结果相比偏小2%。随机弹丸模型模拟结果的残余应力峰值试验结果相比偏大14%,而残余应力层的厚度模拟值比实际值偏小7%,残余应力峰值的深度与试验测试结果相比偏小2%。

5 结论

本文主要针对喷丸强化工艺的特征,采用商业有限元软件ABAQUS对铝锂合金喷丸强化过程进行数值模拟,分析了不同弹丸模型下喷丸强化后材料内部的残余应力场分布规律,对喷丸强度进行了计算分析,同时开展了相关的试验研究,得到以下结论。

1) 随着弹丸直径的增加,残余应力层厚度、残余应力的峰值及其深度随之增加。随着喷丸速度的提高,残余应力值和残余应力层深度也随增加,但残余应力峰值的深度变化不大。随着弹丸数量的增加,残余应力峰值和残余应力层的厚度逐渐增加,但残余应力峰值的深度变化很小。

2) 通过铝锂合金喷丸强化试验对3种不同弹丸模型进行了验证。在弹丸直径 $D=0.28\text{ mm}$,喷丸压力为 0.18 MPa ,弹丸流量为 8 kg/min 及机床速度为 404 mm/min 等喷丸强化试验工艺参数

情况下,进行铝锂合金喷丸强化试验。随机弹丸模型比均布式阵列弹丸模型能够更好地模拟实际喷丸强化的残余应力分布情况。

参考文献:

- [1] 霍红庆,郝维新,耿桂宏,等. 航天轻型结构材料铝锂合金的发展[J]. 真空与低温,2005,11(2):63-69.
HOU Hongqing, HAO Weixin, GENG Guihong, et al. Development of the new aircraft material aluminum-lithium alloy[J]. Vacuum and Cryogenics, 2005, 11(2): 63-69. (in Chinese)
- [2] 周昌荣,潘青林,朱朝明,等. 新型铝锂合金的研究和发展[J]. 材料导报,2004,18(5):30-32.
ZHOU Changrong, PAN Qinglin, ZHU Chaoming, et al. Development and study of new types aluminum-lithium alloy[J]. Materials Review, 2004, 18(5): 30-32. (in Chinese)
- [3] 郑子樵,李劲风,陈志国,等. 铝锂合金的合金化与微观组织演化[J]. 中国有色金属学报,2011,21(10):2337-2351.
ZHENG Ziqiao, LI Jinfeng, CHEN Zhiguo, et al. Alloying and microstructural evolution of Al-Li alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2337-2351. (in Chinese)
- [4] 王齐栓,张九强. 喷丸强化在模具表面处理中的应用[J]. 漯河职业技术学院学报,2009,8(5):21-22.
WANG Qishuan, ZHANG Jiuqiang. Surface treatment application of shot peening in moulds[J]. Journal of Luohe Vocational Technology College, 2009, 8(5): 21-22. (in Chinese)
- [5] 栾伟玲,涂善东. 喷丸表面改性技术的研究进展[J]. 中国机械工程,2005,16(15):1405-1409.
LUAN Weiling, TU Shandong. Recent trends on surface modification technology of shot peening[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(15): 1405-1409. (in Chinese)
- [6] 王梅,陆山,古远兴,等. 喷丸强化对 TC11 合金模拟叶片高周疲劳寿命影响的试验[J]. 航空动力学报,2013,28(3):507-512.
WANG Mei, LU Shan, GU Yuanxing, et al. Experiment of effect of shot peening strengthening on TC11 alloy simulation blade's HCF life[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(3): 507-512. (in Chinese)
- [7] Meguid S A, Shagal G, Stranart J C. Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses[J]. Finite Element in Analysis and Design, 1999, 31(3): 179-191.
- [8] Meguid S A, Klair M S. An examination of the relevance of coindentation studies to incomplete coverage in shot peening using the finite element method[J]. Journal of Mechanics of Working Technology, 1985, 11(1): 87-104.
- [9] Baragetti S. Three-dimension finite element procedures for shot-peening residual stress field prediction[J]. International Journal of Computer Applications in Technology,

- 2001,14(1):51-63.
- [10] Baragetti S,Guallano M,Vergani L. A numerical procedure for shot peening optimization by means of non-dimensional factors[J]. International Journal of Material and Product Technology,2000,15(1):91-103.
- [11] Majzoobi G H,Azizi R,Alavi Nia A. A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts[J]. Journal of Materials Processing Technology,2005,164/165(1):1226-1234.
- [12] Majzoobi G H,Azadikhah R,Nemati J. The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6[J]. Materials Science and Engineering,2009,516(1):235-247.
- [13] Miao H Y,Larose S,Perron C. On the potential application of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening[J]. Advances in Engineering Software,2009,40(10):1023-1038.
- [14] 凌祥,彭薇薇,倪红芳. 喷丸三维残余应力场的有限元模拟[J]. 机械工程学报,2006,42(8):182-189.
- LING Xiang,PENG Weiwei,NI Hongfang. Simulation of 3D residual stress field of shot peening by dynamic finite element analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2006,42(8):182-189. (in Chinese)
- [15] 张洪伟,张以都,吴琼. 喷丸强化残余应力场三维数值分析[J]. 航空动力学报,2010,25(3):603-609.
- ZHANG Hongwei,ZHANG Yidu,WU Qiong. Three dimensional numerical analysis of residual stress field for shot peening[J]. Journal of Aerospace Power,2010,25(3):603-609. (in Chinese)
- [16] 李源,雷丽萍,曾攀. 弹丸束喷丸有限元模型数值模拟及试验研究[J]. 机械工程学报,2011,47(22):43-48.
- LI Yuan,LEI Liping,ZENG Pan. Shot stream finite element model for shot peening numerical simulation and its experiment study[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2011,47(22):43-48. (in Chinese)
- [17] Kim T,Lee J H,Lee H,et al. An area-average approach to peening residual stress under multi-impacts using a three-dimensional symmetry-cell finite element model with plastic shots[J]. Materials and Design,2010,31(1):50-59.
- [18] 李源,雷丽萍,曾攀. 基于静力等效的喷丸工艺数值模拟[J]. 塑性工程学报,2011,18(3):70-74.
- LI Yuan,LEI Liping,ZENG Pan. The numerical simulation of shot peening process with an equivalent static loading method[J]. Journal of Plasticity Engineering,2011,18(3):70-74. (in Chinese)
- [19] Miao H Y,Larose S,Perron C,et al. An analytical approach to relate shot peening parameters to Almen intensity[J]. Surface and Coatings Technology,2010,205(7):2055-2066.