

# 飞机腐蚀损伤构件喷丸强化后的表面残余应力场

程秀全<sup>1</sup>, 夏琴香<sup>2</sup>, 陈志超<sup>2</sup>, 林列书<sup>1</sup>

(1.广州民航职业技术学院, 广州 510403; 2.华南理工大学, 广州 510640)

**摘要:** 目的 研究喷丸方式、飞机构件腐蚀损伤表面形状参数对受喷表面残余应力场的影响。方法 以 7075 铝合金腐蚀损伤飞机构件为研究对象, 采用玻璃弹丸作为喷丸介质, 通过 Abaqus 软件建立随机多弹丸有限元模型, 获得固定方向喷丸和固定角度喷丸两种喷丸方式下以及不同损伤表面几何形状参数下的表面残余应力场, 并通过试验进行验证。结果 采用固定角度喷丸能够获得比较均匀的表面残余应力场, 而固定方向喷丸时, 损伤构件表面不同部位的残余应力存在明显差异。结论 在其他参数不变的情况下, 弹丸入射角越小, 残余压应力越大。应尽量采用垂直撞击方式进行喷丸处理, 喷丸处理前清理腐蚀产物时, 应形成较为平缓的损伤面过渡区域。

**关键词:** 老龄飞机; 腐蚀损伤; 飞机构件; 喷丸强化; 表面残余应力

**中图分类号:** TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)05-0051-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.05.007

## Surface Residual Stress Field by Shot Peening on Corroded Aircraft Structural Part

CHENG Xiu-quan<sup>1</sup>, XIA Qin-xiang<sup>2</sup>, CHEN Zhi-chao<sup>2</sup>, LIN Lie-shu<sup>1</sup>

(1. Guangzhou Civil Aviation College, Guangzhou 510403, China;

2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To investigate the effects of impact methods and surface geometric parameters of aircraft corroded parts on residual stress field of the target damaged surface by shot peening. **Methods** Glass beads and 7075 corrosion damaged civil aircraft structural parts were taken as the research objects, the Abaqus software was adopted and the finite element model of the multiple and random impacts was established. The residual stress fields under the conditions of different impact methods, fixed impact directions and fixed impact incidence angles, and different surface geometric parameters of the damaged parts were obtained. The verified experiments were carried out. **Results** A nearly uniform residual stress field on the target surface could be achieved by the impact method of fixed impact incidence angle, and the stresses disparities on different regions of the damaged surface existed obviously under the condition of fixed impact direction. **Conclusion** When the other parameters were invariant, the smaller the incidence angle of impact, the larger the compressive residual stresses on the target surface. It is better to impact

收稿日期: 2015-12-03; 修订日期: 2016-01-30

**Received:** 2015-12-03; **Revised:** 2016-01-30

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51575117); 国家自然科学基金(民航联合基金)资助项目(61179051)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China(NSFC,51575117) and Joint Fund between NSFC and the Civil Aviation Administration of China(CAAC,61179051)

**作者简介:** 程秀全(1964—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为飞机结构及金属塑性加工。

**Biography:** CHENG Xiu-quan(1964—), Male, Master, Professor, Research focus: aircraft structure and metal forming.

**通讯作者:** 夏琴香(1964—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为金属塑性加工与模具计算机技术。

**Corresponding author:** XIA Qin-xiang(1964—), Female, Doctor, Professor, Research focus: advanced forming technology and computational modeling.

the target surface along its normal direction. A smooth damaged transitional surface should be formed during clearing the corrosion of the parts before shot peening.

**KEY WORDS:** aging aircraft; corrosion damage; aircraft structural parts; shot peening strengthening; surface residual stress

喷丸强化工艺是利用高速喷射的弹丸流碰撞工件的表面,使工件表面层产生塑性变形,形成残余压应力,从而提高构件的疲劳强度<sup>[1]</sup>及耐磨性<sup>[2]</sup>,因而得到广泛应用。民用飞机结构件因存在腐蚀环境及飞机老龄化而常出现腐蚀损伤,为提高零件使用寿命,需对零件损伤部位进行表面喷丸强化处理。

喷丸强化有限元模型大致经历了从二维模型<sup>[3]</sup>到三维模型<sup>[4]</sup>,从单弹丸模型<sup>[5]</sup>到多弹丸模型<sup>[6]</sup>,从部分对称工件模型<sup>[7]</sup>到完整工件模型<sup>[8]</sup>,从弹丸有规律阵列分布<sup>[3]</sup>到弹丸随机分布<sup>[9]</sup>的发展过程。在已发表的文献中,工件受强化表面均为不带损伤缺口的光滑平面,而对于具有斜面、圆弧面等过渡区域的复杂损伤表面的喷丸强化,尚未展开研究。对喷丸强化构件残余应力场的研究均集中于残余应力沿构件深度方向的分布规律,而沿构件表面方向的残余应力分布规律研究则未见报道。文中主要研究具有复杂形貌表面特征的腐蚀损伤构件喷丸强化残余应力场沿构件表面的分布规律。

## 1 有限元建模

飞机局部腐蚀损伤构件如图 1a 所示。在损伤程度满足“可修复损伤”的条件下,可以采用喷丸强化工艺对损伤构件进行强度修复处理,因此首先需要将腐蚀产物去除。在对腐蚀区域进行清理打磨处理后,零件的损伤表面呈现复杂形貌特征,工件受喷表面可分为五个部分,即水平面 I (零件原有表面)、凸圆弧面 II、斜面 III、凹圆弧面 IV 和水平

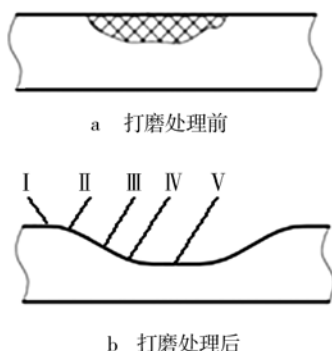


图 1 腐蚀损伤缺口形状  
Fig.1 Notched shape of corrosion damage

面 V (打磨后生成的表面),如图 1b 所示。

以民用飞机常用的 7075 铝合金作为受喷材料,采用双线性材料模型作为该材料喷丸强化的本构模型<sup>[10-13]</sup>,喷丸介质为玻璃弹丸,材料的物理及机械性能见表 1。受喷工件模型及几何尺寸如图 2a 所示。其中,凸圆弧面和凹圆弧面的圆角半径  $R$  相等,分别取 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mm;斜面倾角  $\alpha$  分别取 20°、25°、30°、35°、40°。采用 Abaqus 有限元软件建立弹丸的随机喷丸模型。在距受喷表面深度为 0.2 mm 的范围内为表层网格区,采用六面体网格,网格尺寸小于弹丸直径的 1/10<sup>[14]</sup>,为 0.01 mm,并且均匀划分;其余区域采用四面体型网格,网格尺寸随深度增大而增大。由于弹丸的硬度大于工件的硬度,可以认为弹丸始终保持刚体状态<sup>[15]</sup>,故对所有玻璃弹丸施加刚体约束。有限元模型如图 2b 所示。

表 1 材料的物理及机械性能

Tab.1 Physical and mechanical properties of the materials

材料	密度 $\rho$ /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性 模量 $E/\text{GPa}$	泊松 比 $\mu$	屈服 强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	硬化系 数 $H'$ /MPa
7075 铝合金	2810	70.5	0.29	305	983.3
玻璃弹丸	2700	7.9	0.3		

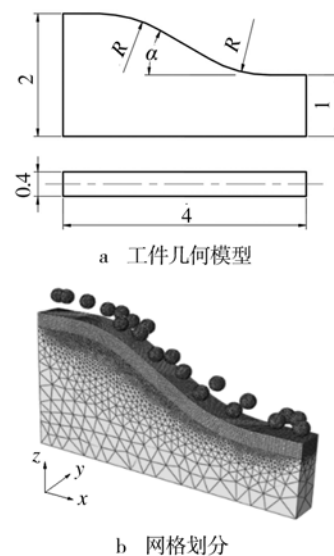


图 2 模型几何形状及网格划分  
Fig.2 Geometrical shape and gridding of the model

玻璃弹丸的载荷以速度场的方式施加, 分别对固定方向喷丸和固定角度喷丸两种不同方式进行研究。当采用固定方向喷丸时, 弹丸始终以速度  $V$  沿着同一方向 ( $-z$  方向) 入射, 如图 3a 所示; 当采用固定角度喷丸时, 弹丸始终以速度  $V$  垂直于工件表面喷射, 如图 3b 所示。

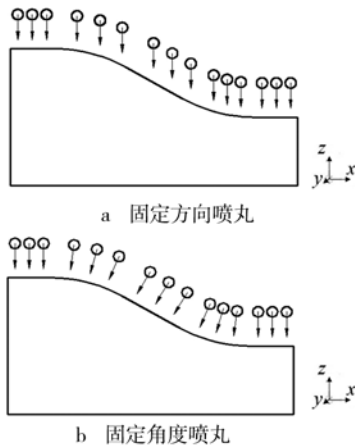


图 3 玻璃弹丸的入射方式  
Fig.3 Impact method of glass beads

## 2 表面残余应力场有限元模拟

### 2.1 表面残余应力沿受喷表面的分布规律

为了获得工件受喷表面有限元模拟的残余应力分布, 并能够与表面残余应力的实际测量结果进行对比, 沿图 3 所示模型的水平方向 ( $x$ ) 在受喷表面取 40 条平行路径, 间距均为 0.01 mm, 分别求各  $x$  坐标下的残余应力值, 取 40 个残余应力值的算术平均值作为该  $x$  坐标下的  $\sigma_x$  值。由于受喷工件表面不是单一平面, 而是带有圆弧面和斜面过渡区域的复杂表面, 为研究受喷点沿表面方向的残余应力, 需要将  $O_{xyz}$  坐标系中的应力分量变换到随应力采样点坐标变化而变化的  $O_{uvw}$  坐标系中进行描述, 如图 4 所示, 其中  $u$  轴、 $v$  轴、 $w$  轴分别为工件受喷表面的切向、轴向、法向。

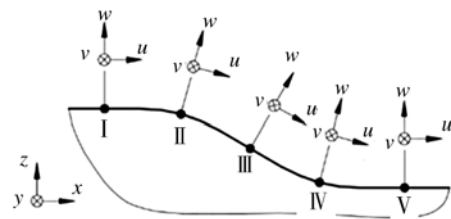


图 4 工件表面的切向坐标系  
Fig.4 Coordinate system along the tangential direction

在如图 4 所示的平面 I、V 上,  $O_{uvw}$  坐标系与  $O_{xyz}$  坐标系完全重合。在圆弧面 II、IV 和斜面 III 上,  $O_{uvw}$  坐标系中仅  $v$  轴与  $O_{xyz}$  坐标系的  $y$  轴重合, 而  $u$  轴和  $w$  轴则相对  $x$  轴和  $z$  轴分别旋转了相同的角度  $\beta$ ,  $\beta$  为受喷点切线与水平线的夹角, 当受喷点位于斜面时,  $\beta$  与斜面倾角  $\alpha$  相等。根据应力分量的坐标变换可得:

$$\sigma_u = \sigma_x \cos^2 \beta + \sigma_z \sin^2 \beta - \tau_{xz} \sin 2\beta \quad (1)$$

在模型  $x$  方向取 200 个点, 计算出各点的表面残余压应力  $\sigma_u$  模拟结果。图 5 是以固定方向喷丸时, 在参数  $R=2$  mm,  $\alpha=30^\circ$ ,  $V=50$  m/s, 弹丸直径  $D=0.2$  mm, 喷丸覆盖率  $C=100\%$  的情况下, 表面残余应力  $\sigma_u$  沿受喷表面的分布结果, 图中圆点表示各取样点的  $\sigma_u$  模拟值。可见, 弹丸随机分布造成表面残余应力场  $\sigma_u$  的波动处于高频振荡状态。为了清晰反映残余应力的分布状态, 采用低通滤波器对其进行滤波处理, 得到表面残余应力  $\sigma_u$  的分布规律, 如图 5 中的实线所示。可以看出, 采用固定方向喷丸时, 平面 I、V 上的残余压应力值基本相同, 约为 -175 MPa; 斜面 III 上的残余压应力均值最小, 约 -135 MPa, 与平面上的残余压应力值相差约 30%; 凸弧面 II 上的残余压应力值随着  $x$  坐标值增大而逐渐减小; 凹弧面 IV 上的残余应力值随着  $x$  坐标值增大而逐渐增大。各区域的表面残余压应力值大致有以下规律: 平面上的最大, 斜面上的最小, 圆弧面上的居中。造成这种差异的主要原因

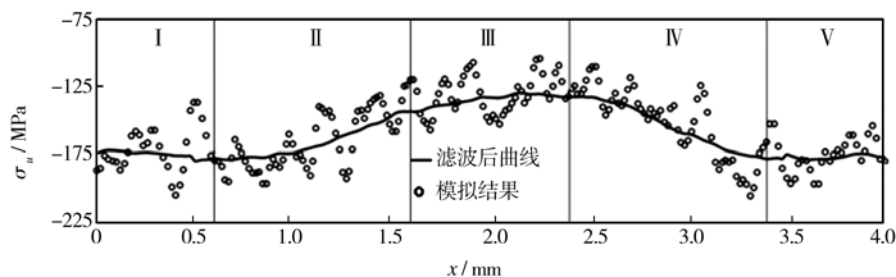


图 5 固定方向喷丸时表面残余应力  $\sigma_u$  的分布情况  
Fig.5 Distribution of  $\sigma_u$  under the fixed impact direction

是弹丸的入射角不同,入射角越小,则残余压应力越大。

在同样参数下采用固定角度喷丸时,表面残余应力 $\sigma_u$ 沿受喷表面的分布结果如图6所示。可见,各区域上的表面残余压应力值变化不大,在-170~-180 MPa之间波动,但总体趋势是凹圆弧面IV上的最大,凸圆弧面II上的最小,平面I、V和斜面III上的居中,与文献[16]结论相同。由于弹丸入射角的原因,固定角度喷丸时的II、III、IV区域表面残余应力均大于固定方向喷丸时的数据。

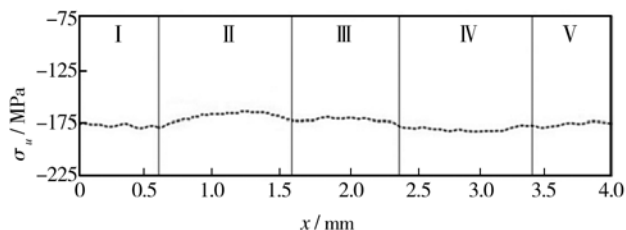


图6 固定角度喷丸时表面残余应力 $\sigma_u$ 的分布情况  
Fig.6 Distribution of  $\sigma_u$  under the fixed impact incidence angle

## 2.2 受喷表面形状对残余应力的影响

在固定方向喷丸时,由于弹丸的入射角不同,导致表面残余应力发生变化,但由于固定方向喷丸操作简单,容易控制,因此实际工程中多以这种方式进行喷丸强化。为了分析固定方向喷丸情况下受喷表面形状特征参数对表面残余应力的影响,分别在圆弧区II、IV和斜面区III的中部各取一点B、C、D(如图7所示),研究圆弧半径 $R$ 及斜面倾角 $\alpha$ 变化时,表面残余应力 $\sigma_u$ 的变化规律。

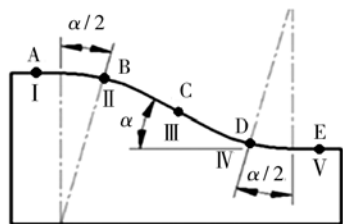


图7 表面残余应力取值点  
Fig.7 Test points of surface residual stress

图8为在参数 $D=0.2$  mm,  $V=50$  m/s,  $C=100\%$ 情况下, $\alpha=30^\circ$ 时过渡圆弧半径 $R$ 对 $\sigma_u$ 的影响规律,以及 $R=2$  mm时斜面倾角 $\alpha$ 对 $\sigma_u$ 的影响规律。可以看出,B、D两点的表面残余应力 $\sigma_u$ 基本相等,并且基本不随过渡圆弧半径 $R$ 的变化而变化。这是因为凸、凹圆弧面的半径相等,B、D又分别位于

各自圆弧段的中点,因此无论 $R$ 取何值,B、D两点的切线都相互平行且与水平线的夹角均为 $\alpha/2$ ,即弹丸撞击B、D两点的入射角保持不变,从而导致B、D两点的表面残余应力与 $R$ 取值无关的现象。C点的表面残余压应力 $\sigma_u$ 随斜面倾角 $\alpha$ 的增加而明显减小,当倾角由 $20^\circ$ 增加 $40^\circ$ 时,残余压应力从140 MPa减小至96 MPa。这同样是由于在固定方向喷丸时,倾角 $\alpha$ 的增加导致弹丸撞击的入射角增大所致。因此,实际清理构件腐蚀产物时,应形成较为平缓的损伤面过渡区域,即减小斜面倾角。

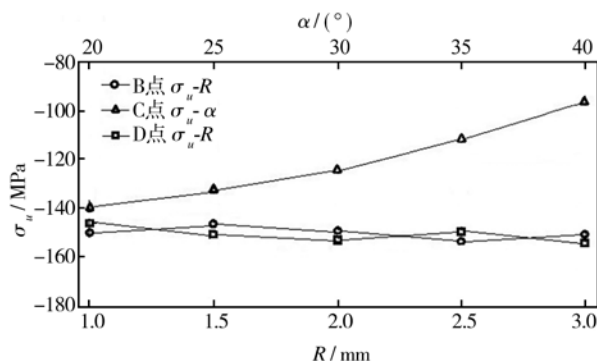


图8 受喷表面形状参数对表面残余应力 $\sigma_u$ 的影响  
Fig.8 Effects of target shape parameters on  $\sigma_u$

## 3 试验验证

由于图7所示B、D两点的切线相互平行,两点的表面残余应力与圆弧半径无关,因此可以将有限元模型放大后进行喷丸试验。试验时,取参数 $R=2$  mm,  $\alpha=30^\circ$ ,  $D=0.2$  mm,  $V=50$  m/s,  $C=100\%$ 。采用固定方向进行喷丸强化后,分别对图7所示5个点(A—E)进行表面残余应力测量,并与模拟值进行比较,结果见图9。由图可见,实测值与模拟值吻合较好,实测表面残余应力的分布规律与模拟结果完全相符,最大相对偏差约为8.91%,证明了所建立有限元模型的可靠性。

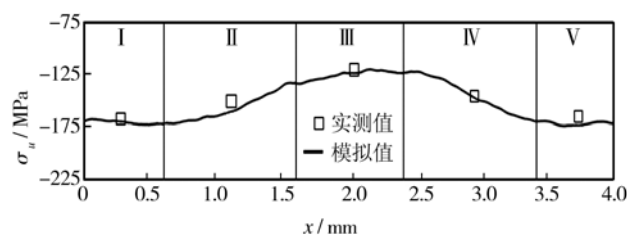


图9 固定方向喷丸时 $\sigma_u$ 实测值与模拟值的对比  
Fig.9 Comparison of  $\sigma_u$  between test values with simulation values under fixed impact direction

## 4 结论

1) 采用固定方向喷丸时, 不论受喷表面是圆弧面, 还是斜面, 表面残余应力均随着弹丸入射角的增大而减小。

2) 采用固定角度喷丸时, 各平面(含斜面)受喷区域的表面残余应力相等。与平面受喷区域相比, 凹圆弧面上的残余应力稍大, 凸圆弧面上的残余应力稍小。

3) 采用固定角度喷丸时, 可以得到较为均匀的表面残余应力场, 并且沿表面垂直方向进行喷丸可以得到较大的表面残余应力。

4) 实际工作中, 在清理构件腐蚀产物时, 应形成较为平缓的过渡区域损伤表面, 以便采用固定方向喷丸时可以得到较强的表面残余压应力场。

## 参考文献

- [1] 高玉魁. TC18 超高强度钛合金喷丸残余压应力场的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(11): 1209—1212.  
GAO Yu-kui. Residual Compressive Stress Field in TC18 Ultra-high Strength Titanium Alloy by Shot Peening[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(11): 1209—1212.
- [2] 田峰, 杨辉. 40Cr 表面高能喷丸纳米化及其耐磨性能[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 52—54.  
TIAN Feng, YANG Hui. Experimental Study on Wear Behavior of Nano-crystallization Surface of 40Cr[J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 52—54.
- [3] GUAGLIANO M. Relating Almen Intensity to Residual Stresses Induced by Shot Peening: a Numerical Approach[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 110(3): 277—286.
- [4] 黄韬, 张铁虎. 喷丸残余应力及工艺参数优化[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(21): 5145—5150.  
HUANG Tao, ZHANG Tie-hu. Residual Stress Induced by Shot Peening and Processing Parameters Optimization[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(21): 5145—5150.
- [5] HARDY C, BARONET C N, TORDION G V. The Elasto-plastic Indentation of a Half-space by a Rigid Sphere[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1971, 3(4): 451—462.
- [6] 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 Hong-wei, ZHANG Yi-du, WU Qiong. Tree-dimensional Numerical Analysis of Residual Stress Field for Shot-peening[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(3): 603—609.
- [7] AL-HASSANI S T S, KORMI K, WEBB D C. Numerical Simulation of Multiple Shot Impact[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Shot Peening. Warsaw, Poland: [s. n.], 1999: 217—227.
- [8] EDBERG J, LINDGREN L E, MORI K. Shot Peening Simulated by Two Different Finite Element Formulations[C]//Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications. Rotterdam: Balkema, 1995: 425—430.
- [9] MYLONAS G I, LABEAS G. Numerical Modelling of Shot Peening Process and Corresponding Products: Residual Stress, Surface Roughness and Cold Work Prediction[J]. Surface & Coating Technology, 2011, 205(19): 4480—4494.
- [10] 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 Li-ping, ZENG Pan. Shot Stream Finite Element Model for Shot Peening Numerical Simulation and Its Experiment Study[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(22): 43—48.
- [11] HONG T, OOI J Y, SHAW B. A Numerical Simulation to Relate the Shot Peening Parameters to the Induced Residual Stresses [J]. Engineering Failure Analysis, 2008, 15: 1097—1110.
- [12] MEGUID S A, SHAGAL G, STRANART J C. Finite Element Modelling of Shot-peening Residual Stresses [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999(92/93): 401—404.
- [13] ROUHAUD E, OUAJKA A, OULD C, et al. Finite Element Model of Shot Peening, Effects of Constitutive Laws of the Material [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Shot Peening. Marne la Vallee, France: [s. l.], 2005: 107—112.
- [14] HAN K, OWEN D R J, PERIC D. Combined Finite/Discrete Element and Explicit/Implicit Simulations of Peen Forming Process [J]. Engineering Computations, 2002, 19(1): 92—118.
- [15] MIAO H Y, DEMERS D, LAROSE S, et al. Experimental Study of Shot Peening and Stress Peen Forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210: 2089—2102.
- [16] RAMANA Grandhi. Laser Peening Optimization for Reliable Fatigue Life of Structural Components [C]// Proceedings of the 3rd International Conference on New Forming Technology. Harbin, China: [s. n.], 2012: 1—6.