喷丸方法对不规则构件表面残余应力分布规律的影响

盛湘飞[1a]，李智[1b]，赵科宇[1a]，程秀全[2]

（1.南华大学 a.机械工程学院 b.土木工程学院，湖南 衡阳 421001；
2.广州民航职业技术学院 飞机维修工程学院，广州 510403）

摘 要：目的 优化喷丸强化工艺，提升喷丸工艺的强化效果。**方法** 采用预定义场和基于移动矢量的快速建模方法，实现满足表面全覆盖和不同喷丸方法的有限元模拟。通过对模拟结果中的应力值进行局部坐标转换，分析不同喷丸方法条件下残余应力沿受喷构件表面切线方向的分布规律。**结果** 在喷射方向固定的喷丸方法中（方法-1），弹丸撞击角度在不同区域内的变化范围为 60°~90°，且随弹丸撞击角度的增加，弹丸撞击时的动能消耗率和应变能转变率分别由 71.6%和 5.3%提高到 89.0%和 7.5%，表面覆盖率也随之增加。在喷射角度固定的喷丸方法中（方法-2），弹丸撞击角度始终为 90°，表面覆盖率分布均匀，从而使得在凸圆弧面、斜面和凹圆弧面内采用方法-2 获得的表面残余应力比方法-1 的大，且两者差值沿+x 方向呈现先增加、后保持稳定、再减少的变化规律。**结论** 与喷射方向固定的喷丸方法相比，采用喷射角度固定的喷丸方法，因弹丸撞击角度大，弹丸撞击动能消耗率及应变能转变率高，且表面全覆盖能得以保证，构件在凸圆弧面、斜面和凹圆弧面内能获得较大的表面残余压应力值。

关键词： 喷丸方法；不规则构件表面；残余应力；数值模拟
中图分类号： TG176 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3660(2018)12-0099-06
DOI： 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.12.014

Influence of Shot Peening Method on the Distribution Rule of Surface Residual Stress for the Irregular Component

SHENG Xiang-fei[1a], LI Zhi[1b], ZHAO Ke-yu[1a], CHENG Xiu-quan[2]

(1.a.School of Mechanical Engineering; b.School of Architecture and Construction, University of South China, Hengyang 421001, China; 2.School of Aircraft Maintenance Engineering, Guangzhou Civil Aviation College, Guangzhou 510403, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize the shot peening process and further improve the strengthening effect of shot peening. The finite element modelling in conformity with full surface coverage and different shot peening methods was established by the predefined field and the rapid modeling method based on moving vector. The distribution rule of residual stress along with the tangential direction of the peened component surface by different shot peening methods was analyzed through the local coordinate conversion of stress in the simulation results. As for the shot peening method with fixed direction (method-1), the impact

收稿日期： 2018-04-10；**修订日期：** 2018-11-25
Received: 2018-04-10; **Revised:** 2018-11-25
基金项目： 国家自然科学基金项目（51575117）；国家自然科学基金（民航联合基金）（61179051）；湖南省教育厅项目（15C1183）
Fund: National Natural Science Foundation of China(51575117), National Natural Science Foundation of China and Civil Aviation Administration of China (61179051), Project of education department in Hunan province (15C1183)
作者简介： 盛湘飞（1984—），男，博士，讲师，主要研究方向为喷丸强化工艺及装备。
Biography: SHENG Xiang-fei (1984—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: shot peening technology and equipment.
通讯作者： 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。邮箱：chengxiuquan@caac.net
Corresponding author: CHENG Xiu-quan (1964—), Male, Master, Professor, Research focus: aircraft structure and metal forming. E-mail: chengxiuquan@caac.net

angle in different areas changed within 60° to 90°. As the impact angle increased, the consumption rate of kinetic energy and conversion rate of strain energy during impaction respectively increased from 71.6% and 5.3% to 89.0% and 7.5% and the surface coverage increased as well. As for the shot peening method with fixed angle (method-2), the impact angle was always 90° and surface coverage was evenly distributed so that the residual stress induced by shot peening method-1 was larger than that in shot peening method-2 in convex arc surface, oblique surface and concave arc surface. The difference value between the stresses increased first, then kept stable, and finally decreased along with the +*x* direction. Compared with the shot peening method with fixed direction, the shot peening method with fixed angle is adopted, because the consumption rate of kinetic energy and the conversion rate of strain energy during the impact are higher due to larger impact angle and the full surface coverage can be ensured. Therefore, larger surface residual stress can be obtained in convex arc surface, oblique surface and concave arc surface of the component.

KEY WORDS: shot peening method; irregular component surface; residual stress; numerical simulation

喷丸工艺是由大量高速弹丸连续撞击构件表面，使构件表层材料产生强烈塑性变形，并形成具有一定深度的残余压应力场[1-3]。该压应力场可明显改善构件服役时的表层应力状态，显著提高构件抗疲劳失效的能力。目前，喷丸强化工艺已在航空航天、武器装备、汽车及船舶等领域得到广泛应用[4-6]。

构件服役时，其表面承受的载荷最大，且服役环境最为恶劣，尤其对于不规则构件表面，因局部区域易产生应力集中，表面受损概率大幅增加[7]。因此，探索此类构件表面残余应力的分布规律，并优化其喷丸工艺条件，是提高喷丸强化效果的关键。当前，最常用的残余应力测量方法是 X 射线衍射法，该方法虽属无损测量范畴，但测量过程易受环境因素干扰，成本较高[8-9]。近年来，随着计算机和有限元模拟技术的发展，越来越多的研究人员尝试采用模拟或模拟与试验相结合的研究方法来探索喷丸残余应力场的形成与变化机制。研究结果表明，通过合理搭配弹丸种类、弹丸直径、喷射速度、喷射角度和表面覆盖率等工艺条件，可明显改善喷丸残余应力场的分布状态[10-12]。

通过疏理国内外相关研究工作不难发现，关于喷丸残余应力分析方面的工作仍存在以下不足之处：1）有限元模型相对简单，受喷构件表面基本以平面为主，无法满足相对复杂构件表面研究的需要；2）模型尺寸小，表面覆盖率相对较低，难以准确表征不同喷丸工艺参数条件下的强化特点；3）弹丸撞击构件表面的方向固定，未考虑受喷表面几何特征变化带来的影响。文中将采用预定义场和基于矢量移动的快速建模方法，建立满足表面全覆盖率的不规则构件表面喷丸有限元分析模型，并探索不同喷丸方法下残余应力沿受喷构件表面切线方向的分布规律，研究成果可为复杂构件表面喷丸工艺的有限元建模以及喷丸方法的选取提供理论支撑。

1 建立有限元分析模型

因喷丸工艺的复杂性，为降低有限元建模难度，提出以下三种假设：1）弹丸几何形状均为球体，尺寸和物理力学性能均相同；2）弹丸只撞击构件表面一次；3）不考虑弹丸之间的接触和干涉。文中基于 Python 编程语言和 Abaqus6.10 软件平台建立了不规则构件表面随机喷丸有限元分析模型，如图 1 所示。因弹丸撞击构件时的大塑性变形发生在表面层，为提高计算效率，仅对模型表层网格进行细化（厚度为 0.2 mm），单元类型选用 C3D8R 八节点六面体减缩积分单元，划分后模型总网格数高达 392 995。另外，采用 Johnson-Cook 本构模型对喷丸过程中材料的变形特性进行描述（该模型可反映材料在塑性变形过程中的应变硬化、应变速率硬化和温度软化效应[13-14]），如式（1）所示，并采用动态显式算法解算弹丸与构件间的撞击过程。

$$\sigma=(A+B\varepsilon^n)\left[1+C\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\left[1-\left(\frac{T-T_0}{T_m-T_0}\right)^m\right] \tag{1}$$

式中：A、B、n、C 和 m 的取值见表 1，弹丸和构件材料的力学性能参数见表 2。

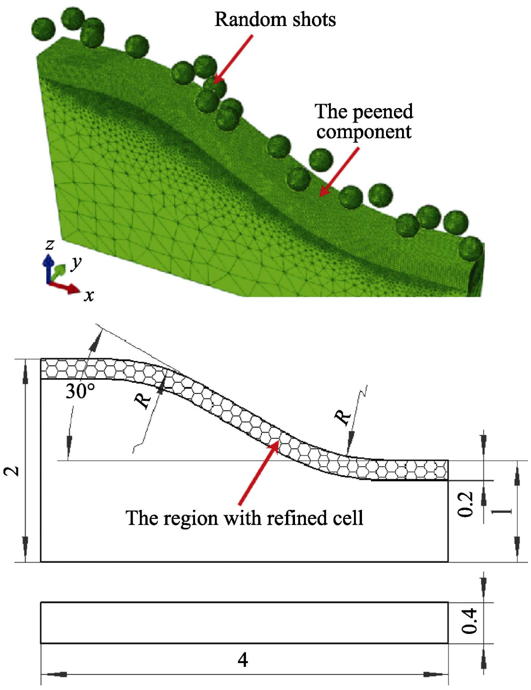


图 1 不规则构件表面喷丸工艺有限元分析模型（R=2 mm）
Fig.1 Finite element analytic model of shot peening for the component with irregular surface (R=2 mm)

表 1　7075 铝合金的 Johnson-Cook 本构模型常数
Tab.1 Constitutive model constants of Johnson-Cook for 7075 aluminum alloy

A/MPa	B/MPa	C	m	n
305	347	0.017	1.61	0.5

表 2　材料静态力学性能参数
Tab.2 Static mechanical property parameters of materials

Materials	Density ρ/(kg·m^{-3})	Young's modulus E/GPa	Poisson's ratio v
Glass shots	2700	7.9	0.30
7075 aluminium alloy	2810	70.5	0.29

本文研究对象的表面几何特征相对复杂，包括平面、凸圆弧面、斜面和凹圆弧面，故采用两种喷丸方法，即喷射方向固定的喷丸方法（方法 1，即弹丸的喷射方向始终保持不变）和喷射角度固定的喷丸方法（方法 2，即弹丸喷射方向始终与受喷构件表面保持垂直），如图 2 所示。考虑到研究对象几何特征的复杂性，为减少不规则构件表面喷丸有限元分析模型的前期建模工作，提高模拟计算效率，采用预定义场方法实现模型间历史计算信息的自动传递，并采用基于移动矢量的快速建模方法，在保留所有建模信息的前提下，仅通过改变弹丸空间位置来获得后续其他模型。

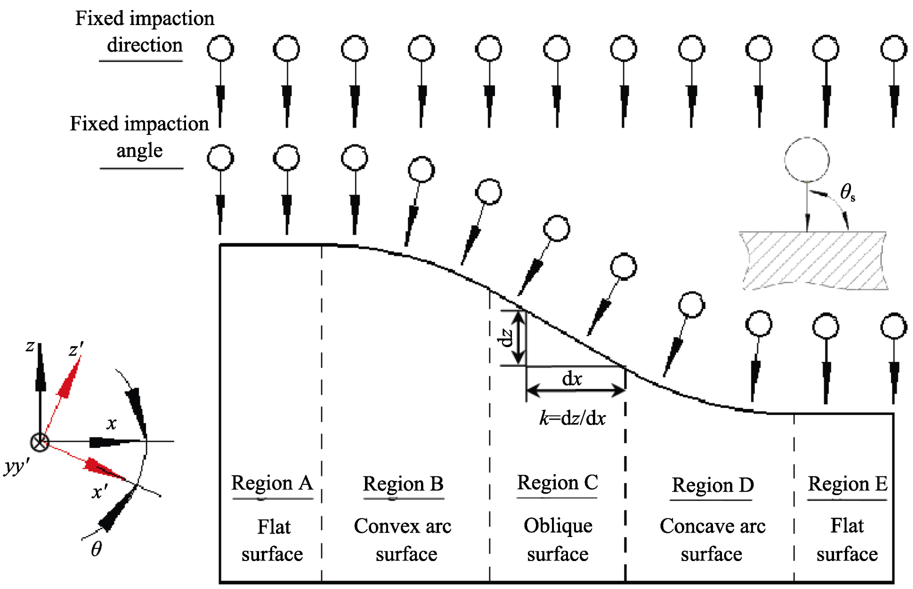


图 2　两种喷丸方法
Fig.2 Two types of shot peening methods

2　有限元模拟结果与分析

两种喷丸方法获得的有限元模拟结果如图 3 所示，模拟时所用喷丸工艺参数：弹丸直径为 0.2 mm，喷射速度为 100 m/s，表面覆盖率为 100%。

2.1　应力坐标转换

由于 Abaqus 模拟结果文件中的残余应力为全局坐标系中 x 方向的主应力值，因本文拟研究残余应力沿构件表面切线方向的分布规律，故需将应力结果 σ_{xx}（即图 3 中的 S_{11}）进行局部坐标变换，转换方法如下：

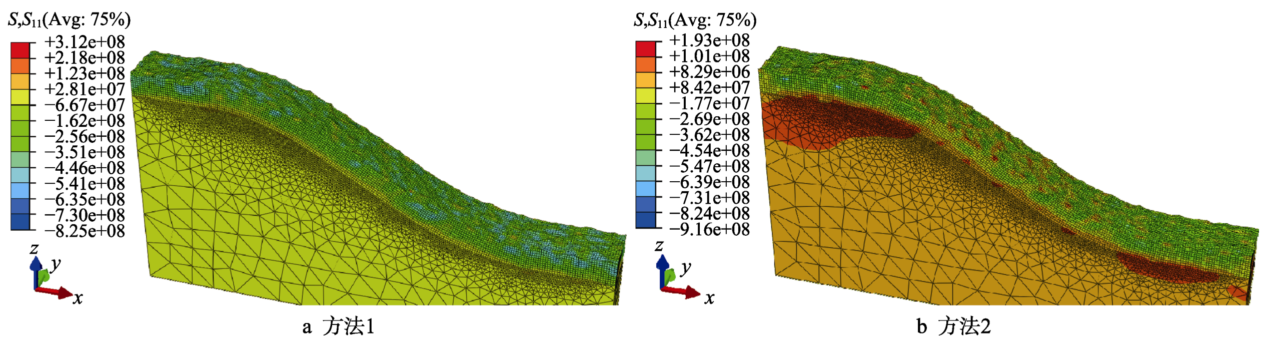


图 3　两种喷丸方法对应的有限元模拟结果
Fig.3 Results of finite element simulation for two types of shot peening methods: a) method-1; b) method-2

$$[\sigma]=\begin{bmatrix}\sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz}\\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz}\\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz}\end{bmatrix} \tag{2}$$

$$[\sigma']=\begin{bmatrix}\sigma_{x'x'} & \sigma_{x'y'} & \sigma_{x'z'}\\ \sigma_{y'x'} & \sigma_{y'y'} & \sigma_{y'z'}\\ \sigma_{z'x'} & \sigma_{z'y'} & \sigma_{z'z'}\end{bmatrix} \tag{3}$$

$$[T]=\begin{bmatrix}\cos\alpha_1 & \cos\beta_1 & \cos\gamma_1\\ \cos\alpha_2 & \cos\beta_2 & \cos\gamma_2\\ \cos\alpha_3 & \cos\beta_3 & \cos\gamma_3\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中：$[\sigma]$、$[\sigma']$分别为全局坐标系 $P(x,y,z)$和局部坐标系 P' (x',y',z')中的应力张量；$[T]$为应力坐标变换矩阵；$(\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3)$、$(\beta_1,\beta_2,\beta_3)$和$(\gamma_1,\gamma_2,\gamma_3)$分别为局部坐标系下的 x'轴、y'轴和 z'轴与全局坐标系下的 x 轴、y 轴和 z 轴之间的方向夹角（且规定当$+x'$逆时针方向旋转至$+x$ 时取正，反之取负）。经分析各坐标轴的几何关系可知，文中$(\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3)$、$(\beta_1,\beta_2,\beta_3)$和$(\gamma_1,\gamma_2,\gamma_3)$分别为$(\theta,90°,90°-\theta)$、$(90°,0°,90°)$、$(90°+\theta,90°,\theta)$，故式（4）可简化为：

$$[T]=\begin{bmatrix}\cos\theta & 0 & -\sin\theta\\ 0 & 1 & 0\\ \sin\theta & 0 & \cos\theta\end{bmatrix} \tag{5}$$

再根据$[\sigma']=[T][\sigma][T]^{\mathrm{T}}$，即可获得局部坐标系下的应力值，文中后续内容中提到的应力值均为变换后的应力值。

2.2 喷丸方法对表面残余应力分布的影响

通过将图 3 中模型表面所有节点 x 方向的应力值提取出来，并进行应力坐标转换，结果如图 4 所示。

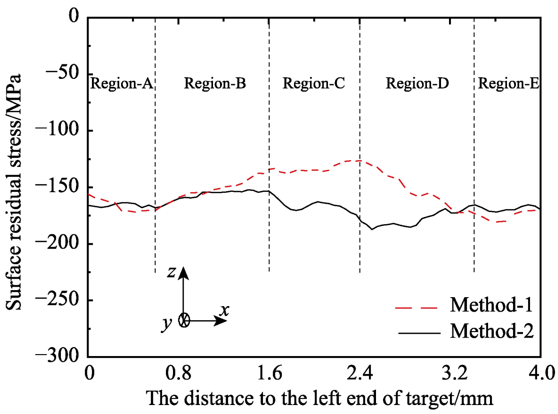


图 4 残余应力沿受喷构件表面切线方向的分布
Fig.4 Distribution of the residual stress along with the tangential direction of the peened component surface

根据图 4 中构件表面残余应力的分布规律可知，当采用喷射方向固定和喷射角度固定两种方法进行喷丸强化时，两种方法获得的表面残余应力 σ_{srs} 在区域 A 和 E 内较为接近。在区域 B、C 和 D 的绝大部分范围内，采用方法 2 获得的 σ_{srs} 比方法 1 的大，而且两者差值沿$+x$ 方向呈现如下变化规律：1）在区域 B 内，差值呈现越来越大的变化趋势；2）在区域 C 内，差值较为一致，且数值相对较大；3）在区域 D 内，差值又呈现越来越小的变化趋势。出现上述变化规律的原因主要有以下两方面。

1）弹丸撞击角度的影响。如图 2 所示，在构件两端的平面内（即区域 A 和 E），弹丸撞击构件表面时的撞击角度 θ_{s}不受喷丸方法的影响，均为 90°。在构件的凸圆弧面、斜面和凹圆弧面内（即区域 B、C 和 D），因在 zox 平面坐标系内的构件表面斜率 k 沿$+x$ 方向是变化的（在区域 B 内，k 逐渐增大；在区域 C 内，k 达到最大值，且保持不变；在区域 D 内，k 逐渐减小），故若采用喷射方向固定的喷丸方法，k 越大，弹丸撞击该位置时的 θ_{s}越小（构件不同，受喷表面区域内的撞击角度变化范围为 60°~90°）；若采用喷射角度固定的喷丸方法，由于弹丸撞击构件不同表面区域时的 θ_{s}始终为 90°，故不受斜率影响。

文中借助喷丸工艺有限元分析模型对三种弹丸撞击角度 θ_{s}（60°、75°、90°）的撞击能量变化情况进行了分析，结果如图 5 所示。在弹丸初始动能相同的情况下（均为 3.58×10^{-5} J），随弹丸撞击时 θ_{s}的增加，弹丸撞击构件表面并离开后的残余动能越少（如图 5a 所示），撞击过程中弹丸与受喷表面间的摩擦耗散能越少（如图 5b 所示），撞击后受喷构件表层材料的应变能越大（如图 5c 所示）。

文中基于弹丸撞击时的初始动能、残余动能和应变能，分别计算了在不同撞击角度条件下的动能消耗率和应变能转变率，见表 3。计算结果表明，弹丸撞击构件表面的撞击角度越大，动能消耗率越大，对应的应变能转变率越高，即越有利于残余压应力的形成。

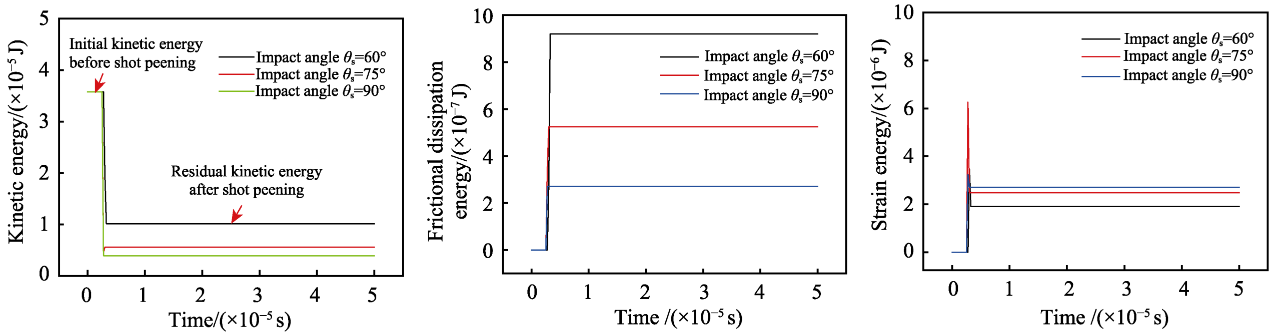
2）表面覆盖率的影响。将构件受喷表面沿$-z$ 方向投影，结果如图 6 所示，各表面区域对应的投影面积 S_{t}分别为 0.24、0.40、0.32、0.40、0.24 mm^2（各表面区域的原始面积 S_{i}分别为 0.24、0.42、0.37、0.42、0.24 mm^2）。若采用喷射角度固定的喷丸方法，因单位受喷面积内弹丸分布密度大致相同，表面覆盖率可基本保持一致。若采用喷射方向固定的喷丸方法，因受喷表面区域的 S_{i} 与 S_{t}不完全相同，受喷构件的表面覆盖率沿$+x$ 方向分布不均，且呈现以下分布特征：在区域 A 和 E 内，因 S_{i}与 S_{t}相同，故受喷表面覆盖率与采用固定角度喷丸方法的相同；在区域 B、C 和 D 内，因 S_{i}大于 S_{t}，故受喷表面覆盖率小于采用喷射角度固定获得的表面覆盖率。另外，表面覆盖率还受表面斜率的影响，斜率越大，表面覆盖率越小，而且任意位置处的表面覆盖率 c_{s}满足以下关系：

$$c_{\mathrm{s}}=c_{\mathrm{s\text{-}p}}\times\sin\theta_{\mathrm{s}} \tag{6}$$

$$\sin\theta_{\mathrm{s}}=S_{\mathrm{t}}/S_{\mathrm{i}} \tag{7}$$

式中：$c_{\mathrm{s\text{-}p}}$为平面处的表面覆盖率。

可见，在其他喷丸工艺参数条件相同的情况下，



a 动能　　b 摩擦耗散能　　c 应变能

图 5　弹丸在不同撞击角度条件下的撞击能量变化情况

Fig.5 Variation of impaction energy for the shots with different impaction angles: a) kinetic energy; b) friction dissipation energy; c) strain energy

表 3　不同撞击角度下弹丸撞击能量转变情况

Tab.3 Conversion of impaction energy for the shots with different impaction angles

Impaction angle/(°)	Residual kinetic energy/(×10^5 J)	Strain energy/ (×10^{-5} J)	Consumption rate of kinetic energy/%	Conversion rate of strain energy/%
60	1.015	0.19	71.6	5.3
75	0.557	0.25	84.4	7.0
90	0.395	0.27	89.0	7.5

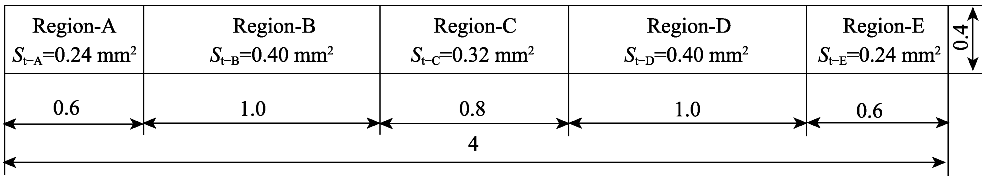


图 6　受喷构件表面在–z 方向的投影

Fig.6 Projection of the peened component surface in –z direction

若采用喷丸方法 1，受喷区域 A 和 E 表面覆盖率达到 100%时，区域 B、C 和 D 的表面覆盖率均低于 100%，且分布不均，从而影响受喷构件表面残余应力的分布。

2.3　试验验证

2.3.1　测量条件

文中采用 X 射线衍射法对试样的表面残余应力进行测量，所用测量设备为 Stresstech X3000 型射线衍射仪，如图 7 所示，测试条件见表 4，并采用交相关法定峰。测试过程参照 GB/T 7704 —2008 无损检测 X 射线应力测定方法执行。

2.3.2　测量结果及分析

由于被测对象包括圆弧面，根据曲面切向残余应力的测量要求，准直器半径与曲率半径之比应小于 1/3。为确保残余应力测量结果的准确性，加工试样的凸、凹圆弧面圆角半径均为 16 mm，是有限元模型相应尺寸的 8 倍。文中选取试样受喷表面 5 个区域(包括试样左端平面区域、凸圆弧面区域中段、斜面区域、凹圆弧面区域中段和右端平面区域)的点进行表面残

图 7　残余应力测量仪器及试样

Fig.7 Measuring apparatus of residual stress and the measured samples

表 4　残余应力测试条件

Tab.4 Test conditions of residual stress

Target	Miller index	Tube voltage/kV	Tube current/mA	Exposure time/s	Pendulum angle	Collimator diameter/mm
CrKα	311	30	6.67	15	－45°~45°	3

余应力 σ_{srs} 的测量，结果如图 8 所示。尽管结果存在一些因测量环境和被测试样局部几何特征尺寸放大等因素引起的误差，但总体变化趋势与有限元模拟基本保持一致，而且，相应位置的有限元模拟结果基本落在试验测量结果的变化范围内。

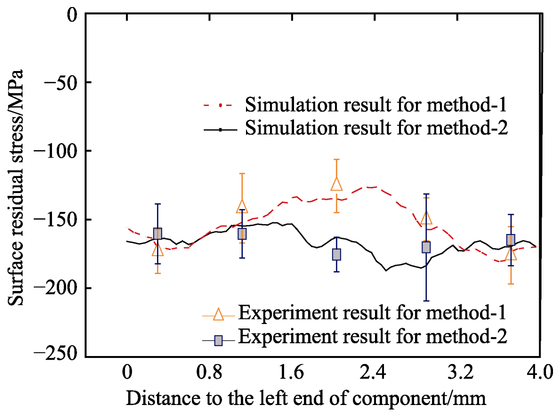


图 8　受喷构件表面残余应力试验验证
Fig.8 Experimental verification of residual stress on the peened component surface

3　结论

1）基于 Python 编程语言和 Abaqus 软件平台，开发了不规则受喷构件表面喷丸的有限元分析模型，该模型可满足表面全覆盖以及两种不同喷丸方法的模拟分析。

2）在喷射方向固定的喷丸方法中，弹丸在不同区域内撞击角度的变化范围为 60°~90°，且随弹丸撞击角度增加，弹丸撞击时的动能消耗率和应变能转变率分别由 71.6%和 5.3%提高到 89.0%和 7.5%，表面覆盖率也随之增加。

3）在喷射角度固定的喷丸方法中，弹丸撞击角度始终为 90°，表面覆盖率分布均匀，从而使得在凸圆弧面、斜面和凹圆弧面内获得的表面残余应力比喷射方向固定喷丸方法的大，且两者差值沿+x 方向呈现先增加、后保持稳定、再减少的变化规律。

4）表面残余应力的有限元模拟结果与试验结果基本吻合。

参考文献：

[1] MEGUID S A, SHAGAL G, STRANART J C. 3D FE analysis of peening of sensitive materials using multiple impingement model[J]. International journal of impact engineering, 2002, 27(2): 119-134.

[2] BASKARAN B H, SRINIVASAN M S, BOB M. Numerical simulation of Almen strip response due to random impacts with strain-rate effects[J]. International journal of mechanical sciences, 2011, 53(6): 417-424.

[3] SEDDIK R, SEDDIK M, ATIG A, et al. Thermo-mechanical relaxation of compressive residual stresses induced by shot peening [J]. Procedia structural integrity, 2016(2): 2182-2189.

[4] 高玉魁. GH742 高温合金激光冲击强化和喷丸强化残余[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(9): 2347-2350.
GAO Yu-kui. Residual stress of GH742 superalloy induced by laser peening and shot peening[J]. Rare metal materials and engineering, 2016, 45(9): 2347-2350.

[5] GONZALEZ J, BAGHERIFARD S, GUAGLIANO M, et al. Influence of different shot peening treatments on surface state and fatigue behavior of Al 6063 alloy[J]. Engineering fracture mechanics, 2017, 185: 72-81.

[6] LLANEZA V, BELZUNCE F J. Study of the effects produced by shot peening on the surface of quenched and tempered steels: Roughness, residual stresses and work hardening[J]. Applied surface science, 2015, 356: 475-485.

[7] ROUSSEAU T, HOC T, GILLES P, et al. Effect of bead quantity in ultrasonic shot peening: Surface analysis and numerical simulations[J]. Journal of materials processing technology, 2015, 225: 413-420.

[8] 强斌，李亚东，顾颖，等. 钢板喷丸处理残余应力场和表面粗糙度数值模拟[J]. 西南交通大学学报，2015, 50(4): 691-697.
QIANG Bin, LI Ya-dong, GU Ying, et al. Numerical simulation of residual stress field and surface roughness for steel plate subjected to shot peening[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(4): 691-697.

[9] GANGARAJ S M H, GUAGLIANO M, FARRAHI G H. An approach to relate shot peening finite element simulation to the actual coverage[J]. Surface & coatings technology, 2014, 243: 39-45.

[10] 闫五柱，刘军，温世峰，等. 喷丸过程中的能量转化及残余应力分布研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(6): 139-142.
YAN Wu-zhu, LIU Jun, WEN Shi-feng, et al. Energy conversion and residual stress distribution in shot peening process[J]. Journal of vibration and shock, 2011, 30(6): 139-142.

[11] GHASEMI A, HASSANI S M, MAHMOUDI A H. Shot peening coverage effect on residual stress profile by FE random impact analysis[J]. Sruface engineering, 2016, 32(11): 861-870.

[12] XIE L C, WANG C X, WANG L Q, et al. Numerical analysis and experimental validation on residual stress distribution of titanium matrix composite after shot peening treatment[J]. Mechanics of materials, 2016, 99: 2-8.

[13] 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.

[14] MAHMOUDI A H, GHASEMI A, FARRAHI G H, et al. A comprehensive experimental and numerical study on redistribution of residual stresses by shot peening[J]. Materials and design, 2016, 90: 478-487.