

# 基于正态分布的喷丸表面覆盖 均匀程度与强化效率研究

盛湘飞<sup>1</sup>, 李智<sup>1</sup>, 周楠楠<sup>1</sup>, 程秀全<sup>2</sup>

(1. 南华大学 机械工程学院, 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** 提高喷丸表面覆盖率分布的均匀程度和强化效率。**方法** 采用图像处理技术分析了单道次喷丸表面覆盖率在喷丸宽度方向上的分布特征, 采用正态分布函数对多道次喷丸表面覆盖率分布的均匀程度以及喷丸强化效率进行了研究。**结果** 单道次喷丸中, 表面覆盖率在喷丸宽度方向上的分布近似呈正态分布。多道次喷丸中, 相邻喷丸道次间距对表面覆盖率影响较大, 道次间距越小, 表面覆盖率越均匀, 两者近似呈线性变化关系。当表面覆盖率均匀程度变化范围在 0.91~0.99 时, 道次间距越小, 喷丸强化效率越高。而且, 喷丸强化效率受构件长度方向尺寸的影响, 尺寸越小, 不同喷丸道次间距对应的喷丸强化效率越接近。**结论** 合理选择相邻喷丸道次间距, 可在保证喷丸强化效率的基础上有效地提高表面覆盖均匀程度。

**关键词:** 正态分布; 喷丸; 道次间距; 表面覆盖率; 均匀程度; 强化效率

**中图分类号:** TG302; TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)05-0227-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.05.035

## Uniformity of Surface Coverage and Strengthening Efficiency in Shot Peening Process Based on Normal Distribution

SHENG Xiang-fei<sup>1</sup>, LI Zhi<sup>1</sup>, ZHOU Nan-nan<sup>1</sup>, CHENG Xiu-quan<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, 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 improve the uniformity of surface coverage and the strengthening efficiency of shot peening (SESP). The distribution characteristics of surface coverage in width direction of shot peening was analyzed in single path shot peening (SPSP) by image processing techniques and the distribution uniformity of surface coverage and SESP were investigated in multi paths shot peening (MPSP) by normal distribution function. In SPSP, surface coverage in width direction of shot peening approximated normal distribution. In MPSP, the surface coverage was significantly affected by the adjacent path spacing. The smaller the path spacing was, the more uniform the surface coverage distribution was. There was an approximate linear re-

收稿日期: 2017-12-05; 修订日期: 2018-01-31

**Received:** 2017-12-05; **Revised:** 2018-01-31

**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, 主要从事喷丸强化工艺及装备研究。

**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。

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

relationship between the two. SESP increased as the path spacing decreased when the uniformity of surface coverage changed from 0.91 ~ 0.99. Moreover, SESP was also influenced by the length of the peened component and the corresponding SESP for different path spacing got closer as the length reduced. The uniformity of surface coverage can be improved on the basis of ensuring the SESP by selecting the adjacent path spacing reasonably.

**KEY WORDS:** normal distribution; shot peening; path spacing; surface coverage; uniformity; strengthening efficiency

喷丸强化工艺可在构件表层形成残余压应力和组织细化层,显著降低裂纹的表面萌生几率和裂纹扩展速率,提高构件疲劳性能,目前已在航空、航天、汽车、船舶等重要领域得到广泛应用<sup>[1,2]</sup>。表面覆盖率(即弹坑面积与构件受喷表面总面积之比)作为喷丸强化工艺最重要的可控参数之一,对受喷构件的残余应力场、表层微观组织和表面完整性均有影响,是确保喷丸强化效果的关键因素<sup>[3]</sup>。

近年来,研究人员对与表面覆盖率相关的科学问题进行了大量研究。研究表明,喷丸残余应力场各特征参数、微观组织细化程度和受喷表面粗糙度等喷丸强化效果评价指标一开始均随表面覆盖率的增加而增加,后期又逐渐趋于平缓<sup>[4-10]</sup>。研究结果同时还表明,经高表面覆盖率喷丸后的强烈塑性形变区在温度和内应力的驱动下极易发生位错运动和晶体自协调,导致残余应力松弛,从而削弱喷丸强化效果<sup>[11]</sup>。文献[12]和文献[13]通过研究表面覆盖率对喷丸抗疲劳性能的影响发现,并非表面覆盖率越高,受喷构件的抗疲劳性能就越好。由此可知,喷丸表面覆盖率是否合理将严重影响工艺的强化效果和效率。

在喷丸工程的工程应用中,单道次喷丸宽度有限,并且在喷丸宽度方向上弹坑分布不均匀,无法满足大表面积喷丸和弹坑均匀覆盖的要求。若采用多道次喷丸,虽可弥补单道次喷丸的不足,但因表面覆盖率的传统检测方法主要依靠经验,存在表面覆盖率分布不均、准确度差和强化效率低等共性工程应用问题。本文主要研究相邻喷丸道次间距对喷丸表面覆盖率分布的影响,以提高表面覆盖率分布的均匀程度和强化效率。

## 1 试验条件

试验所用设备为吸入式气动喷丸机,喷丸处理时,弹丸在负压空气作用下经由喷嘴撞击构件表面,喷嘴位置不变,构件通过夹具安装在试验平台上,并随试验平台移动。试验所用构件为 7075 高强度铝合金板(尺寸为 50 mm×30 mm×5 mm),喷丸介质为玻璃弹丸(直径约为 0.2 mm)。试验采用的工艺参数为:喷射压力 0.4 MPa,构件移动速度 204 mm/s,喷嘴到构件受喷表面的距离 100 mm,喷丸强度约 0.32 mm

(N型)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单道次喷丸表面覆盖率的分布特征

为探索相邻喷丸道次间距对表面覆盖率分布的影响,首先需获取单道次喷丸表面覆盖率的分布特征。弹丸在负压空气作用下经由喷嘴以一定速度撞击构件表面,在撞击区域内,弹坑分布具有以下特征:1)越靠近撞击区域中心,弹坑密度越大;2)撞击区域呈近圆形。采用文献[14]中的受喷构件作为分析对象,该构件为一圆盘零件,直径、厚度分别为 50 mm 和 5 mm,如图 1a 所示。对应的喷丸工艺参数为:喷嘴直径 15 mm,喷嘴到受喷表面的距离 100 mm,钢丸直径 0.3 mm,弹丸流量 0.54 kg/min。在构件的圆形受喷表面选取 4 种区域,分别记为 I、II、III 和 IV,如图 1b 所示,其中区域 I 的直径为 12.5 mm,其他区域的直径均为 6.25 mm。

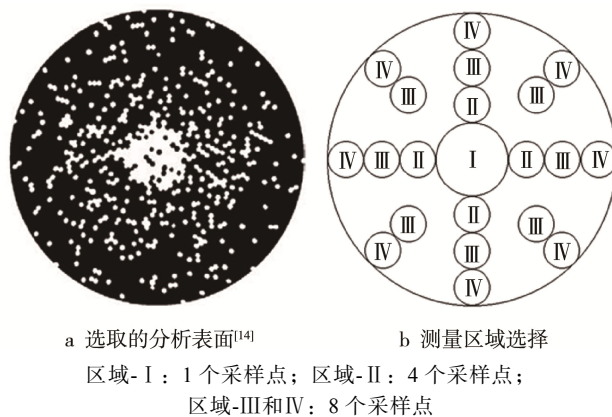


图1 单道次喷丸沿喷丸宽度方向表面覆盖率的测量方案  
Fig.1 Measuring scheme for surface coverage of single path shot peening along with the width direction: a) selected surface to be analyzed<sup>[14]</sup>; b) selection of measuring area

采用基于 Image-J 的图像处理技术对图中 4 种区域的表面覆盖率进行定量计算,由于每一种区域的采样点数不同,结果取平均值,如表 1 所示。将表 1 中的计算结果作直方图,如图 2 所示。从图 2 中不同区域表面覆盖率的计算结果来看,离受喷表面中心越近,表面覆盖率越高,沿喷丸宽度方向上的表面覆盖

表 1 单道次喷丸受喷构件表面不同区域表面覆盖率的计算结果  
Tab.1 Calculation results of surface coverage in different peened areas of component for single path shot peening

| 区域  | 表面覆盖率/% |       |       |       |       |       |       |       | 平均值  |
|-----|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|     | 采样点 1   | 采样点 2 | 采样点 3 | 采样点 4 | 采样点 5 | 采样点 6 | 采样点 7 | 采样点 8 |      |
| I   | 78.1    |       |       |       |       |       |       |       | 78.1 |
| II  | 26.2    | 26.6  | 35.0  | 30.2  |       |       |       |       | 29.5 |
| III | 9.4     | 10.0  | 19.7  | 22.1  | 14.9  | 20.2  | 12.0  | 16.4  | 15.6 |
| IV  | 12.6    | 9.8   | 7.2   | 7.6   | 3.7   | 8.2   | 8.0   | 4.3   | 7.7  |

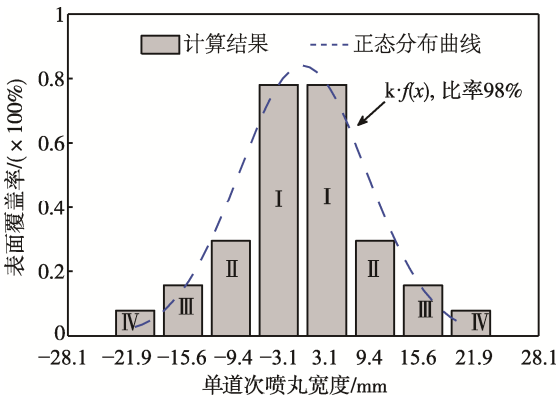


图 2 单道次喷丸表面覆盖率的分布特征 ( $k=20$ )  
Fig.2 Distribution characteristic of surface coverage in single path shot peening ( $k=20$ )

率近似呈正态分布。采用式 (1) 所示函数描述单道次喷丸表面覆盖率的分布特征。

$$F(x)=k \cdot f(x) \quad (1)$$

式中,  $k$  为道次系数, 大小取决于喷丸过程中构件与喷嘴间的相对移动速度, 移动速度越慢,  $k$  越大。 $f(x)$  为正态分布函数, 且  $X \sim N(\mu, 9.5^2)$ 。

## 2.2 相邻喷丸道次间距对受喷构件表面覆盖率分布的影响

基于式 (2) 所示的标准正态分布函数, 对于正态分布  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ , 可令  $Z=\frac{X-\mu}{\sigma}$ ,  $Z$  仍符合标准正态分布, 其对应的分布函数如式 (3), 且该函数在区间  $(x_1, x_2]$  上的概率可表示为式 (4)。

$$\phi(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^xe^{-t^2/2}dt \quad (2)$$

$$\phi(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^xe^{-t^2/2}dt \quad (3)$$

$$P\{x_1 < X \leq x_2\} = P\left\{\frac{x_1-\mu}{\sigma} < \frac{X-\mu}{\sigma} \leq \frac{x_2-\mu}{\sigma}\right\} = \phi\left(\frac{x_2-\mu}{\sigma}\right) - \phi\left(\frac{x_1-\mu}{\sigma}\right) \quad (4)$$

经过测量, 在 2.1 小节中的喷丸工艺参数条件下, 单道次喷丸宽度约为 30 mm, 受喷中心区域的表面覆盖率为 35.8%。考虑弹丸落入受喷区域的比率为 98%

的分布区域, 假设正态分布函数期望值  $\mu=0$ , 此时  $x_1=-15, x_2=15$ , 即有:

$$P\{-15 < X \leq 15\} = \phi\left(\frac{15-0}{\sigma}\right) - \phi\left(\frac{-15-0}{\sigma}\right) = \phi\left(\frac{15}{\sigma}\right) - \left(1 - \phi\left(\frac{15}{\sigma}\right)\right) = 2\phi\left(\frac{15}{\sigma}\right) - 1 \quad (5)$$

如令  $P\{-15 < X \leq 15\}=0.98$ , 即有  $\phi\left(\frac{15}{\sigma}\right) = \frac{1+0.98}{2} = 0.99$ , 通过查表可知,  $\frac{15}{\sigma} \approx 2.33$ , 可计算得到  $\sigma \approx 6.5$ 。

根据正态分布函数的特点, 标准差  $\sigma$  决定正态分布函数曲线在横坐标轴方向上的宽度, 期望  $\mu$  决定曲线的中心位置。故可采用式 (1) 所示函数来描述试验参数条件下单道次喷丸沿喷丸宽度方向上的表面覆盖率分布特征, 其中  $k=5.8$ , 且  $X \sim N(\mu, 6.5^2)$ 。

构件经过第一道次喷丸后, 后续其他道次会对第一道次喷丸区域的表面覆盖率产生影响, 而合理确定相邻喷丸道次间距 (后文简称道次间距) 是控制表面覆盖率分布的关键所在。由于前文采用了正态分布函数描述单道次喷丸表面覆盖率的分布, 故可用正态分布曲线的位置参数  $\mu$  来代替试验时的喷丸道次间距进行分析。借助 Matlab 软件绘制了 4 种不同道次间距 (用  $S$  表示) 对应的多道次喷丸表面覆盖率分布图, 如图 3 所示。每种道次间距下包括 6 个喷丸道次, 目的是为了充分考虑后续道次的影响, 获得表面覆盖率相对稳定区域。图 3 中各道次对应的正态分布函数分别为  $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 、 $f_4(x)$ 、 $f_5(x)$  和  $f_6(x)$ , 叠加后的表面覆盖率分布曲线用式 (6) 表示。

$$Z(x)=5.8[f_1(x)+f_2(x)+f_3(x)+f_4(x)+f_5(x)+f_6(x)] \quad (6)$$

从图 3 中函数  $Z(x)$  的曲线变化情况看, 随着  $S$  的增加, 表面覆盖率越不均匀。同时, 用表面覆盖率相对稳定区域中的最小表面覆盖率  $Z_{\min}$  与最大表面覆盖率  $Z_{\max}$  的比值  $\lambda$  来表征喷丸表面覆盖率分布的均匀程度。可见,  $\lambda$  值越大, 即表示喷丸表面覆盖率越均匀。

为探索道次间距  $S$  与喷丸表面覆盖率均匀程度  $\lambda$  之间的关系, 在  $\lambda$  已知的前提下, 需准确计算出  $S$ 。根据函数  $Z(x)$  可知, 各道次喷丸对应的正态分布函数

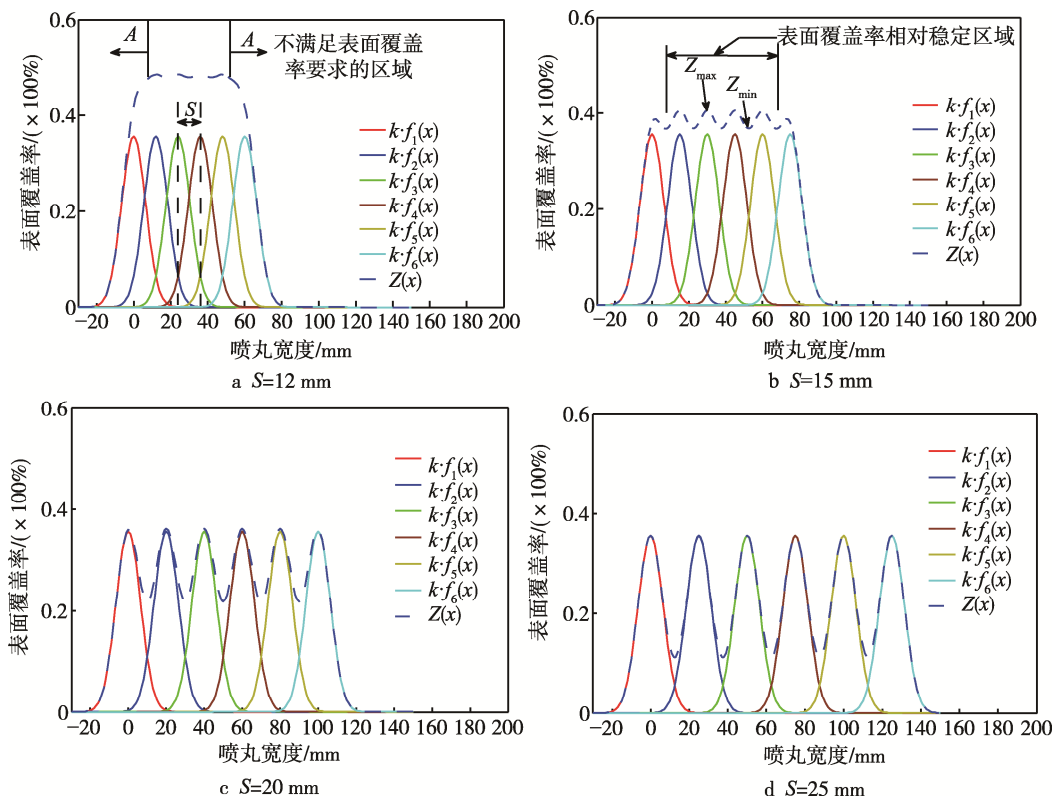


图3 不同喷丸道次间距对应的表面覆盖率分布情况

Fig.3 Distribution of surface coverage for the different path spacing of shot peening

的标准差均为 6.5，期望值分别为  $0$ 、 $\mu$ 、 $2\mu$ 、 $3\mu$ 、 $4\mu$  和  $5\mu$ 。借助 Matlab 对  $\lambda$  进行了计算，计算结果如图 4 所示，从图中可以看出， $S$  越小， $\lambda$  越大，两者近似呈线性变化。

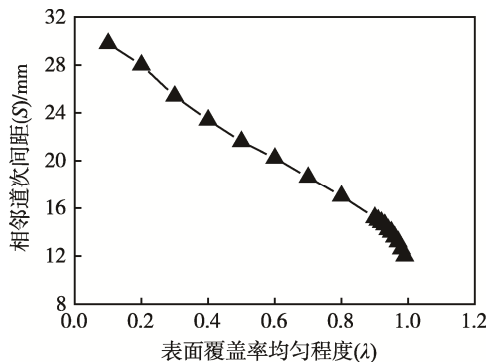


图4 相邻喷丸道次间距对表面覆盖率均匀程度的影响

Fig.4 Influence of the adjacent path spacing for shot peening on surface coverage uniformity

### 2.3 喷丸强化效率分析

假设构件受喷表面沿喷丸宽度方向的长度尺寸为  $L$ ，若完成相同一轮喷丸强化工艺，采用小道次间距比采用大道次间距需要更长的时间。然而，从图 3 中函数  $Z(x)$  的曲线分布不难看出，道次间距越小，相对稳定区域内的平均表面覆盖率 ( $C_1$ ) 越大，根据全覆盖表面覆盖率 ( $C_s$ ) 的计算公式 ( $C_s = 1 - (1 - C_1)^{n_s}$ )，

即采用小道次间距达到全覆盖所需喷丸轮数 ( $n_s$ ) 比采用大道次间距要少。因此，有必要综合分析道次间距与强化效率之间的关系。

分析了表面覆盖率均匀程度分别为 0.91、0.93、0.95、0.97 和 0.99 的喷丸强化效率。同时，基于开发的子程序计算出了对应的道次间距、平均表面覆盖率以及达到全覆盖所需喷丸轮数，结果如表 2 所示。

表2 同表面覆盖率均匀程度条件下达到全覆盖所需喷丸轮数的计算结果

Tab.2 Calculation results of the number of shot peening required to achieve full coverage for different uniformity of surface coverage

| 表面覆盖率均匀程度 $\lambda$ | 道次间距 $S/\text{mm}$ | 平均表面覆盖率 $C_1/\%$ | 达到全覆盖所需喷丸轮数 $n_s$ |
|---------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| 0.91                | 15.0               | 38.7             | 8.0               |
| 0.93                | 14.6               | 39.8             | 7.7               |
| 0.95                | 14.0               | 41.5             | 7.3               |
| 0.97                | 13.2               | 44.0             | 6.8               |
| 0.99                | 12.0               | 48.4             | 6.0               |

为对比不同道次间距  $S$  的喷丸强化效率，需根据公式  $n_z \approx \frac{L}{S} \times n_s$  计算出对应的喷丸总道次数  $n_z$ 。计算结果如图 5 所示。从图 5 可以看出， $S$  越小，即表面



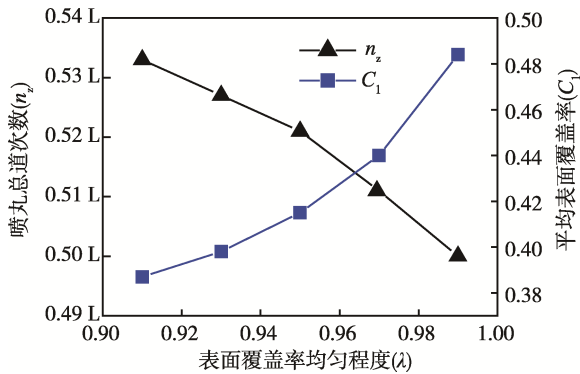


图 5 表面覆盖率均匀程度对喷丸总道次数与平均表面覆盖率的影响

Fig.5 Influence of surface coverage uniformity on the total path number of shot peening and average surface coverage

覆盖率均匀程度  $\lambda$  越大, 因其对应的平均表面覆盖率越高, 所需喷丸总道次数越少, 喷丸效率越高。同时, 各喷丸总道次数之间的差值还与受喷构件长度尺寸  $L$  有关,  $L$  越大, 差值越大。但是, 当  $L$  较小时, 由于高  $\lambda$  对应的第一道次和最后一道次中部分受喷区域不满足覆盖率要求, 如图 3a 中的区域 A, 进而导致喷丸总道次数增加。文中借助 Matlab 编程计算了不同  $\lambda$  对应的区域 A 的宽度, 结果如图 6 所示。可见, 当  $\lambda$  从 0.91 增加到 0.99 时, 区域 A 的宽度从 27.5 mm 增加到了 47 mm, 增幅约为 20 mm (即约占 2/3 个喷丸道次), 从

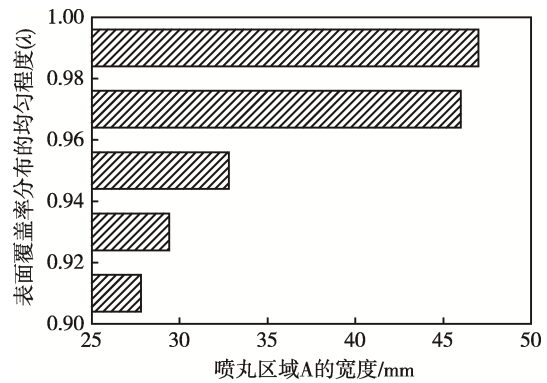


图 6 表面覆盖率均匀程度对受喷区域 A 宽度的影响  
Fig.6 Influence of surface coverage uniformity on the width of the peened area A

而使得不同  $S$  对应的喷丸强化效率大致相同。

## 2.4 试验验证

取两种不同喷丸道次间距  $S$  进行试验验证, 如图 7 所示。当  $S$  为 25 mm 时, 在不同道次之间存在明显的间隔条纹, 如图 7a 所示。当  $S$  为 12 mm 时, 整个受喷区域内表面覆盖率相对均匀, 无明显间隔条纹, 如图 7b 所示, 且受喷表面平均覆盖率为 46.7%, 与基于正态分布分析的结果 (见表 2) 相比, 误差为 1.7%, 此误差值完全在可接受的范围内。

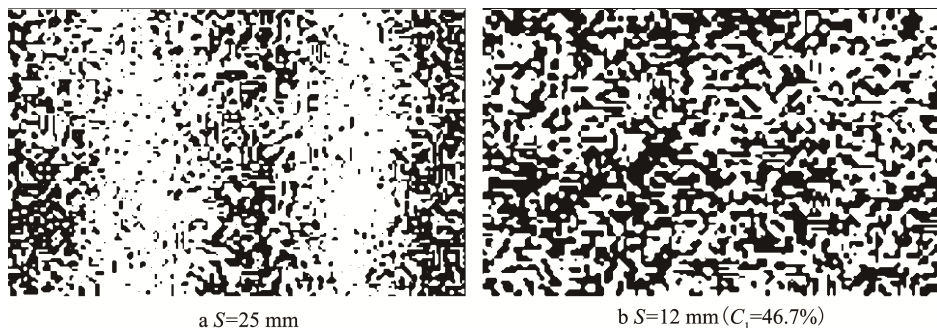


图 7 喷丸道次间距影响表面覆盖率均匀程度的试验验证

Fig.7 Experimental verification for the influence of path spacing of shot peening on surface coverage uniformity

## 3 结论

1) 单道次喷丸中表面覆盖率在喷丸宽度方向上的分布近似呈正态分布。

2) 相邻喷丸道次间距对表面覆盖率有显著影响, 道次间距越小, 表面覆盖率分布越均匀, 且两者近似呈线性变化关系。

3) 采用小道次间距喷丸, 既可获得较高的喷丸强化效率, 同时还能获得良好的表面覆盖率分布均匀程度。

4) 经试验验证, 采用正态分布函数对喷丸表面覆盖率的分布进行分析, 可在保证喷丸强化效率的基础上准确控制表面覆盖率分布的均匀程度, 研究结果

具有一定的工程应用价值。

## 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] 吕鹤婷, 王建明, 刘兴睿. 喷丸残余应力对裂纹闭合效应影响的数值模拟[J]. 中国表面工程, 2016, 29(2): 102-110.  
LV He-ting, WANG Jian-ming, LIU Xin-rui. Numerical Simulation for Residual Stress Fields of Shot Peening on Crack Closure Effects[J]. China Surface

- Engineering, 2016, 29(2): 102-110.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 蔡志刚, 王永东, 苏诚, 等. 喷丸覆盖率对 800 合金传热管残余应力和抗应力腐蚀开裂性能的影响[J]. 上海大学学报, 2015, 21(2): 170-176.
- CAI Zhi-gang, WANG Yong-dong, SU Cheng, et al. Effects of Different Cover Rate of Shop Peening on Residual Stress and Stress Corrosion Cracking of 800 Alloy Tube[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2015, 21(2): 170-176.
- [6] GHASEMI A, HASSANI S M, MAHMOUDI A H, et al. Shot Peening Coverage Effect on Residual Stress Profile by FE Random Impact Analysis[J]. Surface Engineering, 2016, 32(11): 861-870.
- [7] YIN F, HU S, HUA L, et al. Surface Nanocrystallization and Numerical Modeling of Low Carbon Steel by Means of Ultrasonic Shot Peening[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(3): 1253-1261.
- [8] HASSANI S M, CHO K S, VOIGT H J, et al. Experimental Assessment and Simulation of Surface Nanocrystallization by Severe Shot Peening[J]. Acta Material, 2015(97): 105-115.
- [9] HEYDARI A, MIRESMAEILI R, BAGHERIFARD S, et al. Incorporating the Principles of Shot Peening for a Better Understanding of Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT) by Simulations and Experiments[J]. Materials and Design, 2017(116): 365-373.
- [10] 缪宏, 左敦稳, 王珉, 等. 喷丸强化对 NAK80 钢表面完整性的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(5): 1290-1294.
- MIAO Hong, ZUO Dun-wen, WANG Min, et al. Effect of Shot Peening on Surface Integrity of NAK80 Steel[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2011, 41(5): 1290-1294.
- [11] 王欣, 蔡建明, 王强, 等. 喷丸表面覆盖率对 Ti60 高温钛合金疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程, 2011, 24(5): 58-63.
- WANG Xin, CAI Jian-ming, WANG Qiang, et al. Effect of Shot Peening Surface Coverage on the Fatigue Property in Ti60 High-temperature Titanium Alloy[J]. China Surface Engineering, 2011, 24(5): 58-63.
- [12] 李瑞鸿, 刘道新, 张炜, 等. 喷丸强化与表面完整性对 300M 钢疲劳性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(9): 1418-1423.
- LI Rui-hong, LIU Dao-xin, ZHANG Wei, et al. Influence of Shot Peening and Surface Integrity on the Fatigue Properties of 300M Steel[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(9): 1418-1423.
- [13] SAKAMOTO J, LEE Y S, CHEONG S K. Effect of Shot Peening Coverage on Fatigue Limit in Round Bar of Annealed Medium Carbon Steel[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(9): 3555-3560.
- [14] NGUYEN V B, POH H J, ZHANG Y W. Predicting Shot Peening Coverage Using Multiphase Computational Fluid Dynamics Simulations[J]. Powder Technology, 2014, 256(2): 100-112.