

基于有限元仿真的带孔板超声波喷丸成形工艺^{*}

鲁世红¹, 成书民², 刘朝训¹, 朱一峰¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016; 2. 中航飞机股份有限公司西安飞机分公司 工艺研究所, 西安 710089)

摘 要: 为探究飞机壁板带孔部位在喷丸成形时产生的孔区异形, 应力集中等问题, 文中利用有限元方法对 2024 铝合金带孔板喷丸后孔区域变形情况进行研究, 分析了喷丸区域离孔的距离(孔边距 L)对孔变形程度的影响; 讨论了板料厚度, 喷丸速度, 喷丸覆盖率等喷丸工艺参数对带孔板孔变形程度的影响规律; 绘制了孔异形程度 $B < 1\%$ 和 $B < 2\%$ 两种情况下不同喷丸参数时应采取的最小孔边距曲线。结果表明: 孔边距过小时($0 \leq L < 1$ mm)孔异性程度最大, 应力集中明显; 板料厚度可以有效的减小孔异形程度, 板厚大于 6 mm 时孔异形程度基本小于 1%; 当孔异形程度一定时, 喷丸速度和喷丸覆盖率越大, 就需采用更大的孔边距, 覆盖率 $F > 140\%$ 时, 孔边距需增加到 17 mm 以上才能使孔异形程度降低到 1% 以下。

关键词: 2024 铝合金; 带孔板; 有限元; 超声波; 喷丸

中图分类号: TG668

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)02-0108-06

Ultrasonic Peening Forming Process in Perforated Plate Based on Finite Element Simulation

LU Shi-hong¹, CHENG Shu-min², LIU Chao-xun¹, ZHU Yi-feng¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016; 2. Technology Research Institute, AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company Ltd., Xi'an 710089)

Abstract: To explore the problems of hole deformation and stress concentration induced by peening forming on aluminum alloy perforated plate, the finite element method was adopted simulate the hole deformation on 2024 aluminum alloy perforated plate. The influences of distance from the peening region to the hole (the hole margins L) on hole deformation were analyzed. The influence of the parameters, such as sheet thickness, shot peening speed and surface coverage, on the degree of hole deformation were discussed. The hole margins curve was drawn to show which distance should be selected when the value of hole deformation $B < 1\%$ and $B < 2\%$. The results show that the hole deformation is the biggest and the stress concentration is significant when the hole margins is small ($0 \leq L < 1$). Sheet thickness has an important influence on the value of hole deformation, which decreased to 1% when the sheet thickness increases to 6 mm. Large hole margins should be selected with the increase of shot peening speed and surface coverage when the value of hole deformation is constant, when the surface coverage $F > 140\%$, the value of hole deformation reduced to less than 1% on the condition that the hole margins increases to more than 17 mm.

Keywords: 2024 aluminum alloy; perforated plate; finite element; ultrasonic; peening

0 引 言

超声波喷丸成形技术是一种新型金属板料

成形技术, 近年来得到了快速的发展。随着现代航空结构壁板的复杂化, 壁板通常带有减轻孔,

收稿日期: 2014-10-13; **修回日期:** 2015-02-02; **基金项目:** * 国家自然科学基金(51175257); 江苏省第九批六大人才高峰资助项目(ZBZZ-032)

通讯作者: 鲁世红(1964—), 女(汉), 教授, 博士; **研究方向:** 飞机钣金先进成形技术; **Tel:** (025)8489 6460; **E-mail:** lush@nuaa.edu.cn

网络出版日期: 2015-03-11 15:07; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150311.1507.020.html>

引文格式: 鲁世红, 成书民, 刘朝训, 等. 基于有限元仿真的带孔板超声波喷丸成形工艺 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(2): 108-113.
Lu S H, Cheng S M, Liu C X, et al. Ultrasonic peening forming process in perforated plate based on finite element simulation [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(2): 108-113.

装配孔,工艺孔等结构,在喷丸成形过程中,经常发生孔区变形、开裂、应力集中等问题,严重的影响了壁板的成形精度及装配精度。这些问题主要是由于喷丸引起的孔区域材料向孔内延展和孔周边不均匀的残余应力分布导致的,而喷丸工艺参数又直接影响喷丸后材料延展程度和残余应力分布^[1-2]。文中从喷丸工艺参数的角度探讨喷丸时不同参数水平下应采用的孔边距,从而使带孔板孔区变形程度控制在 2% 以下。

国内外学者近年来对喷丸成形技术展开了大量的研究,但研究重点主要集中在喷丸后靶材的残余应力场和成形曲率等方面^[3-5],而对于喷丸后材料延展性问题和喷丸成形缺陷研究很少。杨永红,张红卫等^[6]采用 ASH660 与 ASH230 两种弹丸对 2~11 mm 的 7075 铝合金板进行喷丸并对其喷丸延伸率进行研究。J. M. Yang, Y. C. Her 等^[7]人对 2024 铝合金带孔板进行激光喷丸处理,并对孔区域疲劳裂纹萌生寿命和疲劳裂纹扩展速率进行了研究。赵娜等人^[8]通过试验对带孔加筋壁板进行了研究,并构件了带孔加筋壁板的喷丸有限元模型。中航工业黎明航空发动机厂^[9]研究了小孔部位的喷丸工艺和喷丸方式。H. Y. Miao^[10]采用 Anasys 的隐式分析法计算了喷丸后壁板展向和弦向的弧高值和曲率半径,但是关于带孔板的超声波喷丸成形研究鲜有报道。

1 超声波喷丸成形有限元模拟

1.1 超声波喷丸技术原理

超声波喷丸成形是利用超声波振动为动力源(如图 1 所示),通过换能器将超声波振动转换成机械振动并经变幅杆放大后,带动撞针对板料进行高速撞击,在板料内部一定深度引入残余压应力,并在板料深度方向上产生特定分布的残余应力场,打破了板料内部原有力学平衡,板料朝与撞击方向相反的方向变形,变形程度与变形形状与残余应力大小和分布密切相关,而喷丸参数又直接影响板料成形后残余应力大小与分布。

1.2 有限元方法及模型

采用有限元软件 ABAQUS 对带孔板超声波喷丸成形进行分析,ABAQUS 是大型知名的有限元模拟软件,在瞬态动力学,冲击模型和静态回弹的方面有很好的模拟效果,并广泛应用于航空航天制造、结构件模态分析等行业。喷丸有限

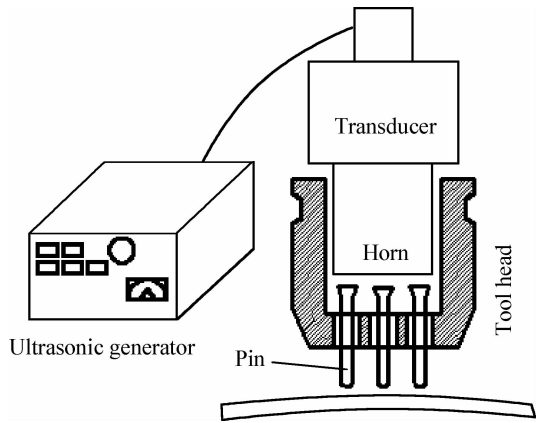


图 1 超声波喷丸成形原理图
Fig. 1 Schematic diagrams of the ultrasonic peening forming process

元模拟方法主要采用应力导入法和等效载荷法(等效静压力载荷,温度梯度载荷),应力导入法(如图 2 所示)是模拟实际喷丸过程将喷丸应力导入材料模型,再根据边界条件释放约束得到最终回弹变形效果,这种方法是大多学者所采用的研究方法。文中采用应力导入模拟方法,在弹丸冲击过程中采用动态显式算法,材料静态回弹过程中采用普通静态算法,并将模拟结果与试验结果进行对比。

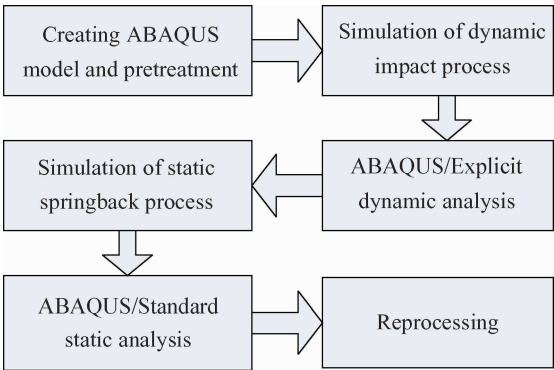


图 2 超声波喷丸有限元方法
Fig. 2 Finite element method of the ultrasonic shot peening

材料本构模型是喷丸模拟研究领域的关键问题,Taehyung 在研究中提到,采用动态应变速率材料得到的模拟精度更高。文中采 2024-T351 铝合金的 Johnson-cook 动态应变速率本构模型,模型表达式(1)为:

$$\sigma = (A + D\epsilon^n) \cdot (1 + Cln\epsilon^*) [(1 - T^*)^m] \quad (1)$$

式中, n 为硬化指数, σ 表示等效应力, ϵ 表示

等效塑性应变, ϵ^* 表示相对等效塑性应变率, T 为与材料熔化温度相关的温度系数, A 、 D 、 C 、 m 为与材料相关的常量。2024 铝合金材料模型参数如表 1 所示。

表 1 2024-T351 铝合金 Johnson-Cook 材料模型参数
Table 1 Material parameters of the Johnson-Cook model about 2024-T351 aluminum alloy

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/GP	Poisson's ratio	A/MPa	D/MPa
2 730	69	0.33	369	684
n	m	C	Epsilon sot zero	
0.73	0	0.008 3	1	

图 3 为带孔板超声波喷丸有限元模型,带孔板孔直径为 40 mm,文章用“孔异形程度 B ”来表征喷丸后孔区变形程度, $B = (\text{孔直径最大变化值} / \text{原始孔直径值}) \times 100\%$, 它表示喷丸成形后孔直径的最大变化值与原始孔直径的百分比值, 有利于排除不同孔直径带孔板对喷丸孔变形程度的影响。喷丸区域采用工程应用中围绕孔周边并与孔有共同圆心的圆环喷丸方式, 这种喷丸区域有利于使带孔板圆孔周边材料均匀的向孔内延展变形, 并且带孔板的“凸峰”变形比较规则, 有利于提高了孔变形量的测量精度。

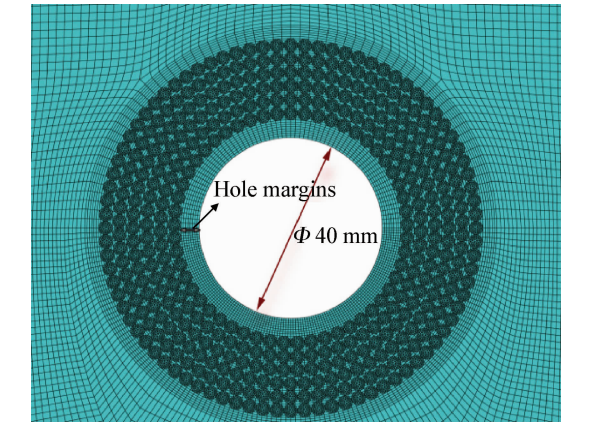


图 3 超声波喷丸有限元模型
Fig. 3 Finite element model of the ultrasonic shot peening

1.3 带孔板喷丸缺陷分析

图 4 为带孔板经喷丸有限元模拟后孔周边轮廓变形情况, 结果表明: ①带孔板在经过喷丸成形后孔周边材料产生了向孔内的延展变形 (I, II, IV, V 区材料分别向孔中心方向延展), 而且延展程度基本相等, 喷丸成形后孔的圆度较

好, 孔异形程度 $B = 2.91\%$; ②图 4(a) 中 III 区和图 4(c) 所示: 当孔边距为 $L = 0$ 时, 孔异性只要集中在受喷面一侧, 应力集中现象明显, 孔异形程度最大, 当孔边距 $L > 1 \text{ mm}$ 时, 孔边缘轮廓线过渡圆滑。③孔异形程度最大值出现在材料受喷面表层以下, 并且随着孔边距的增加, 最大孔异形程度深度加深, 主要原因是由于材料受到弹丸

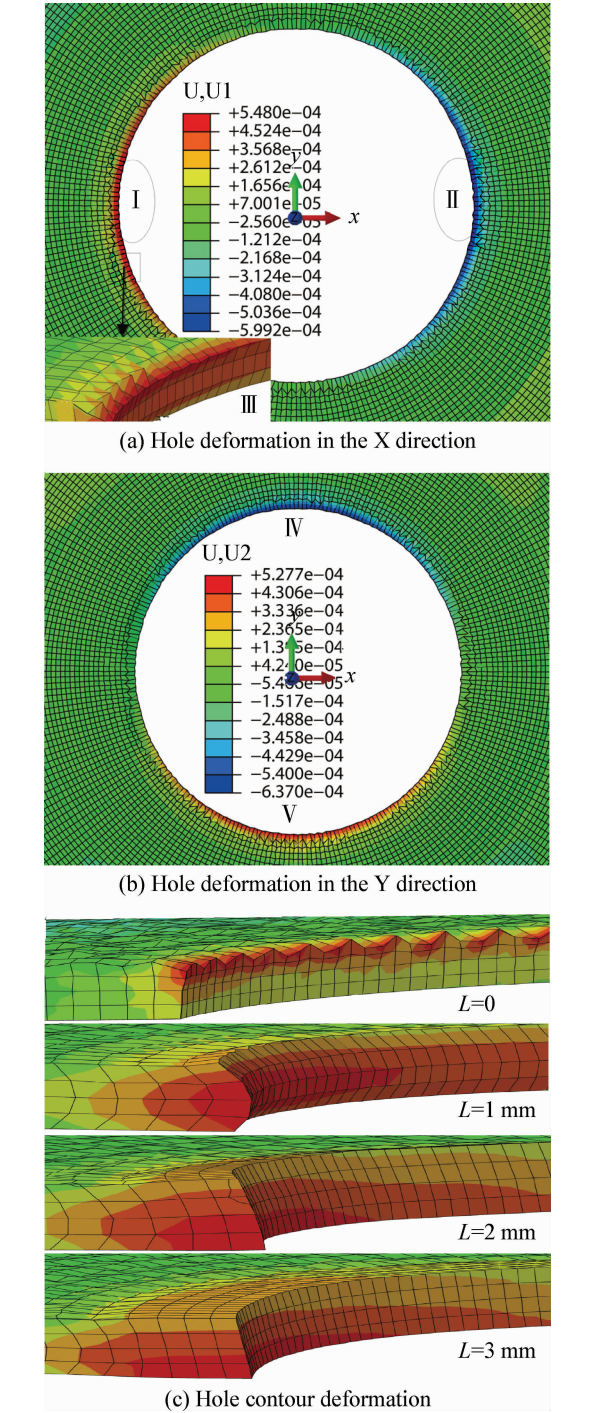


图 4 喷丸成形后孔区变形情况
Fig. 4 Hole deformation after shot peening forming process

冲击后,弹坑内材料向外扩展,并在受喷表层以下达到最大残余压应力。由以上分析可知:在带孔板喷丸成形时,应避免直接对孔周边进行喷丸,喷丸区域与孔周边轮廓需留有一定的“保护距离”,以避免过度的应力集中及孔变形。

1.4 喷丸有限元模型试验验证

为了验证有限元模型的正确性,文章通过试验研究了板厚 $h=2\text{ mm}$,喷丸速度 $V=55\text{ m/s}$,覆盖率 $F=100\%$ 时孔边距对孔异形程度的影响规律。图 5(a) 为超声波喷丸成形后带孔板孔轮廓变形图,从图中可看出轻微的孔异形,图 5(b) 为孔边距 L 对孔异形程度 B 影响规律的试验与有限元数据对比,由图可知:随着喷丸孔边距 L 的增大,孔异形程度 B 减小,在孔边距 $0\text{ mm}<L<1\text{ mm}$ 时,孔异形程度迅速减小,在孔边距 $L>6\text{ mm}$ 时,孔异形程度 B 缓慢减小且趋于稳定,可见过大的孔边距 L 对减小孔异形程度作用不明显。从图也可看出,有限元数据与试验结果贴合度较高,具有较高的参考价值。

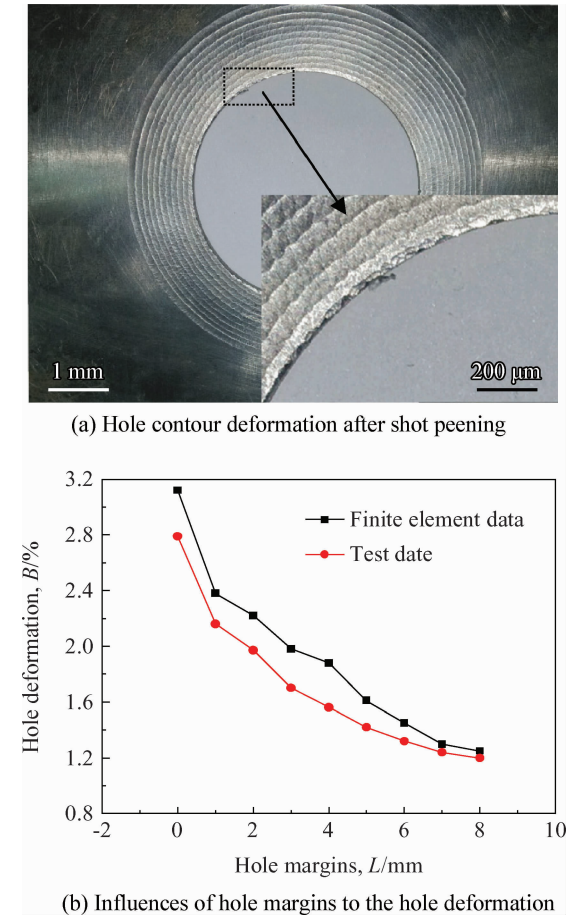


图 5 试验数据与有限元数据对比
Fig. 5 Comparison of the test and finite element data

2 工艺参数水平对孔边距的影响

2.1 板料厚度对孔异形程度和孔边距的影响

图 6(a) 表示不同厚度的板料在各种喷丸孔边距 L 时产生的孔异形程度。由图可得:①板料厚度一定时,随着孔边距的增大,孔异形程度变小,孔边距为 0 时,孔异形程度最大且 $B>2\%$,当孔边距大于 1 mm 时,孔异形程度明显减小,②板料厚度可以有效的减小喷丸后带孔板的孔异形程度,当孔边距相等时,板料厚度越大,孔异形程度越小,当板厚大于 6 mm 时,即使喷丸孔边距很小,孔异形程度仍小于 1%。③图 6(b) 表示了孔异形程度 $B<1\%$ 和 $B<2\%$ 两种情况下不同厚度板应采取的最小喷丸孔边距,由图可以得出,当孔异形程度一定时,板料厚度越大,所需的喷丸孔边距越小,对于 2 mm 以下的薄板,需要较大的

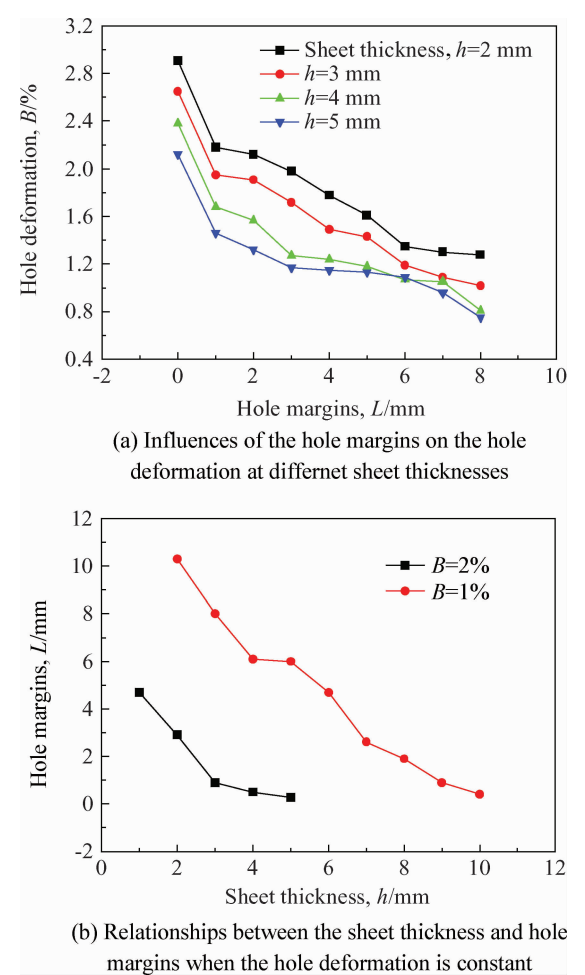


图 6 板料厚度对孔异形程度和孔边距的影响
Fig. 6 Influences of the sheet thickness on the hole margins and hole deformation

孔边距($L > 10$ mm)才能使孔异形程度小于 1%。对于厚度大于 2 mm 的板料,选择合适的喷丸孔边距甚至可以把孔异形程度减小到 0.5% 以下。

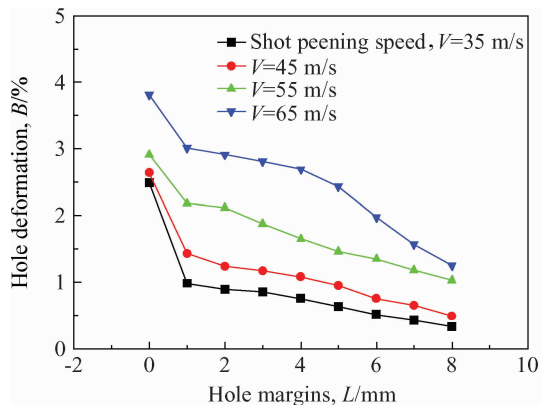
2.2 喷丸速度对孔异形程度和孔边距的影响

电流强度是表示超声波喷丸强度的参数,在有限元模拟中,将电流强度转换为撞针的喷丸速度,撞针做简谐运动,速度方程式如(2)所示:

$$v = \omega A \cos \omega t \quad (2)$$

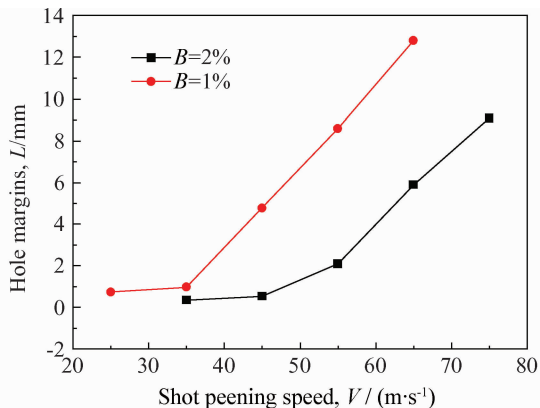
假定撞针与板料接触时撞针速度达到最大值,即 $v_{\max} = \omega A = 2\pi fA$,其中 f 与 A 分别为撞针的振动频率和振幅,可通过试验测得。

图 7(a)为不同喷丸速度时孔边距对孔异形



(a) Influences of the hole margins on the hole deformation at different shot peening speeds

程度的影响。从图中可以看出:①喷丸速度对孔异形程度影响较大,当喷丸速度 $V = 35$ m/s 时,孔异形程度 B 基本处于 1% 以下,而当喷丸速度 $V = 65$ m/s 时,孔异形程度明显增大,最大孔异形程度接近 4%。②当弹丸速度一定时,孔异形程度随着孔边距的增大而减小,而且近似于线性变化趋势,这一规律有利于进一步分析更大的孔边距对孔异形程度的影响。③从图 7(b)中可以看出,当孔异形程度一定时,弹丸速度越大,就需采用更大的孔边距进行喷丸,弹丸速度 $V = 65$ m/s 时,喷丸孔边距需大于 13 mm 才能使孔异形程度降到 1% 以下,而且弹丸速度越大,把孔异形程度从 2% 降到 1% 所需的孔边距也越大。



(b) Relationships between the shot peening speed and hole margins when the hole deformation is constant

图 7 喷丸速度对孔异形程度和孔边距的影响

Fig. 7 Influences of the shot peening speed on the hole margins and value of hole deformation

2.3 喷丸覆盖率对孔异形程度和孔边距的影响

喷丸覆盖率 F 计算方法如公式(3)所示:

$$F = nS_0/S \quad (3)$$

式中, n 为受喷面内弹坑数, S_0 为单个弹坑面积(通过预先模拟得出), S 为受喷面面积。

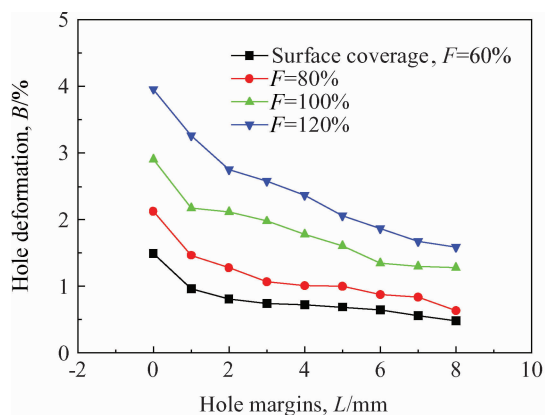
从图 8(a)中可以看出:随着喷丸覆盖率的增大,孔异形程度变大,孔边距为 1 mm 时,60% 的覆盖率 $B = 0.96\%$;而 120% 的覆盖率时 $B = 3.26\%$ 。孔边距为 8 mm 时,60% 的覆盖率 $B = 0.48\%$,而 120% 的覆盖率时 $B = 1.59\%$ 。孔边距 $L > 1$ mm 时,孔异形程度以近似线性关系缓慢减小并趋于稳定,可见孔边距增大到一定程度后,其降低孔异形程度的能力越来越弱。从图 8(b)中可以看出,喷丸覆盖率 $F < 60\%$ 时,采用较小的孔边距($L < 1$ mm)即可以保证孔异形程

度小于 1%,喷丸覆盖率 $F > 100\%$ 时,需采用较大孔边距($L > 10$ mm)才能使孔异形程度小于 1%,甚至对于 $F > 140\%$ 时,孔边距需增加到 17 mm 以上才能使孔异形程度降低到 1% 以下。

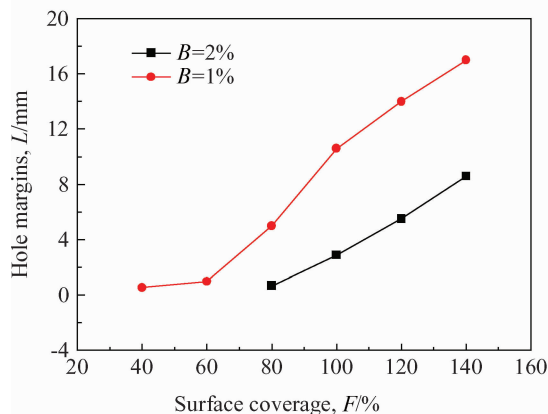
3 结 论

(1) 带孔板经喷丸成形后孔周边材料产生向孔内的延展变形,孔边距 $L = 0$ 时,孔异形程度最大,应力集中明显,孔边距 $L > 1$ mm 时,轮廓线过渡圆滑,孔异形程度明显降低。

(2) 加大板料厚度可以有效减小带孔板喷丸成形后的孔异形程度,当孔异形程度一定时,板料厚度越大,所需的喷丸孔边距越小,当板厚大于 6 mm 时,即使喷丸孔边距很小,孔异形程度仍小于 1%,对于 2 mm 以下的薄板,需要较大的孔边距($L > 10$ mm)才能使孔异形程度小于 1%。



(a) Influences of the hole margins on the deformation at different surface coverage



(b) Relationships between the surface coverage and hole margins when the hole deformation is constant

参考文献

- [1] Gariépy A, Bridier F, Hoseini M. Experimental and numerical investigation of material heterogeneity in shot peened aluminium alloy AA2024-T351 [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 219(4): 15-30.
- [2] Gariépy A, Cyr J, Levers A. Potential applications of peen forming finite element modeling [J]. Advances in Engineering Software, 2012, 52(10): 60-71.
- [3] 郭超亚, 鲁世红. 铝合金超声喷丸残余应力场 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(2): 75-80.
Guo C Y, Lu S H. Residual stress field of aluminum alloy induced by ultrasonic peening [J]. Chinese surface engineering, 2014, 27(2): 75-80 (in Chinese).
- [4] 史学刚, 鲁世红, 张炜. 铝合金超声波喷丸成形制件表面完整性研究 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(22): 3100-4.
Shi X G, Lu S H, Zhang W. Study of surface integrity on ultrasonic peening aluminium alloy sheet [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(22): 3100-4 (in Chinese).
- [5] 鲁世红, 朱一枫, 刘朝训, 等. 高能超声波喷丸成形与校形技术研究进展 [J]. 航空制造技术, 2013(11): 45-47.
Lu S H, Zhu Y F, et al. Research progress of high-energy ultrasonic peening forming [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013 (11): 45-47 (in Chinese).
- [6] 杨永红, 张红卫. 飞机铝合金薄板件对喷成形技术 [J]. 电加工与模具, 2008(6): 69-72.
Yang Y H, Zhang H W. Double shot peening technology of aircraft aluminum alloy sheet [J]. EDM and Mould, 2008(6): 69-72 (in Chinese).
- [7] Yang J M, Her Y C. Laser shock peening on fatigue behavior of 2024-T3 Al alloy with fastener holes and stopholes [J]. Materials Science and Engineering, 2001, 298: 296-299.
- [8] 赵娜, 张博平. 复合材料开孔加筋壁板剪切试验与数值分析 [J]. 科学技术与工程, 2002, 12(13): 3155-65.
Zhao L, Zhang B P. Shear test and numerical analysis of perforated and stiffened compound plate [J]. Science Technology and Engineering, 2002, 12(13): 3155-65 (in Chinese).
- [9] 何恩绪, 魏晓丽, 杨琢, 等. 零件小孔喷丸工艺研究 [J]. 中国新技术新产品, 2014(4): 117.
He S X, We X L, Yang Z, et al. Study of peening process on small hole parts [J]. New Technology and Products of China, 2014(4): 117 (in Chinese).
- [10] Miao H Y, Larose S, Perron C, et al. Numerical simulation of the stress peen forming process and experimental validation [J]. Advances in Engineering Software, 2011, 42: 963-975.

(责任编辑: 陈茜)

图8 喷丸覆盖率对孔异形程度和孔边距的影响
Fig.8 Influences of the surface coverage on the hole margins and hole deformation

(3) 当弹丸速度一定时,随着孔边距的增大,孔异形程度变小,而且近似于线性变化趋势,这一规律有利于进一步分析更大的孔边距对孔异形程度的影响。当弹丸速度 $V=65\text{ m/s}$ 时,孔异形程度明显增大,最大孔异形程度接近4%。

(4) 喷丸覆盖率也是影响带孔板孔异形程度的重要参数,随着喷丸覆盖率的增大,孔异形程度也变大,当覆盖率 $F=60\%$,孔边距 $L>1\text{ mm}$ 时,孔异形程度小于1%,当覆盖率 $F=120\%$,孔边距 $L>6\text{ mm}$ 时,孔异形程度降低到2%以下。