

喷丸路径的设计、优化及等效有限元模拟^{*}

李东来¹, 李 丁³, 张明哲¹, 赵 勇², 刘纯国²

(1. 吉林大学材料科学与工程学院, 长春 130000;

2. 吉林大学锻锻工艺研究所, 长春 130000;

3. 航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110000)

[摘要] 以典型双曲率飞机壁板零件为例, 采用 Geomagic 软件分析其零件特征并设计 2 条喷丸路径, 初步建立喷丸参数与等效温度值的映射关系, 通过有限元软件 ABAQUS 中显式-隐式顺序方法进行“温度场”等效模拟, 计算沿既定喷丸路径的成形情况, 用 Geomagic 软件表征其成形误差; 并根据其成形误差优化所设计的喷丸路径, 得到工件最理想成形效果; 最后结合 1:1 全尺寸试验件喷丸成形试验进行验证。结果表明: 该等效模拟法可以正确预测既定喷丸路径下的成形结果并且可以优化喷丸路径, 对喷丸成形工艺的路径规划具有重要的指导意义。

关键词: 喷丸成形; 喷丸路径; 路径优化; 温度场; 等效模拟

Design and Optimization of Shot Peening Path for Aircraft Panel and Equivalent Finite Element Simulation

LI Donglai¹, LI Ding³, ZHANG Mingzhe¹, ZHAO Yong², LIU Chunguo²

(1. College of Material Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130000, China;

2. Roll Forging Institute of Jilin University, Changchun 130000, China;

3. AVIC Shenyang Aircraft Industry Group Co., Ltd., Shenyang 110000, China)

[ABSTRACT] Taking a typical double curvature aircraft panel part as an example, the 2 kinds of shot peening paths were designed according to part characteristics, which were analyzed by Geomagic software. Next, the initial mapping relationship between shot peening parameters and equivalent temperature was established, and the “temperature field” equivalent simulation was carried out by finite element software ABAQUS with the order of the transient steady-state method. And then, Geomagic software was used to characterize the forming error. According to its forming error, the plan of the path was optimized, and the ideal forming result was obtained. Finally, the forming result was verified by a shot peening test of a 1:1 test piece. The result showed that the equivalent simulation method can predict the forming result of the established shot peening path correctly and optimize the shot peening path, which was of great significance to the path designing of shot peening forming.

Keywords: Shot peening forming; Shot peening path; Path optimization; Temperature field; Equivalent simulation

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.12.086

喷丸成形因不需要成形模具, 适用于各种复杂曲率零件, 且成形后残余应力可强化零件表面的优势, 广泛应用于现代飞机整体壁板零件制造中。目前, 这一工艺已成为国内外制造机翼壁板首选的成形方法^[1-3]。机翼是飞机机体结构制造的核心, 机翼整体壁板是构成飞机气动外形的重要构件, 现代机翼制造技术已成为衡量一个国家航空制造技术水平的重要标志之一^[4-5]。喷丸路

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51575231)。

径的分析与规划是大型复杂双曲率外形机翼壁板成形的关键。由于技术敏感性, 其研究成果鲜有报道, 据公开文献表明: 目前喷丸路径仍然主要依靠经验以及大量试错法获得^[6]。数值模拟技术可以对既定的喷丸路径的进行模拟计算, 并可以进行路径优化, 因此可以大幅降低制造成本。当前采用最广泛的方法是通过依次计算各个弹丸的撞击作用而得到大量弹丸对其撞击作用产生的工件变形^[7], 然而, 实际零件的喷丸成形所需的

弹丸数量巨大,使得模拟过程的计算量和成本都难以接受。因此将这种方法应用到实际生产过程中是不切实际的。本文根据典型零件的外形分析、偏差量分析及厚度分析设计喷丸路径,运用等效模拟法代替多弹丸模拟法,即“等效”温度场模拟法^[8],初步建立喷丸参数与等效温度值的映射关系,按照显式-隐式顺序方法沿既定路径进行等效模拟,该方法可以针对复杂曲率的零件,对所规划的喷丸路径进行模拟计算,达到预测既定的路径成形效果的目的。并且可以根据其成形结果优化所设计的路径,得到最优的成形效果。

1 典型零件喷丸路径设计

喷丸路径是喷丸成形工艺中关键参数之一,其对壁板的成形曲率有决定性影响。本文针对典型的零件外形特征,设计2条喷丸路径,用有限元模拟技术对既定的喷丸路径进行计算,验证路径设计的合理性,以达到科学划分路径,减小喷丸成形制造成本的目的。

1.1 零件外形

某型号飞机壁板零件尺寸如图1所示。该壁板不具有大的展弦比,且整个曲面在弦向、展向均呈变曲率分布,且壁板上分布有3个铣区,3个铣区分别有等百分线,壁板的厚度因铣区的存在呈无规则变化。

1.2 偏差量分析

用 Geomagic 软件将坯料与成形零件进行曲面拟合分析,通过约 20 万个采集点的拟合云图分析零件变形情况。相较于传统曲率分析方法,该 3D 拟合云图通过“偏差量”的概念表征零件变形情况,坯料与目标零件的“偏差量”即是“变形量”,最大偏差点即是变形最大点,该点拥有极小曲率半径。如图2所示,变形量最大的点为A点,达到约71mm;变形量最大的边为AB边,且从A到B依次递减,B点变形量约为17mm,而在壁板中间区域变形量非常小。拟合云图对喷丸路径的划分具有指导意义,即优先喷打靠近AB的区域,并以条带喷丸形式逐渐向中心线靠拢,然后逐次向下,直至CD端。

1.3 厚度分析

喷丸成形对零件厚度十分敏感,目前,厚度因素与喷丸变形之间还没有明确定量关系。当其他条件一样时,喷丸变形量随零件厚度的增加而减小,且大致与厚度的平方成反比^[9]。对于成形相同曲率半径的壁板,厚度越大所需弹丸冲击强度越大,因此使喷丸路径尽量通过壁板较厚区域。整体壁板厚度小于3mm,因3个铣区的存在使得壁板厚度变化无规则,铣槽厚度仅为1mm,每个铣区之间的等百分线区域最厚达到3mm,因此喷丸条带应优先考虑经过此区域。对于其他局部较厚区域,如果喷丸窄带无法覆盖,可以局部增加喷丸窄

带宽度或减小窄带间距。

1.4 喷丸路径设计

依据以上分析规划2条喷丸路径,2条路径趋势一致,如图3所示。以壁板中心线为界,喷丸路径分为上、下两部分。对于上部分的路径划分有两种考虑:(1)由于该零件外形曲面复杂,使得曲面等百分线的分布毫无规律,由图2知AB边的变形量最大,因此采用外形曲面的弦向控制曲线AB构造曲面近似的等百分线,即以AB边作为参考等百分线,窄带尽量平行于AB边;(2)虽然零件外形曲面等百分线的分布没有规律,但零件上部分存在1、2两个铣区,并且铣区2范围更广,因此考虑喷丸窄带尽量平行于铣区2的等百分线。在下部分的路径规划中,由图2知CD边的变形量绝对值明显小于AB边,并且下部分区域几乎全被铣区3所覆盖,平行于铣区3的等百分线区域存在厚度极大值,因此喷丸窄带尽量平行于铣区3的等百分线,而不平行于弦向控制曲线CD构造的曲面等百分线。

综上,按喷丸路径尽量通过壁板较厚区域的优先级顺序,规划两条路径,设置条带宽度为80mm,条带间距为100mm,如图3所示。路径1上部分的喷丸条带平行于AB边,依次往下直至中心线,下部分的喷丸条带平行于铣区3的等百分线,依次往下直至CD边;路径

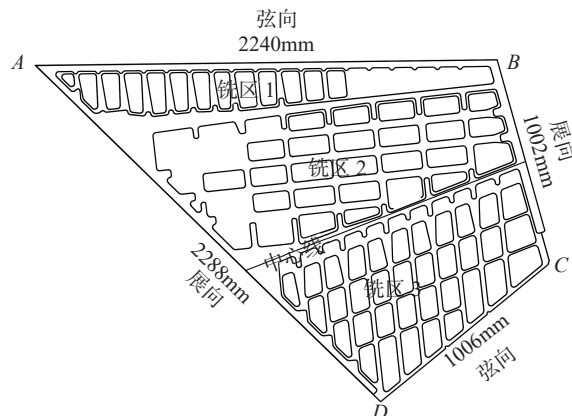


图1 零件外形图

Fig.1 Part outline drawing

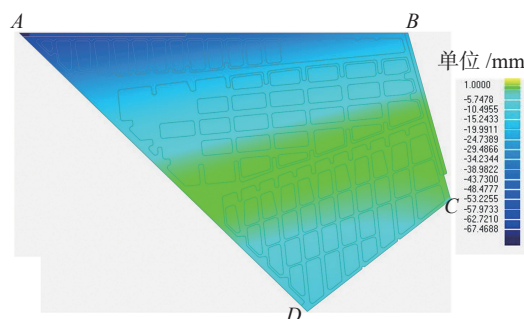


图2 匹配拟合云图

Fig.2 Part fitting cloud picture

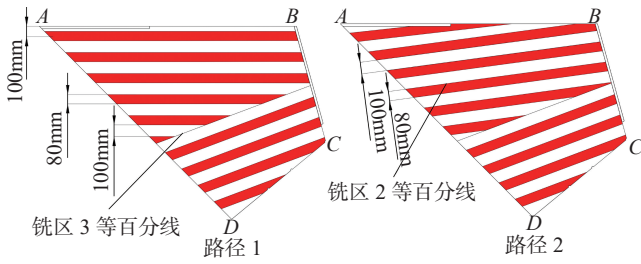


图3 喷丸路径示意图

Fig.3 Sketch map of shot peening path

2 上部分喷丸条带平行于铣区 2 的等百分线,下条带分布与路径 1 相同。

2 等效有限元模拟及验证试验

2.1 “等效”温度场模拟法

基于试验工作和多重冲击模拟^[10]表明:喷丸弯曲中存在一个塑性层^[11-12],即大量高速弹丸冲击零件表面形成密集凹坑,可以形象地理解为每个凹坑都有材料被挤压出来向四周延伸,整个外表面积增加而内表面仍保持原状,内外表面面积的差异,使板材发生弯曲变形。其中外表面积增加的部分是塑性变形,“外表面”层应具有厚度,一定厚度的“外表面”层我们称之为塑性层。如图 4 所示,温度场可以施加到此层内,并可设置温度梯度,与边界条件共同作用,达到弯曲变形的目的。在一定厚度的塑性层内施加温度梯度可以与喷丸达到相同的弯曲变形。本文将此层定义为“等效塑性层”,将此方法定义为“等效”温度场模拟法。

2.2 喷丸参数与等效温度值的映射关系

“等效塑性层”是连接机械喷丸与等效温度场模拟的“桥梁”,喷丸参数与等效温度数值的映射关系通过“等效塑性层”建立。为了探究喷丸参数与等效温度数值的映射关系,本文分别建立了单弹丸,多弹丸以及等效温度场有限元模型。其中单弹丸模型用来探究弹丸参数与塑性层厚度的对应关系;多弹丸模型和等效温度场模型用来探究弹丸参数与温度场数值的映射关系。试板尺寸:长 100mm × 宽 50mm × 厚 2mm,材料为航空用铝:7B04,具体材料参数如表 1 所示。

塑性层的厚度由单弹丸反复喷打获得^[13],在单弹丸模型中,设置了不同的弹丸参数,反复喷打试板同一位置,直至塑性层深度不发生变化,达到饱和。弹丸参数与塑性层厚度的对应关系如表 2 所示。图 5 为单弹丸喷打试板产生的塑性变形情况。塑性层厚度对喷丸参数与等效温度值映射关系的建立具有重要意义,采用变形等效的原则,若在一定厚度的塑性层内施加温度梯度可以与实际喷丸达到相同的弯曲变形,那么此温度梯度则可以“取代”实际喷丸的参数,下面由多弹丸模型举

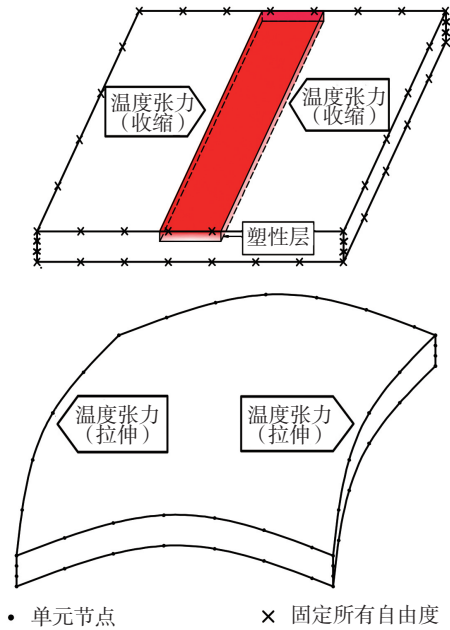


图4 加载单元示意图

Fig.4 Sketch map of loading unit

表1 材料参数

参数	数值
杨氏模量 /MPa	70000
泊松比	0.33
密度 /($t \cdot mm^{-3}$)	2.78×10^{-9}
热膨胀系数	2.3×10^{-5}
热导率 /($W \cdot m^{-1} \cdot k^{-1}$)	237
屈服强度 /MPa	503
抗拉强度 /MPa	572

表2 喷丸参数与塑性层厚度的对应关系

喷丸速度 / ($m \cdot s^{-1}$)	弹丸直径 / mm	喷射角度 / ($^{\circ}$)	塑性层厚度 / mm
40	1	90	0.35
50	1	90	0.40
60	1	90	0.45

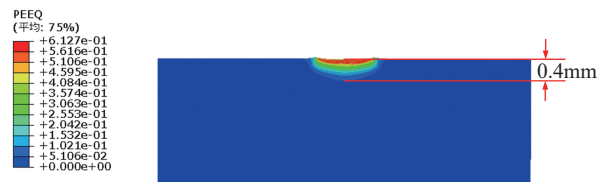


图5 单弹丸模型中试板的塑性变形

Fig.5 Plastic deformation of panel in single-shot model

例说明。试板尺寸及参数如上文所述,在试板中心设置一条宽 20mm 的喷丸窄带,弹丸速度 50m/s,弹丸直径 1mm,喷射角度 90°。其变形云图如图 6 所示,弹丸冲击在试板表面留下了细小密集的凹坑。

在相同的窄带区域,0.4mm的等效塑性层内,240~25℃、280~25℃、320~25℃、360~25℃、400~25℃温度梯度下,获得板料凸起变形,并绘制节点位移图,如图7所示。由图7知,多弹丸喷丸模型和温度场模型(400~25℃)使试板达到了几乎相同的变形情况,根据变形等效的思想:在7B04试板中,弹丸直径1mm,弹丸速度50m/s,喷射角度90°的喷丸参数等效于在0.4mm的塑性层内施加400~25℃的温度梯度。本文对喷丸参数与等效温度值的映射关系做了初步探索,针对不同厚度的试板,更全面喷丸参数与等效温度值的映射关系数据库还有待进一步系统地研究。

2.3 壁板零件的等效温度场有限元模拟

壁板零件的材料参数与喷丸参数与等效温度值的映射关系相同,数模尺寸为实际零件尺寸,将A、B、C、D 4个边角导圆角处理,防止有限元计算过程中不收敛,且利于网格划分。由于零件是三维可变形的实体,尺寸大且结构复杂,因此单元类型选为4结点热耦合四面体单元(C3D4T)。以零件中线线为界,等效温度场模拟分上、下两部分进行。利用显式分析ABAQUS/Explicit求解模块依次在各喷丸条带内的塑性层(0.4mm)施加等效温度场,该温度场是自上而下的变温温度场,在等效塑性层内,上表面温度高(400℃),下表面温度低(25℃),以此近似模拟实际喷丸中由上及下的不同冲击

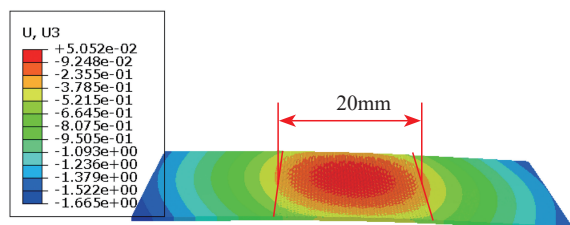


图6 多弹丸模型中试板的位移云图

Fig.6 Displacement chart of panel in multi-shot model

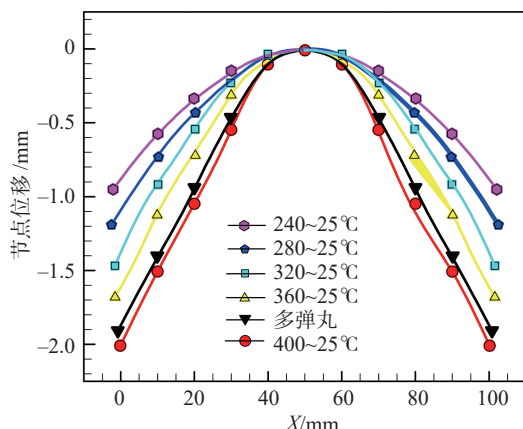


图7 多弹丸模型、等效温度场模型中沿X方向的节点位移

Fig.7 Node displacement along X-direction in multi-shot model and equivalent temperature field model

强度,并且整个零件热膨胀系数均设为真实的线膨胀系数为 2.3×10^{-5} ;随后在ABAQUS/Standard中模拟壁板零件的松弛;经两个模块计算得到的板料变形数据被传递到后处理模块ABAQUS/Viewer中。

路径1、2变形结果分别如图8、图9所示。从成形零件与目标零件的拟合云图来看,路径1的最大成形误差5.7mm小于路径2的最大成形误差7.6mm,路径1成形效果优于路径2,故本文主要分析路径1的成形结果,并提出路径优化。用Geomagic软件的分析功能,创建20万个采集点的误差数据,并以百分比的形式表示出来,路径1采集点的拟合情况如图10所示,约20万采集点匹配误差介于[-2mm,5.7mm],并且69%的点成形误差介于 ± 1 mm,约90%的点成形误差介于 ± 2 mm,局部区域成形误差达到+3mm以上,在未施加局部压装力($2500\text{N}/\text{m}^2$)的前提下,此成形误差是可以接受的,可认为路径1设计基本合理,下面对路径1进行优化。

2.4 基于模拟结果的路径优化

基于有限元模拟结果,对喷丸路径进行优化。从图8和10可以看到4个明显的特征:(1)最大成形误差为+5.7mm,成形误差主要集中于AB边附近,并且误差值为正,这主要是因为AB边是最先喷打的部分,并且中心线以下区域覆盖保护材料不发生变形,而AB边距离喷丸保护区域最远,容易造成变形过大。提出在首

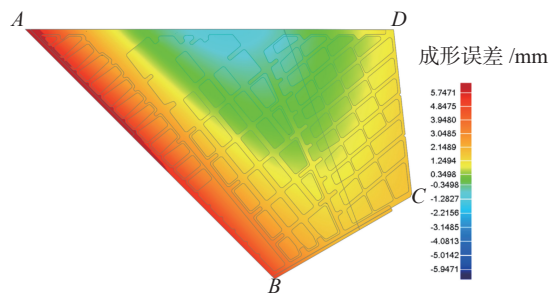


图8 成形零件与目标零件拟合云图(路径1)

Fig.8 Simulation results along path 1

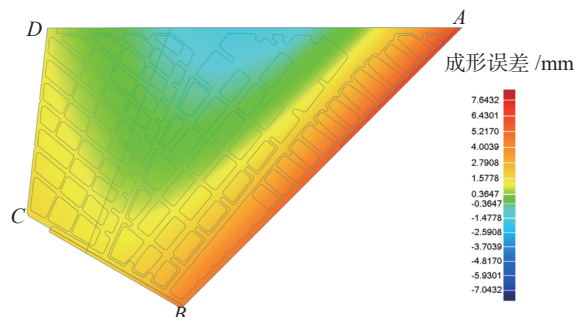


图9 成形零件与目标零件拟合云图(路径2)

Fig.9 Simulation results along path 2

次喷丸路径不变的前提下,降低首次弹丸冲击强度;(2)整体误差值从BC边到AD边呈现逐渐增大的趋势,以AB边为例,从A点到B点误差值从+3.9mm逐渐增至+5.7mm,所以提出一种变强度喷丸的思想:即在同一条喷丸窄带中,弹丸冲击强度并非不变的,而是从BC边到AD边逐渐减小;(3)除中心区域少部分误差值为负以外,整体误差值均为正,为了减小变形程度,除壁板中线附近的窄带强度保持不变外,其余部位均减小弹丸冲击强度;(4)误差值介于[-2mm,5.74mm],其误差区间过大,说明成形效果并不均匀,因此在喷丸窄带宽带不变的前提下,需要缩小喷丸窄带间距,增加喷丸条带数目,增大零件受喷面积以使喷丸效果更加均匀。

基于上述结论得到优化后的喷丸路径。整体路径规划保持不变的前提下,喷丸窄带间距由100mm缩小至60mm,弹丸冲击强度从BC边到AD边逐渐降低,并且显著降低第一条窄带的弹丸冲击强度,部分降低其余窄带弹丸冲击强度。由强至弱的弹丸冲击强度在温度场等效模拟中由从左至右的温度梯度实现。优化后的路径的计算结果如图11所示,成形误差范围由[-2mm, 5.74mm]缩小为[-0.29mm, 0.49mm]。

2.5 验证试验

试验件为某机翼下翼面,喷丸设备为:MP8000,采用1:1全尺寸试验件,材料为7B04铝合金。弹丸参数与等效温度值的映射关系,在已知等效温度梯度(400~25℃)的前提下,可以确定的喷丸参数有:弹丸规格S280(弹丸直径1mm);喷射角度90°;弹丸速度50m/s;喷丸方式为单面喷丸;弹丸流量10kg/min;喷丸窄带宽度80mm;喷丸间距60mm。喷丸路径与优化后的路径一致,并且喷嘴沿窄带从BC边到AD边横向移动中,同时匀速向上移动,以调整弹丸冲击强度。在喷射上半区域时,在下半区域覆盖保护材料避免喷丸;上半区域喷射完成后覆盖保护材料,沿路径依次喷打试件。实际成形零件如图12所示,沿所优化的喷丸路径,其成形趋势与模拟结果一致。

3 结论

(1)根据零件外形分析、曲率分析及厚度分析规划了两条喷丸路径,并对路径1提出了优化,成形误差由[-2mm, 5.74mm]缩小为[-0.29mm, 0.49mm]。

(2)基于变形等效的思想,运用单弹丸,多弹丸以及等效温度场有限元模型,初步探究了喷丸参数与等效温度值的映射关系。

(3)在尺寸为长100mm×宽50mm×厚2mm的

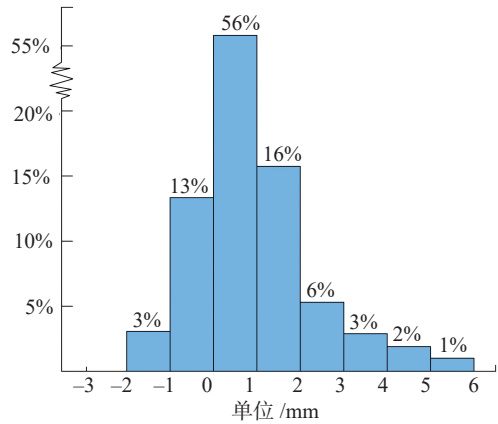


图10 采集点百分比匹配误差直方图(路径1)
Fig.10 Acquisition point percentage error histogram (path 1)

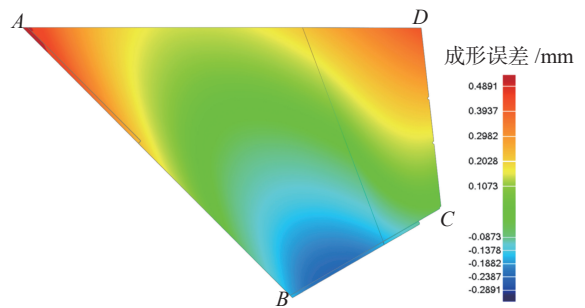


图11 路径优化后的计算结果
Fig.11 Finite element calculation result after path optimization

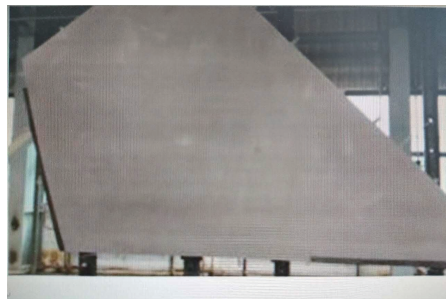


图12 1:1全尺寸试验件成形图
Fig.12 Forming picture of 1:1 full-size test piece

7B04试板中,喷丸参数为弹丸直径1mm,弹丸速度50m/s,喷射角度90°等效于在0.4mm的塑性层内施加400~25℃的温度梯度。

(4)开展了1:1全尺寸零件成形试验,零件成形后误差分布趋势与数值模拟一致,从而说明等效温度场模型对喷丸成形工艺的路径规划具有指导意义。

参考文献

[1] 王明涛,曾元松,黄遐.大尺寸弹丸喷丸成形2024-T351铝合金表面质量研究[J].航空制造技术,2012,55(5):92-94.
WANG Mingtao, ZENG Yuansong, HUANG Xia. Research on surface quality of 2024-T351 aluminum alloy by peen forming with large