

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20160926001

铝合金弹性预应力超声喷丸成形试验

周 圳¹, 鲁世红¹, 张 涛¹, 关艳英², 姜 伟²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016; 2. 航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司, 西安 710089)

摘 要: 超声喷丸作为一种新型的板料成形技术, 具有易操作, 能耗少及优良成形性能等优点, 广泛应用于板料成形中。但自由状态下, 超声喷丸成形也易发生球面变形, 因而提出了弹性预应力超声喷丸成形方法, 以2024-T351铝合金壁板为研究对象, 分析预弯力矩大小、成形轨迹和壁板厚度对成形曲率半径及成形性能的影响。试验中通过控制壁板展向的弯曲曲率来实现弹性预弯。结果表明: 预应力超声喷丸能够大幅度减小壁板展向的成形曲率半径, 同时增大弦向成形曲率半径, 且随着预弯曲率半径的减小, 这种减小和增大的效应随之逐渐增大。此外, 与自由状态相比, 预应力超声喷丸能够产生幅度和深度更大的残余压应力场, 且表面粗糙度并未随着预弯曲率的增大而增加。分析认为, 弹性预应力超声波喷丸能够进一步提高受喷材料的成形曲率并在一定程度上减小球面变形趋势, 对大变形大厚度的单曲率零件成形具有重要的意义。

关键词: 超声喷丸; 弹性预应力; 成形曲率; 残余应力; 表面粗糙度

中图分类号: TG668

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)03-0031-09

Experimental Study of Elastic Prestressed Ultrasonic Peen Forming on Aluminum Alloy

ZHOU Zhen¹, LU Shi-hong¹, ZHANG Tao¹, GUAN Yan-ying², JIANG Wei²

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

Abstract: Ultrasonic shot peening is a new type of forming technology with many merits such as operability, low energy consumption and good comprehensive performance, which is widely used in sheet metal forming process. The elastic prestressed ultrasonic peen forming method was put forward due to the spherical deformation during ultrasonic peen forming process in the free state. The effects of prestressed moment, forming trajectory and plate thickness on forming curvature radius and forming performance were investigated for 2024-T351 aluminum alloy wall panel. The elastic prebending curvature was achieved by controlling the prebending curvature through the span wise direction of the plate. Results show that prestressed ultrasonic peen forming can significantly reduce the curvature radius through the span wise direction and increase the curvature radius through the chord wise direction. Meanwhile, the variation range is increased with descending prebending curvature radius. Larger residual stress and bigger influence depth of residual stress appear in prestressed ultrasonic peen forming compared with that of the free state. The surface roughness increases with ascending prebending curvature. Therefore, the elastic prestressed ultrasonic peen forming can further improve the forming curvature and decrease the spherical deformation tendency to a certain extent, which has a great significance to the forming process of plate with the large deformation, large thickness and single curvature.

Keywords: ultrasonic shot peening; elastic prestress; forming curvature; residual stress; surface roughness

收稿日期: 2016-09-26; 修回日期: 2017-04-26

网络出版日期: 2017-05-05 18:14; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170505.1814.018.html>

通讯作者: 鲁世红(1964—), 女(汉), 教授, 博士; 研究方向: 塑性加工新技术; E-mail: nuaalush@163.com

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(ZBZZ-032)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51175257) and Ninth Batch of Six Talent Peak of Jiangsu Province (ZBZZ-032)

引文格式: 周圳, 鲁世红, 张涛, 等. 铝合金弹性预应力超声喷丸成形试验[J]. 中国表面工程, 2017, 30(3): 31-39.

ZHOU Z, LU S H, ZHANG T, et al. Experimental study of elastic prestressed ultrasonic peen forming on aluminum alloy[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(3): 31-39.

0 引言

超声喷丸成形(Ultrasonic peen forming)技术是利用超声发生器产生的强烈冲击波经冲击介质(弹丸或撞针)作用在金属材料表面,具有振动频率高、加载作用强和冲击载荷上升前沿时间短等优点,属于高能高应变速率变形^[1],能够在金属表面产生纳米结构层和残余压应力场,可以显著地提高金属零件的机械性能、疲劳寿命和耐腐蚀性能^[2-4]。

近年来,国内外学者在相关理论和实验的基础上,对超声喷丸进行了诸多研究。KAWANO S等人^[5]为了提高核反应堆零件的表面层性能,利用直径为3 mm的不锈钢弹丸对316 L不锈钢和600合金进行超声喷丸试验。YIN F等人^[6]研究了AISI-1018钢经过超声喷丸发生剧烈塑性变形的表面形态,利用非接触式3D轮廓测量仪对喷丸后的工件进行测量,探讨了弹丸直径和喷丸时间对表面形态的影响。YANG X等人^[7]采用基于内德勒曼(GTN)的韧性损伤本构方程的有限元模型研究了超声喷丸对AISI 304不锈钢产生的塑性损伤问题,发现随着弹丸冲击速度的增加,受喷材料表面残余压应力值随之增加,且残余压应力层深度也有了明显的增大。史学刚等人^[8]研究了超声喷丸覆盖率分别为100%~300%时2024铝合金的疲劳性能,发现喷完产生的表面纳米层和残余压应力使其疲劳寿命提高了5倍以上。

随着航空器件向着大规模、大尺寸、高精度和轻量化发展,需要满足长寿命、低耗能、低维修、高质量的要求,喷丸成形技术存在的局限性越发明显起来,如工艺参数多且不易控制、工作效率低、易发生球面变形、精确成形能力有待提高,喷完后零件表面粗糙度值有待降低。尽管超声喷丸能够在一定程度上改善以上状况,但是在自由状态下,喷丸成形过程中也易发生球面变形,而预应力喷丸成形能够在一定程度上改变喷丸的球面变形趋势,并且还能够提高零件的成形性能^[9]。BARRETT和TODD^[10]试验研究了弹性预应力喷丸成形技术对残余应力场分布的影响,发现预应力喷丸成形后的残余压应力较传统自由喷丸成形有了大幅度的提高。MIAO H Y^[11]建立了喷丸饱和度、表面覆盖率和粗糙度与喷丸时间之间的定量关系,并且试验研究了喷丸速度和喷丸时间对残余应力的影响以及喷丸过程中预弯力矩对

窄板和方板弧高值的影响。XIE L等^[12]研究了预应力喷丸对(TiB+TiC)/Ti-6Al-4V复合材料表面性能的影响,通过沃伊特方法得到的衍射峰积分宽度分析了晶粒尺寸和表面变形层微观应变。HU Y等^[13]通过在方形试验件的单方向上施加预弯曲率来实现预应力激光喷丸成形,建立了一种基于本征应变的新模型来模拟预应力对弯曲变形和残余应力场分布的影响。

文中结合现行壁板超声喷丸成形和预应力喷丸成形的相关研究,从理论角度分析探讨了预应力喷丸成形后残余应力场的分布以及成形曲率的大小。通过试验研究,从预应力大小、成形轨迹和偏置距离以及壁板厚度等方面阐明预应力超声喷丸的成形特性,为研制开发机翼壁板超声喷丸成形工艺奠定理论与技术基础。

1 预应力超声喷丸成形理论

预应力喷丸时,受喷材料表面处于拉应力状态下接受撞针或弹丸的撞击。与自由状态下相比,在相同的撞击能量下,这种拉应力有助于受喷表层材料的延伸,同时加深残余压应力层的深度以及残余压应力值的大小。以在板料宽度方向(弦向)上施加弹性预弯为例,分析喷丸过程的残余应力以及成形曲率半径的大小,如图1所示。

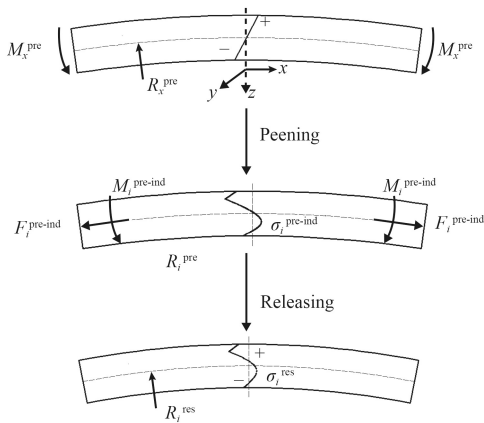


图1 预应力超声波喷丸成形过程力学解析

Fig.1 Forming process and mechanics analysis of prestressed ultrasonic peen

板料的 x 方向上施加弹性预弯后,如图1(a)所示。板料 y 方向上的预弯力矩可以忽略不计, x 方向单位宽度上的预弯力矩可表示为:

$$M_x^{\text{pre}} = EI\rho_x^{\text{pre}} \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量; I 为单位宽度的惯性矩, 大小为 $I=h^3/12$, h 为板料厚度。

板料的弯曲变形会在其内部产生相应的应力场, x 方向上由预弯力矩产生的应力大小为:

$$\sigma_x^{\text{pre}} = M_x^{\text{pre}}(h/2 - z)/I = E\rho_x^{\text{pre}}(h/2 - z) \quad (2)$$

喷丸过程中, 板料上表面处于拉应力状态下接受撞针或弹丸的撞击。喷丸后, 板料表层发生剧烈塑性变形并在材料内部诱导产生了应力 $\sigma_i^{\text{pre-ind}}$, 其中 i 表示 x 或者 y 方向, 该应力的出现破坏了板料内部原有的力系平衡, 如图1(b)。边界条件进行释放之后, 板料只能通过发生宏观弯曲变形来使其内部力系重新达到平衡, 如图1(c)。最终, 板料内部的残余应力大小为^[14]:

$$\sigma_i^{\text{res}} = \sigma_i^{\text{pre-ind}} + \sigma_i^s + \sigma_i^b \quad (3)$$

喷丸处理后, 在解除约束条件之前, 在应力 $\sigma_i^{\text{pre-ind}}$ 的作用下, 板料单位宽度(长度)上产生的延伸力和弯曲力矩分别为^[15]:

$$F_i^{\text{ind}} = - \int_0^h \sigma_i^{\text{pre-ind}} dz \quad (4)$$

$$M_i^{\text{ind}} = - \int_0^h \sigma_i^{\text{pre-ind}}(h/2 - z) dz \quad (5)$$

由于施加的是弹性预弯, 因而从预弯夹具上取下受喷板料以后, 板料受到的预弯力矩和延伸力以及由它们引起的应力有一部分消失, 在这里分别引入回弹系数 α_i 和 β_i , 释放约束条件后板料内部的延伸力和弯曲力矩可表示为^[16]:

$$F_i^{\text{pre-ind}} = F_i^{\text{ind}} + \alpha_i \int_0^{h/2} \sigma_i^{\text{pre}}(z) dz \quad (6)$$

$$M_i^{\text{pre-ind}} = M_i^{\text{ind}} - \beta_i M_i^{\text{pre}} \quad (7)$$

而式(3)中的 $\sigma_i^b = M_i^{\text{pre-ind}}(h/2 - z)/I$, $\sigma_i^s = F_i^{\text{pre-ind}}/h$, 故由式(3)、(4)、(5)、(6)、(7)联立可得预应力超声喷丸成形后板料的残余应力大小。

忽略 $F_i^{\text{pre-ind}}$ 对成形曲率的影响, 由纯弯曲方程式可得喷丸成形以后板料在预弯方向上的曲率半径 R_x 和与预弯垂直方向上的曲率半径 R_y :

$$R_x = \frac{E(h - \delta_\varepsilon)^3}{12} \cdot \frac{1}{M_x^{\text{pre-ind}} - \mu M_y^{\text{pre-ind}}} \quad (8)$$

$$R_y = \frac{E(h - \delta_\varepsilon)^3}{12} \cdot \frac{1}{M_y^{\text{pre-ind}} - \mu M_x^{\text{pre-ind}}} \quad (9)$$

式中: μ 表示板料的泊松比; δ_ε 表示喷丸后残余压应力深度。

将 R_x 除以 R_y , 可得:

$$\frac{R_x}{R_y} = \frac{M_y^{\text{pre-ind}}}{M_x^{\text{pre-ind}}} \cdot \frac{(1 - \mu M_x^{\text{pre-ind}}/M_y^{\text{pre-ind}})}{(1 - \mu M_y^{\text{pre-ind}}/M_x^{\text{pre-ind}})} \quad (10)$$

由于 $M_x^{\text{pre-ind}}$ 大于 $M_y^{\text{pre-ind}}$, 故 $R_x/R_y < 1$, 即 $R_x < R_y$ 。

由以上理论分析可以看出: 预应力超声喷丸成形后, 板料内部的残余应力增大, 预弯方向上的成形曲率半径减小, 与预弯垂直方向上的成形曲率半径增大, 这种变化随着预弯曲率(预弯力矩)的增加而加剧。因此, 预应力超声喷丸能够有效地克服自由状态喷丸成形时板料的球面变形趋势, 并提高其机械性能、疲劳寿命和耐腐蚀性能。

2 预应力超声喷丸成形试验

2.1 超声喷丸设备

超声喷丸成形试验采用南京航空航天大学自主研发的数控超声喷丸装置进行, 其工作原理是将交流电转换成频率为20 kHz左右的高能超声波, 然后通过换能器将高频超声振动经变幅杆转换成振幅为20~50 μm 的机械振动, 带动撞针将产生的机械能通过撞击传递到工件表面, 从而使板料发生塑性变形, 图2为超声喷丸装置示意图。

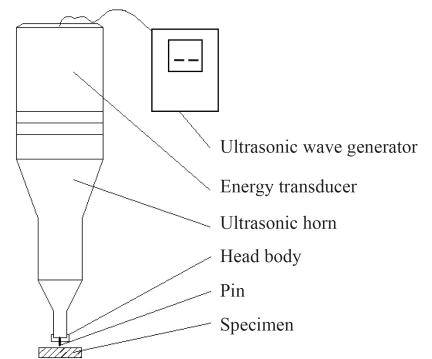


图2 超声喷丸成形装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the ultrasonic peen forming device

2.2 预弯装置和试验件

如图3所示, 将试验件紧固在预弯模具的弯曲曲面上, 通过控制预弯模具弯曲曲面的曲率半径来实现不同的预弯曲率, 从而使得试验件上表层获得不同程度的弯曲应力。由于预应力喷丸成形需要施加的是弹性预弯, 因而试验件表面受到的

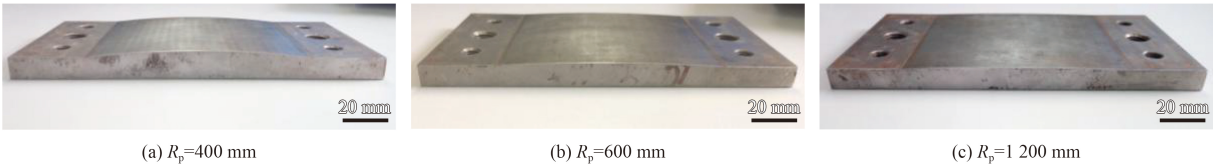


图 3 曲率半径 R_p 分别为400、600和1 200 mm的预弯模具

Fig.3 Prebending molds with curvature radius R_p of 400, 600 and 1 200 mm, respectively

拉应力不能超过材料的屈服极限。结合Von-Mises屈服准则和弹塑性理论，弹性预应力的预弯曲率半径大小必须满足如下不等式：

$$R_p \geq \frac{\sqrt{1-\nu+\nu^2} \cdot Eh}{2(1-\nu^2)\sigma_s}$$

(11)

式中： ν 为泊松比； E 为弹性模量； h 为试验件厚度，mm； σ_s 为材料屈服强度。

试验所用材料为2024-T351铝合金，该材料采用固溶处理加自然时效处理的热处理方式。其化学成分和力学性能分别见表1和表2。

表 1 2024-T351铝合金化学成分

Table 1 Chemical composition of 2024-T351 aluminum alloy

(w/%)					
Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
Content	0.5	0.5	3.8–4.9	0.3–0.9	1.2–1.8

Element	Cr	Zn	Ti	Al	
Content	0.1	0.25	0.15	Bal.	

表 2 2024-T351铝合金力学性能

Table 2 Mechanical properties of 2024-T351 aluminum alloy

Parameters	Values
Tensile strength, σ_b / MPa	470
Yield strength, σ_s / MPa	325
Elongation, δ / %	10
Fatigue strength, σ_{-1} / MPa	105
Hardness HB / (N · mm ⁻²)	120
Elastic modulus, E / GPa	68
Density, ρ / (kg · m ⁻³)	2 770

试验件长宽尺寸为：120 mm×50 mm，厚度分别为1.5、2.0、2.5、3.0和3.5 mm，由方程(10)可计算得到3.5 mm试验件的弹性极限预弯曲率半径为363 mm，为了保证试验板件均为弹性预弯，预弯曲率半径分别取400、600和1 200 mm。

2.3 试验过程

采用控制变量法进行预应力超声喷丸成形试

验研究，重点研究预弯力矩，成形轨迹，偏置距离，壁板厚度等参数对2024-T351铝合金成形曲率的影响，偏置距离与成形轨迹示意图如图4。在试验件的中心选取尺寸为80 mm×50 mm作为喷丸区域，选用单撞针工具头，3 mm直径的撞针、变幅杆振幅调为24 μm，机床进给速度为3 000 mm/min。

具体试验研究的安排如下：

(1) 成形轨迹是影响超声喷丸成形的重要因素，它对板料成形的外形轮廓具有非常重要的影响。采用图4所示两种成形轨迹，在预弯曲率半径 R_p 为+∞、1 200、600、400 mm的模具上，偏置距离 $d=1$ mm，对厚度 h 为2.5 mm的试验件进行超声喷丸成形试验，研究弹性预应力对超声喷丸成形曲率的影响以及在有无预应力状态下成形轨迹对成形曲率的影响。

(2) R_p 为+∞、1 200、600、400 mm，选取成形效果较优的成形轨迹，拟定偏置距离 d 分别为0.6、0.8、1、1.2和1.4 mm，对 h 为2.5 mm的试验件进行

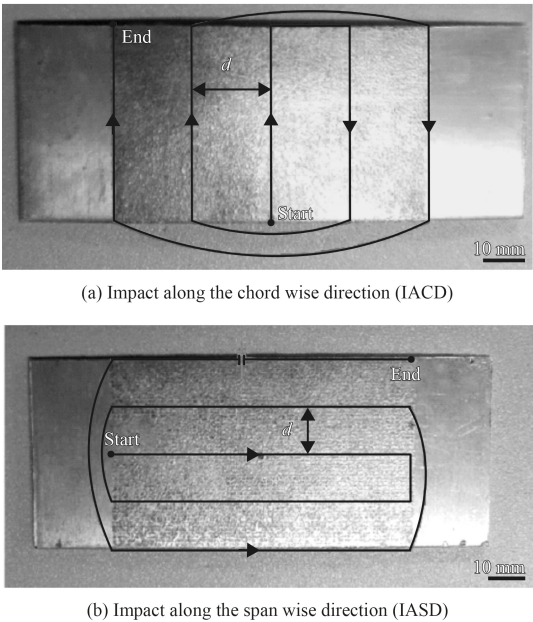


图 4 偏置距离 d 与成形轨迹示意图

Fig.4 Schemoctic diagrams of offset distance d and forming trajectory

超声喷丸试验, 研究预应力状态下偏置距离对超声喷丸成形性能的影响。

(3) 采用同样的成形轨迹, $d=1\text{ mm}$, 对 h 为1.5、2、2.5、3和3.5 mm, 在 R_p 为 $+\infty$ 、1 200、600和400 mm的条件下进行超声喷丸成形试验, 研究壁板厚度与预应力超声喷丸成形之间的作用规律。

为了进一步研究弹性预应力对超声喷丸成形综合性能的影响, 对在不同预弯曲率半径下喷丸后的试验件进行残余应力和表面粗糙度测量。残余应力测量设备采用Proto公司制造的腐蚀设备和残余应力测试仪, 采用同倾固定 Ψ 加摆动法测量, Cr靶材 $k\alpha$ 辐射, 测试晶面为(311), 实验前对材料表面进行5~10 s的腐蚀, 去除表面氧化膜, 以确保试验测量的准确性。试验件表面粗糙度通过Surftest SJ-310进行测量, 探针方向垂直喷丸轨迹, 每个试验件测量8个点。

3 结果与讨论

3.1 弧高值和成形曲率

超声喷丸试验后壁板成形曲率半径 R 的结果通过采用测量弧高值 AH_p 然后根据其几何关系计算得出, 测量所用弧高仪如图5所示, 其测头部位是由上下移动的测针和位移传感器连接组成, 通过表面光滑平整的校准块校零, 两侧滑块可以调整跨

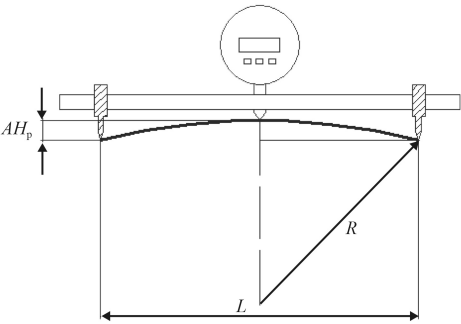


图5 曲率半径和弧高值之间的关系

Fig.5 Relationship between radius of curvature and arc height

距。成形曲率半径的表达式如下:

$$R = \left(R^2 - AH_p\right)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2 \tag{12}$$

由于 AH_p 远小于 R , 所以式(12)可以简写成:

$$R = \frac{L^2}{8AH_p} \tag{13}$$

式中, L 表示测量跨距, 弦向跨距为50 mm, 展向跨距为100 mm。

表3列出了4种预弯曲率半径下的预弯力矩、表面最大拉应力以及采用图4(b)所示的弦向成形轨迹(IACD)对厚度为2.5 mm壁板进行超声喷丸后弦向和展向的弧高值平均值以及对应的成形曲率半径。预弯力矩和表面最大拉应力可分别由式(1)和式(2)计算得出。从表中数据可以看出, 随着预弯曲率半径的减小, 壁板展向的弧高值 AH_x 随之增大, 预弯曲率半径为400 mm时, AH_x 为2.754 mm, 较自由状态而言, 弧高值增大了150.6%; 而弦向的弧高值 AH_y 随着预弯曲率半径的减小而减小, 预弯曲率半径为400 mm时的弧高值比自由状态减小了38.1%。

将表3中的弧高值和成形曲率半径数据转化为曲线, 如图6所示。从图6(a)可以看出: 壁板展向(弦向)弧高值随着预弯力矩的增加而增加(减小), 且几乎呈线性变化。由图6(b)可知, 预弯力矩 M^{pre} 与成形曲率半径 R 之间的关系和其与弧高值的关系不尽相同。随预弯力矩的增大, 喷丸后壁板展向成形曲率半径 R_x 先快速减小后逐渐趋于平缓, 而弦向成形曲率半径 R_y 随预弯力矩的增大几乎呈线性增大。当预弯曲率 R_p 为400 mm时, R_x 为454 mm, R_p 为800时, R_x 为563 mm, R_p 为1 200 mm时, R_x 为788 mm; 相比自由状态成形曲率半径1 137 mm, 成形曲率半径分别减少了60.1%、50.5%、30.7%。而壁板弦向上的成形曲率 R_y 远远大于 R_x , 并随着预弯力矩的增加而线性增大, 预弯曲率半径 R_p 为

表 3 不同预弯条件, 弧高值和成形曲率半径的大小

Table 3 Value of arc height and radius of curvature under different prebending conditions

Radius of prebend, R_p / mm	Prebending moment, M^{pre} / (N·mm)	Surface stress, σ_{st} / MPa	Resulting arc height / mm		Forming radius of curvature / mm	
			Span wise	Chord wise	Span wise	Chord wise
$+\infty$	0	0	1.099	0.126	1 137	2 470
1 200	73.8	70.8	1587	0.106	788	2 947
600	147.6	141.6	2.219	0.088	563	3 551
400	221.4	212.4	2.754	0.078	454	4 020

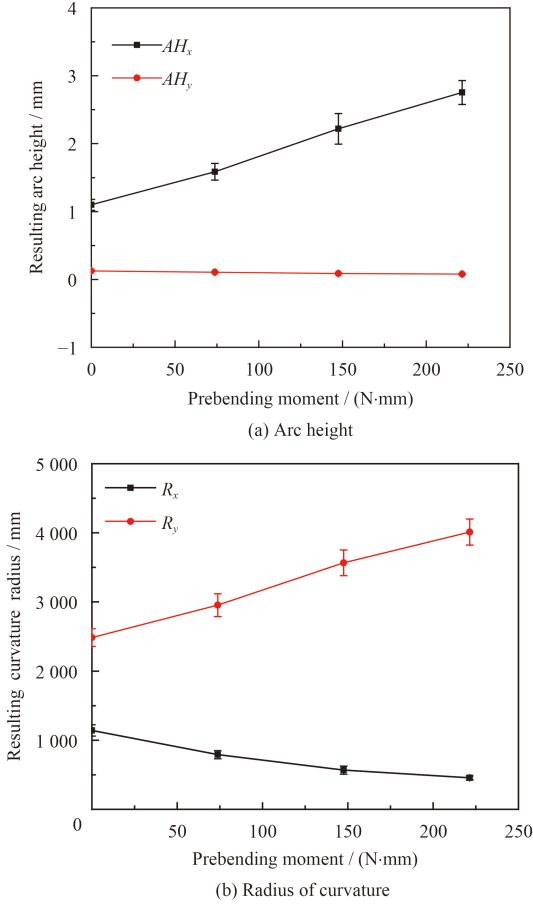


图6 预弯力矩与成形结果的关系

Fig.6 Relationship between forming results and prebending moment

400 mm时, 与自由状态相比其成形曲率半径增大了62.8%。

就同一试验件而言, 其弦向和展向成形曲率半径的比值随着预弯曲率的增加而增大, 当预弯曲率为0时, R_y 与 R_x 的比值为2.17, 随着预弯曲率的增加, R_y 与 R_x 的比值最大达到了8.82, 表明了预应力超声喷丸能够大幅度减小球面变形趋势。

成形轨迹是超声喷丸的重要参数, 对板料成形的外形轮廓具有非常重要的影响。图7对比分析了图4两种成形轨迹, 在不同预弯条件下对厚度为2.5 mm壁板进行超声喷丸后得到的成形曲率。从图中可以看出, 两种成形轨迹得到的 R_x 和 R_y 随预弯力矩的变化趋势基本一致, 即 R_x 随预弯力矩的增大先快速而后平缓减小, R_y 随预弯力矩的增大近乎线性增大。另一方面, 弦向喷丸(IACD)得到的 R_x 比展向喷丸(IASD)要小, 而 R_y 比展向喷丸要大。显然, 选择弦向成形轨迹对壁板进行预应力超声喷丸不仅能够进一步提高其成形曲率, 还能

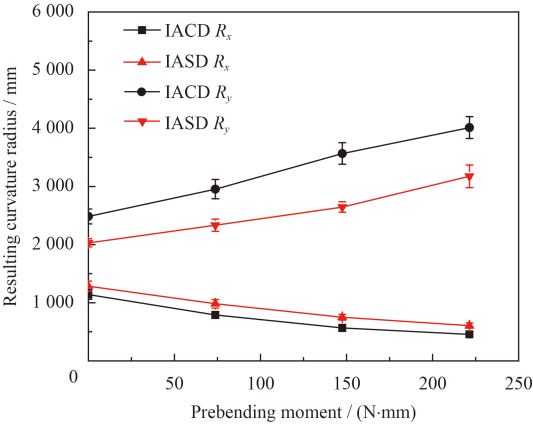


图7 两种不同成形轨迹与成形曲率半径的关系

Fig.7 Relationship between resulting radius of curvature and prebending moment under two different impact trajectory

更好地改善其球面变形趋势。

偏置距离对于板料的成形量以及诱导产生的残余应力场的大小和分布具有非常重要的影响。上述分析结果表明, IACD较IASD能进一步提高壁板的成形曲率半径, 并在更大程度上消除球面变形的趋势。因此, 在IACD的基础上, 分析了偏置距离 d 对壁板展向成形曲率的影响, 结果如图8所示。可以看出, R_x 随偏置距离的减小而减小, 这是因为随着偏置距离的减小, 壁板单位面积受到撞针冲击的次数越多, 传递到壁板中的冲击能量也就越多, 从而使得 R_x 越来越小。当 $R_p=+\infty$, $d=1.4$ mm时, R_x 为1 482 mm, 而在 $R_p=400$ mm, $d=0.6$ mm时, R_x 为347 mm, 较 $R_p=+\infty$ 减小了76.6%。

可见, 在预应力状态下减小偏置距离可以大幅度减小壁板的成形曲率半径。这可能是由于预

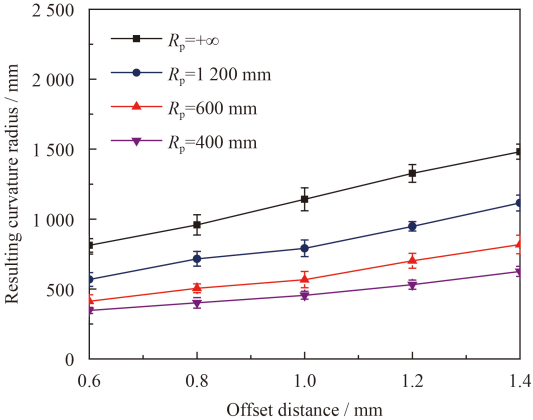


图8 不同预弯条件下, 偏置距离对成形曲率半径的影响

Fig.8 Influence of offset distance on forming curvature radius under different prebending conditions

应力的存在, 超声喷丸后壁板内部诱导产生了更大的残余压应力, 而偏置距离的减小使得残余压应力进一步加大, 导致壁板的弯曲变形程度加大。

图9分析了不同厚度壁板在预弯曲状态下超声喷丸成形后的展向成形曲率半径。由图9可知, 无论是在自由状态下还是预弯状态下, 成形曲率半径都随着壁板厚度的增加而增加, 且增加幅度越来越大。自由状态下, 2.5和3.5 mm壁板的成形曲率半径由1.5 mm壁板的897 mm分别增大到1 141和2 070 mm, 分别增大了27.2%和130.7%; 预弯曲率半径为400 mm时, 2.5和3.5 mm壁板较1.5 mm的成形曲率半径由387 mm增大为455 mm和804 mm, 分别增加17.6%和107.8%。可见, 预应力状态下, 壁板成形曲率半径随其厚度增加的增加幅度要比自由状态小, 且随着预弯曲率半径的减小, 增加幅度越来越小。与自由状态相比较而言, 预弯曲率半径为400 mm时, 1.5 mm壁板的成形曲率半径减少了56.8%, 2.5和3.5 mm分别减少了60.1%和61.1%。可见预应力状态与自由状态相比, 壁板成形曲率半径的减少幅度并不随着其厚度的增加而减小。因此, 利用预应力超声喷丸成形工艺可以提高更大厚度零件的成形曲率。

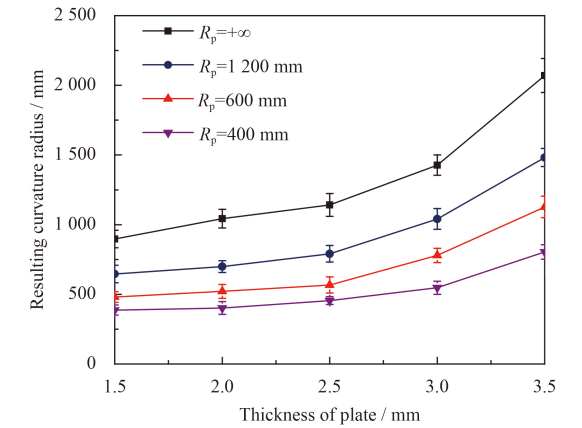


图9 不同预弯条件下, 壁板厚度对成形曲率半径的影响
Fig.9 Influence of plate thickness on forming curvature radius under different prebending conditions

3.2 残余应力

材料表面层的残余压应力场不仅能够有效的阻止材料内裂纹的萌生, 还能通过残余压应力场的作用增加裂纹的闭合效应减小疲劳裂纹的扩展。超声喷丸利用在材料内部引入残余压应力场来改善整个工件的应力分布状况达到提高疲劳寿命的目的, 已有研究表明, 引入的残余压应力场

越大, 试样的疲劳寿命越高^[17]。为更好地描述喷丸后残余压应力场的特征, 将其归纳为5个特征参量, 即上表面残余压应力值 σ_{tsrs} 、下表面残余压应力值 σ_{bsrs} 、最大残余压应力 σ_{mrs} 、最大残余压应力值深度 Z_m 和残余压应力层深度 Z_0 。

图10比较了厚度为2.5 mm的壁板在不同预弯力矩下超声喷丸后上表面和下表面的残余应力值的大小, 可以看出: 无论是否处于预应力状态进行超声喷丸成形, 壁板的上下表面均产生了残余压应力, 且 $\sigma_{tsrs} > \sigma_{bsrs}$; 随着预弯力矩的增大, σ_{tsrs} 、 σ_{bsrs} 均随之呈现出近似线性增大的趋势, 该结果与HU Y X^[13]等人得出的结论基本一致。

图11分析了 $R_p=400$ 、600、1 200 mm以及 $+\infty$ 条件下超声喷丸后2.5 mm壁板残余应力场分布。从图可以看出, 与自由相比较, 预应力喷丸在壁板内部诱导产生的 σ_{tsrs} 、 σ_{mrs} 、 Z_m 以及 Z_0 均更大, 而

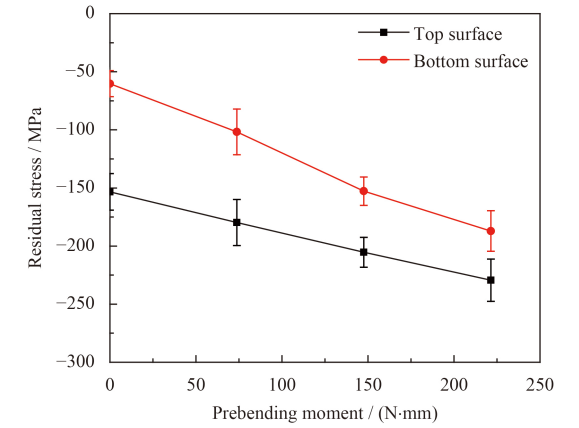


图10 不同预弯条件下, 壁板上下表面的残余应力值
Fig.10 Values of residual stress on top surface and bottom surface under different prebending conditions

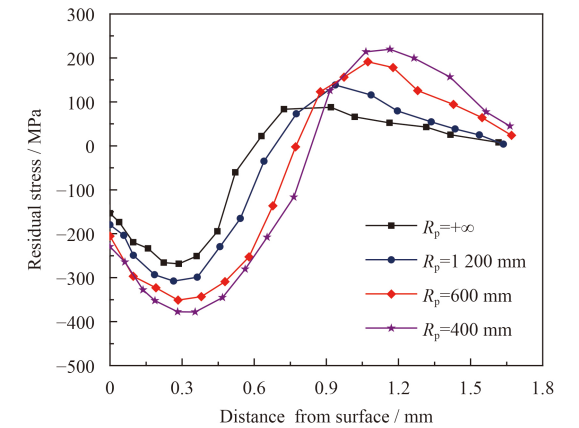


图11 不同预弯条件下, 残余应力随深度的分布
Fig.11 Distribution of residual stress with depth under different prebending conditions

且预应力喷丸在壁板内部产生的残余拉应力也比自由状态更大。随着预弯曲率半径减小，壁板的上表面残余压应力值(σ_{tsrs})随之增大，预弯曲率半径为400 mm的 σ_{tsrs} (229 MPa)较自由状态(153 MPa)增大了49.7%， σ_{mrs} 、 Z_{m} 以及 Z_0 也随着预弯曲率半径的减小而增大。可见，预应力超声喷丸能够进一步提高受喷零件的残余压应力场，从而提高受喷零件的抗疲劳性能。

3.3 表面粗糙度

表面粗糙度直接影响着材料零部件的耐腐蚀性、耐磨性、疲劳强度及导流、导电等性能。在传统的喷丸成形中，弹丸流高速撞击材料的表面，产生大量的弹坑，使得受喷材料的表面非常粗糙，严重影响其表面质量。因此，对预应力超声喷丸成形后板料表面粗糙度的研究具有非常重要的意义。表4为不同预弯条件下，原材料以及受喷件表面粗糙度主要参数Ra的测量值。可以看出：超声喷丸后，试验件的表面粗糙度Ra的平均值有

所增加，由原材料的0.562 μm 增加至1.903 μm ，且随着预弯曲率半径的减小，Ra平均值先略微增加然后减小，这是因为预弯产生的弹性变形使得喷丸过程中发生的塑性变形更加充分和均匀，在试样件表面形成的更低的波峰，导致粗糙度值略微下降。可见，预应力超声喷丸成形不仅产生了更大的残余压应力场，提高了受喷零件的成形曲率，而且并没有使其表面粗糙度值变大。

但是，相对于原材料而言，预应力超声喷丸后零件的表面粗糙度值有了大幅提高，而表面粗糙度的增大，往往会造成零件表面的损伤，应力集中也会明显增加，对疲劳性能非常不利。在实际应用中，为了降低喷丸成形件的表面粗糙度值，通常采用打磨进行处理，打磨后喷丸所产生弹坑的波峰大幅度降低，从而实现减小表面粗糙度值的效果。此外，对成形件采用小压力、大弹丸的工艺参数进行喷丸强化不仅可以减小成形件的表面粗糙度值，还可以进一步提高其表面显微硬度和残余应力场。

表 4 原材料以及不同预应力状态下喷丸后试验件的粗糙度 Ra

Table 4 Surface roughness Ra of raw material and peened specimen under different prebending conditions

Radius of prebend, R_p / mm	Surface roughness, R_a / μm							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$+\infty$	1.029	1.153	1.066	0.986	1.095	1.092	1.161	1.158
1 200	1.124	1.146	1.153	1.209	1.056	1.193	0.997	1.161
600	1.035	0.892	1.019	0.934	0.995	1.037	1.109	1.114
400	0.979	0.954	1.024	0.923	0.823	0.792	1.04	0.892
Raw materials	0.587	0.509	0.624	0.563	0.517	0.569	0.521	0.605

4 结 论

文中结合预应力喷丸成形和超声喷丸成形两种工艺方法，对2024-T351铝合金壁板采用试验研究分析了不同工艺参数对成形性能的影响。基于分析结果，得出了以下结论：

(1) 无论是否处于预应力状态，超声喷丸成形壁板的展向成形曲率半径远小于弦向；且随着预弯力矩的增大，展向成形曲率半径随之减小，而弦向成形曲率半径随之增大，大幅度地减小了壁板的球面变形趋势。

(2) 喷丸成形轨迹和偏置距离是影响预应力超声喷丸的重要因素。较展向成形轨迹而言，弦向成形轨迹能够进一步提高(降低)其展向(弦向)的成形曲率，减小球面变形趋势。随着偏置距离的减

小，壁板展向的成形曲率半径随之减小，且其减小幅度随着预弯曲率半径的减小而减小。

(3) 预应力超声喷丸能够实现更大厚度的板材成形，且与自由状态相比较而言，预应力状态下壁板成形曲率半径的减小幅度并不随其厚度的增加而减小。

(4) 超声喷丸成形在壁板的上下表面均产出了残余压应力，且上表面的残余压应力值较下表面的大。随着预弯曲率半径的减小，表面残余压应力值(σ_{tsrs} 、 σ_{bsrs})、最大残余压应力值(σ_{mrs})、最大残余压应力值深度(Z_{m})、残余压应力深度(Z_0)均随之增大。

(5) 预应力超声喷丸成形不仅能够诱导产生更大更深的残余应力场，提高其成形曲率，且成形

后试验件表面的粗糙度并未随着预弯曲率半径的减小而增加, 表明了预应力超声喷丸能够获得更好的表面层性能。

参考文献

- [1] SEKKAL A C, LANGLADE C, VANNES A B. A micro/macro impact test at controlled energy for erosion and phase-transformation simulation[J]. *Tribology Letters*, 2003, 15(3): 265-274.
- [2] MORDYUK B N, PROKOPENKO G I. Ultrasonic impact peening for the surface properties' management[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2007, 308(3): 855-866.
- [3] FAN Z, XU H, LI D, et al. Surface nano crystallization of 35# type carbon steel induced by ultrasonic impact treatment (UIT)[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 27: 1718-1722.
- [4] HACINI L, LE N V, BOCHER P. Evaluation of residual stresses induced by robotized hammer peening by the contour method[J]. *Experimental Mechanics*, 2009, 49(6): 775-783.
- [5] KAWANO S, KAWAGISHI A, SUEZONO N, et al. Development of ultrasonic shot peening technique for reactor components to improve structural integrity against stress corrosion cracking[C]. *International Conference on Nuclear Engineering*, 2009: 543-547.
- [6] YIN F, HUA L, WANG X, et al. Numerical modeling and experimental approach for surface morphology evaluation during ultrasonic shot peening[J]. *Computational Materials Science*, 2014, 92(5): 28-35.
- [7] YANG X, ZHOU J, LING X. Study on plastic damage of AISI 304 stainless steel induced by ultrasonic impact treatment[J]. *Materials & Design*, 2012, 36: 477-481.
- [8] 史学刚, 鲁世红, 张伟. 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): 3100-3104.
SHI X G, LU S H, ZHANG W. Study on surface integrity of

aluminum alloy ultrasonic shot peening forming workpieces[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(22): 3100-3104 (in Chinese).

- [9] HACKEL L A, HALPIN J M, HARRIS F B. Pre-loading of components during laser peenforming: EP, US 6670578 B2[P]. 2002.
- [10] BARRETT C F, TODD R. Investigation of the effects of elastic pre-stressing technique on magnitude of compressive residual stress induced by shot peen forming of thick aluminum plates[C]. *Proceedings of the 2nd International Conferences on shot peening*, 1984: 15-21.
- [11] 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(15): 2089-2102.
- [12] XIE L, JIANG C, LU W, et al. Effect of stress peening on surface layer characteristics of (TiB+TiC)/Ti-6Al-4V composite[J]. *Materials & Design*, 2012, 33: 64-68.
- [13] HU Y, LI Z, YU X, et al. Effect of elastic prestress on the laser peen forming of aluminum alloy 2024-T351: Experiments and eigenstrain-based modeling[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 221: 214-224.
- [14] AL-HASSANI S T S. Mechanical aspects of residual stress development in shot peening[J]. *Hasscmi*, 1981.
- [15] 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(11): 963-975.
- [16] HASHMI S, BATALHA G F, VAN TYNE C J, et al. Comprehensive materials processing[M]. *Elsevier*, 2014: 325-326.
- [17] ZÁVODSKÁ D, GUAGLIANO M, BOKŮVKA O, et al. Fatigue resistance of low alloy steel after shot peening[J]. *Materials Today Proceedings*, 2016, 3(4): 1220-1225.

(责任编辑: 陈茜)