

多撞针超声波喷丸校形的工艺参数研究

王志晖^{1,2}, 马青霄², 李荣和², 张庆龙², 赵 夙²

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 中国科学院 宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201)

摘要: 为了提高超声波喷丸校形工艺的工作效率及可控性, 以自研的 65 针超声波喷丸校形设备为研究对象, 对其喷丸工艺参数展开了研究。通过正交试验法, 分析了气体压力、撞针行程和超声波振幅对喷丸强度的影响规律。结果表明: Almen 试片在气体压力为 0.65 MPa、超声波振幅为 25.6 μm 、撞针行程为 1 mm 的条件下, 得到的校形弧高的最大值为 1.073 mm, 即采用该组合获得的喷丸强度最大; 另外, 喷丸强度与超声波振幅及气体压力呈正相关, 与撞针行程呈负相关; 对薄壁件弯曲变形影响最大的工艺参数为超声波振幅, 其次为撞针行程, 影响最小的为气体压力。最后, 通过搭建的检测系统研究了喷丸工艺参数对撞针冲击速度的影响规律, 结果与正交试验的结果一致。

关键词: 超声波喷丸校形; 喷丸强度; 撞针冲击速度; 气体压力; 撞针行程; 超声波振幅

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.019

中图分类号: TG668

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 12-0129-06

Research on process parameters of multi-pin ultrasonic shot peening sizing

Wang Zhihui^{1,2}, Ma Qingxiao², Li Ronghe², Zhang Qinglong², Zhao Su²

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

Abstract: To improve the working efficiency and controllability of ultrasonic shot peening sizing process, the shot peening process parameters of the self-researched 65-pin ultrasonic shot peening sizing device were studied, and the influence laws of air pressure, firing pin stroke and ultrasonic amplitude on shot peening strength were analyzed by orthogonal test method. Results show that for Almen test piece, the maximum height of sizing arc obtained is 1.073 mm under the air pressure of 0.65 MPa, the ultrasonic amplitude of 25.6 μm and the firing pin stroke of 1 mm, and the maximum shot peening strength is obtained under this composition. In addition, the shot peening strength is positively correlated with the ultrasonic amplitude and the air pressure, and negatively correlated with the firing pin stroke. Furthermore, the process parameter that has the greatest impact on the bending deformation of thin-walled parts is ultrasonic amplitude, followed by the firing pin stroke, and the air pressure has the least impact. Finally, the influence laws of shot peening process parameters on impact velocity of firing pin are studied by the established detection system, and the results are consistent with that of orthogonal test.

Key words: ultrasonic shot peening sizing; shot peening strength; firing pin impact velocity; air pressure; firing pin stroke; ultrasonic amplitude

超声波喷丸校形技术以超声波振动为动力源, 通过换能器将超声波振荡信号 (频率在 20 kHz 以上) 转换为机械振动信号, 再通过变幅杆将微小振幅的机械振动放大, 带动安装在振动工具头上的撞针对靶材表面进行高速撞击, 使材料发生表层塑性

变形, 同时在其内部产生高幅残余压应力, 其沿壁厚非均匀分布, 会引起工件宏观弯曲变形, 进而实现工件校形的效果^[1-2]。超声波喷丸校形的过程如图 1 所示。

超声波喷丸校形技术由于具有成形成本低、绿色环保、过程稳定无回弹、工艺可控性好、对材料的损伤小、校形精度和效率高等优点^[3-5], 近年来得到了飞速发展。自 1996 年开始, 法国 SONATS 公司在超声波喷丸校形和成形等方面做了大量的理论试验研究, 开发了超声波喷丸设备以及相应的工艺流程, 现已在航天航空、汽车制造及轮船制造等行业投入使用^[6]; KSA 公司于 2001 年提出, 可在飞

收稿日期: 2022-01-06; 修订日期: 2022-04-12

基金项目: 宁波市“3315”创新团队 (Y80929DL04); 宁波市科技创新“2025”重大专项 (2018B10059)

作者简介: 王志晖 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 18370266642@163.com

通信作者: 赵 夙 (1981-), 男, 博士, 研究员

E-mail: zhaosu@nimte.ac.cn

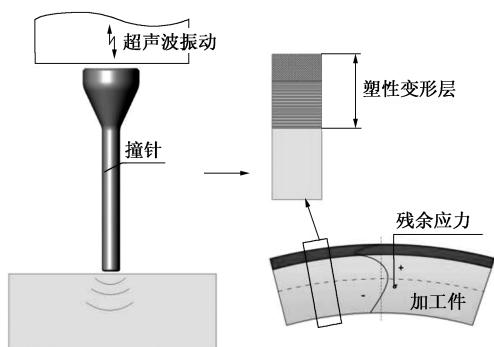


图 1 超声波喷丸校形原理图

Fig. 1 Principle diagram of ultrasonic shot peening sizing

机大型板件上采用超声波喷丸成形和校形技术^[7]；Wheelabrator 公司研发了可人工操作、灵活方便的便携式超声波喷丸设备^[8-9]。在国内，超声波喷丸校形技术也在多个领域得到发展，如：鲁世红等^[10]采用有限元模拟分析方法，对超声波喷丸校形后的 2024 铝合金带孔板进行了研究，当喷丸区域离孔的距离过小时，发现了孔异性程度最大、应力明显集中等现象；中航飞机股份有限公司西安飞机分公司针对 C919 飞机机翼整体壁板，联合南京航空航天大学，采用超声波喷丸成形和校形技术展开了理论研究以及工艺研究，最终满足了加工件校形量的要求^[5]。近年来，学者针对超声波喷丸校形工艺参数等方面也进行了一些研究。南京航空航天大学陈星^[11]、高琳^[12]研究了单一喷丸参数，如撞针直径、喷丸时间、电流强度等对铝合金板料校形的影响规律；航空工业西安飞机工业公司的周圳等^[13]研究了预弯力矩、成形轨迹及薄板厚度对 2024-T351 铝合金成形性能、曲率半径的影响，发现弹性预应力超声波喷丸能够提高材料的成形曲率及减小球面的变形趋势。但是，目前超声波喷丸校形研究主要集中在单撞针或少撞针方面，对多撞针的超声波喷丸校形的研究较少，且绝大部分研究仅控制单一的变量。虽然这种方法可得到工艺参数对喷丸靶材变形量的影响，但无法得到各工艺参数对靶材变形量影响的权重，而在实际的加工过程中，往往需要同时调节多个工艺参数。

正交试验法是一种研究多因素多水平的设计方法^[14]，通过正交试验不仅能够大大降低试验成本，而且还可以得到工艺参数对变形影响的权重。该方法恰恰适用于多参数控制的超声波喷丸校形过程。因此，本文基于正交试验方法，利用团队自研的 65 针超声波喷丸校形设备对 Almen 试片进行喷丸处理，研究了气体压力、超声波振幅和撞针行程对喷丸强度的影响规律及影响程度，并对试验结果进行

极差分析，最后对各参数对撞针冲击速度的影响进行了试验验证。

1 超声波喷丸校形原理

与传统的滚压校形技术相比，超声波喷丸校形是一种高效的校形技术。基于基尔霍夫假设^[15]，建立平面内板件弯曲的力学分析模型，如图 2 所示，其中， xoy 为建立的平面直角坐标系， o 为板件中性面的中心点， x 轴为与板件长度相切的方向， y 轴为板件的厚度方向， L 为板件变形后的弧长， R 为板件变形后的曲率半径， M 为残余应力产生的宏观弯曲力矩， t 为板件厚度， δ 为超声波喷丸处理后中性面的偏移量， σ_x 为残余应力沿 x 轴的分量。

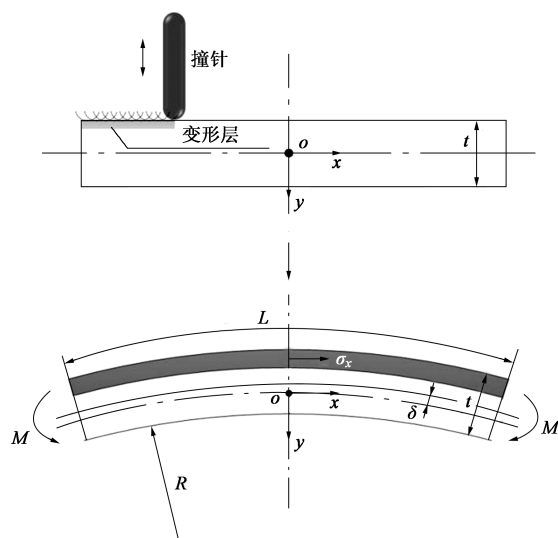


图 2 板件弯曲力学分析模型

Fig. 2 Mechanical analysis model of plate bending

假设板件只发生平面形变，超声波驱动撞针在板件表面制造塑性变形，进而引起板件内部残余应力的重新分布，诱发产生的宏观弯曲力矩 M 可按式 (1) 计算：

$$M = \int_{-\left(\frac{t}{2}+\delta\right)}^{\frac{t}{2}-\delta} \sigma_x y dy \quad (1)$$

在宏观弯曲力矩下，平板产生的弯曲变形可按式 (2) 与式 (3) 计算：

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{W_0} \quad (2)$$

$$W_0 = E \frac{t^3}{12} \quad (3)$$

式中： W_0 为板件的抗弯截面系数； E 为材料的弹性模量。

因此，板件弯曲的曲率大小与板件厚度 t 、超声波植入残余压应力层的厚度等相关。

2 多撞针超声波喷丸设备及试验方法

图 3 为超声波喷丸校形平台及撞针驱动方式，试验平台包括三坐标移动平台、65 针超声波喷丸设备及 Almen 试片夹具。将超声波喷丸设备固定在三坐标移动平台的主轴上，以便精确控制撞针喷丸区域、进给速度等，提高 Almen 试片喷丸校形试验的可

控性。三坐标移动平台在 X 、 Y 、 Z 轴的定位精度可达到 0.001 mm ，移动速度范围为 $1\sim300\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。超声波喷丸校形处理时，撞针首先在气流的作用下贴合至振动体表面，再由声波辐射面驱动，使撞针经过一定的行程后高速冲击金属表面，造成表面塑性变形后被反弹，反弹撞针与变幅杆接触并被再次激励，重复上一个过程。可以看出，在超声波喷丸校形过程中，影响撞针冲击运动的主要工艺参数包括：超声波振幅、气体压力以及撞针行程。

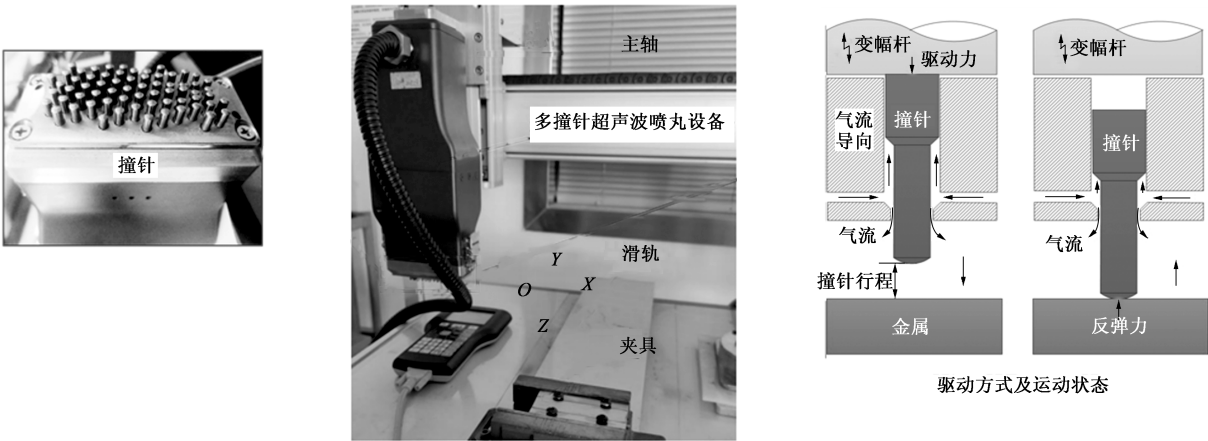


图 3 超声波喷丸校形平台及撞针驱动方式
Fig. 3 Ultrasonic shot peening sizing platform and driving mode of firing pin

因此，本文选取气体压力、超声波振幅、撞针行程作为主要影响因素，并且每个因素均选取 3 种变化即 3 个水平设计正交试验表。表 1 为在 3 种因素不同水平下根据正交原理创建的 $L_9(3^3)$ 正交试验表。

表 1 正交试验因素及水平表
Table 1 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素		
	气体压力 A/MPa	超声波振幅 $B/\mu\text{m}$	撞针行程 C/mm
1	0.50	10.5	1
2	0.60	15.6	2
3	0.65	25.6	3

正交试验采用的薄壁件为 Almen-A 型试片，它是国际上用来表征喷丸效果的标准样块，在确定 3 个工艺参数对薄壁件变形影响权重的同时，还可以得到不同工艺参数组合下喷丸强度的大小，起到标定设备的作用。固定 Almen 试片采用的工装是设备自带的标准块，通过 4 颗螺丝将 Almen 试片固定在夹具上，试片的长度为 76.098 mm 、宽度为 18.987 mm 、厚度为 1.295 mm ，材质是 SAE1070 弹

簧钢，试片每一面的平整度均达到 $\pm 0.013\text{ mm}$ ，适用于航空行业及高要求的汽车行业。

为验证正交试验的结果，搭建了冲击响应信号检测系统，如图 4 所示。该检测系统主要包括移动平台、超声波喷丸装置、压电式载荷传感器、电荷放大器及 Textronix MSO 示波器（记录及采集终端）。通过该检测系统，可以测出不同工艺参数对撞针冲击速度的影响，进而确定参数对薄壁件变形的影响程度。

3 Almen 试片超声波喷丸校形试验结果

3.1 正交试验结果

图 5、图 6 为经过超声波喷丸后的 Almen 试片照片，以及使用 Almen 测量仪进行的 Almen 试片弧高值的测量示意图。

完成试验并收集数据后，对所得数据进行极差分析，正交试验结果如表 2 所示。极差分析在考虑某一因素时，认为其他因素对于 Almen 试片变形量的影响是均衡的，因此，认为该单因素各水平的差

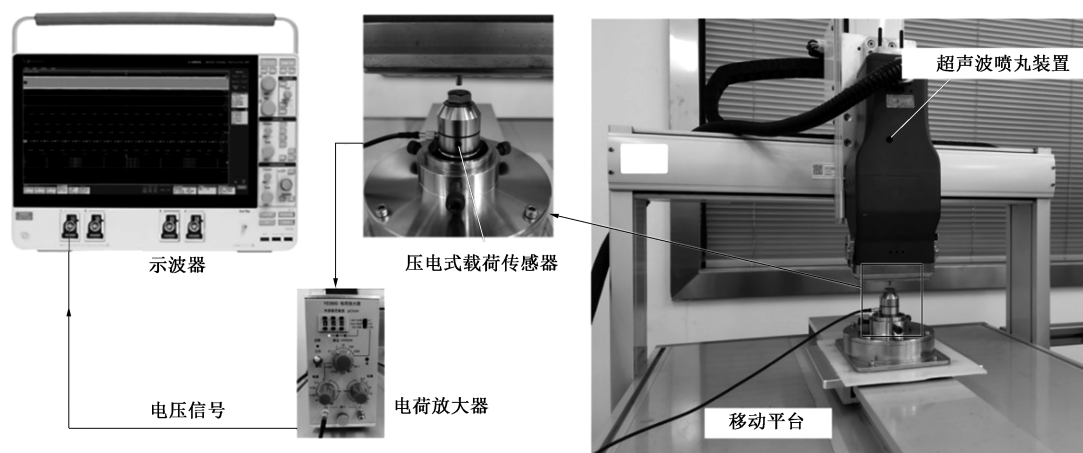


图 4 冲击响应信号检测系统平台

Fig. 4 Platform of impact response signal detection system

图 5 超声波喷丸后的 Almen 试片
(a) 形貌对比 (b) 弧高对比

Fig. 5 Almen test pieces after ultrasonic shot peening

(a) Comparison of morphology (b) Comparison of arc height values

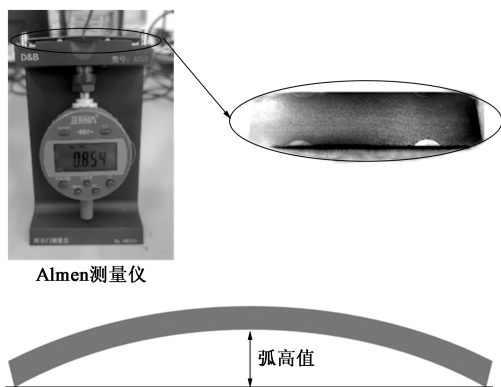


图 6 弧高值测量示意图

Fig. 6 Measurement schematic diagram of arc height values

异是由该因素自身导致的。通过极差分析,可以得到气体压力、超声波振幅、撞针行程这 3 个工艺参数对 Almen 试片弧高值的影响程度,即得到对喷丸强度的影响权重,并且可以确定 3 个工艺参数各自在校形能力上的最优水平,为超声波喷丸校形试验工艺参数的选择提供指导。

在极差分析法中, K_{jm} 代表的是第 j 列因素的第 m 个水平对应的 Almen 试片超声波喷丸校形试验中弧

表 2 正交试验方案及结果

Table 2 Schemes and results of orthogonal test

序号	组合方式	气体压力 A/MPa	超声波振幅 $B/\mu\text{m}$	撞针行程 C/mm	弧高值/ mm
1	$A_1B_1C_1$	0.50	10.5	1	0.322
2	$A_1B_2C_3$	0.50	15.6	3	0.578
3	$A_1B_3C_2$	0.50	25.6	2	0.896
4	$A_2B_1C_3$	0.60	10.5	3	0.154
5	$A_2B_2C_2$	0.60	15.6	2	0.718
6	$A_2B_3C_1$	0.60	25.6	1	1.032
7	$A_3B_1C_2$	0.65	10.5	2	0.276
8	$A_3B_2C_1$	0.65	15.6	1	0.854
9	$A_3B_3C_3$	0.65	25.6	3	0.883

高值的总和, \bar{K}_{jm} 为 K_{jm} 的平均值, 如式 (4) 所示:

$$\bar{K}_{jm} = \frac{K_{jm}}{j \text{ 列因素的 } m \text{ 水平的重复次数}} \quad (4)$$

式中: j 为正交试验中影响因素的个数, $j=1, 2, 3$, 分别表示气体压力、超声波振幅和撞针行程; m 为正交试验中 3 个影响因素的水平数, $m=1, 2, 3$ 。

通过 \bar{K}_{jm} 可以得到 3 个工艺参数在超声波喷丸校形试验中以校形能力为目标的最优水平, 并且得到最优校形能力的工艺参数组合。

R_j 为正交试验的极差, 其含义为第 j 列因素所对应的各水平下试验结果的变动幅度, 如果变动幅度越大, 即 R_j 数值越大, 则说明该工艺参数对 Almen 试片超声波喷丸校形弧高值即喷丸强度的影响越大, 反之则影响越小, 表达式如式 (5) 所示:

$$R_j = \max(\bar{K}_{j1}, \bar{K}_{j2}, \dots, \bar{K}_{jm}) - \min(\bar{K}_{j1}, \bar{K}_{j2}, \dots, \bar{K}_{jm}) \quad (5)$$

Almen 试片超声波喷丸校形的正交试验计算分析结果如表 3 所示。

表 3 正交试验计算分析结果

Table 3 Calculation and analysis results of orthogonal test

参数	气体压力 A/MPa	超声波振幅 B/ μm	撞针行程 C/mm
K_{j1}	1.796	0.752	2.208
K_{j2}	1.904	2.15	1.890
K_{j3}	2.013	2.811	1.615
\bar{K}_{j1}	0.599	0.251	0.736
\bar{K}_{j2}	0.635	0.717	0.630
\bar{K}_{j3}	0.671	0.937	0.538
极差 R	0.072	0.686	0.198
因素主次	$B>C>A$		
优水平	A_3	B_3	C_1
优组合	$A_3B_3C_1$		

根据气体压力、超声波振幅、撞针行程各个水平所对应的 Almen 试片的弧高值大小，可以得到 3 个工艺参数的最优水平，并且可以根据校形要求指导超声波喷丸设备工艺参数的选择。对表 3 分析如下。

(1) 对 Almen 试片弧高值，即喷丸强度，影响最大的因素是超声波振幅，其次是撞针行程，气体压力对喷丸强度的影响最小。通过试验验证得到，采用 $A_3B_3C_1$ 组合进行超声波喷丸校形得到的校形弧高值最大为 1.073 mm，即获得的喷丸强度最大。

(2) 超声波振幅的极差较大，说明超声波振幅是影响 Almen 试片弯曲变形的重要因素，通过控制超声波振幅能有效地控制 Almen 试片变形的曲率半径。

(3) 在进行超声波喷丸校形时，可根据薄壁件要求的校形量进行参数选择，若薄壁件弧高值的要求量很小，可选择工艺参数所对应的水平平均值较小时的数值，此时超声波喷丸设备对应的喷丸强度较小；若薄壁件所要求的校形量大，则选择工艺参数对应的水平平均值较大时的数值，此时的喷丸强度较大。在经过超声波喷丸加工处理后，若弧高值未达到要求，可调整所选择的工艺参数：当变形量偏小时，选用更大的水平平均值对应的参数；当变形量偏大时，则选择更小的水平平均值对应的参数。

3.2 撞针冲击速度测试结果

采用示波器收集了不同参数条件下的电压信号并进行了处理，得到了不同参数条件下的撞针冲击速度。图 7 为不同振幅条件下撞针的冲击速度。

从图 7 可以看出，在气体压力为 0.65 MPa、撞针行程为 2 mm 的条件下，随着振幅的增大，撞针的冲击速度也随之增大，并且振幅的变化对撞针冲

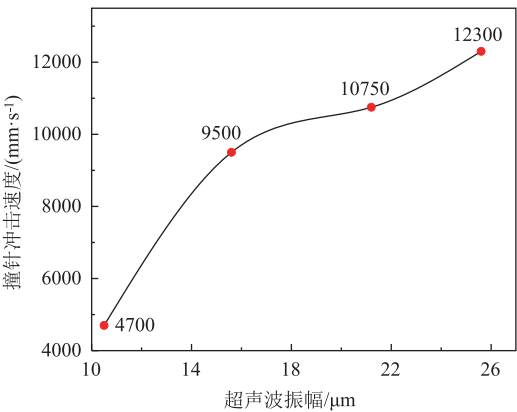


图 7 不同振幅条件下的撞针冲击速度

Fig. 7 Impact velocities of firing pin under different amplitude conditions

击速度的影响很大，振幅从 10.5 μm 增加至 21.2 μm 时，撞针冲击速度从 4700 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大至 10750 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，增大了约 1.29 倍。

图 8 为不同撞针行程条件下撞针的冲击速度，当气体压力为 0.65 MPa、超声波振幅为 15.6 μm 时，撞针的冲击速度随着撞针行程的增大而减小。由图 8 可知，在撞针行程由 1 mm 转变为 2 mm 时，撞针冲击速度下降的幅度最大，下降了约 11.7%，并且随着撞针行程的不断增大，撞针冲击速度的下降幅度逐渐减小，撞针行程从 3 mm 增大至 5 mm，撞针的冲击速度下降了约 6.26%，撞针行程对撞针冲击速度的影响逐渐减弱。

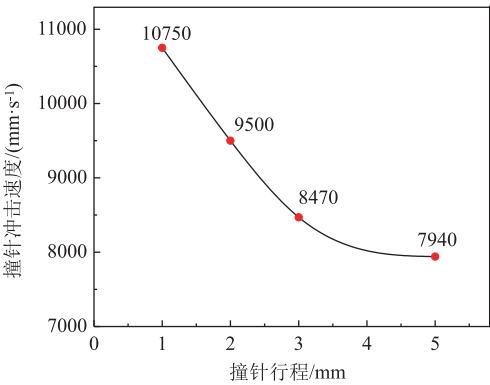


图 8 不同撞针行程条件下的撞针冲击速度

Fig. 8 Impact velocities of firing pin under different firing pin stroke conditions

图 9 为不同气体压力条件下撞针冲击速度的变化情况，当超声波振幅为 15.6 μm 、撞针行程为 2 mm 时，随着气体压力的增大，撞针的冲击速度也随之增大，呈正相关趋势，但撞针增速较小。气体压力从 0.45 MPa 增加至 0.65 MPa 后，撞针冲击速度仅增加了 6.1%。需要指出的是，气体压力在

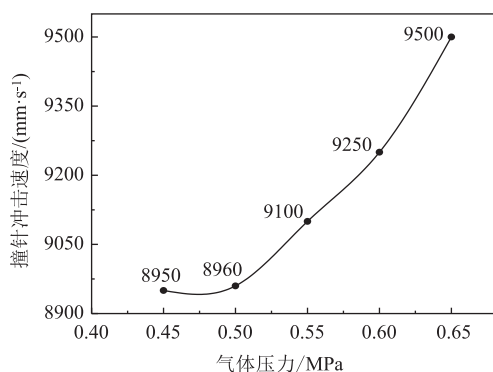


图 9 不同气体压力条件下的撞针冲击速度

Fig. 9 Impact velocities of firing pin under different air pressure conditions

撞针向下冲击及向上反弹时分别起到阻碍和驱动作用, 气体压力越大时, 相应的阻碍和驱动作用同时增大, 因此, 气体压力对撞针冲击速度的影响较小。

由上述试验结果可知, 对撞针冲击速度影响最大的因素是超声波振幅, 其次是撞针行程, 气体压力对撞针冲击速度的影响最小, 该试验结果与正交试验结果吻合。

4 结论

(1) 通过正交试验得知, 薄壁件 Almen 试片在气体压力为 0.65 MPa、超声波振幅为 25.6 μm 、撞针行程为 1 mm 的条件下, 得到的校形弧高值为 1.073 mm, 即采用 $A_3B_3C_1$ 组合获得的喷丸强度最大; 喷丸强度与超声波振幅及气体压力呈正相关、与撞针行程呈负相关; 其中, 对薄壁件弯曲变形影响最大的工艺参数是超声波振幅, 其次是撞针行程, 气体压力的影响最小。

(2) 通过检测系统检测得知, 撞针冲击速度与超声波振幅及气体压力呈正相关、与撞针行程呈负相关; 对撞针冲击速度影响最大的工艺参数是超声波振幅, 其次是撞针行程, 气体压力的影响最小。

(3) 喷丸工艺参数对撞针冲击速度及喷丸强度的影响效果一致。

参考文献:

- [1] 郭超亚. 数控超声波喷丸校形工艺研究与预测模型建立 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
Guo C Y. Research on Numerical Control Ultrasonic Shot Peening Straightening Process and Prediction Model [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [2] Xue Y, McDowell D L, Horsten eyer M F, et al. Micro structure-based multistage modelin of aluminum alloy 7075-T651 [J]. Engineering Fracture mechanics, 2007, 74: 2810-2823.
- [3] 门向南, 董锦亮, 黄振彪, 等. 超声波喷丸技术在大型零件变形校正中的应用 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (7): 156-160.

- Men X N, Dong J L, Huang Z B, et al. Application of ultrasonic shot peening technology in correction of large-scale parts deformation [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (7): 156-160.
- [4] 杨辉, 徐刚, 张炜, 等. 超声波喷丸技术在大型零件变形校正中的应用研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2020, 56 (9): 54-56.
Yang H, Xu G, Zhang W, et al. Application of ultrasonic shot peening technology in deformation correction of large parts [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2020, 56 (9): 54-56.
- [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, Liu C X, et al. Research progress of high energy ultrasonic peening forming and sizing technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, (11): 45-47.
- [6] 刘峰, 鲁世红, 张炜. 超声波喷丸技术的研究进展 [J]. 航空制造技术, 2016, (14): 24-28.
Liu F, Lu S H, Zhang W, Research progress of ultrasonic shot peening technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, (14): 24-28.
- [7] Friese A. One of the worlds largest shot peening machines installed at Airbus, 2004.
- [8] 闫琳琳. 超声喷丸技术及应用 [J]. 制造技术与机床, 2010, (6): 29-31.
Yan L L. The technology and application of ultrasonic shot peening [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2010, (6): 29-31.
- [9] Ines Fernandez Pariente, Mario Guagliano. About the role of residual stresses and surface work hardening on fatigue ΔK_{th} of a nitride and shot penned low-alloy steel [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202 (13): 3072-3080.
- [10] 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): 109-113.
- [11] 陈星. 超声波喷丸校形的应用研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
Chen X. Research of Ultrasonic Shot Peening Technology in Straighening [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [12] 高琳. 高能超声波喷丸板料成形技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
Gao L. Research of High-energy Ultrasonic Shot Peening Technology in Sheet Metal Forming [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [13] 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.
- [14] 王学深. 正交试验设计法 [J]. 山西化工, 1989, (3): 53-58.
Wang X S. Orthogonal experimental design method [J]. Shanxi Chemical Industry, 1989, (3): 53-58.
- [15] Vijayakumar K. New look at kirchhoff's theory of plates [J]. AIAA Journal, 2009, 47 (4): 1045-1046.