

## 典型框类零件的喷丸强化工艺优化

李胜男<sup>1</sup>, 杜建宁<sup>1</sup>, 崔 丽<sup>1</sup>, 王金权<sup>2</sup>, 石全强<sup>2</sup>

(1. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110034; 2. 中国科学院金属研究所 师昌旭先进材料创新中心, 辽宁 沈阳 110016)

**摘要:** 为解决长期以来框类零件喷丸强化要求高、加工方法困难的问题, 针对典型框类零件制定了新的喷丸强化加工方法。通过分析零件数模, 将零件数模各部分外表面按类型进行编号并量化, 不同类型的表面按照不同的角度、喷打次数进行喷丸; 之后设计喷嘴进给路径, 并结合局部表面保护, 对设备、夹具和辅助工具和工艺辅料进行选择, 结合加工程序, 设计零件保护方案。通过工艺优化, 零件全部表面均能满足在适合的角度下进行喷丸, 表面覆盖率 100% 满足图纸要求, 同时大幅度提高生产效率, 为后续该类零件甚至类似零件的生产加工提供了可行且有效的参照。

**关键词:** 框类零件; 喷丸强化; 喷丸路径; 喷丸强度; 表面质量

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.022

**中图分类号:** TG394

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 03-0159-05

## Optimization on shot peening strengthening process for typical frame part

Li Shengnan<sup>1</sup>, Du Jianning<sup>1</sup>, Cui Li<sup>1</sup>, Wang Jinquan<sup>2</sup>, Shi Quanqiang<sup>2</sup>

(1. Shenyang Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Shenyang 110034, China;

2. Shi Changxu Advanced Material Innovation Center, Institute of Metal Research of the Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** To solve the long-standing problems of high requirements of shot peening and difficulty in processing methods for frame parts, a new shot peening processing method was formulated for the typical frame parts. By analyzing the digital model of part, the outer surface of each part in the digital model of part was numbered and quantified according to the type, and the surface of different types was shot peened according to different angles and shot peening times. Afterwards, the feeding path of nozzle was designed, and combined with local surface protection, the equipment, fixtures, auxiliary tools and process auxiliary materials were selected. Furthermore, combined with processing procedures, the part protection plan was designed. Through the optimization of process, the entire surface of part could be shot peened at a suitable angle, the surface coverage rate is 100% which meet the requirements of the drawing, and the production efficiency is greatly improved at the same time, which provide a feasible and effective reference for subsequent production and processing of such parts and even similar parts.

**Key words:** frame part; shot peening strengthening; shot peening path; shot peening intensity; surface quality

喷丸强化技术是用来提高零件疲劳寿命的方法之一<sup>[1-3]</sup>, 其原理是将高速弹丸流喷射到材料表面, 使材料表层发生塑性变形, 进而形成一定厚度的强化层, 强化层内产生较高的残余应力, 通过引入表面压应力从而起到提高疲劳抗力的作用<sup>[4-5]</sup>。喷丸强化技术被广泛应用于航空及汽车领域<sup>[6-8]</sup>, 经喷丸强化后的零件的疲劳寿命可提高数倍, 喷丸强化在提高金属零件产品的质量和可靠性上发挥了至关重要的作用<sup>[9-12]</sup>。

### 1 喷丸强化工艺分析

影响喷丸强化表面质量的因素有很多, 而一旦工艺参数确定后, 局部覆盖率对表面质量的影响起主要作用: (1) 局部覆盖率过低, 甚至达不到基本的 100% 覆盖率要求, 此时零件需要进行补喷或二次喷丸, 既对已经达到覆盖率要求的零件的表面质量造成了不好的影响, 又增加了工作量, 降低了工作效率; (2) 局部覆盖率过高, 可能会造成局部表面发生翘曲、卷边、凸起、变形量超差, 导致无法进行后续加工等后果, 甚至会影响零件的疲劳寿命。局部覆盖率与喷射角度、进给方式、进给次数等参

收稿日期: 2022-05-15; 修订日期: 2022-08-26

作者简介: 李胜男 (1988-), 女, 硕士, 工程师

E-mail: 774123800@qq.com

数有关。所以,如何在喷丸强度、机床加工能力、加工方法之间寻找一种合适的协调关系,是提高零件喷丸质量的关键所在。

### 1.1 喷丸强化加工方法的制定

框类零件多数存在形状结构复杂、客户要求高等特点,这些增加了喷丸加工方法制定的难度。以某机型框类零件为例,尺寸轮廓为 1049 mm×635 mm×110 mm,材料为 7040-T745 铝合金,图纸中喷丸强度要求为 0.152~0.254 mmA。该零件尺寸较大,形状结构复杂,喷丸强度范围较小,加工难度大且周期长。

要求零件的喷丸速度选用饱和点速度与零件达到 100%覆盖率速度这两者之间较慢的速度。一般

喷丸加工方法为机床中 4 个喷嘴分别以 4 个方向沿“弓”字形轨迹移动喷打零件 4 遍,以此做到全覆盖,如图 1 所示。该方法有以下几种弊端:

(1) 加工方式不够灵活,造成零件局部表面如腹板面平面、内侧立筋、外侧缘条局部表面等部分的喷打次数不小于 4 遍,覆盖率不均匀且部分表面覆盖率过高,零件极易产生翻转、凸起、卷边、变形量超差等质量问题;

(2) 零件结构较为复杂,局部零件表面实现 45°~90°喷丸,可能导致实际喷丸后产生的残余应力层深度未能达到预期值;

(3) 零件尺寸较大,单件零件的加工时间过长,生产效率低。

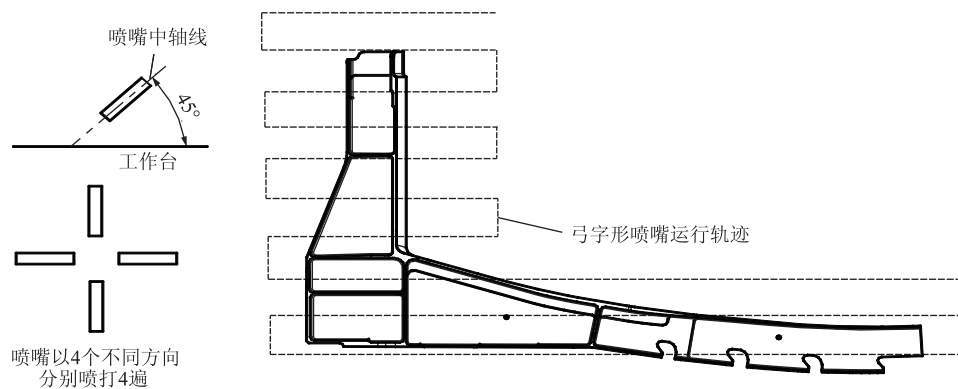


图 1 某机型框类零件的传统喷丸加工方法

Fig. 1 Traditional shot peening processing method of a certain type for frame parts

所以,需要制定新的喷丸加工方法以满足该零件加工的各项要求。一般来说,零件的喷丸工艺规程制定通常包括以下几个方面:

(1) 根据各类文件并结合本单位生产实际,包括设备加工能力、产能、技术条件、人员限制等编制典型操作规程;

(2) 结合零件数模对零件进行具体分析、结合图纸喷丸要求及相关要求确定喷丸技术条件,包括喷丸强度、喷丸区域等,选择弹丸类型及弹丸尺寸,确认零件上所有孔的喷丸状态;

(3) 根据技术条件选择设备,制定加工方法(喷丸角度、喷嘴个数、喷嘴尺寸、喷射距离、工装夹具、验证工具、试片个数),通过工艺试验确定喷丸气压、弹丸流量、进给速度。依据零件特性编制零件喷丸加工程序。

传统的喷丸加工方法不能满足该类零件加工要求的原因在于未将零件各部分区分开来,未沿零件形状轮廓准确进行喷丸。造成了局部喷打时间参差不齐,易产生质量问题,大面积的喷嘴行进轨迹也

降低了加工效率。所以,本文主要针对零件本身,制定专用于该零件的喷丸加工方法流程,以做到改善产品质量、提高生产效率。首先,将零件各部分外表面按照类型划分开来,这样有利于后续对于零件不同类型表面喷丸进行分类分析,缘条、立筋的上表面及部分腹板面由于暴露在喷嘴 4 个方向的喷丸区域下,覆盖率要大于其他表面,所以要通过设计喷嘴进给路径并结合局部表面保护,以尽可能少的次数来喷打这些表面,并在加工过程中辅助使用保护胶带,保护零件局部表面以避免过度喷打。

### 1.2 工艺设置的选择

自动化喷丸设备包括五轴联动数控平台、弹丸筛选循环系统、空气循环系统、气压流量监测装置等组成部分,通过特定的数控程序,按照试验确定的喷丸参数对零件进行加工,具有生产效率高、工艺稳定性好等优点,适用于梁类、框类等大中型结构件的喷丸强化。典型自动化设备喷丸室设置如图 2 所示。4 个喷嘴朝向相同,这样更便于设计出可以避免局部表面覆盖率过高的喷丸路径。

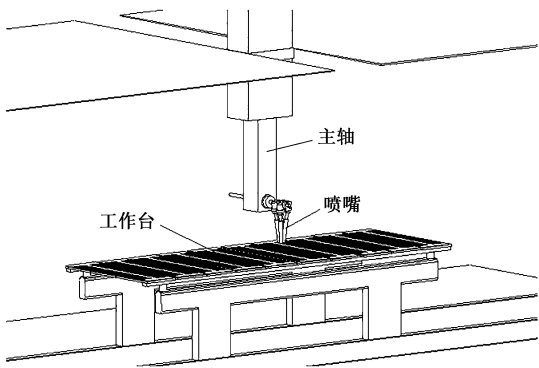


图 2 自动化喷丸的机喷丸室设置

Fig. 2 Setting of shot peening chamber for automatic shot peening machine

1.3 喷丸强化工艺试验及工艺参数的制定

保持其他工艺参数不变，采用增加喷丸时间的方法，绘制出试片弧高值与喷丸时间（或速率倒数）的关系曲线，曲线由原点和至少 4 点来定义。当喷丸时间增加为两倍的时间后，以喷丸时间关系曲线上的弧高值增加不大于10%的第1点为饱和点，

该点的弧高值即为该曲线的饱和喷丸强度，得出的各点的喷丸强度必须在图纸要求的强度范围之内，这样制定出的工艺参数是符合要求的。

一般要制定出一组符合要求的工艺参数需要在前期进行大量的工艺试验。针对要求的强度范围(0.152~0.254 mmA)，选取 3 个零件加工过程中产生的典型喷丸角度分别为 90°、水平 45°、竖直 45°。为了缩短进给路径、提高工作效率，同时还要避免不同试片在喷丸时产生的不必要的干涉，试片在试片夹具上的位置以及夹具在机床中的固定位置需遵循一定的规律。根据以往的工作经验，选取的基本机床参数见表 1，工艺试验数据见表 2，确定工艺参数后绘制的弧高值饱和曲线见图 3。

表 1 工艺试验基本参数

Table 1 Basic parameters of process test

| 参数 | 喷丸距离/<br>mm | 喷嘴数<br>量/个 | 喷丸角<br>度/(°) | 弹丸<br>种类 | 试片类型         | 试片数<br>量/个 |
|----|-------------|------------|--------------|----------|--------------|------------|
| 数值 | 200±10%     | 4          | 45~90        | ASH280   | 阿尔门 A<br>型试片 | 3          |

表 2 工艺试验数据

Table 2 Process test data

| 参数 | 喷丸气压/<br>MPa | 弹丸流量/<br>(kg·min <sup>-1</sup> ) | 试片进给速度/<br>(mm·min <sup>-1</sup> ) | 试片编号       | 弧高值/mmA |       |       |       | 饱和点进给速度/<br>(mm·min <sup>-1</sup> ) | 饱和点弧<br>高值/mmA |
|----|--------------|----------------------------------|------------------------------------|------------|---------|-------|-------|-------|-------------------------------------|----------------|
| 数值 | 0.16         | 8                                | 2000, 1000,<br>500, 250            | 1#(水平 45°) | 0.140   | 0.162 | 0.186 | 0.203 | 649                                 | 0.178          |
|    |              |                                  |                                    | 2#(90°)    | 0.182   | 0.216 | 0.256 | 0.264 | 763                                 | 0.240          |
|    |              |                                  |                                    | 3#(竖直 45°) | 0.140   | 0.164 | 0.180 | 0.192 | 823                                 | 0.169          |

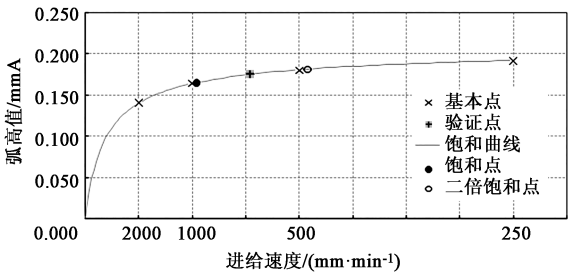


图 3 弧高值饱和曲线

Fig. 3 Arc high saturation curve

1.4 数控加工程序的编制

考虑到机床极限坐标及有效加工区域的限制、结合喷丸路径及机床工作台是否产生干涉、零件本身的尺寸限制及工人固定零件的操作便利程度，应尽量将零件放置在工作台两个垂直边附近，并根据极限坐标预留出一定距离。经过反复试验最终确认的喷丸加工方案如下：外缘条的外表面以与弹丸流

呈 90°喷打 1 次；外缘条内表面、内侧立筋两侧面以 45°喷打 1 次；腹板面与外缘条、立筋的上表面均以 45°喷打 1~3 次。共有 5 个数控程序用以加工零件不同部分的外表面，设计新的喷嘴（或零件）进给路线，沿着零件形状轮廓对零件进行精确加工。喷丸进给路线如图 4 所示，其中箭头方向代表喷嘴与零件的相对运动方向，角度代表喷嘴几何轴线与竖直面夹角。对个别腹板面、立筋及缘条上表面进行保护，操作者只需在运行两个加工程序之间对零件少部分表面采用专用保护胶带进行保护即可。

程序编制完成后，加工零件，若发生局部覆盖率不够、未喷到的情况，应当再对零件进行二次喷丸，以保证零件的全覆盖。

2 结论

(1) 分析零件数模，将零件数模各部分外表面

特种成形栏目由北京机电研究所有限公司 赞助刊出

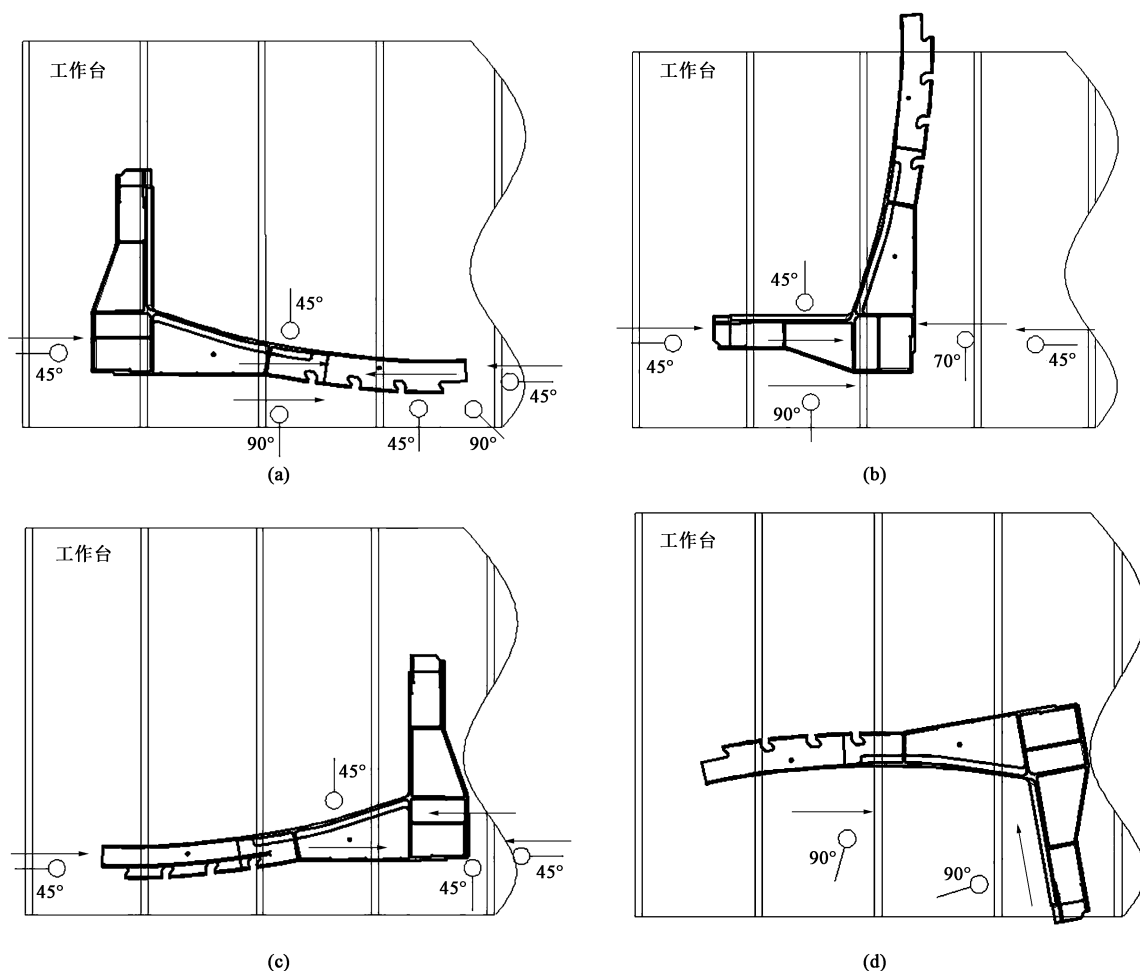


图 4 喷丸进给路径

(a) 第 1 次摆放喷丸 (b) 第 2 次摆放喷丸 (c) 第 3 次摆放喷丸 (d) 第 4 次摆放喷丸

Fig. 4 Shot peening feeding paths

(a) Shot peening of the first placement (b) Shot peening of the second placement (c) Shot peening of the third placement (d) Shot peening of the fourth placement

按类型进行编号并量化,不同类型的表面按照不同的角度、喷打次数进行喷丸。

(2) 优化加工程序,摒弃以往的机床进给与喷嘴移动方式,结合设备实际情况,设计新的喷嘴(或零件)进给路线。

(3) 结合加工程序,设计零件保护方案,避免了对零件表面大范围、大面积、重复性的保护。

(4) 通过工艺方法的优化,零件全部表面均能满足在适合的角度下进行喷丸,表面覆盖率 100% 满足图纸要求,彻底解决了局部覆盖率高及不规则表面受喷不均匀的问题;零件表面质量良好,零件边缘无卷边、涂起,腹板面变形量均在要求范围内。同时,大幅度压缩了单件零件加工时间,提高生产效率 50% 以上,大大节约了生产成本。

(5) 不仅解决了长时间以来框类零件喷丸要求高、加工方法困难的问题,而且对于之后该类零件甚至类似零件的生产加工均提供了可行且有效的加工方案参考,有效预防了质量隐患。

#### 参考文献:

- [1] 洪兴宝. 喷丸强化技术机理及其作用 [J]. 机械, 1983, (10): 6-12.  
Hong X B. Mechanism and function of shot peening technology [J]. Machinery, 1983, (10): 6-12.
- [2] 徐昇厚. 国外喷丸强化工艺技术应用概况 [J]. 材料开发与应用, 1988, (3): 21-25.  
Xu S H. Application of shot peening technology abroad [J]. Development and Application of Materials, 1988, (3): 21-25.
- [3] 刘先英, 赵聪, 芦小龙, 等. 超声喷丸换能器振动特性仿真分析 [J]. 机械制造, 2022, 60 (5): 48-51.

(下转第 179 页)