

# 喷丸強化技術

(文集)

国防工業出版社

统一书号

N 15034·1299

定价0.60元

# 噴丸強化技術

(文 集)

國防工業出版社

1973

**喷丸强化技术**

(文 集)

\*

**国防工业出版社 出版**

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

**国防工业出版社印刷厂印装 内部发行**

\*

787 × 1092 1/32 印张 67/8 146 千字

1973年3月第一版 1973年3月第一次印刷 印数：0,001—5,000册

统一书号：N15034·1299 定价：0.60元

## 出版说明

喷丸加工是提高零件疲劳强度的一个重要方法。这种方法近几年来在航空、造船、常规兵器等部门得到了迅速的推广和使用。

在国外，这种工艺方法很早就在产品上得到了应用，并已标准化。例如美国生产的一些航空喷气发动机中，用喷丸加工的零件多达400余种，包括压气机叶片、涡轮叶片、涡轮轴等重要零件。

喷丸加工不仅能显著提高零件的疲劳强度，而且还能提高零件的耐应力腐蚀能力。例如铝、镁合金零件经喷丸强化后，其耐海水的应力腐蚀能力比不喷丸强化提高几百甚至上千倍。

喷丸加工工艺还有其成本低、生产率高等优点。这也是获得广泛应用的主要原因之一。

为了推广喷丸加工工艺，有关领导部门于一九七二年八月召开了经验交流会，本书就是在这次会议上收集整理的。共收集国内外资料13篇，其中国内12篇，包括喷丸强化在飞机、船舶、兵器零件上应用情况；国外1篇，包括喷丸强化、成形等在各方面的应用情况。

本书可供从事喷丸强化、成形工艺方面的工人、技术人员参考，也可供有关院校师生参考。

## 目 录

喷丸强化工艺	5
金属材料喷丸强化及疲劳强度	27
喷丸强化对铁基热强合金 808 (GH-135) 高温 疲劳强度的影响	62
808 (GH-135) 铁基热强合金的喷丸强化	73
高强度钢的喷丸强化	91
球形冷气瓶的表面喷丸强化	106
发动机连杆的喷丸强化	114
涡轮叶片喷丸强化	130
导气圈的表面喷丸强化	136
软轴的喷丸强化	144
喷丸强化对磁力探伤质量的影响	150
喷丸强化使用的夹具、零件变形及多次冲击检验法	157
国外喷丸工艺概况	166

# 喷丸强化工艺

## 引 言

喷丸强化工艺是提高零件机械疲劳强度的一个重要方法。这种方法在各个工业部门以及航空工业部门中已经获得了迅速的推广使用。

喷丸强化不仅能显著地提高零件的疲劳强度，而且还能提高零件的抗应力腐蚀能力。例如经喷丸强化的铝、镁合金，它们的抗盐水应力腐蚀能力可获得成百倍甚至成千倍的提高。喷丸强化除了显著提高零件的上述性能之外，对其抗张强度 ( $\sigma_b$ )、屈服强度 ( $\sigma_s$ )、冲击强度 ( $a_k$ )、塑性 ( $\delta$ )、高温瞬时强度以及高温持久强度等基本上无明显的影响。此外，喷丸强化工艺还有其成本低廉和生产率高的优点。上述种种均构成它能在越来越多的零件上获得采用的主要原因。

国外生产的一些飞机、发动机中采用喷丸强化工艺的零件品种繁多，其中包括：气门摇臂、活塞、曲轴、齿轮、主副连杆、金属螺旋桨、活塞发动机机匣、主起落架、压气机叶片、涡轮叶片，等等。据报导，1965年美国生产的F-111飞机上已有400余件采用了喷丸强化工艺，而其中有30余件采用了自动程序控制喷丸强化工艺<sup>(1)</sup>。

因此，在更大范围内进一步广泛地采用喷丸强化工艺，对延长产品的使用寿命及提高产品质量具有极为重要的意义。

然而，一个好的喷丸强化工艺的制定应该建立在实验研究和科学分析的基础之上，当然还需要在实践中考验。这里的关键问题在于喷丸强化工艺参数的选择及机械疲劳实验的布置。合理的喷丸工艺参数的确定取决于试样（零件）的疲劳实验结果，而喷丸强化试样（零件）的疲劳强度的提高又决定于预先所选择的喷丸强化工艺诸参数。因此，只有在经过大量实验和生产实践的基础上，才能最后获得一个比较合理的喷丸强化工艺参数。

本文主要介绍喷丸强化工艺参数选择的原则以及喷丸机的设计与制造的一些原则，应用这些原则于具体零件上，才能获得具体的，在生产上切实可行的喷丸强化工艺。

### 一、喷丸强化原理

喷丸过程就是大量弹丸喷射到零件表面上的过程，而弹丸喷射到零件表面上有如无数小锤对表面锤击。由此，金属零件表面产生极为强烈的（相当于最大程度的压力加工所产生的）塑性形变，使零件表面产生一定厚度的冷作硬化层，此层称为表面强化层。此强化层会显著地提高零件在室温和高温工作下的疲劳强度。

零件表面形成的这个强化层之所以会改善其疲劳性能，其原因是在此层内有着完全不同于基体（即零件心部）的应力状态及组织结构。当不考虑零件在使用过程中强化层内各因素的变化变化的情况下，一般地说，零件疲劳强度的提高与表面强化层内以下三个因素有关<sup>(2)</sup>：

#### 1. 表面层的宏观残余应力：

在喷丸过程中，由于表面层金属的强烈变形，致使零件



表面产生很大的残余压应力,而内部则为拉应力(图1中曲线1)。当零件在工作中承受一交变载荷时(图1中曲线2),残余应力与外加交变应力相互作用的结果,使零件实际承受

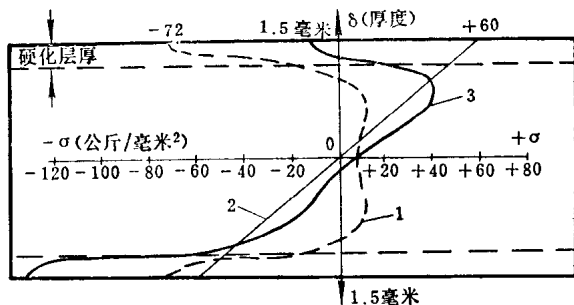


图1 弯曲疲劳情况下喷丸强化试样(零件)  
截面上应力分布示意图

- 1—喷丸强化后形成的残余应力; 2—外加交变应力;  
3—试样(零件)实际承受的应力。

的拉应力有所减弱(图1中曲线3)。疲劳裂纹在表面层的形成及扩展的主要原因是由拉应力而引起的,而表面拉应力的减弱也就意味着零件疲劳强度的提高。

但是这里应该指出,由于喷丸强化所产生的表面残余压应力在零件承受交变载荷的过程中会逐渐地产生弛豫。疲劳实验结果指出,试样承受的交变应力越大,表面残余压应力值下降的越快。当然,表面压应力的减弱会导致试样疲劳断裂寿命的降低。

但是,在一般情况下零件在工作中实际承受的交变载荷很低(远低于其疲劳强度极限),所以不会使喷丸强化所形成的残余压应力产生大幅度的下降。而对于那些在使用中表面残余压应力下降较为显著的零件,在进行翻修时,可以对

零件表面再度采用喷丸强化处理，由此可使零件重新获得更高的疲劳强度。

### 2. 表面层的微观应力：

由于表面层内的金属产生塑性形变的结果，引起晶体晶格 ( $a$ ) 产生最大限度的畸变 ( $\Delta a/a$ )，由此嵌镶块 (或称为亚晶粒) 之间产生了很高的应力，此即为微观应力。微观应力的存在，对零件的疲劳强度也会产生有利的影响。

### 3. 表面层的微细嵌镶组织：

在弹丸的强烈锤击下，表面层的嵌镶块 (亚晶粒) 发生最大限度的碎化。在一般情况下，经过喷丸强化的金属表面层内的嵌镶块尺寸可细化至小于 0.02 微米。大量的实验结果证明<sup>(2,3)</sup>，零件表面嵌镶块越小，其疲劳强度越高；微细的嵌镶组织不仅能够提高零件的室温疲劳强度，而且还能够提高零件的高温疲劳强度。

喷丸强化后在表面层内所引起的上述应力状态及组织结构上的变化，是试样 (或零件) 疲劳强度提高的主要原因。

然而，上述三个强化因素可以同时也可以单独影响于金属材料的疲劳强度。譬如在高温下工作的零件 (例如涡轮叶片)，当工作温度超过该金属材料的恢复与再结晶温度时，虽然表面残余压应力基本上完全消失，但只要表面强化层内的嵌镶块组织基本上还没有长大，那么喷丸强化的效果依然存在，材料的高温疲劳强度仍然能够保持在 (比喷丸强化) 更高的水平上。由此可见，上述强化因素中任何一个因素的单独存在，都能使金属材料的疲劳强度获得提高。

## 二、喷丸介质

喷丸强化用的介质是弹丸。从弹丸的材料上分类，则可分为黑色金属、有色金属及非金属弹丸。喷丸强化用的弹丸首先要求它应具备圆球形状，其次弹丸在具有一定冲击韧性的情况下，其硬度越高越好。

经常使用的弹丸直径一般为  $d = 0.05 \sim 1.5$  毫米。根据不同的需要采用不同材料和不同大小的弹丸。在一般情况下，选择喷丸强化的弹丸应遵守以下规则：

(1) 弹丸直径应小于零件缺口处（例如沟、槽等）的尺寸，以保证缺口的底部及侧面均能获得喷丸强化。

(2) 弹丸飞到零件表面的动量  $mV$  越大（ $m$ ——弹丸质量； $V$ ——弹丸运动速度），表面强化层深度越深。通常是通过改变弹丸的直径或改变弹丸速度的方法来改变弹丸的动量，从而调节表面强化层的深度。

(3) 弹丸越细，获得的零件表面光洁度越高；反之，表面光洁度越粗糙。

(4) 有色金属零件应避免采用铸铁或钢丸进行喷丸强化，因为附着于零件表面的铁粉会导致零件表面的电化学反应。

现将几种常用的弹丸材料及其要求分述如下：

### 1. 铸铁和铸钢弹丸：

一般使用的铸铁丸的含碳量为  $2.75 \sim 3.60\%$ ，其硬度为  $HRC = 58 \sim 65$ 。

由于这种弹丸韧性较差，易于破碎，所以目前使用它来作为喷丸强化介质的已为数不多，一般逐渐用弹簧钢丸代替。

## 2. 钢弹丸:

我国各工厂目前所采用的钢弹丸一般是用弹簧钢丝切割而成, 弹簧钢丝的直径为 0.6~1.2 毫米。用专门的自动切割机将一束钢丝首先切割成与其直径相同的圆柱体, 然后将这些圆柱体在废旧零件上喷射, 或者置入滚筒内滚动, 直至圆柱体尖棱角完全消除为止, 由此获得较为圆滑的钢弹丸。经上述两种方法处理的弹丸, 其硬度均可获得某种程度的提高。

喷丸强化当然是要求弹丸的硬度越高越好, 但硬度越高弹丸越容易破碎, 使用寿命越短。作为喷丸强化用的钢弹丸, 其最适宜的硬度为  $HRC=45\sim50$ 。钢丸的使用寿命取决于其金相显微组织。实践证明, 以热处理成回火马氏体和贝氏体的寿命为最长。另一方面使用寿命还取决于弹丸的直径大小, 直径越小使用寿命相对增高, 例如直径为  $d=1.1$  毫米的使用寿命平均为 840 次 (撞击次数), 而直径为  $d=0.55$  毫米的使用寿命平均为 1390 次。如果热处理不好, 使弹丸的金相显微组织为回火马氏体与残余奥氏体组织, 而晶界上为渗碳体和贝氏体组织, 则其寿命要降低 1~3 倍。

总的说来, 钢丸的使用寿命比铸铁丸的要高 20 倍左右。所以虽然钢丸的材料费用较高, 但是由于使用寿命长, 比铸铁丸费用还是可节约十几倍。

## 3. 玻璃弹丸:

利用玻璃作为喷丸强化介质还是近十几年来才发展起来的, 主要是在航空工业部门中获得了较为广泛的应用。

我国和外国使用玻璃弹丸的化学成分及机械性能分别列于表 1 和表 2。

表1 玻璃弹丸的化学成分

弹丸种类	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	PbO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
美国	72	1	9	3	15	—	—
英国	62	0.3	15	1	8	21	—
沈阳-5	65	13	—	4.2	5	—	5
沈阳-7	78.5	1	—	—	6.2	—	14.3

表2 玻璃弹丸的机械性能

弹丸种类	弹性模量	抗压强度	抗拉强度
	(公斤/毫米 <sup>2</sup> )	(公斤/毫米 <sup>2</sup> )	(公斤/毫米 <sup>2</sup> )
美国	710.14	103.66	8.66
英国	643.57	93.06	6.36
沈阳-5	791.92	106.0	8.52
沈阳-7	789.13	114.13	8.17

玻璃弹丸的硬度约为  $HRC=46\sim 50$ ，比重约为 2.4。根据不同的用途选用不同直径的玻璃丸。经常使用的玻璃丸直径为  $d=0.05\sim 0.5$  毫米，这样规格的弹丸均可购买到。

当零件的硬度超过玻璃丸的硬度时，弹丸会产生大量的破碎；如果零件的硬度低于弹丸，则玻璃丸很少破碎。实验指出，玻璃丸能够吸收  $1.25\times 10^{-2}$  米-公斤的能量而不致破碎。在一般的使用过程中，玻璃丸都是破碎而不是磨损。

由于玻璃丸的比重较小，它对金属材料基本上没有切削作用。采用玻璃丸喷丸时，会使零件获得较高的表面光洁度。经过玻璃丸喷丸强化后，通常可使零件获得  $\nabla 8$  以上的表面光洁度。

在喷丸强化过程中，由于弹丸的破碎或磨损，往往需要更换或补充新的弹丸，这就出现了新旧弹丸搭配使用的比例

问题。如果使用的为玻璃弹丸，则当然是新弹丸为最好，因为新弹丸破碎率最小；如使用钢弹丸时，则新弹丸不如旧的几何形状圆。在喷丸强化的正常生产过程中，应该严格地控制新旧弹丸的比例，以保证弹丸在直径和几何形状上达到合乎要求的数量在80%以上，这是保证喷丸强化质量的重要环节之一。

根据不同材料和不同零件选择不同的喷丸介质。例如对于钢零件，一般采用铸铁、铸钢或钢弹丸；对于铝、镁合金以及铁、镍基热强合金，一般采用玻璃丸。表3中列出了几种金属材料所采用的喷丸介质以及其他一些数据，作为选择喷丸介质时的参考。

表3 各种金属材料所采用的喷丸介质

零件名称	零件材料	零件表面硬度	弹丸			零件表面硬化层深度 (毫米)
			材料	硬度 (HRC)	直径 (毫米)	
涡轮叶片	GH-33	HRC=28	玻璃	>48	0.05~0.15	0.06~0.08
涡轮叶片	GH-135 (808)	—	玻璃	>48	0.05~0.15	0.06~0.08
直升机旋翼大梁	LB-2CZ	HB=65	玻璃	>48	0.05~0.15 与 0.15~0.30	~0.50
螺旋桨叶	LY-11	HB=95	玻璃	>48	0.05~0.15	~0.30
主连杆, 副连杆	40CrNiMoA	HRC=38	弹簧钢	42~44	0.8	0.25~0.28
副连杆	18CrNiWA	HRC=43	弹簧钢	42~44	0.8	0.28~0.30
发电机软轴	50CrVA	HRC=43	铸铁	>58	0.6~1.0	0.15~0.17
美国 P2V 飞机发动机副连杆	合金钢	—	—	—	—	0.24~0.32

### 三、喷丸强化设备

从目前我国工业部门的使用情况来看，喷丸强化设备的形式有两种：一种是机械离心式喷丸机，利用叶轮转动时的离心力将弹丸甩出；另一种是风动式喷丸机，利用压缩空气将弹丸由喷嘴内喷射出。现将这两种喷丸机的主要特征及用途分述如下：

#### 1. 机械离心式喷丸机

离心式喷丸机的主要结构示于图2。零件放在喷丸室的转动工作台上进行喷丸。喷丸机的工作过程如下：将零件1放在转动工作台上，弹丸2借助于离心轮3的离心力而获得

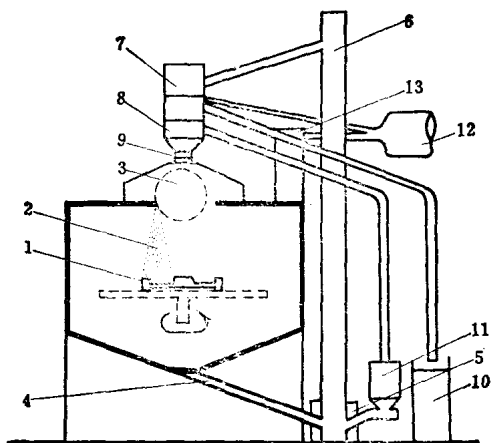


图2 机械离心式喷丸机结构图

- 1—零件；2—弹丸；3—离心轮；4—弹丸收集管；  
 5—弹丸收集箱；6—弹丸提升机；7—弹丸分离器；  
 8—筒壳；9—流量调节阀；10—废料箱；11—弹  
 丸补充箱；12—排尘管；13—弹丸回收器。

足够高的运动速度，然后喷射到零件表面上。撞击到零件上而失速的弹丸，通过弹丸收集管 4 到达弹丸收集箱 5，然后由弹丸提升机 6 将弹丸送入分离器 7，这里将一部分合格弹丸送入储丸箱 8，通过流量调节阀 9 再进入离心轮，而另一部分不合规格的弹丸则由分离器直接送入废料箱 10。由于弹丸的消耗而需要补充弹丸时，可将新弹丸注入补充箱 11 内。喷丸机内的灰尘通过排尘管 12 排出室外。

这种喷丸机使用的弹丸一般是比重比较大的铸铁、铸钢或钢弹丸，而不采用比重比较小的玻璃丸。对于那些要求喷丸强度大的（即强化层深度较深的）大钢件（例如连杆、摇臂、机匣等），大都采用机械离心式喷丸机。这种喷丸机可使弹丸离开叶轮的速度（即切向速度）达到  $45\sim 75$  米/秒。

这种设备的优点是效率高，调节容易，工作较稳定，容易实行自动化。其缺点是设备投资高，在喷射复杂形状零件时不灵活。

## 2. 风动式喷丸机

风动式喷丸机的主要结构示于图 3，其工作过程如下：将零件 1 放在转动工作台上，压缩空气通过管道 3 进入喷嘴 2 并将弹丸通过管 4 吸入喷嘴，然后喷射到零件上。因与零件碰撞而失速的弹丸落在工作室底部的储丸箱 5 内。抽气机通过排尘管 6 将工作室内的灰尘（其中包括破碎的玻璃丸粒）吸入分离器 7，分离器将合格的弹丸重新送回储丸箱 5，而将灰尘及破碎的玻璃丸粒排出。

这种喷丸机所使用的弹丸一般均为比重较小的玻璃弹丸，当然钢丸也可以采用这种喷丸机，不过因为钢丸的比重较大，不能利用弹丸管 4 将钢丸吸入喷嘴内，而是采用如同图 2



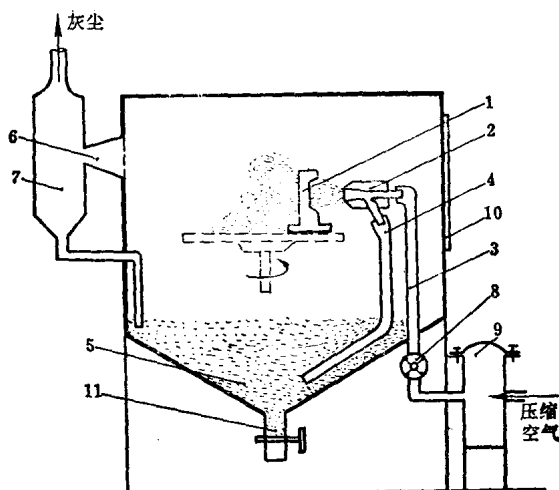


图3 风动式喷丸机结构图

1—零件；2—喷嘴；3—压缩空气管；4—弹丸管；5—储丸箱；  
6—排尘管；7—弹丸分离器；8—压缩空气阀；9—压缩空气过  
滤器；10—工作室门；11—更换弹丸管。

中所示的弹丸提升机将钢丸提升到一定高度，然后靠弹丸本身重量落入喷嘴内，压缩空气再将钢丸喷射到零件上。

图4 是用于涡轮叶片喷丸强化的风动式喷丸机外貌。

设计和制造风动式喷丸机应注意以下几个问题：

(1) 风动式喷丸机内往往安装数个喷嘴，因此在工作时所消耗的压缩空气量相当可观。为了保证喷嘴前的压力在正常工作时不下降，喷丸机的总进气管应直接通往压缩空气站，而不应随便由车间的压缩空气管道上采取分流的方式引进喷丸机，这种方式会引起喷嘴前压力的显著波动，保证不了喷丸强化质量。

(2) 引射弹丸管(图3中4)的长度在可能情况下应