金属零件的喷丸强化技术

北京航空材料研究院 （100095） 王 强

喷丸强化又称为强化喷丸或受控喷丸，是以提高机械零部件疲劳强度或抗应力腐蚀性能为目标的一种表面处理技术。

一、喷丸强化原理

喷丸强化技术是指在外力的驱动下，喷丸介质（弹丸）高速冲击受喷零件表面，使材料表层发生弹性、塑性变形，从而改变其组织结构、残余应力和表面状态，在增加位错密度和引入残余压应力的共同作用下而达到强化效果。

1. 残余应力场的强化作用

喷丸引入的残余压应力场在不同种类的交变载荷下起着不同的作用，其强化机理也有所不同。表面未经强化的零件，其疲劳源大多萌生于表面，这种情况下获得的疲劳极限叫做表面疲劳极限，它是材料的一个特征值。喷丸后的疲劳源也往往萌生于表面，表面残余压应力在此起着抵抗外载荷拉应力的作用，在此情况下，残余压应力起着直接的强化作用，称为应力强化。在喷丸不引起严重表面应力集中的情况下，疲劳源萌生于次表层拉应力区，残余压应力场的作用只是把疲劳裂纹源从表面驱赶到次表面，此时残余压应力场起到间接的强化作用。

2. 组织强化的作用

高温合金喷丸后，在高温服役过程中，喷丸残余压应力场大约在10h内便松弛殆尽，此时塑变层的组织结构基本保持其喷丸后的状态，因此，对高温环境服役的零件，喷丸对疲劳性能的改善起主要作用的是组织强化。材料表层无喷丸塑性变形层时，内部运动的位错一旦达到表面，形成尖锐的台阶，产生应力集中；而喷丸后，表面存在喷丸强化层，在与上述相同的应力水平下强化层内的位错较基体更难以开动，因此可以显著改善基体的疲劳性能。

3. 表面形貌的作用

喷丸对零件表面造成的变化可能成为强化因素，也可能是弱化因素，这取决于零件喷前的表面状态和喷丸工艺。当受喷前表面粗糙度值较高，且喷丸强度不大时，喷丸后表面粗糙度值R_a反而降低，如表1所示，此时喷丸对表面形貌的改变即为强化因素；当喷丸后表面粗糙度值显著提高或由于过喷引起表面微裂纹，将降低受喷零部件的疲劳强度。

表1 铝合金7050喷丸表面粗糙度值R_a

喷后粗糙度值/μm ＼ 喷前粗糙度值/μm；喷丸强度	0.8	1.5	3.2
0.15A	1.5	1.8	2.1
0.25A	5.1	6.7	6.1
0.35A	10.7	10.5	10.7

二、喷丸强化技术的应用

喷丸技术的强化效果显著，效率高，限制小，实施难度低，因此应用越来越广泛。喷丸强化机理和大量试验结果表明，喷丸强化适用的材料和零件应具有表2中的特点。

表2 喷丸零件的分类

分类方法	适用范围
按材料	σ_b≥1400MPa的结构钢
	σ_b≥400MPa的铝合金
	钛合金
按工艺	表面电镀零件，镀前喷丸
	焊接零件，焊后喷丸
	化铣零件
按受载	主要承受扭转和弯曲载荷的零件
	存在较严重应力集中的零件

三、喷丸工艺的选择

喷丸强化工艺参数包括喷丸介质、弹丸流量、喷射压力、喷丸角度、喷射距离和时间等。研究者将这些参数归结于喷丸介质、喷丸强度和覆盖率。

1. 喷丸介质的选择

喷丸介质（弹丸）的选择主要依据零件的力学性能、形状、尺寸及服役条件，包括弹丸种类和尺寸选择两方面。

喷丸强化用弹丸有金属弹丸（如铸铁丸、铸钢丸、切制钢丝丸和不锈钢丸等）和非金属弹丸（陶瓷丸和玻璃丸等）。金属弹丸中铸钢丸韧性好，成本较低，因此应用较多。陶瓷弹丸是一种较新的喷丸介质，可用于替代玻璃丸和部分替代铸钢丸。

弹丸种类的选择一般应遵循：①黑色金属可用各种弹丸，有色金属及不锈钢零件建议选用非金属丸或不锈钢丸。②对喷后表面粗糙度要求不高的零件可选择金属丸，反之则应选择陶瓷丸或玻璃丸。③受喷材料硬度较高的，应选择高硬度的弹丸。

弹丸的尺寸选择应遵循以下原则：①对于零件狭缝和沟槽等非开放式受喷部位，弹丸的尺寸应保证一定的通过性，如齿根R较小的齿轮，弹丸直径应小于$R/2$。②对于喷丸前表面粗糙度值较大的零件，宜选择较大尺寸的弹丸，反之则宜选择较小尺寸。③对于喷丸后表面需要进行机械加工的零件喷丸，弹丸宜选择较大尺寸。

2. 喷丸强度的选择

喷丸强度是喷丸介质冲击能量的度量值，喷丸强度通常使用Almen试片进行度量，零件喷丸强度的选择应遵循以下原则：①应保证喷丸变形能够满足设计的要求。②在保证不产生损伤的前提下，提供足够的强化效果。③同样的材料喷丸强化，喷前零件的表面粗糙度值越高，则喷丸强度应随之适当增大。④对于喷丸前表面电镀或喷后表面进行机械加工的零件喷丸，应选择较大的喷丸强度。

3. 喷丸覆盖率

受喷零件表面上弹丸坑占据的面积与受喷表面总面积之比值，通常以百分数表示，称为表面覆盖率。喷丸覆盖率的选择应根据受喷零件的实际状态而定，一般情况下对于室温服役的零件，喷丸覆盖率应达到200%；而对于高温下服役的零件则应根据零件的服役状态通过试验确定最佳喷丸覆盖率。

四、喷丸强化效果的表征

在喷丸强化工艺的研究、零件喷丸参数的选择和强化质量的鉴定时，最可靠和可行的表征方法是疲劳性能检测法和残余应力检测法。

1. 疲劳性能检测法

喷丸强化的主要目的是提高零件的疲劳寿命和强度，因此通过疲劳性能测试来表征喷丸强化效果是最直观和可靠的方法。

疲劳寿命检测可进行相同载荷的疲劳寿命对比或S-N曲线对比，其中S-N曲线较为完整地反应不同载荷下的疲劳寿命以及疲劳极限，但所需试样较多，试验量较大；而疲劳寿命对比的方法每组试样最少只需3支，通过对比喷丸强化试样的疲劳寿命增益即可表征喷丸强化效果的优劣。

使用疲劳性能检测法应注意：①疲劳试样的喷前表面状态应尽量模拟喷前实际零件表面。②疲劳试验应尽量模拟实际零件服役状态下的受载情况。

2. 残余应力检测法

残余应力是喷丸强化提高零件室温疲劳性能的主要机制，因此研究人员常常采用残余应力来表征喷丸效果。残余压应力场深度和最大残余压应力这两个喷丸残余压应力场特征值可较为准确的反应喷丸的强化效果。

五、喷丸强化技术的发展

喷丸强化技术的主要发展趋势是：

（1）量化强化效果 要加强对喷丸强化层性能的定量研究，特别是残余压应力场的稳定性和松弛规律的研究，发展数学模型和借助计算机手段实现喷丸强化零件寿命的分析和预测。

（2）新型喷丸介质 加强对新型喷丸介质的研究和开发，满足机械零件对喷丸表面完整性的要求。

（3）新型喷丸与复合强化 开发新型的喷丸强化技术，如激光喷丸、射流喷丸等；研究复合强化技术，获得最佳的协同效应，使基体材料强化层具有更优异的力学性能。

（4）喷丸设备 设计和开发具有高效、高精度和低能耗的先进喷丸设备。MW （20120316）