

# 喷丸强化在曲轴圆角上的应用分析

■ 尹建君，张太洪，冯军

**摘要：**利用ABAQUS软件对曲轴圆角喷丸过程进行仿真计算其喷丸后的表面残余应力状态，同时对曲轴圆角喷丸前、喷丸后以及抛光后进行残余应力测试。根据仿真计算结果与实际测试应力情况，确认喷丸能有效改善曲轴圆角处的应力状态，提高曲轴的疲劳强度。

**关键词：**曲轴圆角；喷丸；ABAQUS；残余应力

曲轴作为发动机关键性零件之一，在运动过程中，承受着交变弯曲以及交变扭转载荷的共同作用。特别是轴颈与曲柄的过渡圆角处承受的交变应力最大，曲轴圆角位置经常由于应力高度集中造成曲轴断裂。因此，在曲轴设计制造过程中，需对曲轴圆角位置进行强化，以提高曲轴整体的性能。曲轴圆角强化通常采用感应淬火、渗氮处理、圆角喷丸、圆角滚压以及激光冲击等方式。

我公司与某单位共同开发一种曲轴产品，该曲轴设计为轴颈表面感应淬火。为提高曲轴疲劳强度，要求对所有过渡圆角进行强化处理。由于该曲轴为R20mm的内圆角，根据我公司现有技术手段，无法进行中频感应淬火处理，拟采用圆角喷丸强化处理。

### 1. 试样材料及结构

该曲轴采用34CrNi3MoA材料，具体化学成分如表1所示。

曲轴试样结构（见图1）及

喷丸前热处理状态：试样进行调质处理后轴颈经过中频感应淬火（见图2）。

曲轴试样调质后力学性能检测结果如表2所示。

### 2. 喷丸强度测试试验

通过查阅相关资料以及借鉴类似曲轴的喷丸技术要求，设定其喷丸强度为 $0.5 \pm 0.05A$ ，覆盖率200%。同时曲轴圆角要求表面粗糙度达到 $0.8 \mu m$ ，所以圆角喷丸后，会对圆角抛光处理，以便到达技术要求。

根据设定的喷丸强度和覆盖率，选取丸粒类型为S330，其直径为0.84mm，硬度在50~55HRC。

试验过程采用专用工装进行

阿尔门试片装夹，并固定在曲轴圆角专用测试试样上（见图3），通过调整压力、丸粒流量来获取不同喷丸速度，并结合喷丸时间进行喷丸强度和覆盖率的



图1 曲轴试样示意

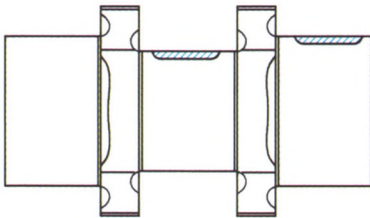


图2 试样结构示意

表1 34CrNi3MoA钢的化学成分（质量分数）（%）

| C    | Si   | Mn   | P    | S     | Cr   | Ni   | Mo   | Cu    |
|------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|
| 0.39 | 0.26 | 0.69 | 0.01 | 0.005 | 1.01 | 3.19 | 0.35 | 0.072 |

表2 曲轴试样热处理后力学性能检测结果

| $R_m/MPa$ | $R_{p0.2}/MPa$ | $A(\%)$ | $Z(\%)$ | $KV/J$ | HBW |
|-----------|----------------|---------|---------|--------|-----|
| 1114      | 1016           | 16.5    | 58      | 92     | 341 |

测试, 根据测试结果, 绘制喷丸饱和曲线。

通过测试数据进行绘制喷丸饱和曲线, 试验结果证明喷丸压力为0.2MPa、丸粒流量5kg/min及喷丸时间为6min, 其喷丸饱和强度为0.49A, 喷丸饱和曲线(见图4), 覆盖率可达200%, 满足技术要求。

### 3. 残余应力模拟仿真计算

利用有限元分析软件ABAQUS, 对喷丸过程进行仿真模拟计算。由于仿真模拟过程中, 多丸模型的残余压应力与单丸模型的残余压应力值差别不大, 只是多丸模型的残余压应力区域较大, 所以本文建立单丸模型进行喷丸过程仿真, 见图5。在实际喷丸试验过程中, 由于弹丸的硬度很高, 在模拟过程中将其视为刚体, 设定其密度 $\rho=7800\text{kg/m}^3$ , 弹性模量 $E=206\text{GPa}$ , 泊松比 $\nu=0.3$ ; 试样靶材的材料34CrNi3MoA, 设定其密 $\rho=7800\text{kg/m}^3$ , 弹性模量 $E=206\text{GPa}$ , 泊松比 $\nu=0.3$ , 其塑性变形参数设定见表2, 同时由于测试曲轴试样圆角喷丸前的应力值为拉应力300MPa左右, 仿真计算中赋予靶材初始应力为300MPa。

在仿真计算过程中, 为缩短计算时间, 靶材只对喷射点周边进行网格划分(见图6), 通过上述喷丸参数以及喷枪的口径尺寸进行粗略计算, 丸粒的喷射速度在10~20m/s。设定弹丸分别以10m/s和20m/s的速度对靶材进行喷射, 模拟出弹丸冲击一次靶材的残余应力云图(见图7、图8), 以及沿厚度方向残余应力分布图(见图9、图10)。

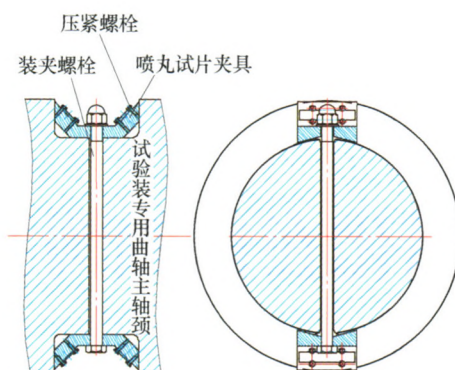


图3 阿尔门试片装夹示意

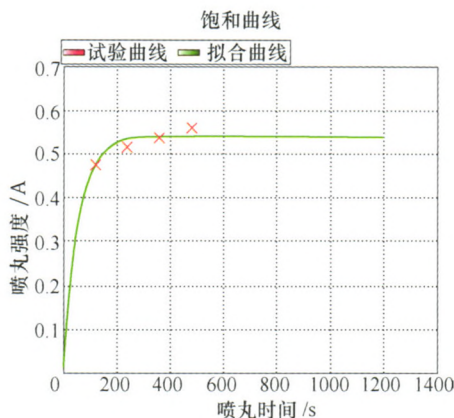


图4 曲轴喷丸饱和曲线



图5 三维有限元模型



图6 模型网格划分

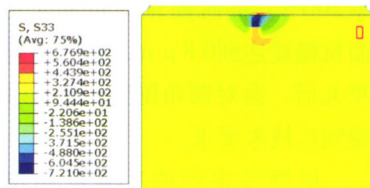


图7 弹丸冲击速度为10m/s残余应力云图

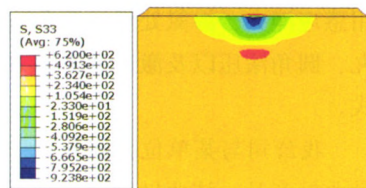


图8 弹丸冲击速度为20m/s残余应力云图

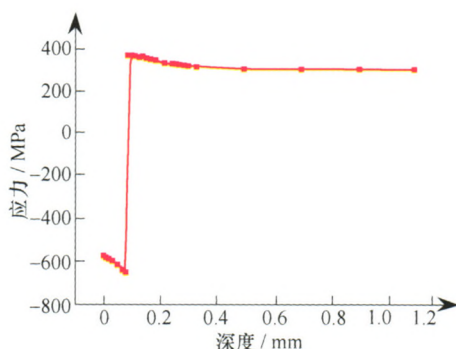


图9 弹丸速度为10m/s沿厚度方向残余应力分布

由仿真结果可得,弹丸以速度10m/s冲击靶材,其最大残余压应力出现在表面下0.1mm位置,其最大残余压应力值为720MPa左右,而表面残余压应力值为570MPa左右。弹丸以速度20m/s冲击靶材,其最大残余压应力出现在表面,其值为920MPa左右。从弹丸分别以速度10m/s和20m/s冲击靶材沿厚度方向应力曲线进行对比,弹丸速度越快,最大残余压应力越大且厚度方向的残余压应力范围也越大。而实际喷丸过程中,由于丸粒的冲击次数增加,其压应力沿厚度方向的范围比弹丸一次冲击沿厚度方向的范围要深。

#### 4. 应力测试结果

为确认曲轴圆角喷丸前后以及抛光后的应力实际情况,采用加拿大PROTO公司生产的IXRD便携式残余应力仪对试样圆角喷丸位置进行残余应力检测。具体测试情况和结果如图11、图12所示。

从图12测试结果可以得知,曲轴试样圆角喷丸后,其表面由喷丸前300MPa左右的拉应力转变为600MPa左右的压应力,说明喷丸可有效地改善曲轴圆角应力状态,提高曲轴的疲劳寿命。通过与仿真计算的表面残余应力值进行对比分析,其数据与弹丸以10m/s的速度喷射的仿真结果差距较小。

而曲轴圆角经过表面抛光处理,抛光量约为0.05mm,由于抛光会产生拉应力,从而降低喷丸后的残余压应力,从图12可知,抛光后曲轴圆角表面残余压应力值减小为240MPa左右。

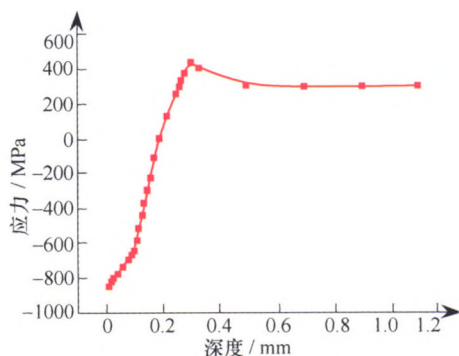


图10 弹丸速度为20m/s沿厚度方向残余应力分布

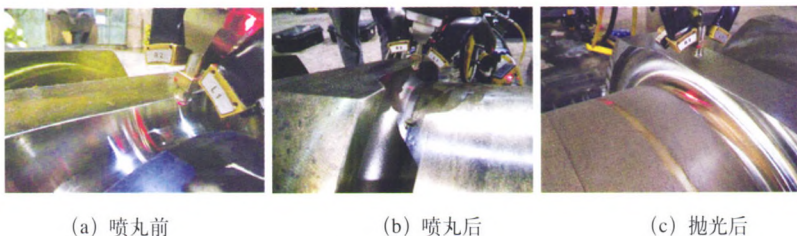


图11 圆角应力测试图

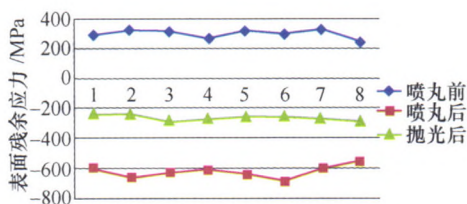


图12 各阶段应力测试结果

#### 5. 结语

(1) 曲轴圆角进行喷丸处理,改变了曲轴圆角处的应力状态,圆角处表面由拉应力转变为压应力,可有效地提高曲轴的疲劳寿命。

(2) 曲轴圆角经过的抛光0.05mm后,其表面残余压应力减小。

(3) 通过ABAQUS软件进行曲轴圆角喷丸仿真计算,其残余应力值结果与实际测试结果差距较小,说明可以通过有限元仿真分析,对后期喷丸参数的优化调整具有指导意义。

#### 参考文献

[1] 王仁智.金属材料的喷丸强化

原理及其强化机理综述[J].中国表面工程, 2015, 25 (6): 1-8.

[2] 强斌,李亚东,顾颖,等.钢板喷丸处理残余应力场和表面粗糙度的数值模拟[J].西南交通大学学报, 2015, 50 (4): 691-697.

[3] 维尔贝莱特(中国)有限公司.曲轴断裂与喷丸强化[J].现代零部件, 2008 (9): 92.

作者简介:尹建君、张太洪、冯军,中车资阳机车有限公司。

MW 20170412