

# 曲轴激光喷丸强化数值仿真<sup>\*</sup>

高立

**【摘要】** 采用数值仿真的方法,研究了激光冲击强化对175A型柴油机曲轴疲劳寿命的影响,取得了数值仿真条件下曲轴过渡圆角处残余应力场的数据,数值仿真结果和实验结果的对比分析表明:数值仿真结果和实验结果较为接近,从而验证所采用的材料本构模型、冲击波峰值压力和冲击波作用时间是精确的。通过此类激光冲击强化仿真分析,可优化激光冲击的相关参数,使曲轴过渡圆角产生有利的残余应力场,从而为激光冲击强化曲轴提供优化的工艺参数。

**关键词:** 曲轴 激光喷丸 强化 仿真

**中图分类号:** TG668; TK413.3<sup>+</sup>1; TN249

**文献标识码:** A

## Simulation on Laser Shock Peening of Crankshaft

Gao Li

(Weifang University)

### Abstract

Laser shock peening is a technique similar to shot peening. Laser shock peening imparts compressive residual stresses in materials to improve the fatigue resistance. During a laser shock peening event, pressure well above the dynamic yield strength of the material is imparted on the target within a microsecond. The severity of the loading causes local plastic deformation, which ultimately results in the development of the favorable residual stresses. Finite element analysis technique was applied to predict the residual stress induced from laser shock peening. The comparison between the simulation and experimental results was carried out and the model was validated subsequently. The results showed that the numerical simulation on laser shock peening was effective for the crankshaft design and parameters optimization.

**Key words** Crankshaft, Laser shock peening, Strengthening, Simulation

### 引言

曲轴材质要求具有较高的刚性和抗疲劳强度以及良好的耐磨性能。球墨铸铁的铸造工艺不断发展,性能不断提高,已成为取代锻钢制造曲轴的首选材料<sup>[1~2]</sup>。市场竞争迫使愈来愈多的企业采用了扩缸、增压或增加冲程等技术措施,以提高发动机的动力性和经济性。但首先遇到的就是曲轴强度不足的问题,如果在不改变曲轴原设计结构尺寸及材料的前提下,采用表面强化技术,就能满足曲轴的使用要求,无疑是一个有效的方法。到目前为止,最有

效而成熟的措施是曲轴圆角滚压强化,经合理圆角滚压之后其弯曲疲劳强度可提高80%以上;其次是圆角淬火及渗氮。圆角滚压强化是利用滚轮(球)对轴颈圆角部位施加较大的力,当滚压力撤除后,在圆角部位形成残余压应力,可抵消(或部分抵消)曲轴圆角部位的工作拉应力,从而大幅度提高曲轴的疲劳强度。但在滚压过程中,滚轮工作情况较复杂,滚轮既滚动又滑动,如果滚压速度过大,则有可能造成滚压表面烧伤、撕痕;又由于曲轴圆角结构的特殊性以及滚压接触应力分布的不均匀性,如滚压次数过多,将会使曲轴圆角产生接触疲劳,表面形成鱼鳞状

甚至脱落。本文采用数值仿真的方法,研究激光冲击强化对 175A 型柴油机曲轴疲劳寿命的影响,取得数值仿真条件下曲轴过渡圆角处残余应力场的数据,并将数值仿真结果和实验结果做对比性分析。

### 1 数值仿真的关键技术

#### 1.1 材料本构模型选择

球墨铸铁材料的机械性能列于表 1 中,关于材料行为,在激光冲击过程中材料被压缩并产生动态变形,应变率超过  $10^6 \text{ s}^{-1}$ ,在这种情况下静态的应力-应变关系已不能反映材料的真实响应,必须用动态的弹性极限取代。Johnson - Cook 在 1983 年综合硬化和应变率对屈服强度的影响,提出了一个材料模型用来描述材料的这种动态行为。其本构关系为<sup>[3]</sup>

$$\bar{\sigma} = (\sigma_0 + B\bar{\epsilon})(1 + c \ln \dot{\bar{\epsilon}}^n) \quad (1)$$

式中  $B、n、c$ ——材料常数  
 $\bar{\epsilon}$ ——等效塑性应变  
 $\dot{\bar{\epsilon}}$ ——等效塑性应变率

表 1 球墨铸铁材料的机械性能

Tab.1 Mechanical properties of nodular cast iron

性能参数	密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	泊松比	弹性模量/GPa	剪切模量/GPa	静态屈服强度/MPa	断裂屈服强度/MPa
数值	7 300	0.286	169	61	420	700

#### 1.2 冲击波加载确定

在整个光斑范围内激光场强呈近似均匀的分布,但冲击波施加于靶的压力却随时间而变化。确定冲击波峰值压力的经验公式为<sup>[4]</sup>

$$p = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha + 2}} Z I_0 \quad (2)$$

式中  $\alpha$ ——内能转化为热能的系数  
 $I_0$ ——入射激光功率密度  
 $Z$ ——靶材与约束层间的冲击波折合声阻抗

将  $\alpha = 0.25、I_0 = 3.12 \text{ GW}/\text{cm}^2、Z = 0.315 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 代入式(2)中求出冲击波的峰值压力  $p = 2.75 \text{ GPa}$ 。

根据 Fabbro R<sup>[4]</sup>等人的研究结果,激光诱导冲击波的作用时间大约为激光脉宽的 2~3 倍甚至更高。因此在进行成形过程的有限元模拟时,对于激光脉冲的作用时间可先按照激光脉宽的 3 倍来确定,实验采用的激光脉宽  $\tau = 23 \text{ ns}$ ,这样每一次冲击加载的作用时间就为 70 ns 左右,模拟时取为 70 ns。文献[5]在实验的基础上,已确定了冲击波压力随时间变化的图形,图 1 所示为冲击波的压力幅值变化

曲线,ABAQUS 的加载模块将按这条曲线给曲轴加载。

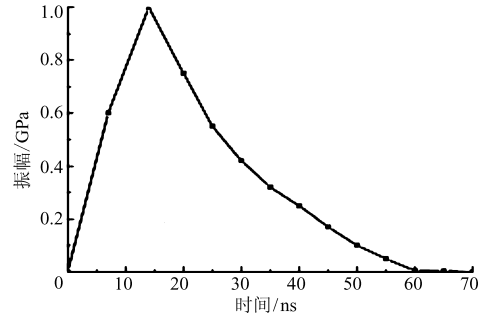


图 1 冲击波加载曲线

Fig.1 Shock wave loading curve

#### 1.3 有限元仿真软件选择

由于冲击波压力作用下板料的变形是一个高速动态的过程,不仅产生大位移、大转动和大应变现象,而且还有高应变率现象。这既涉及到几何非线性问题也涉及到材料非线性问题,因此在数值计算中应尽可能计及这些因素,以提高计算精度。目前可用于仿真分析高速冲击下所涉及的几何非线性和材料非线性的软件有 ANSYS 和 ABAQUS<sup>[6]</sup>等。相对于 ANSYS 软件,ABAQUS 的非线性力学(几何、材料、接触)分析功能具有世界领先水平,所以选择 ABAQUS 作为仿真软件。

#### 1.4 模型建立和网格划分

根据图 2 所示的 175A 型柴油机曲轴简图,在 ABAQUS 的 CAE 模块里建立如图 3 所示的三维曲轴模型,在曲轴的过渡圆角处施加如图 1 所示的前后光斑位置相切的冲击加载,光斑直径 8 mm。对实际使用中断裂的曲轴统计发现,大部分断裂事故都发生在该处圆角。对曲轴的应力分析应主要关心

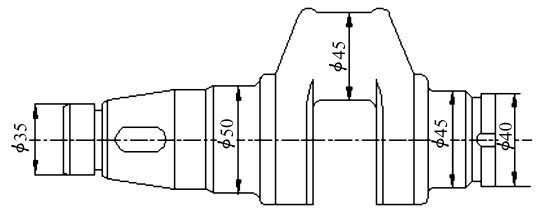


图 2 175A 型柴油机曲轴简图

Fig.2 Diagram of 175A diesel engine crankshaft

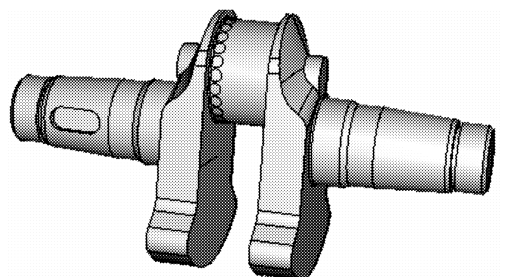


图 3 175A 型柴油机曲轴 CAE 几何模型图

Fig.3 CAE model of 175A diesel engine crankshaft

该处的应力分布,因此将该处的网格细化。把圆角部分手工划分为 600 多个 6 节点五面体单元,单元较密且形状较好,最小单元为  $0.2\text{ mm} \times 0.4\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$ 。其余部分用有限元程序自动生成 1 000 多个四面体单元,然后再和手工划分的部分组合到一起,最后划分的有限元分析网格如图 4 所示。

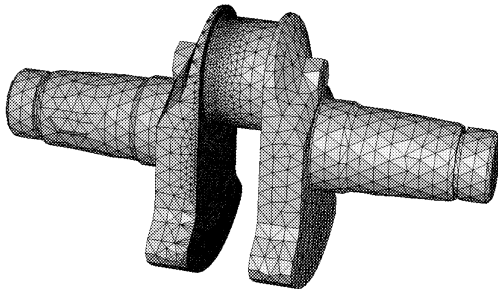


图 4 有限元分析网格模型  
Fig. 4 Grid for simulation

### 1.5 边界条件的处理

将曲轴主轴颈所承受轴承的弹性支承作用离散为作用在支承面每个节点上的弹性边界元,通过弹性边界元使主轴颈在半径方向的位移为零。考虑到激光光斑与轴的几何尺寸相比很小,曲轴的另一端让其处于悬空状态,这不会对仿真结果有太大影响。

## 2 有限元计算结果

图 5 为沿着曲轴过渡圆角顺次激光冲击一圈后的等效残余应力分量  $S_{11}$  仿真结果图,图 6 为 Mises 等效残余应力分量  $S_{22}$  仿真结果图。在 13 平面内沿着过渡圆角,每隔 1 mm 的弧长处取一个点,共选择 11 个点,如图 7 所示。

由 ABAQUS 的后处理输出,将各测试点处的 Mises 表面残余应力仿真结果列于表 2 中,由表 2 中

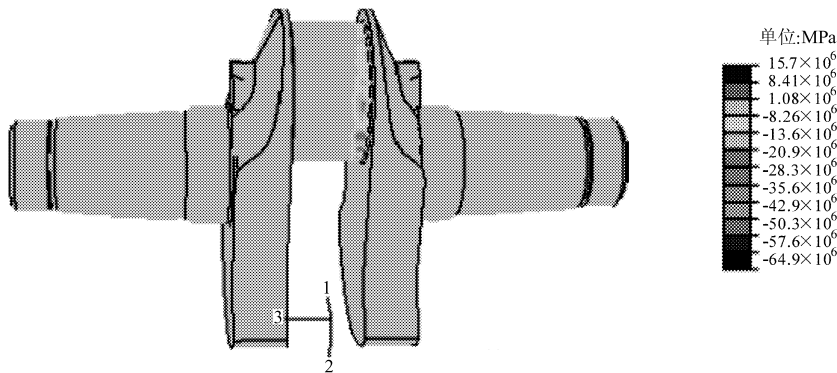


图 5 等效残余应力分量  $S_{11}$  图

Fig. 5 Simulation result of equivalent residual stress component  $S_{11}$

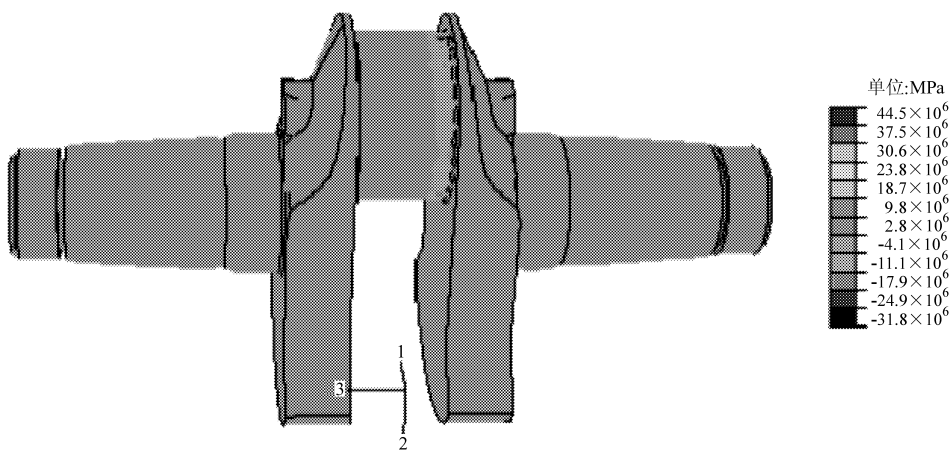


图 6 等效残余应力分量  $S_{22}$  图

Fig. 6 Simulation result of equivalent residual stress component  $S_{22}$

的数据可看出曲轴曲柄与连杆轴颈之间的圆角横截面冲击强化后残余应力分布比较规律,出现了 2 个区:压应力区和拉应力区。在曲柄部分生成残余拉应力,在连杆轴颈部分生成压应力。拉、压应力交界

处过渡平稳,应力的数值比未冲击的试样高,说明激光斜冲击强化起到了强化和硬化作用。

将表 2 中的仿真结果和文献[7]中的曲轴激光冲击强化实验结果作对比性分析,可以发现,从产生

的拉应力区和压应力区的分布以及残余应力的大小变化情况来看,排除由于冲击波的峰值压力受实验中黑漆涂层和流动约束水层厚度变化影响所引起的冲击波加载波动,而造成实验和仿真结果两者之间误差的影响因素之外,仿真结果和实验比较吻合。

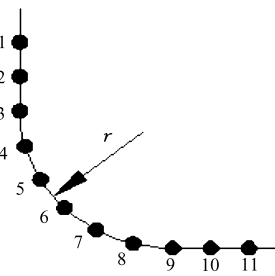


图 7 残余应力测试点分布示意图

Fig. 7 Test points for residual stress

表 2 表面残余应力仿真分析结果  
Tab.2 Simulation results of residual stress at the test points MPa

测试点编号	1	2	3	4	5	6
仿真结果	224.3	567.2	718.4	597.9	265.8	-203.3
测试点编号	7	8	9	10	11	
仿真结果	-187.6	-254.7	-804.6	-241.1	-489.6	

残余应力分布的技术对实验方案的安排和激光工艺参数的选择有一定的指导意义。

(2) 实验和仿真结果对于后续进行的曲轴激光冲击强化多次/搭接冲击中工艺参数和冲击路径的优化研究具有一定的指导和参考作用。

### 3 结论

(1) 鉴于仿真的结果与实验测得的数据比较一致,因此数值仿真在预测激光冲击曲轴过渡圆角处

### 参 考 文 献

- 1 陈耀廉,行涛,王海防,等. 4105 发动机球墨铸铁曲轴安全性评估[J]. 拖拉机与农用运输车, 2000(3): 37~39.
- 2 陈鹭滨,秦可,徐英,等. 农用车发动机球墨铸铁曲轴断裂失效分析[J]. 山东机械, 2001(5):15~17.
- 3 Zhang Wenwu, Y Lawrence Yao. Micro scale laser shock processing of metallic components[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2002, 124: 369~378.
- 4 Fabbro R, Fournier J, Ballard, et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. Appl. Phys., 1990, 68(2): 775~784.
- 5 Berthe L, Fabbro R, Peyre P, et al. Shock waves from a water-confined laser-generated plasma[J]. Appl. Phys., 1997, 82(6): 2 826~2 832.
- 6 ABAQUS user's manual[M] version 5.7. Pawtucket (RI): Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc, 1997.
- 7 高立,张永康. 曲轴激光喷丸强化实验研究[J]. 应用激光, 2006, 12(6): 372~374.

(上接第 168 页)

### 参 考 文 献

- 1 张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津:天津大学出版社,1999.
- 2 赵英剑,郭敬滨,张国雄. 弱刚度三坐标测量机的误差补偿[J]. 制造技术与机床,2000(4):38~40.
- 3 Zhao Yingjian, Song Kaicheng, Zhang Guoxiong. Study on the horizontal beam and the vertical column of cantilever 3D CMM[C]. Proceedings of the 2nd International Symposium on Test and Measurement, Beijing, China,1997.
- 4 李醒飞,张晨阳,李立京,等. 电梯导轨对轿厢振动的影响[J]. 中国机械工程,2005,16(2): 115~122.
- 5 Hoon Wee, Yoon Young Kim, Haeil Jung, et al. Nonlinear rate-dependent stick-slip phenomena; modeling and parameter estimation[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001,38(8): 1 415~1 431.
- 6 周传宏. 滚动直线导轨副静态和动态特性研究[D]. 武汉:华中科技大学,1999.
- 7 刘习军,贾启芬. 工程振动与测试技术[M]. 天津:天津大学出版社,1999.
- 8 胡仁喜,王庆五,闫石. ANSYS8.2 机械设计高级应用实例[M]. 北京:机械工业出版社,2005.