

# 基于裂纹萌生期限的典型零件剩余寿命预测

宋守许 张敬东 刘志峰

合肥工业大学,合肥,230009

**摘要:**将有限元分析方法与疲劳寿命预测相结合,以曲轴为对象,对循环载荷导致的疲劳断裂进行了研究。以实际裂纹检测精度定义的疲劳裂纹萌生极限尺寸为计算标准,通过 ABAQUS 有限元分析计算整体应力应变,采用子结构分析由名义载荷得出的局部最大名义应力载荷谱,结合 Ohij 疲劳寿命法则准确计算出裂纹萌生期限,实现了基于裂纹萌生的剩余寿命预测。

**关键词:**裂纹萌生;疲劳断裂;剩余寿命;Ohij 疲劳寿命法则

**中图分类号:**TH133.5

**文章编号:**1004—132X(2011)20—2490—05

## Crack Initiation Period—based Rest Life Prediction of Typical Parts

Song Shouxu Zhang Jingdong Liu Zhifeng

Hefei University of Technology, Hefei, 230009

**Abstract:** Combining the method of finite element analysis with fatigue life prediction, fatigue fracture led by cyclic load was studied with crankshaft as the object. Based on the actual crack detection accuracy of the fatigue crack initiation limits as the size of the computational standard, the comprehensive stress and strain were obtained through finite element analysis, then using substructure analysis the spectrum of local maximum load nominal stress was calculated, integrated with fatigue life law the period of the crack initiation was gotten precisely. The rest life prediction was realized based on the crack initiation. It provides a method to predict the rest of life for low stress high cycle fatigue led by cyclic load.

**Key words:** crack initiation; fatigue fracture; rest life; law of Ohij fatigue life

## 0 引言

退役零件寿命的评估与预测是再制造产品高质量服役的重要基础。在对零件进行疲劳设计和寿命预测时,应根据不同的疲劳特征采用相应的疲劳特性曲线。目前常用的疲劳特性曲线有三种:低应力高周疲劳采用  $S-N$  曲线进行预测;高应力低周疲劳采用  $\epsilon-N$  曲线;裂纹扩展寿命采用 Paris 裂纹扩展公式<sup>[1-2]</sup>。何庆庆等<sup>[3]</sup>根据全生命周期理论,在  $S-N$  曲线基础之上,采用线性损伤法则对发动机转子进行寿命预测。张莉等<sup>[4]</sup>利用有限元法和疲劳损伤累积理论建立了一种幂指数形式的损伤演化方程,用以估算疲劳寿命。王旭亮等<sup>[5]</sup>应用模糊数学方法修正 Miner 线性损伤法则,使疲劳寿命的预测误差由原来的 63% 减小到 14.7%。上述研究未对交变载荷引起的低应力高周疲劳寿命预测进行研究,且在进行寿命预测时均忽略了小幅值载荷。

对于承受交变载荷的零件,当裂纹萌生之后,裂纹扩展期限非常短,因此笔者采用裂纹萌生的

期限代替整个疲劳断裂的期限,略带一定的保守性。在进行疲劳载荷处理时,考虑一个周期内低应力高周疲劳和高应力低周疲劳,采用雨流法对疲劳载荷进行分段处理,避免了在常规计算中忽略小幅值载荷,为 Miner 线性损伤法则提供了准确的数据。

## 1 零件剩余寿命预测方法模型

为预测零件寿命,首先建立零件的三维模型,然后根据名义载荷进行有限元模拟,求出局部最大应力载荷谱,结合零件材料的循环应力应变曲线并采用雨流计数法计算应变幅、应变比等,运用 Miner 线性损伤法则计算出一个周期循环载荷下总的累积损伤,根据实际的工作时间得出实际消耗的寿命,进而计算出零件的剩余寿命。零件剩余寿命预测模型如图 1 所示。

## 2 局部最大应力载荷谱求解

### 2.1 建立分析流程

曲轴是发动机最重要的零件之一,工况复杂,承受周期性交变载荷的同时也受到来自汽缸高温的影响。曲轴工作性能要求高,设计制造工艺复杂,因而退役后的发动机曲轴具有较高的再制造

收稿日期:2011—01—04

基金项目:国家自然科学基金资助重点项目(50735006);国家自然科学基金资助项目(50905052);国家科技支撑计划项目(2008BAC46B01);安徽省科技计划项目(08010202010)

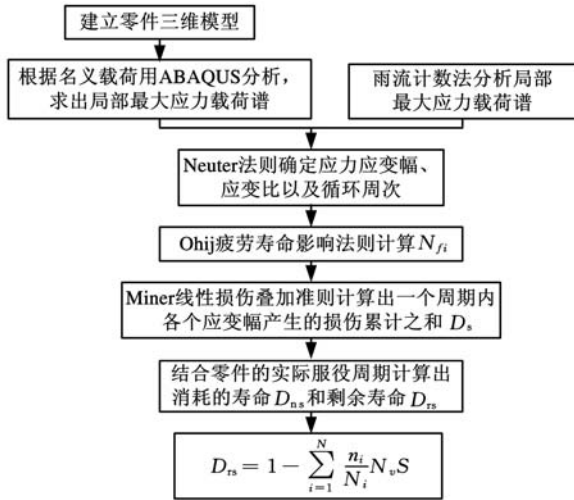


图1 寿命预测模型

价值。评估曲轴的剩余寿命是对其进行再制造的前提。本文选用四缸发动机曲轴的1/4进行分析,简化了建模并降低了ABAQUS分析计算量。首先在ABAQUS中施加名义载荷,输出整体应力,先找出可能出现断裂的位置,再重新启用ABAQUS的子结构分析,经细化网格后处理最大应力区,从而得到局部最大应力处的时间应力载荷谱,基本流程如图2所示。

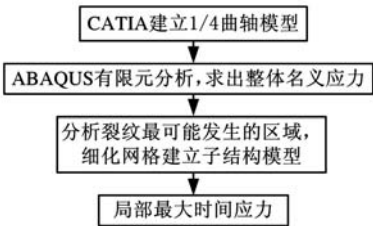


图2 基本处理程序

### 2.2 建立有限元模型分析名义应力

曲轴的材料为40CrNiMo,表面硬度为350HBS,弹性模量为2.09GPa,泊松比为0.295,三维模型及网格模型如图3、图4所示。曲轴的常规疲劳损伤形式为低应力高周疲劳,因此应根据循环载荷计算其塑性应变,试验验证的静态拉伸和循环应力应变曲线如图5所示。曲轴的疲劳安全系数S为1.65<sup>[6]</sup>,发动机转速为2000r/min,分析周期为0.06s,整体应力云图如图6所示。

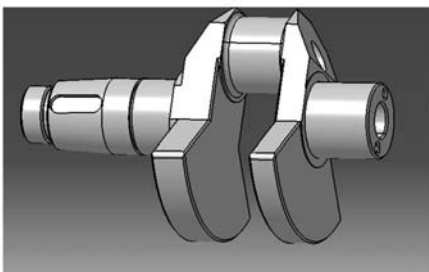


图3 1/4曲轴模型

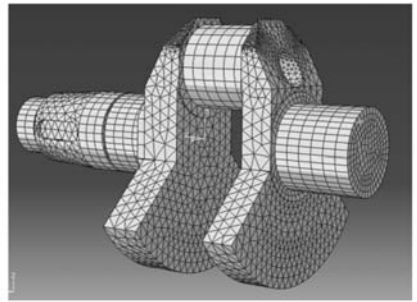


图4 曲轴网格模型

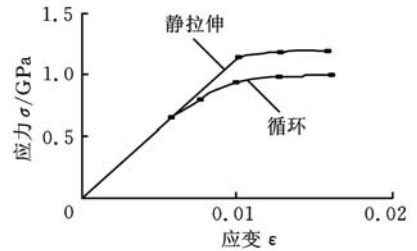


图5 40CrNiMo循环应力—应变曲线

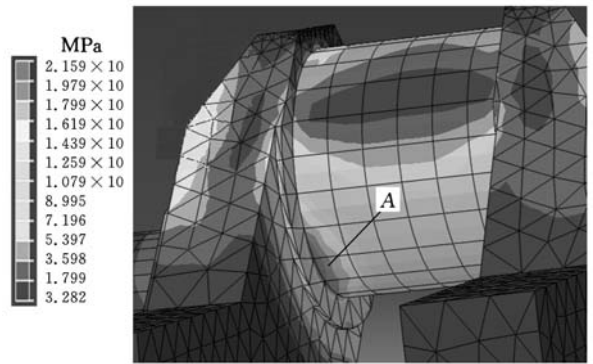


图6 整体名义应力云图

### 2.3 求局部最大时间—应力载荷谱

图6表明,曲拐A处出现了应力集中。根据曲轴的实际工况可知,在一个周期内,连杆和曲轴配重对曲轴施加循环载荷,在离心力和连杆作用力的共同作用下,曲拐A处有应力集中并成为最大应力出现区域,而曲轴的失效形式主要是轴颈磨损和曲拐处的疲劳断裂。所以上述分析结果与实际基本一致,因而对此处细化网格进行子结构分析,以求出局部最大时间应力载荷谱。子结构网格如图7所示,该处随时间变化的应力如图8所示。

### 3 雨流法处理局部最大应力载荷谱

雨流法<sup>[7-8]</sup>又称“塔顶法”,是Mat-suiski和Endo提出的,在工程界广泛用于疲劳寿命计算。雨流法处理后的时间—应力载荷数据如图9所示。该周期载荷谱的所有循环计数如下。

小循环:

4—5—4′,

取4点、5点为极值点;

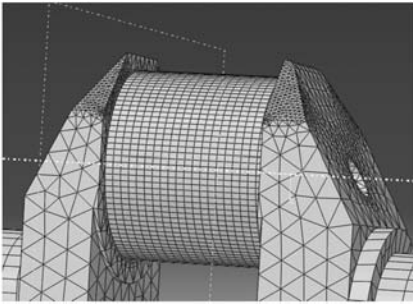


图 7 应力集中区网格细化子结构模型

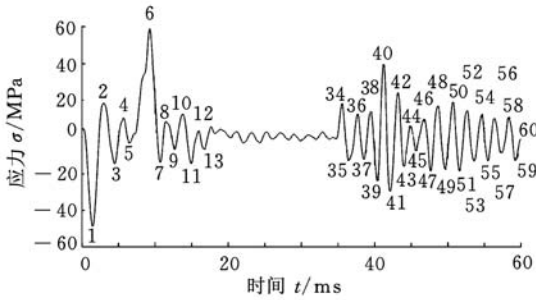


图 8 最大局部时间应力载荷谱

- 2—3—2', 取 2 点、3 点为极值点;
- 8—9—8', 取 8 点、9 点为极值点;
- 7—10—7', 取 7 点、10 点为极值点;
- 13—34—13', 取 13 点、34 点为极值点;

- 36—37—36', 取 36 点、37 点为极值点;
- 11—38—11', 取 11 点、38 点为极值点;
- 39—40—39', 取 39 点、40 点为极值点;
- 44—45—44', 取 44 点、45 点为极值点;
- 43—46—43', 取 43 点、46 点为极值点;
- 48—49—48', 取 48 点、49 点为极值点;
- 53—54—53', 取 53 点、54 点为极值点;
- 56—57—56', 取 56 点、57 点为极值点。

总体循环:

1 点、6 点为总体极值循环点, 42 点、51 点为总体第二循环点, 53 点、60 点为收尾循环点。

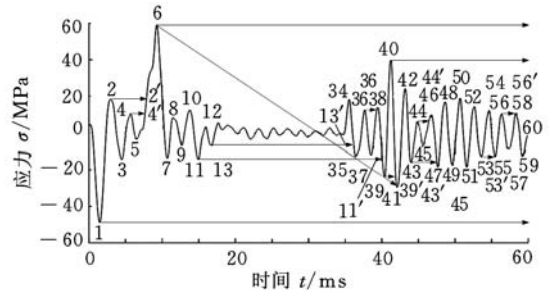


图 9 雨流法处理后的计数点

把上述雨流法得到的 15 组数据进行整合, 并结合在弹性范围内的应变关系计算出应变幅比值和循环周次, 如表 1 所示。

表 1 曲轴在一个周期内的应变寿命

循环序号 $i$	反向次数	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	最大应变 $\epsilon_{\max}$	最小应变 $\epsilon_{\min}$	总应变范围 $\Delta\epsilon$	应变比 $R_\epsilon$	周次 $N_{fi}$
1	4,5	10	-3.3	$4.785 \times 10^{-6}$	$-1.85 \times 10^{-6}$	$6.635 \times 10^{-6}$	-0.3866	$1.5 \times 10^{11}$
2	2,3	18.3	-14.3	$8.756 \times 10^{-6}$	$-6.84 \times 10^{-6}$	$7.715 \times 10^{-6}$	-0.7812	$1.1 \times 10^{11}$
3	8,9	6	-6.9	$2.871 \times 10^{-6}$	$-3.3 \times 10^{-6}$	$6.171 \times 10^{-6}$	-0.87	$1.7 \times 10^{11}$
4	7,10	12.4	-12.7	$5.933 \times 10^{-6}$	$-6.08 \times 10^{-6}$	$1.201 \times 10^{-5}$	-0.9758	$5.4 \times 10^{10}$
5	13,34	18.2	-6.7	$8.708 \times 10^{-6}$	$-3.21 \times 10^{-6}$	$1.192 \times 10^{-5}$	-0.3686	$5.5 \times 10^{10}$
6	36,37	12.6	-11.8	$6.029 \times 10^{-6}$	$-5.65 \times 10^{-6}$	$1.168 \times 10^{-5}$	-0.9371	$2.8 \times 10^{12}$
7	11,38	14.2	-14.3	$6.794 \times 10^{-6}$	$-6.84 \times 10^{-6}$	$1.363 \times 10^{-5}$	-0.9933	$4.4 \times 10^{10}$
8	39,40	39.8	-23.8	$1.9043 \times 10^{-5}$	$-1.139 \times 10^{-5}$	$3.043 \times 10^{-5}$	-0.5982	$1.1 \times 10^{10}$
9	44,45	6.67	-6.5	$3.191 \times 10^{-6}$	$-3.11 \times 10^{-6}$	$6.301 \times 10^{-6}$	-0.9747	$1.1 \times 10^{10}$
10	43,46	9.8	-15.9	$4.689 \times 10^{-6}$	$-7.61 \times 10^{-6}$	$1.230 \times 10^{-5}$	-0.6162	$5.2 \times 10^{10}$
11	53,55	11.3	-11.2	$5.407 \times 10^{-6}$	$-5.36 \times 10^{-6}$	$1.077 \times 10^{-5}$	-0.9913	$6.5 \times 10^{10}$
12	66,67	10.2	-8.8	$4.88 \times 10^{-6}$	$-4.21 \times 10^{-6}$	$9.09 \times 10^{-6}$	-0.8627	$8.7 \times 10^{10}$
13	1,6	58.3	-48.5	$2.7895 \times 10^{-5}$	$-2.321 \times 10^{-5}$	$5.111 \times 10^{-5}$	-0.8320	$4.6 \times 10^9$
14	42,51	24	-17	$1.1483 \times 10^{-5}$	$-8.13 \times 10^{-6}$	$1.961 \times 10^{-5}$	-0.7082	$2.3 \times 10^{10}$
15	53,54	39.8	-12.6	$1.9043 \times 10^{-5}$	$-6.03 \times 10^{-6}$	$2.507 \times 10^{-5}$	-0.3167	$1.5 \times 10^{10}$

#### 4 计算应力反向次数

计算应力反向次数的基本思想是, 相同的应变幅将导致相同的疲劳损伤, 如果应力集中处的局部应变幅能够确定, 那么构件的疲劳寿命就可以根据光滑式样的疲劳数据计算。根据雨流计数法求出循环应力幅和断裂应力反向次数  $2N_f$  之间的关系:

$$\Delta\sigma/2 = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (1)$$

式中,  $\Delta\sigma$  为应力幅;  $\sigma'_f$ 、 $b$  为材料的疲劳性能参量;  $N_f$ 、 $2N_f$

分别为断裂循环次数和断裂应力反向次数。

由于曲轴的疲劳损伤属于低应力高周疲劳, 所以材料在弹性极限范围内。根据弹性应力应变的关系  $\Delta\sigma = E\Delta\epsilon$ , 式(1)改写为

$$\Delta\epsilon_e/2 = \epsilon'_f (2N_f)^b/E \quad (2)$$

式中,  $\Delta\epsilon_e$  为弹性应变幅;  $E$  为材料的弹性模量。

但是在冲击载荷发生时可能出现高应力低周疲劳, 根据塑性应变幅与  $2N_f$  的关系:

$$\Delta\epsilon_p/2 = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (3)$$

式中,  $\Delta\epsilon_p$  为塑性应变幅;  $\epsilon'_f$ 、 $c$  为材料的疲劳性能参量。

结合塑性应变和弹性应变得

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \epsilon_c}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f(2N_f)^b}{E} + \epsilon'_f(2N_f)^c \quad (4)$$

考虑平均应力的影响,式(4)转化为

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f \pm \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f(2N_f)^c \quad (5)$$

式中,  $\sigma_m$  为平均应力,拉伸和压缩分别取正值;  $\Delta \epsilon$  为总应变幅。

对于硬度为 350HBS 的 40CrNiMo 而言,疲劳塑性指数  $c = -0.59$ ,疲劳应变指数  $\epsilon'_f = 0.48$ ,式(5)在计算过程中考虑了 4 个因素:非零平均应力、零平均应力、非零平均应变、零平均应变,然而在运用雨流计数法处理载荷时必须避免零的出现,因此忽略零平均应力和零平均应变的影响,把式(5)转化为

$$\Delta \epsilon = \frac{2(1 - R_\epsilon) \epsilon'_f}{[(4N_f - 1)(1 - R_\epsilon)^a + 2^a]^{1/a}} \quad (6)$$

$$R_\epsilon = \begin{cases} \epsilon_{\min} / \epsilon_{\max} & | \epsilon_{\max} | \geq | \epsilon_{\min} | \\ \epsilon_{\max} / \epsilon_{\min} & | \epsilon_{\max} | \leq | \epsilon_{\min} | \end{cases}$$

式中,  $a$  为材料常数,  $a = -1/c$ ;  $R_\epsilon$  为应变比。

由于计算过于复杂,这里采用编程计算,结果如表 1 所示。比较表 1 中各个应力幅水平计算出的  $N_{fi}$ ,可知各组应力幅在整个裂纹萌生期限内所占的比例不仅与应变幅大小有关,而且与应变比有关;单周期内反向次数也同样影响累积损伤,在该分析中,反向次数为 15,应变比的极小值和极大值分别为  $-0.3866$  和  $-0.9933$ ,但对裂纹萌生影响最大的数据却不出现在应力比极值处。表 1 表明,第 13 组循环影响最大。单周期内损伤值  $1/N_{f13}$  为  $2.17 \times 10^{-10}$ ,占整个服役周期损伤值的 16%。

## 5 根据服役时间计算曲轴剩余寿命

### 5.1 Miner 损伤法则计算单周期内的损伤

Miner 法则把各应变范围内造成的损伤线性叠加,并将计算数值与 1 比较:若计算值达到 1,则疲劳裂纹萌生或者疲劳失效发生;若计算值没有达到 1,则裂纹尚未萌生或者尚未发生疲劳失效,线性损伤法则基本表达式为

$$D_s = \sum_{i=1}^l \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (7)$$

式中,  $n_i$  为第  $i$  级应力水平下的循环数;  $l$  为周期数。

由于在一个周期内同样的循环只发生一次,所以  $n_i = 1$ ,对表 1 内的数据进行计算得

$$D_s = \sum_{i=1}^{15} \frac{1}{N_{fi}} \quad (8)$$

把表 1 中的  $N_{fi}$  代入式(8)计算得  $D_s = 5.74 \times 10^{-10}$ 。

## 5.2 剩余寿命计算

### 5.2.1 曲轴当量转数的计算

汽车在不同路面行驶时,功率和曲轴转速时刻发生变化,所以很难用一个准确的数值说明服役周期内曲轴的转数。本文将正常行驶常用的功率和转速换算成总体服役期限内的当量转数,并以当量转数作为服役周期内曲轴的转数。按车轮直径 0.6m、总体减速比  $C = 4.74$  计算可知,我国现行汽车报废里程为 30 万千米,由  $\pi DN_v / C = 3.0 \times 10^8 \text{m}$  计算得曲轴的当量转数  $N_v = 7.5 \times 10^8$ 。

### 5.2.2 剩余寿命计算

实际消耗寿命

$$D_{ns} = D_s N_v S \quad (9)$$

实际剩余寿命  $D_{rs} = 1 - D_{ns} \approx 0.3$ ,说明该车的曲轴还剩 1/3 寿命,即可再运行 10 万千米。

## 6 结论

(1) 本文把有限元分析方法与疲劳寿命预测相结合,以有限元分析为载荷谱的计算来源,以曲轴的当量转数为寿命预测的评定标准,建立剩余寿命预测方法模型,最终实现了基于裂纹萌生的剩余寿命预测。

(2) 对该曲轴进行有限元分析,采用粗网格进行粗略计算,再对最大应力处的网格细化进行子结构分析,得出曲轴在承受交变循环时应力最大值达到 58.3MPa,且最大处出现在曲拐的圆角处,进而证明曲拐的圆角大小对曲轴的疲劳载荷有很大影响<sup>[9]</sup>。

(3) 按照国家标准规定的汽车报废里程数计算出曲轴的当量转数约为  $7.5 \times 10^8$ ,运行 30 万千米只消耗曲轴寿命的 70%,剩余寿命不足以完成下一个周期,不适合进行再制造。

(4) 曲轴的当量转数的计算直接采用汽车在正常路况下的行驶条件,没有考虑各种路面的曲轴运转情况,因而计算的准确性方面存在一定的问题。如何更准确地计算曲轴的当量转数是该寿命预测方法需要进一步解决的问题。此外,由于该方法没有考虑裂纹扩展的时间,因此对于最终计算的剩余寿命为 1/3 周期偏于保守。

### 参考文献:

[1] 侯静泳,蔡肇云,屠一鹤. TC-11 钛合金高低周复合疲劳及损伤累积研究[J]. 航空动力学报,1992,7(2):134-138.  
[2] Paris P C, Erdogan F. A Critical Analysis of Crack

# 电爆炸喷涂技术用于提高炮管的抗烧蚀性分析

蒋啸林<sup>1</sup> 王燕妮<sup>2,3</sup> 陆 辛<sup>4</sup>

1. 中国兵器工业规划研究院, 北京, 100053      2. 北京联合大学, 北京, 100101  
3. 北京理工大学, 北京, 100081      4. 北京机电研究所, 北京, 100831

**摘要:**为进一步提高火炮身管内膛的抗烧蚀性能,对火炮身管内膛表面改性涂层应具备的特性进行了分析,利用电爆炸喷涂技术制备了涂层,并将其与电镀铬镀层进行了性能对比试验。试验结果表明,利用电爆炸喷涂技术可制备出抗烧蚀性能显著优于镀铬层的涂层。在今后延长火炮身管抗烧蚀寿命研究过程中,运用电爆炸喷涂技术是制备高品质涂层的一种有效方法。

**关键词:**火炮身管;电镀铬;抗烧蚀性;电爆炸喷涂

**中图分类号:**TJ305;TG174.2      **文章编号:**1004—132X(2011)20—2494—04

## Anti-erosion Analysis for Artillery Barrel Coated by Electrical Explosion Spraying Technology

Jiang Xiaolin<sup>1</sup> Wang Yanni<sup>2,3</sup> Lu Xin<sup>4</sup>

1. China North Industries Planning Institute, Beijing, 100053

2. Beijing Union University, Beijing, 100101

3. Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081

4. Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology, Beijing, 100831

**Abstract:** Researches on the mechanism of improving anti-erosion in artillery barrel were done in order to enhance anti-erosion property of artillery barrel. Coating prepared by electrical explosion spraying technology was compared in performance with chrome plating. The experimental results show that coating prepared by electrical explosion spraying technology is significantly better in anti-erosion performance than coating prepared by chrome coating. Electrical explosion spraying technology is an effective method to prepare high quality coating for research of anti-erosion property of artillery barrel.

**Key words:** artillery barrel; chrome coating; anti-erosion; electrical explosion spraying

## 0 引言

随着现代火炮技术的快速发展,弹药效能、膛压和射速等指标不断提高,使得炮管内膛的疲劳损伤和烧蚀等问题更为突出。目前国内外正努力开发更高性能的火炮,这些新武器的膛压和射速等参数都显著高于常规火炮的指标,如何延长炮管的疲劳寿命并提高抗烧蚀性是当今研究和未来

应用中需要解决的关键问题<sup>[1]</sup>。

大多数研究结果认为,火炮内膛主要是在机械—热—化学作用下而失效的,而烧蚀、磨损和疲劳裂纹是炮膛失效的主要原因。自 20 世纪 90 年代中期开始,电渣重熔<sup>[2]</sup>和液压自紧技术<sup>[3]</sup>在我国趋于成熟,现已普遍应用于大中口径火炮身管加工制造,有效地延长了身管的疲劳寿命,相比之下,火炮身管抗烧蚀性能差的问题却相当突出。

收稿日期:2011—05—03

Propagation Laws[J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 528-534.

[3] 何庆庆,罗永要,王正伟,等. 水轮发电机转子疲劳寿命预测分析[J]. 水力发电学报, 2010, 29(6): 223-228.

[4] 张莉,唐立强,付德龙. 基于损伤累积理论的多轴疲劳寿命预测方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(4): 123-125.

[5] 王旭亮,聂宏. 考虑载荷加载顺序的模糊 Miner 理论研究[J]. 中国机械工程, 2008, 22(19): 2725-2727.

[6] 杨连生. 内燃机设计[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1980.

[7] Dowling N-E. Fatigue Failure Predictions for Com-

plicated Stress-strain Histories[J]. Journal of Materials, 1972, 7: 71-78.

[8] 董乐义,罗俊,程礼. 雨流计数法及其在程序中的具体实现[J]. 计算机技术与应用, 2004, 24(3): 38-40.

[9] 诸葛良,李爱军,王明武. 基于三维有限元的曲轴圆角优化设计[J]. 内燃机工程, 2002(2): 47-50.

(编辑 张 洋)

**作者简介:** 宋守许,男,1964年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院副教授。研究方向为绿色设计与绿色制造、产品再资源化、逆向物流等。发表论文 30 余篇。张敬东,男,1987年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院硕士研究生。刘志峰,男,1963年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院教授、博士研究生导师。