

文章编号: 1000-8055(2006) 03-0545-05

航空发动机主轴轴承滚道表面 光饰强化处理

邓四二^{1,2}, 滕弘飞¹, 周彦伟², 马付建², 张志华²
(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116023;
2. 河南科技大学 机械工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 表面改性处理技术是一种提高航空发动机主轴轴承疲劳寿命的有效途径。在表面改性处理理论分析基础上, 提出一种新的航空发动机主轴轴承滚道表面强化处理技术(即光饰强化处理)并研制了相应的光饰强化专用设备——离心强化机, 试验结果表明: 该技术可以有效地提高航空发动机主轴轴承滚道表面硬度, 改善滚道表面粗糙度, 并在滚道接触表层产生残余压应力, 显著地提高航空发动机主轴轴承疲劳寿命和降低疲劳寿命离散性。

关键词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 滚动轴承; 光饰强化; 表面处理; 疲劳寿命

中图分类号: V 232

文献标识码: A

Luster Polish Strengthening for Race Surface of the Mainshaft Bearings of Aeroengine

DENG Si-er^{1,2}, TENG Hong-fei¹, ZHOU Yan-wei²,
MA Fu-jian², ZHANG Zhi-hua²

(1. School of Mechanical Engineering,

Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. School of Mechatronics Engineering,

Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: The technology of surface modification was an efficient way to increase fatigue life of the mainshaft bearing of the aircraft engines. On the basis of theoretical analysis of the surface modification, this paper proposed a new strengthening treatment technology of the raceway surface for the mainshaft bearings (i. e. luster polish strengthening treatment), and designed a corresponding special machine for luster polish strengthening treatment (the centrifugal strengthening machine). The experimental results show that the surface hardness of the raceway is increased and the surface roughness is improved and the residual compression stress is produced on the surface of the raceway, the method of luster polish strengthening can increase notably the fatigue life of the mainshaft bearings and decrease the degree of dispersion of fatigue life.

Key words: aerospace propulsion system; aircraft engines; rolling bearing;

收稿日期: 2005- 08- 30; 修订日期: 2005- 12- 20

基金项目: 国家“十五”重点科技攻关资助(HK- 2002- 043)

作者简介: 邓四二(1963-), 男, 江苏丹阳人, 大连理工大学机械学院博士生, 河南科技大学副教授, 主要从事滚动轴承设计及理论研究。

luster strengthening; surface treatment; fatigue life

作为航空发动机用的支承旋转主轴的关键部件—滚动轴承,其精度、寿命、振动和可靠性等性能指标直接影响着航空飞机的性能和安全,航空发动机主轴轴承延寿技术一直是我国关注的问题。航空发动机主轴轴承的失效形式多表现为滚动轴承套圈的疲劳点蚀失效,因此,提高滚动轴承滚道表面的抗疲劳性是实现航空发动机主轴延寿的一个关键技术。对于航空发动机主轴轴承,其滚道表面在磨加工过程中,由于磨削热而不可避免要在表面产生变质层,使滚道表面层硬度下降15%左右,而且是拉应力层,易产生疲劳裂纹,从而降低航空发动机主轴轴承的疲劳寿命和可靠性。

利用表面强化处理可以极大改善滚动轴承滚道表面层的使用性能,从而提高航空发动机主轴轴承的疲劳寿命。目前适合于轴承滚道表面强化的技术主要有:表面覆层,表面改性和表面机械强化。前两种方法,能明显提高轴承接触疲劳寿命和滚道的耐蚀性,可望在航天飞机主发动机轴承上应用,但存在涂层与基体结合力差,工艺尚不成熟,成本昂贵等到不足。表面机械强化主要包括滚压与喷丸强化。滚压能在工件表面层产生残余压应力,但这种方法易使表面层产生过冷作硬化而变脆,反而降低疲劳寿命。喷丸强化法也是使表层产生冷作硬化和残余压应力,但也存在使表面粗糙度加大及过冷过硬化的问题。本文采用一种新的光饰弹塑性变形强化方法(简称光饰强化法),此方法与滚压法,喷丸法相比,不会引起过冷作硬化和粗糙度加大。它在使滚道表面产生残余压应力、提高表面硬度的同时,还改善了其粗糙度,实验结果表明此强化方法可有效的提高航空发动机主轴轴承的使用使命。

1 光饰强化法提高疲劳寿命的机理

光饰强化法是通过自行研制的行星轮光饰强化机构,使强化填料在离心力作用下,对轴承表面产生微切削,达到光饰效果,同时,强化填料又碰撞套圈滚道表面,使套圈滚道表面层发生弹塑性变形,并使套圈材料组织结构发生变化,引起亚晶粒内位错密度增加,从而提高了套圈材料表面层的显微硬度和疲劳强度^[1,2];其次由于光饰强化将在滚道表面层产生残余压应力,使作用在材料上的最大交变剪应力水平下降,降低了疲劳裂纹的

萌生和扩展速度,使轴承的疲劳强度提高^[3,4];光饰强化法还能改善表面形貌,在工件表面形成带有“油囊”的形貌,从而耐磨损,并有利于疲劳寿命的提高^[5,6];另外,光饰强化可以避免加工表面发生烧伤和其它热缺陷,同时又不会产生强化冷作硬化而导致材料的脆性增加的缺陷。

2 离心式强化机结构及工作原理

为提高光饰强化法的效果和效率,作者设计了如图1所示的离心式强化机,主要由电磁调速电机进行行星转动的圆盘1(系杆)及滚桶2(行星),带动圆盘转动的大皮带轮3,带动滚桶进行自转的行星皮带轮系5,控制滚桶自转与否的离合皮带轮4和操作控制系统,安全保险系统等组成。

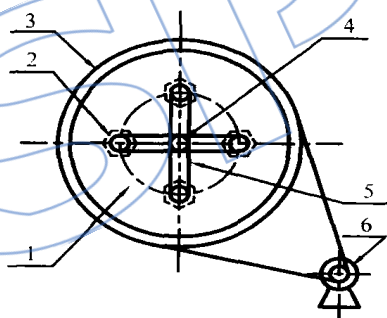


图1 离心强化机结构图

Fig.1 Structure of luster polish machine

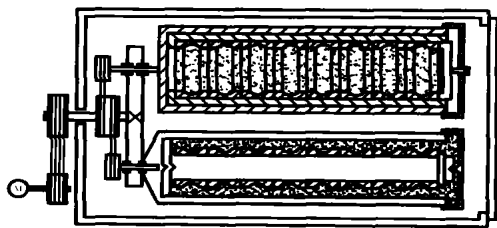


图2 离心强化机串桶结构图

Fig.2 Structure of centrifugal strengthen machine roller

工作原理是在转动圆盘的回转轴心的同心圆上等分地装上滚桶进行行星转动,产生离心力,桶内的钢球和强化液作复杂的运动,对滚道进行碰撞和微切削,从而达到对滚道表面的强化。

待强化加工的内、外套圈,按图2所示装入滚

桶内。采用三角皮带传动减少噪声, 选用无级调速电机可满足强化工艺调整参数的要求, 本装置可加工轴承套圈最大外径为 $\Phi 160\text{ mm}$ 。

3 强化实验

利用该离心式强化机, 进行球轴承套圈滚道表面强化处理实验。

3.1 实验参数的确定

3.1.1 强化液配制及钢球配比

本实验采用以洗洁精、三乙醇胺为主的水溶液, 使用效果很好, 防锈期可达1周。

强化填料应先用硬度值超过滚道硬度的钢球。本实验选用轴承钢球, 经热处理后以上, 抛光或研磨后使用, 不同尺寸钢球的配比经优选后确定为: 30%的 $\Phi 1\sim\Phi 1.5\text{ mm}$ 钢球、20%的 $\Phi 2\sim\Phi 3\text{ mm}$ 钢球、20%的 $\Phi 4\sim\Phi 5\text{ mm}$ 钢球、30%的 $\Phi 8\text{ mm}$ 钢球。

3.1.2 强化机转速

强化机的公转角速度影响轴承表面层的残余应力和显微硬度的大小, 因此应予合理选择。本实验选用的公转角速度为 200 r/min 。

3.1.3 装料量及强化时间

钢球配比确定后, 装球量多少对表面质量影响很大。经优选本实验选用65%的装填钢球量, 强化时间为 $90\sim 120\text{ min}$ 。

3.2 实验结果

3.2.1 残余压应力值及强化层厚度

表层及表面下每隔 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的残余压应力值列于表1, 从表1中可以看出, 强化处理后表面下 $80\text{ }\mu\text{m}$ 仍为压应力, 而一般航空发动机主轴轴承滚道表面变质层厚度小于 $50\text{ }\mu\text{m}$, 因此完全可以消除变质层。

3.2.2 表面显微硬度

强化处理后测量结果表明, 全部套圈表面显微硬度都达到62 HRC 以上(每个套圈在相隔 120° 的3个不同位置各测量1次, 分别为I, II和III), 并且同一套圈显微硬度间差大大缩小, 显著地提高了硬度均匀性(见表2)。

3.2.3 表面粗糙度

用德国霍美尔表面测量仪对滚道强化前、后表面粗糙度值。

表1 表面层下的残余应力值

Table 1 The value of residual stress below surface layer

套圈应力	应力	表面	20 μm 处	40 μm 处	60 μm 处	80 μm 处
外圈	$\delta_{\text{YR}}/\text{MPa}$	- 1 304	- 350	- 159	- 111	- 191
	$\delta_{\text{XR}}/\text{MPa}$	- 1 177	- 191	- 95	- 111	- 159
内圈	$\delta_{\text{YR}}/\text{MPa}$	- 827	- 588	- 80	- 64	- 48
	$\delta_{\text{XR}}/\text{MPa}$	- 1 813	- 1 113	- 96	- 95	- 70

表2 表面层显微硬度 (单位: HRC)

Table 2 Surface microhardness (Unit: HRC)

位置	强化前					强化后				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
I	62.00	58.40	59.50	60.75	63.25	63.88	62.50	64.50	63.88	63.88
II	61.37	58.40	61.37	62.50	62.50	63.88	63.10	63.88	63.25	64.50
III	62.50	59.00	60.00	60.75	60.75	63.88	63.00	63.88	63.88	64.50
平均	61.96	58.60	60.29	61.37	62.17	64.09	62.96	64.09	63.67	64.25
间差	1.13	0.60	1.77	1.75	2.50	0.62	0.60	0.62	0.63	0.62
提高						3.80	4.36	3.80	2.30	2.08

表3 表面粗糙度 (单位:HRC)
Table 3 Surface roughness (Unit: HRC)

位置	强化前					强化后				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
I	0.06	0.05	0.08	0.04	0.08	0.03	0.02	0.03	0.03	0.04
II	0.05	0.03	0.06	0.06	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04
III	0.06	0.04	0.04	0.07	0.06	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04
平均	0.057	0.04	0.06	0.057	0.063	0.03	0.027	0.027	0.03	0.04
间差	0.01	0.02	0.06	0.03	0.03	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
提高						0.027	0.013	0.033	0.027	0.023

测量条件: 扫描速度 $V_t=0.01\text{ mm/s}$; 行程长度 $L_t=1.5\text{ mm}$; 截止波长 $\lambda=0.80\text{ mm}$ 。

每个套圈在 3 个不同位置各测量一次, 每个套圈粗糙度值都下降, 并且单个套圈粗糙度均匀性得到改善, 间差值为 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 以下。测量结果如表 3 所示。

实验及检测表明, 强化的效果较好。

4 接触疲劳寿命对比实验

4.1 实验概述

接触疲劳寿命对比实验是在两台 ZYS-6 型滚动接触疲劳试验机上进行的, 采用滚轮(图3)和试验轴承滚道的点接触对滚疲劳试验, 强化组与未强化组轴承套圈试件各为 20 件, 交替在两台试验机上进行。试验条件下如下: 最大赫兹压力 4.5 GPa ; 转速 $1\text{ }000\text{ r/min}$; 喷油润滑; 30# 机油。

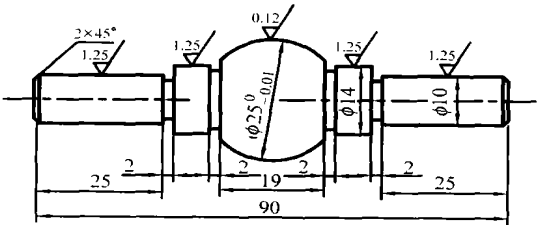


图3 滚轮
Fig.3 Roller

4.2 实验结果

两组试样的疲劳寿命试验结果韦布尔分布曲线见图 4。由图 4 可知: 强化后 L_{10} 寿命提高 0.91 倍, $\tilde{\sigma}$ 值由 1.8 增加到 2.0, 强化后轴承疲劳寿命离散性大大减小。

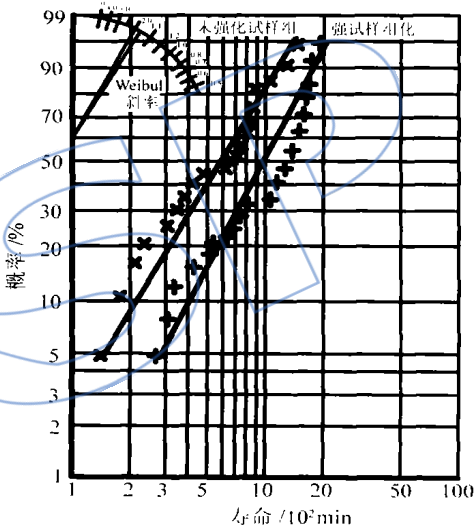


图4 疲劳寿命韦布尔分布曲线
Fig.4 Weibull distribution curve of fatigue

5 光饰强化机理对接触疲劳寿命影响的理论分析

5.1 残余应力对接触疲劳寿命影响计算

残余应力影响滚动接触疲劳寿命的增长率^[7]为:

$$\gamma_1 = \frac{(L_{10})_R}{L_{10}} = \left[\frac{(\delta_{ED})_R}{\delta_{EDR}} \right]^9 - 1$$

式中:

$(L_{10})_R$ ——考虑残余应力影响后的额定寿命;

L_{10} ——不考虑残余应力影响的额定寿命;

δ_{EDR} ——考虑残余应力影响的当量临界应力, 由文献[8]可求得: $\delta_{EDR}=1\text{ }286\text{ MPa}$

δ_{ED} —— 不考虑残余应力影响的当量临界应力, 其值与最大接触触赫兹应力 P_0 有以下关系^[9]: $\delta_{ED} \approx 0.3P_0$

5.2 硬度对接触疲劳寿命影响计算

强化后硬度影响滚动接触疲劳寿命的增长率^[10]为:

$$\gamma_2 = \frac{L_2}{L_1} = e^{0.1(HRC_2 - HRC_1)} - 1$$

试样强化前的平均硬度 $HRC_1 = 61.02$, 强化后的平均硬度 $HRC_1 = 63.01$ 。

5.3 表面粗糙度对接触疲劳寿命影响的计算

当强化前后的材料、使用工况、当量动负荷、额定动负荷及最小油膜厚度都相同时, 表面粗糙度影响滚动接触疲劳寿命的增长率^[11]为:

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = \left[\frac{0.3 \times 4\,500}{1\,286} \right]^9 + e^{0.1 \times (63.01 - 61.02)} + \left[\frac{(0.055\,4 \times 1.25)^2 + (0.12 \times 1.25)^2}{(0.030\,8 \times 1.25)^2 + (0.12 \times 1.25)^2} \right]^{0.27} - 3 = 0.924\,2 = 92.42\%$$

由上述理论分析可知, 光饰强化工艺可使试样的接触疲劳寿命提高92.42%, 与接触疲劳寿命试验结果相符合。

6 结 论

(1) 光饰强化处理可使滚动轴承套圈表面层产生残余应力, 残余应力深度可达80 μm 以上, 从而有效地消除了轴承套圈滚道表面的磨加工形成的变质层, 可有效地提高轴承接触疲劳寿命。

(2) 光饰强化处理可提高套圈滚道表面的硬度, 经过光饰强化后的表面硬度可达62HRC 以上并且滚道表面硬度均匀性也得到明显的改善。

(3) 光饰强化处理可改善套圈滚道表面粗糙度, 光饰强化处理后的滚道表面粗糙度有明显的降低并且均匀性也得到明显的改善。

(4) 光饰强化处理技术可使航空发动机主轴轴承套圈的接触疲劳寿命提高90%左右, 本文所提的光饰强化处理工艺也可广泛用于其它轴承套圈加工中。

参考文献:

[1] 朱刑璞. 金属表面强化技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.

[2] Harris T A. Rolling Bearing Analysis[M]. John Wiley & Sons, Inc., 2001.

[3] Scott R L, Kepple R K, Miller M H. The Effect of

$$\gamma_3 = \frac{L_2}{L_1} = \left[\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2}{\delta_1^2 + \delta_2^2} \right]^{0.27} - 1$$

式中: L_1 和 L_2 分别为强化前、后试样的额定寿命; δ_1 和 δ_2 分别为强化前试样、滚轮表面粗糙度值均方根偏差; δ_1 和 δ_2 分别为强化后试样、滚轮表面粗糙度值均方根偏差。

粗糙度值的均方根偏差与粗糙度之间的关系^[11]为:

$$\delta = 1.25R_a$$

这里试样强化前的粗糙度 $R_a = 0.0554\,\mu\text{m}$;
试样强化后的粗糙度 $R_a = 0.0308\,\mu\text{m}$;
滚轮的粗糙度 $R_a = 0.12\,\mu\text{m}$ 。

5.4 光饰强化工艺对接触疲劳寿命影响的计算

光饰强化工艺对试样接触疲劳寿命总的增长率为:

Processing Induced Near Surface Residual Stress on Ball Bearing Fatigue [M]. In Bidwell J. B. (Ed.), Rolling Contact Phenomena, Elsevier, Amsterdam, 1962: 301~316.

[4] Guo Y B, Mark E Barkey. FE-Simulation of the Effects of Machining-Induced Residual Stress Profile on Rolling Contact of Hard Machined Components[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004(46): 371~388.

[5] 刘锁编著. 金属材料的疲劳性能与喷丸强化工艺[M]. 北京: 国防工业出版社, 1977.

[6] 斯·伊·费什次茵. 滚动轴承套圈滚道表面塑性变形强化处理的新方法[J]. 国外轴承, 1985(3): 46~57.

Feishiciyin S Y. New Method of Surface Plastic Deformation Strengthen Disposal on Rolling Bearing Raceway[J]. Foreign Bearing, 1985(3): 46~57.

[7] Parker R J, Zaretsky E V. Reevaluation of the Stress Life Relation in Rolling Element Bearing[R]. NASA Contract E6768, 1972.

[8] Popinceanu N G, Diaconescu E, Cretu Sp S. Critical Stresses in Rolling Contact Fatigue[J]. Wear, 1981(71): 265~282.

[9] Cretu Sp S, Popinceanu N G. The Influence of Residual Stresses Induced by Plastic Deformation on Rolling Contact Fatigue[J]. WEAR, 1985, 105: 153~ 170.

[10] Zaretsky E V, Parker R J, et al. Effect of Component Differential Hardnesses on Residual Stress and Rolling Contact Fatigue[R]. NASA Tech., Note., TN-D 2664, 1965.

[11] Popinceanu N G, Gafitanu M D, et al. Rolling Bearing Fatigue Life and EHL Theory[J]. Wear, 1977(45): 17~32.