

双元素离子注入机及其在航空发动机 主轴轴承上的应用

王锦辉¹ 梁 华² 明建川¹ 过骐千¹ 丁 伽¹ 徐志潜¹ 金 杰¹ 朱启良¹ 白玉兰¹

1 (北京机械工业自动化研究所 北京 100011)

2 (洛阳轴承研究所 洛阳 471039)

摘要 为了延长航空发动机主轴轴承的使用寿命,在自制的双元素离子注入机上对 GCr15 和 M50 两种轴承钢材料的试样、轴承试验件和正式轴承零件进行了双元素离子注入,注入能量为 100 keV。经检测, GCr15 和 M50 两种材料经 N、Ti 两种元素注入后,摩擦系数和耐磨损、耐腐蚀、抗疲劳等性能都得到了显著提高。轴承的内外套圈、滚柱和钢球注入的均匀性都达到了 87% 以上。

关键词 离子注入, 航空发动机, 主轴轴承, 耐磨损, 耐腐蚀

中图分类号 TG174.445, V229.2

航空发动机主轴轴承的损坏会引起机毁人亡的严重后果。这些损坏通常由表面磨损、腐蚀和表层接触疲劳引起。因此,提高轴承钢的耐磨、耐蚀和表层抗疲劳性能,具有十分重要的意义。

金属材料表面层的物理结构和化学成分,对上述摩擦、磨损、腐蚀等性能和表层接触疲劳寿命具有决定性的影响。设法改变金属材料的表面成分、组织或结构,就有可能改善材料的上述性能。离子束表面改性技术可解决上述问题,发展至今已数十年^[1]。离子注入技术具有不改变零件尺寸、注入层不会剥落以及可控性好等优点,国内外都在进行其在航空轴承等精密零件上的应用研究^[2-8]。

我们曾将氮离子重叠注入技术成功地应用于航空发动机主轴轴承的寿命延长。在发动机台架试验中,离子注入主轴轴承寿命提高到 1.5 倍以上;装飞机试飞后寿命也超过原寿命的 1.5 倍;地面使用的燃气轮发动机主轴轴承,经离子注入后,运行时间达原寿命的 2.5 倍后尚有剩余寿命^[3,4]。

为进一步提高某航空发动机主轴轴承的寿命,我们研制了双元素离子注入机,进行了主轴轴承材料试样、轴承试验件和正式轴承零件的离子注入工艺试验。本文介绍这些新进展。

1 注入机

离子注入机大体上可分为束线型和全方位两大类。束线型注入机与全方位注入机相比,具有以下优点:

(1) 注入离子的成分较纯;(2) 较准确地测量注入工件上的束流密度;(3) 较准确地控制离子注入的剂量;(4) 较易控制工件基体的温度;(5) 只要零件夹具设计得好,能获得较好的注入均匀性。

束线型注入机的测量准确性高、可控性好、注入质量好,尤宜于航空轴承等精密零件的改性。此注入机(图 1)的靶内腔为 $\phi 700 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$,采用涡轮分子泵,靶室极限真空度为 $1.5 \times 10^{-4} \text{ Pa}$,内设直射平面靶、斜靶、钢球注入专用靶等工作靶台,靶直径可达 $\phi 300 \text{ mm}$ 。离子源和工件靶的冷却用循环去离子纯净水,水温低于 10°C (恒温)。

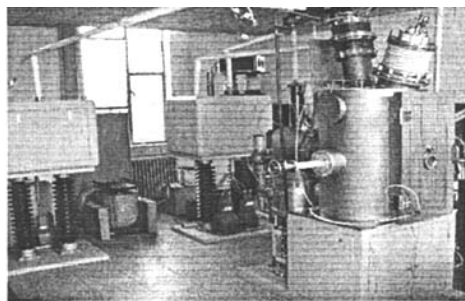


图 1 100 keV 离子注入机
Fig.1 The 100 keV implanter

采用金属和气体两种离子源。金属离子源为 MEVVA 源,气体离子源为宽束高能永磁微波离子源^[9,10]。两离子源引出的离子束流均 $> 20 \text{ mA}$,能量 $0 \sim 100 \text{ keV}$ 可调,束斑直径 $\phi > 300 \text{ mm}$ 。

微波离子源采用永久磁铁,结构简单、体积小;采用四电极引出系统,引出电压能稳定于 100 kV。微波源具有寿命长(此离子源已稳定运行一年半)、电离效率高、气耗量小($N_2 \leq 3$ SCCM)和工作时的真空度高(优于 2×10^{-3} Pa)等优点,从而提高了注入质量和工作时间的利用率。

2 试验步骤和方法

先进行平面试样工艺试验,确定工艺参数。再进行轴承零件注入试验,验证注入离子分布、离子浓度、零件变形、基体是否回火、表面粗糙度变化以及接触疲劳寿命等。最后进行轴承产品注入改性。

试样为 GCr15、M50 两种轴承材料,基体硬度为 HRC62,表面经金相抛光。注入元素取 N+Ti、N+Cr、N 和 N+Ti+C 四种组合。用微波源进行氮离子注入,能量 100 keV,注入剂量 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$;用 MEVVA 源注入 Ti、Cr、C 等元素,引出电压 50 kV,注入量 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$,在垂直平面靶上进行注入。

轴承的内外套圈和滚柱在水冷旋转斜靶上进行注入(图 2)。钢球用专用夹具固定在垂直平面靶上,注入时钢球在两个相互垂直的方向滚动(图 3),并确保钢球的表面粗糙度不降低。

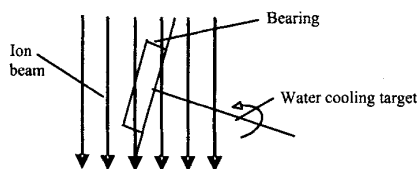


图 2 轴承套圈注入
Fig.2 Implantation of bearing rings

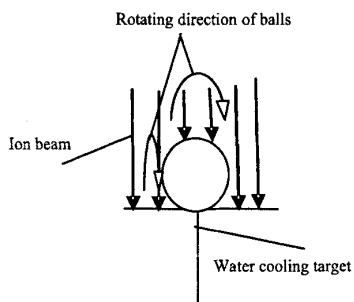


图 3 钢球注入
Fig.3 Implantation of balls

3 试样的试验结果及分析

3.1 摩擦和耐磨损性能

轴承材料的耐磨性是最重要的性能指标。摩擦磨损试验采用 SRV 高温磨损试验机(Optimel)。试验条件:室温、无润滑干摩擦;陪试球: $\phi 10$ mm、GCr15 钢;载荷: 5 N、频率 10 Hz、行程 1.5 mm;磨损时间: 90 s。磨损后的试样采用 P-120 型表面形貌仪测量磨损量。结果如下:

注入 N、N+Ti、N+Cr、N+Ti+C 以及未注入的 GCr15 材料试样的摩擦系数见图 4。

注入 N、N+Ti、N+Cr 和未注入的 M50 材料试样摩擦系数见图 5。

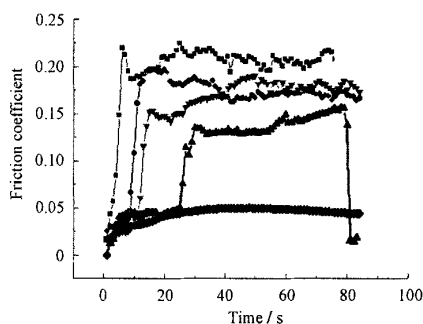


图 4 GCr15 钢的摩擦系数

Fig.4 Friction coefficient of GCr15 steel

■: Non-implanted, ●: Implanted N, ▲: Implanted N+Ti,
▼: Implanted N+Cr, ◆: Implanted N+Ti+C

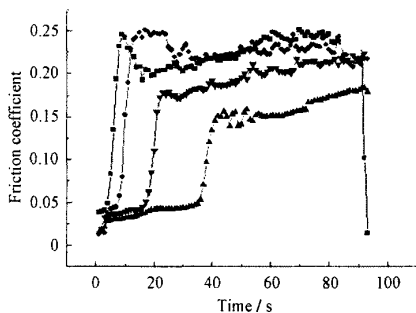


图 5 M50 钢的摩擦系数

Fig.5 Friction coefficient of M50 steel

■: Non-implanted, ●: Implanted N, ▲: Implanted N+Ti,
▼: Implanted N+Cr

由图可看出,两种材料经离子注入后,其摩擦系数无论在注入层磨破之前或之后,都比未注入的小。其中,注入 N+Ti+C 的 GCr15 试样最好,膜层未见磨破,摩擦系数保持在 0.05,其次是注入 N+Ti,两种材料的膜层的耐磨时间都较长。尔后依次是注入 N+Cr 和注入纯氮。

轮廓仪测量的磨痕截面积见表 1。以磨损量衡量材料的耐磨性能，可以看出：

(1) GCr15 轴承钢注入 N+Ti+C (081)试样后，耐磨性能比未注入试样(075)提高 60 倍。

(2) 注入 N+Ti 后，GCr15 轴承钢耐磨损性能提高 2 倍，M50 轴承钢耐磨损性能提高 7 倍。

(3) 注入 N+Cr 后，GCr15 轴承钢耐磨损性能提高 2 倍，M50 轴承钢耐磨损性能提高 6.4 倍。

表 1 两种材料的磨痕截面积
Table 1 Wear track area of the GC15 and M50 samples

试样号 Samples	材料 Material	注入元素 Implanted species	磨痕截面积平均值 Averaged wear area / μm^2
075	GCr15	None	198.7 ± 5.4
071	GCr15	N+ Ti	66.2 ± 24.6
087	GCr15	N+Cr	66.6 ± 2.3
105	GCr15	N	138.3 ± 1.5
081	GCr15	N+Ti+C	3.2
M47	M50	None	170.1 ± 6.9
M40	M50	N+Ti	24.2 ± 1.8
M37	M50	N+Cr	26.4 ± 3.2
M38	M50	N	50.5 ± 3.7

由此可见,多元素复合注入与单元素注入相比，提高耐磨损性能的效果更显著。由于 N+Ti 的注入工艺稳定、实用性强，已能满足需要，下文重点对注入 N+Ti 的试样进行其他性能检测。

测量误差很大，因此采用 10 g 载荷进行测量。测量结果是基体和注入层的复合硬度。此结果虽然不能完全表征注入层的硬度，但可在一定程度上反映出离子注入的效果。

3.2 显微硬度

离子注入层仅 0.15 μm 左右，测量显微硬度的载荷若太大，注入层很易被压穿；但载荷太小，则

离子注入 GCr15 试样与未注入试样的表面显微硬度(HV)的测量数据(表 2)表明双元素(N+Ti)注入的表面显微硬度优于单元素(N)注入。

表 2 GCr15 试样的显微硬度(HV)(载荷为 10 g)
Table 2 HV hardness of GCr15 samples implanted with 100 keV Ti+N ions

试样号 Sample's No	注入元素 Implanted species	注入量 Dose / 10^{17} cm^{-2}	显微硬度 Hardness / HV
079	None	—	760
086	N	3	949
088	N	3	1078
	Ti	2	

3.3 耐腐蚀性能

将注入 N+Ti 与未注入的 GCr15 和 M50 试样放进盐雾箱，用 5%的 NaCl 溶液连续喷雾，在 80 cm^2 面积上盐雾沉降量 1~2 mL/h。试验温度 35℃。1.5 h 后取出清洗、观察，未注入的 108 号 GCr15 试样和 M97 号 M50 试样均出现明显的锈点(图 6)。而注入

N+Ti 的 077、073、M44 号试样，基本未见锈点。将 077、073、M44 试样继续腐蚀 125 h，清洗后仍无锈斑；165 h 腐蚀后，开始出现锈斑。如将试样表面出现清洗不掉的锈斑的时间作为耐盐雾腐蚀试验的指标，离子注入的轴承钢试样比未注入的耐腐蚀性能提高 80 倍。

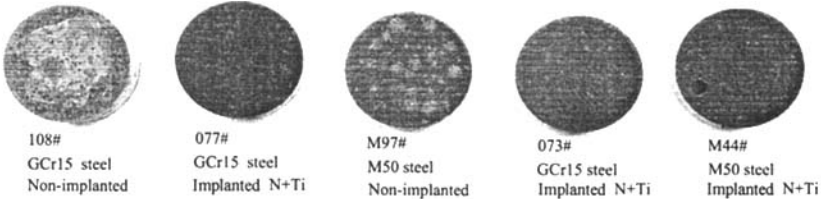


图 6 试样腐蚀 1.5 h 后的结果
Fig. 6 Result of the 1.5 h corrosion test

3.4 俄歇电子能谱分析

N+Ti 注入 GCr15 钢样表面元素的原子百分比和深度分布由 PHI-610/SAM(扫描俄歇微探针,溅射速率为 300 Å/min)测定(图 7),图上的 N 峰(实为 N 和 Ti 第一个峰之和)超过 30%。杂质元素 O、C 分布在表面,离子注入深度约为 0.15 μm。

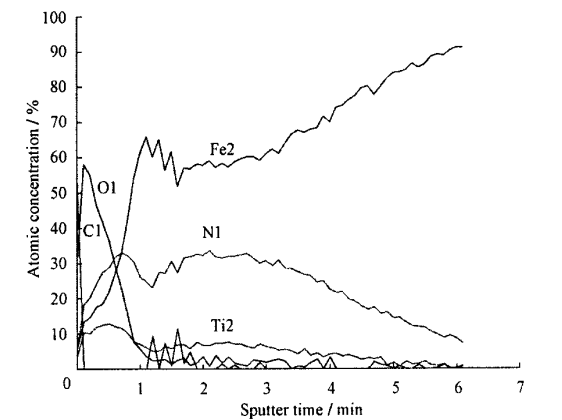


图 7 GCr15 钢注入 N+Ti 后的俄歇电子能谱
Fig.7 Auger electron spectroscopy depth profiles acquired from GCr15 sample

4 轴承零件和轴承产品的注入效果

4.1 接触疲劳寿命

对注入后的钢球采用五球式 TLP 接触疲劳试验机进行接触疲劳试验。试验数据采用韦布尔(Welbull)分布[P(破坏概率)-N(寿命转数)]曲线法进行处理^[11]。结果见图 8 和表 3。

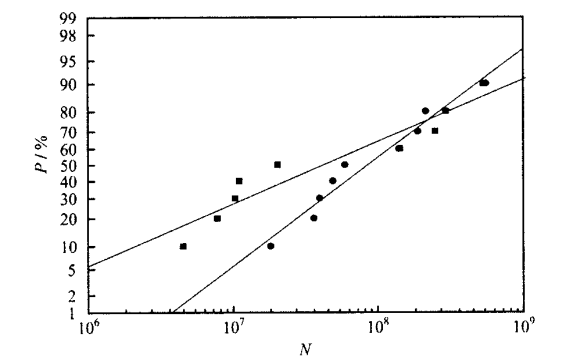


图 8 钢球接触疲劳 P-N 曲线
Fig.8 P-N curve of contact fatigue of balls
■: No-implantation, ●: Implantation N+Ti

表 3 钢球接触疲劳寿命试验结果
Table 3 The test results of fatigue life of ball samples

钢球 Ball samples	斜率参数 <i>b</i> Slope parameters <i>b</i>	特征寿命 <i>V_s</i> Characteristic life <i>V_s</i>	额定寿命 <i>L₁₀</i> Rating life <i>L₁₀</i>	中值寿命 <i>L₅₀</i> Median life <i>L₅₀</i>
注入 N+Ti Implanted N+Ti	1.222817725	13.2355×10 ⁷	2.10137×10 ⁷	9.80782×10 ⁷
未注入 Non-implanted	0.624418148	11.3047×10 ⁷	0.307688×10 ⁷	6.28556×10 ⁷

由图 8 和表 3,与未注入的钢球相比,N+Ti 离子注入钢球的接触疲劳寿命大为提高,其额定寿命(*L*₁₀)提高 5.83 倍,中值寿命(*L*₅₀)提高 0.56 倍。此外,*P-N* 曲线的斜率也增大了 95.8%,说明其离散性大大减小,可靠性显著增大。这对于可靠性要求很高的航空轴承尤为重要。

4.2 注入均匀性

在注入零件的工作表面任取几点,用扫描俄歇微探针分析注入表面层注入离子浓度的分布。计算结果表明,各轴承零件的注入离子浓度均匀性最小为 87%,钢球的均匀性达 89.3%。

4.3 轴承产品的注入

航空发动机主轴轴承注入后,经轴承生产厂检测,尺寸精度完全合格。等待进行台架试验。

5 结论

- (1) 此双元素离子注入机已成功用于对航空发动机主轴轴承的双元素离子注入的工艺研究。
- (2) N+Ti 注入的 GCr15 和 M50 轴承钢的耐磨损、耐腐蚀性能都获显著提高。
- (3) 轴承零件注入后,其尺寸、表面粗糙度均未改变。离子浓度分布均匀性>87%,抗接触疲劳性能也有很大提高。

参考文献

1 Hartley N E W. Wear, 1975, 34: 427—438
2 Klingenberg M, Arps J, Wei R, et al. Surf Coat Technol, 2002, 158—159: 164—169
3 过骥千, 厉学文, 吴玉珍, 等. 97 全国荷电粒子源粒子束学术会议论文集, 1997. 146—148
GUO Qiqian, LI Xuewen, WU Yuzhen, et al. Symposium on charged particle sources and beams, 1997. 146—148

- 4 厉学文. 97 全国荷电粒子源粒子束学术会议论文集, 1997. 282—285
LI Xuewen. Symposium on charged particle sources and beams, 1997. 282—285
- 5 Dodd A, Kinder J, Torp B, *et al.* Surf Coat Tech, 1995, **74**—75(2): 754—759
- 6 陈 锦. 四川大学学报(工程科学版), 2003, **35**(5): 80—83
CHEN Jin. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2003, **35**(5): 80—83
- 7 陈 锦. 西南石油学院学报, 2003, **25**(6): 84—86
CHEN Jin. Journal of Southwestern Petroleum Institute, 2003, **25**(6): 84—86
- 8 TANG Baoyin, WANG Yuhang, WANG Langping. Surf Coat Technol, 2004, **186**(2): 153—156
- 9 明建川, 王锦辉, 过骥千, 等. 核技术, 2006, **29**(2): 102—104
MING Jianchuan, WANG Jinhui, GUO Qiqian, *et al.* Nucl Tech, 2006, **29**(2): 102—104
- 10 MING Jianchuan, GUO Qiqian, DING Jia, *et al.* Rev Sci Instrum, 2006, **77**: 03A315
- 11 靳九成, 赵传国. 磨削变质层及表面改性. 长沙: 湖南大学出版社, 1988. 116—121
JIN Jiucheng, ZHAO Chuanguo. Grinding affected layer and surface modification. Changsha: Hunan University Press, 1988. 116—121

Dual species implanter and application on gas turbine engine main shaft bearings

WANG Jinhui¹ LIANG Hua² MING Jianchuan¹ GUO Qiqian¹ DING Jia¹ XU Zhiqian¹
JIN Jie¹ ZHU Qiliang¹ BAI Yulan¹

1 (Beijing Research Institute of Automation for Machinery Industry, Beijing 100011, China)

2 (Luoyang Bearing Research Institute, Luoyang 471039, China)

Abstract In order to extend service life of the main shaft bearing of turbine engines, GCr15 and M50 steel samples and bearings were implanted with 100 keV N and Ti ions. Properties of the implanted samples were determined. The results show that the friction coefficient, wear resistance, corrosion resistance and fatigue resistance are enormously improved by the N + Ti ions implantation. Implantation uniformity of the balls, rollers and rings of the bearing is over 87%. The implanted bearing has stood the proof by the production enterprise.

Key words Ion implantation, Gas turbine engine, Main shaft bearings, Wear resistance, Corrosion resistance

CLC TG174.445, V229.2