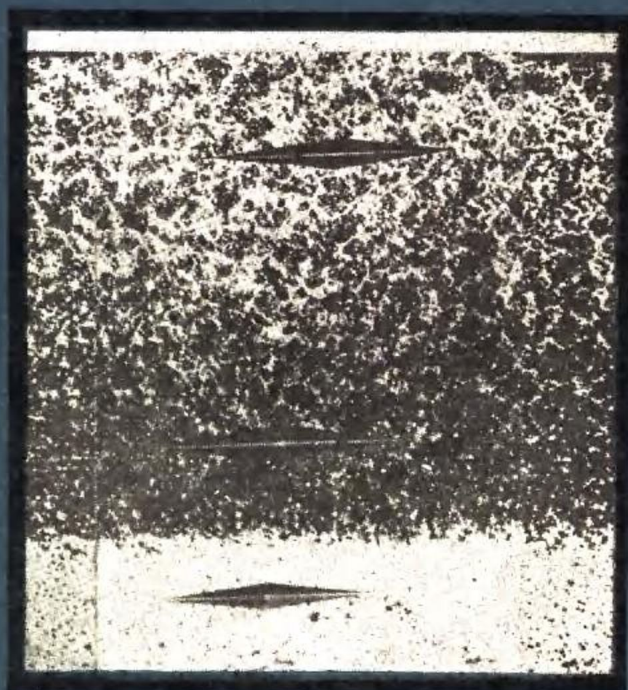


靳九成 赵传国 等编 著

# 磨削变质层及表面改性

Moxiao Bianzhiceng Ji Biaomian Gaixing



H133.3

9

湖南大学出版社

TH153.3

19

3

# 磨削变质层 及 表面改性

靳九成 赵传国 等编著

GRINDING AFFECTED LAYER  
&  
SURFACE MODIFICATION

by Jin Jiucheng Zhao Chuanguo et al.

湖南大学出版社

Hunan University Press

49261

## 内 容 简 介

磨削变质层是因磨削造成材料表面微观组织发生变化的表面层，它直接损害材料和产品的机械性能。轴承表面变质层严重影响着轴承的使用寿命，人们总希望消除它。由于变质层薄，且呈梯度变化，目前国内外对它的系统研究报导较少。

本书是作者近年来应用显微硬度、光学金相、电镜、X射线衍射、俄歇电子能谱、X射线光电子谱等现代表面分析测试手段，从事轴承工作表面磨削变质层微观结构研究、优化磨削工艺、减少和消除变质层研究及离子注入表面强化等系统研究成果的总结；同时还概括了国内外这方面的近年报道；对新发展起来的电子能谱技术、离子注入技术也做了实用性介绍，以便阅读。

本书对从事轴承研究和生产的科技人员具有现实的技术价值；对从事材料表面科学研究、磨削表面质量研究的科技人员、大专院校教师、研究生、高年级学生也具有参考价值。

## 磨削变质层及表面改性

靳九成 赵传国 等 编著

★

湖南大学出版社出版发行

(长沙市岳麓山)

湖南省新华书店经销 湖南大学印刷厂印刷

★

787×1092 毫米 16开 11印张 254千字

1988年5月第1版 1988年5月第1次印刷

印数：0001—3700册

ISBN 7—314—00218—5/T·38

定价：3.25元

# Grinding Affected Layer & Surface Modification

## ABSTRACT

Grinding affected layer is a layer in which the microstructure of material has been changed by grinding. It affects the mechanical properties of materials and products directly. The existence of affected layer on bearing surface causes its service life to decrease considerably, and people are always desirous to eliminate it. In view of the affected layer is very thin and decreasing gradually, until now few systematical reports in this field could be found domestically or abroad.

Of late years, the authors have been working on the microstructure analysis of grinding affected layer on bearing surfaces by means of microhardness measurement, metallography, electron microscopy, X-ray diffraction, Auger electron spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, and on the studies of optimizing grinding process, of diminishing or eliminating the affected layer, and of strengthening the surface with ion implantation. This book is mainly the investigating summary and outlined some recent reports concerned at home and abroad, besides, a practical introduction about modern electron energy spectroscopy and ion implantation technology was also included.

This book has been written for scientists and advanced technicians who are working on bearing research and production and it could be a reference book for college teachers, graduate students and senior students.

The book is written by prof. Jin Jiuching Applied Physics Dept., Hunan Univ., and senior engineer Zhao Chuanguo, Luoyang Bearing Research Institute, et al.

## 前 言

在现代工业、农业、科技和国防建设中,轴承应用极广。一旦轴承早期失效,将影响到整个工作系统的正常运转和可靠性。提高我国轴承、尤其是在航天、航空、航海、核工业和其他特种领域中轴承的寿命和可靠性,已成为目前轴承科学研究的急迫任务。

轴承失效主要发生在工作表面和表面层。因磨削造成材料表面微观组织发生变化的表面层称为磨削变质层,它直接损害着材料和产品的工作性能。磨削往往是轴承的终加工工序,严重地影响着轴承的寿命;因而分析和研究磨削变质层及其消除方法,成为提高轴承寿命和可靠性的关键性课题之一。但由于变质层薄,且呈梯度变化,形成原因复杂,不易分析,目前国内外对它的系统研究报道尚少。

近期我国对表面磨削变质层的研究进展较大。本书是洛阳轴承研究所和湖南大学的赵传国、靳九成、陈焕中、吴景升、朱正华、宋新玉、王柏林等近年来应用显微硬度、光学金相、电镜、X射线衍射、俄歇电子能谱和X射线光电子能谱等现代表面分析研究手段,从事轴承工作表面磨削变质层微观结构研究、优化磨削工艺、减少和消除变质层及应用离子注入法强化轴承工作表面等系统研究的总结;同时也概括了国内外这方面的近年报道。在此奉献给从事轴承研究和生产的朋友们,希望有益于我国轴承事业的发展;同时也希望对从事材料表面科学、磨削表面质量研究的科技人员、大专院校师生有所裨益。为便于阅读,对新近发展起来的电子能谱分析、离子注入技术作了实用性介绍。

本书第1章由赵传国、靳九成撰写,赵传国主笔;第2、5章由赵传国、陈焕中撰写,赵传国主笔;第3章由靳九成、吴景升撰写,靳九成主笔;第4、8章由靳九成撰写;第6章由靳九成、王柏林撰写,靳九成主笔;第7章由靳九成、陈焕中撰写。全书由靳九成统稿。

本书先后承蒙国家机械工业委员会通用局总工万长森高级工程师、洛阳轴承研究所副总工贾刚高级工程师审阅,提出宝贵意见,在此一并致谢。

由于作者水平有限,本书内容跨多个学科,不足和错误之处在所难免,尚祈读者、学者们指正。

作 者 一九八八年五月

# 目 录

## 前 言

### 第 1 章 概 论

1.1 滚动轴承的结构及工作条件对材料性能的要求	(1)
1.2 轴承失效的主要形式	(3)
1.2.1 接触疲劳失效	(3)
1.2.2 磨损失效	(5)
1.2.3 腐蚀失效	(5)
1.2.4 塑性变形失效	(5)
1.2.5 断裂失效	(5)
1.2.6 游隙变化失效	(6)
1.3 轴承钢的冶金质量和热处理质量	(6)
1.3.1 轴承钢的冶金质量控制	(6)
1.3.2 轴承钢的热处理及其质量控制	(7)
1.4 滚动轴承的工作表面变质层	(8)
1.4.1 磨削加工过程中轴承表面的温度分布	(10)
1.4.2 轴承滚道磨削变质层的类别	(11)
参考文献	(12)

### 第 2 章 滚动轴承工作表面变质层的金相分析

2.1 轴承滚道磨削表面的形貌分析	(13)
2.2 表面变质层金相分析的取样、取样特点	(18)
2.3 显微硬度法在表面变质层分析中的应用	(19)
2.4 表面变质层的金相分析	(25)
2.5 表面取膜和电子显微镜分析	(30)
参考文献	(34)

### 第 3 章 轴承工作表面磨削变质层的 X 射线衍射研究

3.1 研究磨削变质层相组织随深度变化的原理及基本公式	(35)
-----------------------------	------

3.1.1 相分析本征强度法	(36)
3.1.2 真实重量百分比分布递推公式	(39)
<b>3.2 轴承表面磨削变质层相结构试验研究</b>	<b>(40)</b>
3.2.1 样物制备	(40)
3.2.2 物相测试和计算结果	(40)
3.2.3 分析和讨论	(40)
<b>3.3 轴承磨削表面残余应力的分析</b>	<b>(44)</b>
3.3.1 磨削方式与残余应力的关系	(44)
3.3.2 磨削顺序与表面残余应力关系	(46)
3.3.3 磨削液的作用	(46)
3.3.4 磨削表面残余应力与材质关系	(46)
<b>参考文献</b>	<b>(47)</b>

## 第 4 章 轴承表面氧化膜的电子能谱研究

<b>4.1 实用俄歇电子能谱(AES)</b>	<b>(48)</b>
4.1.1 AES的基本物理过程	(48)
4.1.2 Auger 信号的检测	(50)
4.1.3 AES的定量分析	(51)
4.1.4 AES中所反映的化学信息	(52)
4.1.5 AES的深度剖面分析	(53)
<b>4.2 实用X 射线光电子谱(XPS)</b>	<b>(54)</b>
4.2.1 XPS的基本物理过程	(55)
4.2.2 化学位移	(56)
4.2.3 电子能量分析器	(57)
4.2.4 XPS的定量分析	(58)
4.2.5 XPS的数据处理和谱峰解叠	(59)
<b>4.3 轴承表面氧化膜的AES分析</b>	<b>(63)</b>
4.3.1 样品和仪器	(63)
4.3.2 表面氧化膜原子浓度的 AES—PRO 分析	(63)
<b>4.4 轴承表面氧化膜的XPS研究</b>	<b>(64)</b>
4.4.1 样品和仪器	(64)
4.4.2 氧化膜厚度与轴承性能的关系	(64)
4.4.3 氧化膜的组分和结构	(66)
4.4.4 氧化膜组分的定量分析	(68)
4.4.5 讨论和结论	(69)
<b>参考文献</b>	<b>(72)</b>

## 第 5 章 轴承工作表面变质层的磨削工艺因素分析

5.1 磨削加工及其工艺因素	(75)
5.1.1 磨削能量	(75)
5.1.2 磨削温度	(75)
5.1.3 磨削热引起的表面损伤	(75)
5.2 磨削工艺试验及其参数的选择	(77)
5.2.1 磨削工艺试验的参数选择	(78)
5.2.2 磨削工艺试验	(81)
5.3 试验套圈滚道表面的磨削变质层分析	(84)
5.3.1 滚道表面形貌分析	(85)
5.3.2 滚道表面层显微硬度分布曲线的测试	(86)
5.3.3 金相分析	(88)
5.4 影响磨削变质层的工艺因素讨论	(90)
5.4.1 影响磨削表面质量的主要工艺因素	(90)
5.4.2 主要因素的转化	(91)
5.4.3 沟磨工艺因素的特殊性	(91)
5.4.4 现行磨削工艺的优化	(91)
参考文献	(93)

## 第 6 章 轴承工作表面的现代强化

6.1 表面强化技术概况	(94)
6.2 激光和电子束表面强化	(94)
6.2.1 激光表面强化	(94)
6.2.2 电子束表面强化	(96)
6.3 气相沉积表面强化	(97)
6.3.1 真空蒸发	(97)
6.3.2 溅射镀	(97)
6.3.3 离子镀	(97)
6.3.4 化学气相沉积 (CVD)	(98)
6.3.5 气相沉积膜强化轴承表面的应用	(98)
6.4 离子注入表面强化的特点	(99)
6.5 离子注入的射程、浓度分布和损伤分布	(101)
6.5.1 离子注入的射程	(101)
6.5.2 注入原子的浓度分布	(102)
6.5.3 离子注入的损伤分布	(104)



6.6 离子注入工艺的演化	(105)
6.6.1 反冲注入 (RI)	(105)
6.6.2 动态反冲注入 (DRI)	(105)
6.6.3 离子束混合	(105)
6.6.4 轰击扩散镀层 (BDC)	(106)
6.6.5 重叠注入	(106)
参考文献	(107)

## 第 7 章 离子注入用于轴承钢表面改性的试验研究

7.1 离子注入强化轴承钢表面硬度的试验研究	(108)
7.1.1 离子注入试样表面硬度的测定	(108)
7.1.2 离子注入 GCr15 试样显微硬度试验	(109)
7.2 离子注入强化轴承钢表面耐磨性的试验研究	(110)
7.2.1 实验室常用的磨损试验机	(111)
7.2.2 磨损试验的测定	(112)
7.2.3 磨损试验的定量评定	(112)
7.2.4 离子注入轴承钢的耐磨性试验研究	(113)
7.3 氮离子注入 GCr15 钢的接触疲劳试验研究	(116)
7.3.1 接触疲劳试验机	(116)
7.3.2 接触疲劳试验的数据处理方法	(117)
7.3.3 氮离子注入 GCr15 钢的接触疲劳试验研究	(121)
7.4 离子注入轴承钢的耐蚀性研究	(121)
7.4.1 金属腐蚀的基本概念	(121)
7.4.2 离子注入纯 Fe 的电极化特性研究	(126)
7.4.3 离子注入高温轴承钢 M50 的耐蚀性研究	(128)
参考文献	(130)

## 第 8 章 氮离子注入强化轴承表面的微观机理

8.1 Fe—N 系统形成氮化物的一般规律	(131)
8.2 N <sup>+</sup> 重叠注入 GCr15 钢表面的 AES—PRO 分析	(133)
8.2.1 样品和仪器	(133)
8.2.2 AES—PRO 分析	(133)
8.3 氮离子重叠注入 GCr15 钢表面的 XPS—PRO 分析	(134)
8.3.1 样品和仪器	(134)
8.3.2 注入表面氧化膜的结构和厚度	(134)
8.3.3 氮注入层中的相分析	(135)

<b>8.4 氮离子注入钢铁材料的X射线衍射分析</b> .....	(137)
8.4.1 N <sup>+</sup> 注入工业纯Fe、工具钢和GCr15钢的相分析.....	(137)
8.4.2 N <sup>+</sup> 重叠注入样的面间距和点阵参数变化.....	(137)
<b>8.5 氮离子注入轴承钢的透射电镜分析</b> .....	(138)
<b>8.6 氮离子注入GCr15钢强化的机制</b> .....	(138)
8.6.1 固溶强化.....	(138)
8.6.2 二类相的弥散强化.....	(140)
8.6.3 注入过程的轰击、溅射作用.....	(140)
8.6.4 氧化膜减薄.....	(140)
8.6.5 重叠注入.....	(141)
<b>参考文献</b> .....	(141)
<b>附录 I 压痕长对角线长度L与Knoop硬度值Hk的对照表</b> .....	(142)
<b>附录 II 离子注入投影射程表</b> .....	(153)

# CONTENTS

<b>Abstract</b> .....	(i)
<b>Preface</b> .....	(ii)
<b>Chapter I Introduction</b> .....	( 1 )
1.1 Structure of Rolling Bearings and Their Requirements of Material Properties .....	( 1 )
1.2 Main Forms of Bearing Failure.....	( 3 )
1.2.1 Contact Fatigue Failure.....	( 3 )
1.2.2 Wear Failure.....	( 5 )
1.2.3 Corrosion Failure .....	( 5 )
1.2.4 Plastic Deformation Failure.....	( 5 )
1.2.5 Fracture Failure.....	( 5 )
1.2.6 Clearance Variating Failure.....	( 6 )
1.3 Metallurgical Quality and Heat Treatment Quality of Bearings .....	( 6 )
1.3.1 Metallurgical Quality Control .....	( 6 )
1.3.2 Heat Treatment Quality Control .....	( 7 )
1.4 Affected Layers in Working Surface of Rolling Bearings. ....	( 8 )
1.4.1 Temperature Distribution in Bearing Surface During Grinding.....	(10)
1.4.2 Classification of Grinding Affected Layers .....	(11)
<b>References</b> .....	(12)
<b>Chapter 2 Metallographic Analysis of Affected Layers for Rolling Bearings</b> .....	(13)
2.1 Morphological Analysis of Ground Surfaces.....	(13)
2.2 Sampling and Features of Sample Preparation .....	(18)
2.3 Microhardness Method Used for Analysis .....	(19)
2.4 Metallographic Analysis .....	(25)
2.5 Surface Layer Sampling and Electron Microscopic Analysis .....	(30)
<b>References</b> .....	(30)
<b>Chapter 3 Studies on Grinding Affected layers of Bearing by X-ray Diffraction</b> .....	(35)
3.1 Principle of Analyzing Phase Variance in Affected Layers.....	(35)
3.1.1 Inherent Intensity Method for Phase Analysis.....	(36)
3.1.2 Recursive Formula for Real Weight Percent Distribution.....	(39)
3.2 Sampling and Analysis of Affected Layers .....	(40)
3.2.1 Preparation of Samples .....	(40)
3.2.2 Detection of Phases .....	(40)
3.2.3 Analysis and Discussion .....	(40)
3.3 Analysis on Residual Stress of Affected Layers.....	(44)
3.3.1 Residual Stress—Grinding Forms Relation.....	(44)
3.3.2 Residual Stress—Grinding Order Relation.....	(46)
3.3.3 Function of Grinding Fluid .....	(46)

3.3.4 Residual Stress—Material Relation .....	(46)
<b>References .....</b>	<b>(47)</b>
<b>Chapter 4 Studies on Oxide Film of Bearing Surface by Electron Spectroscopy .....</b>	<b>(48)</b>
4.1 Practical Auger Electron Spectroscopy (AES) .....	(48)
4.1.1 Physical Basis of AES .....	(48)
4.1.2 Detection of Auger Signal.....	(50)
4.1.3 Quantitative Analysis by AES.....	(51)
4.1.4 Chemical State and AES.....	(52)
4.1.5 Depth Profile Analysis by AES .....	(53)
4.2 Practical X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) .....	(54)
4.2.1 Physical Basis of XPS .....	(55)
4.2.2 Chemical shift .....	(56)
4.2.3 Electron Energy Analyser.....	(57)
4.2.4 Quantitative Analysis by XPS .....	(58)
4.2.5 Data Processing and Peak Decomposition of XPS .....	(59)
4.3 AES Analysis of Oxide Film on Bearing Surface.....	(63)
4.3.1 Specimen and Instrument .....	(63)
4.3.2 AES-PRO Analysis of Atomic Concentration of Oxide Film.....	(63)
4.4 XPS Analysis of Oxide Film on Bearing Surface .....	(64)
4.4.1 Specimen and Instrument .....	(64)
4.4.2 Relation between Properties of Bearing and Thickness of Oxide Film .....	(64)
4.4.3 Composition and Structure of Oxide Film.....	(66)
4.4.4 Quantitative Analysis of Oxide Film Composition .....	(68)
4.4.5 Discussions and Conclusions .....	(69)
<b>References.....</b>	<b>(72)</b>
<b>Chapter 5 Analysis of Grinding Technological Factors for Bearing working Surfaces .....</b>	<b>(74)</b>
5.1 Grinding and Its Technological Factors.....	(75)
5.1.1 Grinding Energy .....	(75)
5.1.2 Grinding Temperature.....	(75)
5.1.3 Damage to the Surface Caused by Grinding Heat .....	(75)
5.2 Grinding Technological Experiment and Its Parameter Selection.....	(77)
5.2.1 Parameter Selection .....	(78)
5.2.2 Experiment.....	(81)
5.3 Analysis of Grinding Affected Layers .....	(84)
5.3.1 Morphology Analysis .....	(85)
5.3.2 Microhardness Measurement .....	(86)
5.3.3 Metallographic Analysis .....	(88)
5.4 Discussion on Factors Influencing Affected Layers.....	(90)
5.4.1 Main Factors Affecting Ground Surface Quality .....	(90)
5.4.2 Chang of the Main Factors .....	(91)
5.4.3 Characteristics of Groove Grinding .....	(91)

5.4.4 Optimization of Current Grinding Technology.....	(91)
<b>References .....</b>	<b>(93)</b>
<b>Chapter 6 Modern Strengthening Technique of Bearing Working</b>	
<b>Surface.....</b>	<b>(94)</b>
6.1 Survey of Strengthening Surface Technique.....	(94)
6.2 Strengthening Surface with Laser and Electron Beam .....	(94)
6.2.1 Strengthening Surface with Laser .....	(94)
6.2.2 Strengthening Surface with Electron Beam.....	(96)
6.3 Strengthening Surface with Vapour Deposition .....	(97)
6.3.1 Vapouration in Vacuum.....	(97)
6.3.2 Spattering Plating Film .....	(97)
6.3.3 Ion Plating Film.....	(97)
6.3.4 Chemical Vopour Deposition (CVD).....	(98)
6.3.5 Applications of Vapour Deposition Technique in Strengthening Bearing	
Surface .....	(98)
6.4 Peculiarities of Surface Strengthened by Ion Implantation .....	(99)
6.5 Range of Ion Implation, Concentration Distribution and Defect Distribution	
.....	(101)
6.5.1 Range of Ion Implantation .....	(101)
6.5.2 Atomic Concentration Distribution .....	(102)
6.5.3 Defect Distribution .....	(104)
6.6 Varieties of Ion Implantation Technique .....	(105)
6.6.1 Recoil Implantation .....	(105)
6.6.2 Dynamic Recoil Implantation .....	(105)
6.6.3 Mixing Implantation .....	(105)
6.6.4 Bombarding Diffusion Coat.....	(106)
6.6.5 Overlap-Implantation.....	(106)
<b>References.....</b>	<b>(107)</b>
<b>Chapter 7 Experimental Studies on Surface Modification of Bearing</b>	
<b>Steel Ion-implanted.....</b>	<b>(108)</b>
7.1 Study on Surface Hardness of Bearing Steel Implanting Strengthening	
.....	(108)
7.1.1 Measurement of Surface Hardness of The Sample Ion-Implanted.....	(108)
7.1.2 Microhardness Test of GCr15 Specimen Ion-Implanted .....	(109)
7.2 Wear Resistance Test of Bearing Steel Implanting Strengthened .....	(110)
7.2.1 Universal Wear Testing Machine .....	(111)
7.2.2 Wear Test .....	(112)
7.2.3 Quantitative Evaluation of Wear Test.....	(112)
7.2.4 Wearability of Bearing Steel Implanted .....	(113)
7.3 Experimental Study on Contact Fatigue of GCr15 Steel N <sup>+</sup> -Implanted	
.....	(116)
7.3.1 Contact Fatigue Testing Machine .....	(116)
7.3.2 Data Analysis of Contact Fatigue Test .....	(117)
7.3.3 Study on Contact Fatigue of GCr15 Steel N <sup>+</sup> -Implanted.....	(121)

7.4	Study on Corrosion-resistance of Bearing Steel Ion-Implanted .....	(121)
7.4.1	Elemental Conception of Metal Corrosion.....	(121)
7.4.2	Electropolar Characteristics of Pure Iron Ion-Implanted.....	(126)
7.4.3	Corrosion-resistance of M50 High Temperature Bearing Steel Ion- Implanted.....	(128)
	<b>References .....</b>	<b>(130)</b>
	<b>Chapter 8 Strengthening Mechanism of Bearing Surface N<sup>+</sup>- Implanted.....</b>	<b>(131)</b>
8.1	General Law of Nitride Formation from Fe-N System.....	(131)
8.2	AES-PRO Analysis of GCr15 Steel Surface Overlap-Implanted with N <sup>+</sup> .....	(133)
8.2.1	Specimen and Instrument .....	(133)
8.2.2	AES-PRO Analysis .....	(133)
8.3	XPS-PRO Analysis of GCr15 Steel Surface Overlap-Implanted with N <sup>+</sup> .....	(134)
8.3.1	Specimen and Instrument .....	(134)
8.3.2	Structure and Thickness of Oxide Film of Implanted Surface.....	(134)
8.3.3	Phase Analysis of N <sup>+</sup> -Implanted Layer .....	(135)
8.4	X-ray Diffraction Analysis of Iron & Steel N <sup>+</sup> -Implanted .....	(137)
8.4.1	Phase Analysis of N <sup>+</sup> -Implanted Industrial Iron, Tool Steel and GCr15 Steel .....	(137)
8.4.2	Variation of Lattice Parameter of GCr15 Steel Overlap- Implanted by N <sup>+</sup> .....	(137)
8.5	TEM Analysis of Bearing Steel N <sup>+</sup> -Implanted .....	(138)
8.6	Strengthening Mechanism of N <sup>+</sup> -implanted GCr15 Bearing Steel.....	(138)
8.6.1	Solid solution strengthening .....	(138)
8.6.2	Dispersion Strengthening of Secondary Phases.....	(140)
8.6.3	Bombard and Spatter Effects.....	(140)
8.6.4	Thinning of Grinding Oxide Film .....	(140)
8.6.5	Overlap-Implantation .....	(141)
	<b>References.....</b>	<b>(141)</b>
	<b>Appendix I TABLE FOR KNOOP HARDNESS NUMBER.....</b>	<b>(142)</b>
	<b>Appendix II PROJECTING RANGE TABLE OF ION IMPLANTATION.....</b>	<b>(153)</b>

# 第 1 章 概 论

轴承在现代工业、农业、科学技术和国防建设中应用极为广泛。目前光滚动轴承我国已发展到11个大类别，计及关节轴承与直线运动轴承等有6000个品种、13000个规格、年产3亿多套，仍不能满足需要。轴承一旦早期失效，将影响到整机和整个工作系统的可靠性。特别是航天、航空、航海、核工业和其他特种工业、科技领域，迫切需要提高轴承的寿命和可靠性。失效分析表明，轴承失效主要发生在其工作表面和表面层。因而应用现代表面科学技术分析研究滚动轴承工作表面及其微观结构，对揭示滚动轴承早期失效的表面质量因素和提高产品质量具有显而易见的重要性。目前国外这方面的成果报道不多，且很分散。近年我国的研究取得了较大的进展，但也较分散。本书希望总结近年国内外这方面的进展，以有益于我国轴承事业的发展。

本书第1章将介绍必要的基本知识，以适应某些读者的需要；第2至4章分别介绍近年应用显微硬度、光学金相、电镜、X射线衍射、电子能谱技术，分层次揭示轴承表面变质层微观结构的研究成果；第5至8章分别介绍有关改进轴承磨削工艺、减少和消除表面变质层及表面强化提高表面性能的原理、方法。本书的讨论主要对象虽然是滚动轴承，但有关表面磨削变质层的研究成果和研究方法对机械工程界却有着普遍的参考意义。

## 1.1 滚动轴承的结构及工作条件对用材性能的要求

滚动轴承一般由内圈、外圈、滚动体（包括钢球、滚子、滚柱、滚针等）及保持器等四个主要部分所组成。

**内圈：**通常是装在轴上，并与轴一起旋转的。其外表面上有供滚动体滚动的沟槽，称为内滚道或内沟。

**外圈：**通常是装配在轴承或机械壳体上，起支承滚动体的作用。也有些轴承是外圈旋转，内圈固定起支承作用。外圈内表面也有供滚动体滚动的沟槽，称为外滚道或外沟。

**滚动体：**在内圈和外圈的滚道之间滚动，它的大小和数量决定着轴承的负荷能力。

**保持器：**把轴承中的一组滚动体均等地相互隔开，以免互相碰撞和摩擦，并使每个滚动体均匀地轮番承载相等的负荷。

在推力轴承中，与轴紧配的套圈称为紧圈，与轴承座或机械壳体相配的套圈叫活圈。随着机械部件对轴承性能要求的不同，轴承的结构亦有差异。

所谓轴承钢材，通常是指专门用来制造轴承内、外圈和滚动体的钢材（不包括用于制造保持器、密封圈、隔圈及铆钉等零件的普通用钢）。本书所研究的轴承工作表面是指内滚道、外滚道和滚动体表面而言的。一般说来，这些轴承零件都是在拉伸、压缩、

弯曲、剪切等交变应力和循环接触应力状态下长时间地工作，转速高、负荷大，不仅有滚动而且还有滑动，容易造成轴承工作表面的疲劳和磨损。为保证轴承零件工作表面具有高的使用寿命和可靠性，要求轴承钢材应具有如下的工作性能：

### 1) 具有高的接触疲劳强度

接触疲劳强度是轴承钢材最重要的综合机械性能指标，直接与轴承的工作条件有关。滚动轴承工作时，滚动体要在内、外滚道上高速滚动，其接触部分每分钟要承受数万次以上的交变载荷，接触应力有时高达 5 GPa。在接触表面或最大剪应力面上，易出现疲劳破坏。因此要求其工作表面必须具有高的接触疲劳强度。

影响接触疲劳强度的因素很多，目前尚没有统一的国家标准或国际标准，数据只能靠试验获得。一般认为，GCr15轴承钢为HRC 61.5~62.5 时具有最高的接触疲劳强度（图1.1）。

### 2) 具有高的硬度和耐磨性

滚动体与内、外滚道表面之间在高速运转中不仅有滚动磨擦，而且还有滑动磨擦；同时套圈、滚动体与保持器之间也有滑动磨擦，易使轴承因磨损而丧失精度。因此要求轴承钢材经热处理后必须具有高而均匀的表面硬度和耐磨损性能。试验证明套圈和滚动体使用状态下的硬度为 HRC61~65 时，才具有良好的耐磨损性能（图1.2）。

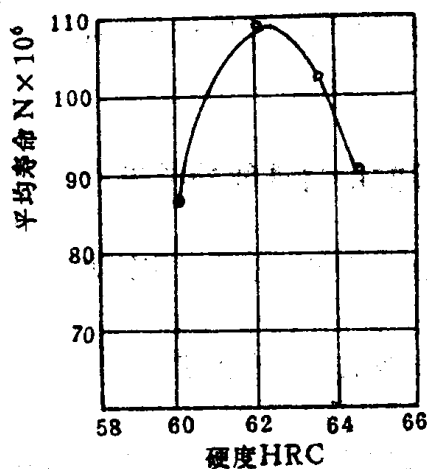


图1.1 GCr15钢淬、回火后表面硬度对接触疲劳寿命的影响 [1]

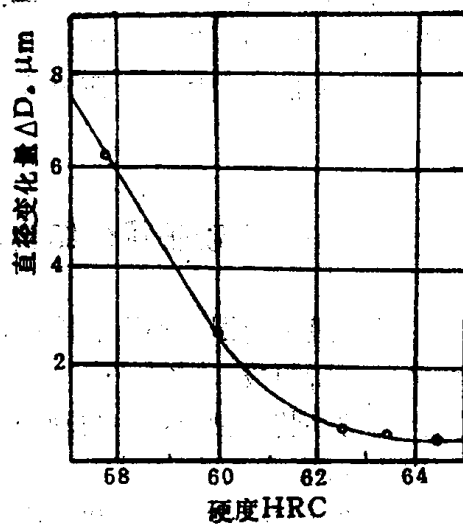


图1.2 GCr15钢淬、回火后硬度对耐磨性的影响 [1]

### 3) 良好的尺寸稳定性

轴承零件，尤其是精密轴承零件的精度要求很高（以微米为精度计算单位）。必须在长期的保存或使用中保证其尺寸精度的稳定性，才能保证整套轴承的精度，因此要求轴承钢材经热处理后必须具有良好的尺寸稳定性。

### 4) 良好的加工工艺性

轴承钢材多属高合金钢，要加工成轴承零件，需要具有良好的易切削性能、锻造性能和热处理淬透性能。特别是其锻造性能对采用精密辗压和高温挤压新工艺，提高工效和



材料利用率，以提高质量降低成本很重要。足够的淬透性对于保证较大尺寸的套圈和滚动体在热处理后整个断面具有高而均匀的硬度和组织是必不可少的。

#### 5) 一定的弹性和韧性

轴承运转时，滚动体和套圈滚道之间的接触面积是很小的，因而单位面积上承受的压力很高。为防止在高应力作用下发生较大的塑性变形，保证轴承的正常工作，轴承钢材必须具有较高的弹性极限。

大多数轴承在使用中都承受一定的冲击载荷，尤其是轧机、铁路轴承等，因此轴承钢材也必须具有承受一定的冲击载荷仍可正常工作的性能。

除此而外，有的轴承还必须在高温、高压、高真空、强腐蚀介质、强辐照等特定的条件下工作，这就必须从原材料、热处理、表面保护和表面强化等多方面着手来强化轴承表面的某种性能，例如抗腐蚀、抗辐照及高温稳定等特性，以适应其工作环境的需要。仅就钢材的选择而言，为了满足滚动轴承零件工作表面某种特殊性能的要求，用来研制各类新型滚动轴承的合金钢材，除最常用的高碳铬轴承钢（以GCr15为代表）外，尚有不锈轴承钢（9Cr18等）、高温轴承钢（Cr4Mo4V等）、渗碳轴承钢（20Cr2Ni4A等）等共四大类几十种高合金钢。此外还有特大型轴承钢、防磁轴承材料、特殊合金和陶瓷材料等。这些钢材、材料及其生产工艺的正确选择曾使滚动轴承行业完成了多种特殊轴承的研制工作。表1.1列出了其中的主要部分钢种及其化学成份和应用范围。

## 1.2 轴承失效的主要形式

轴承在工作中失去使用性能，导致故障或不能正常工作的现象称为失效<sup>[2]</sup>。轴承失效一般可分为止转失效和丧精失效两种。止转失效，就是轴承因失去工作能力而终止转动；丧精失效，就是轴承因几何尺寸变化而改变了配合间隙，丧失了原来的回转精度，轴承虽尚能继续转动，但属非正常运转。

由于各类轴承工作条件和失效因素的差异，产生失效的形式和形貌特征亦各不相同，失效形式的分类方法有多种<sup>[2-3]</sup>。一般按损伤机理分类，主要有疲劳、磨损、腐蚀、变形、断裂等失效形式；以疲劳和磨损最为多见。

### 1.2.1 接触疲劳失效

轴承在高接触应力的作用下，经多次循环，在内、外滚道或滚动体表面局部位置产生小片或小块金属剥落，形成麻点或凹坑，导致不正常工作的现象，称为接触疲劳失效。接触疲劳一般又可分麻点剥落，浅层剥落和硬化层剥落等形式。

1) 麻点剥落，又称为表面剥落或点蚀，是轴承滚道表面常见的早期失效形式之一。

2) 浅层剥落，又称为疲劳片状剥落，是初始疲劳裂纹首先从接触表面以下最大正交切应力处产生，或从接触表面有缺陷处产生，然后扩展至表面形成的剥落。最大正交切应力所在深度随接触椭圆长短半轴比而变化。线接触时，最大正交切应力所在深度为接触表面下 $0.5b$ 处， $b$ 为接触半宽度。