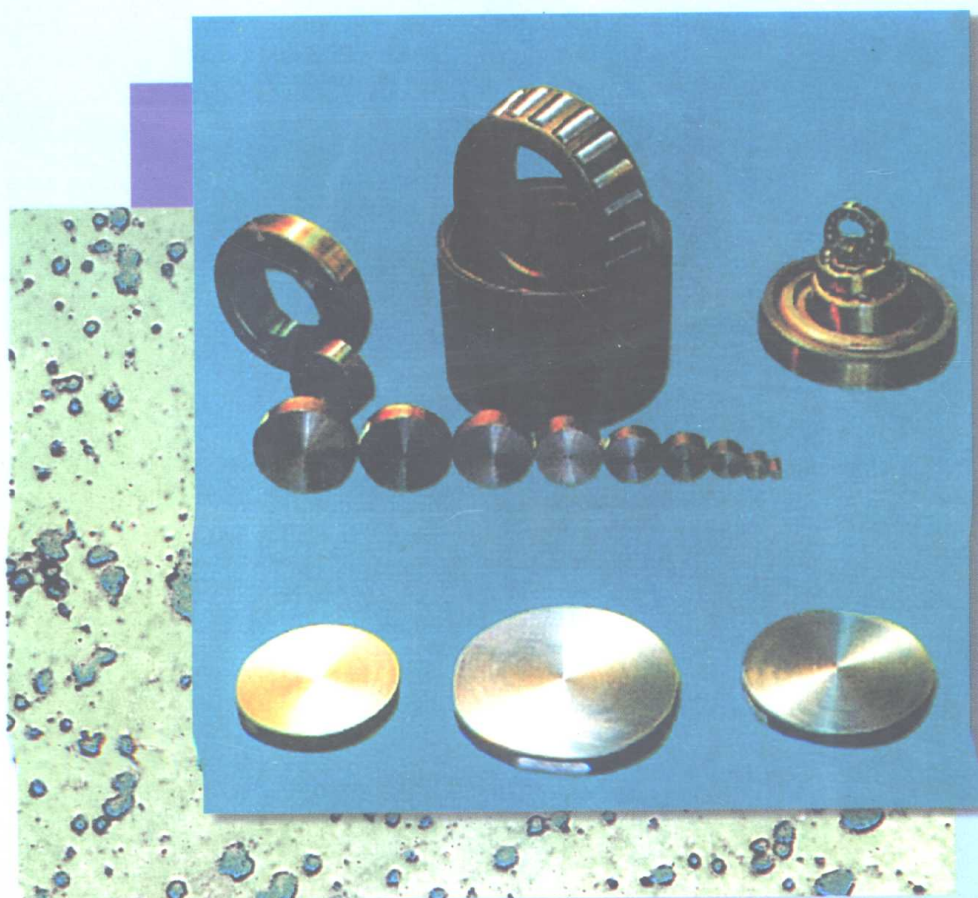


特 殊 钢 丛 书

轴承钢

钟顺思 王昌生 主编



冶 金 工 业 出 版 社

特殊钢丛书

轴 承 钢

钟顺思 王昌生 主编

北 京
冶 金 工 业 出 版 社

2000

内 容 简 介

《轴承钢》是中国金属学会特殊钢专业学会组织编写的“特殊钢”丛书之一,本书全面系统地介绍了轴承的工作条件及对轴承钢的要求;轴承钢的生产工艺;轴承钢的组织性能、冶金质量与疲劳寿命等。特别应该提及的是,书中阐明了我国刚刚起步的连铸轴承钢的质量,尤其是争论较多的连铸轴承钢的压缩比问题。本书还大量搜集了轴承钢各钢号的特性数据,并对世界各个国家的轴承钢标准进行了评述。

本书可供有关从事轴承钢和轴承生产、科研和设计的科技人员和管理人员以及高等院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

轴承钢/钟顺思,王昌生主编. —北京:冶金工业出版社,2000.11

(特殊钢丛书)

ISBN 7-5024-2543-8

I. 轴… II. ①钟…②王… III. 轴承钢

IV. TG142.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 14362 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 王成蓓 美术编辑 李 心 责任校对 王贺兰

北京昌平百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2000 年 11 月第 1 版,2000 年 11 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 20.375 印张;545 千字;638 页;1—2000 册

45.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

《特殊钢丛书》编辑工作委员会

(按姓氏笔画为序)

主任委员	刘嘉禾	杨 栋	
委 员	马绍弥	王洪发	王建英
	关玉龙	刘福魁	那宝魁
	范小媛	林慧国	侯树庭
秘 书 长	林慧国		

《轴承钢》编委会

主 任	钟顺思	文 武		
副 主 任	王 实	胡建新	张家福	叶瑞强
	吴利生			
委 员	(以姓氏笔画为序)			
	王昌生	方文才	叶重建	刘胜国
	李 民	汪学瑶	汪家龙	张圭璧
	张树军	张继咸	周德光	胡定安
	徐君浩	谢亚庆		
特邀委员	褚翰林	刘德金	沈梨庭	王有铭
	王世俊			

序

特殊钢是钢铁工业的一个重要领域。特殊钢的品种繁多,性能各异,质量要求高,应用范围广,国家的经济建设、国防建设乃至人民的日常生活都与特殊钢有密切关系。因而通常把特殊钢品种、质量、产量作为衡量一个国家钢铁工业科学技术和工业化水平的重要尺度。

当前,我国的四化建设和改革开放正向深广方向发展,中共中央和国务院做出关于加强科学技术进步的决定,广大职工积极要求掌握科学技术专业知识。在这样的形势下,中国金属学会特殊钢专业学会发起并组织编写一套具有自己特色的《特殊钢丛书》,是有时代意义的。

这套丛书分卷撰写,陆续出版。本丛书是由中国金属学会特殊钢专业学会及其15个专业学术委员会组织国内冶金与材料界的知名专家教授编写的,因此具有一定的权威性。编写这套丛书是为了介绍中国特殊钢工业的发展情况和科学研究成果以及国外在这方面的进展情况,总结和整理国内老一辈专家们的丰富学识和实践经验。这套《特殊钢丛书》将重点介绍特殊钢的现代生产工艺技术、特殊钢各大钢类钢种的性能特点和应用指南,为特殊钢生产、科研和使用部门的科技人员在职学习提供素材,为有关大专院校师生提供教学参考。

组织编写特殊钢方面的系列图书,在国内尚属首次,在国外也不多见,难免存在疏漏和不足之处,欢迎指正。期望这套《特殊钢丛书》能在普及提高科学知识、合理生产和合理使用钢材方面发挥积极作用。

《特殊钢丛书》编委会

前 言

含 C 1.0%、Cr 1.5% 的高碳铬轴承钢自本世纪初问世, 至今已有近 100 年的历史。在本世纪里, 科学技术迅猛发展, 对轴承提出了非常苛刻的要求。例如, 在提高转动速度、提高工作温度的同时, 还要求更高的可靠性和寿命; 轴承钢尺寸的不断增大, 要求更高的淬透性; 办公自动化机器的出现, 要求对小型轴承噪声的抑制等等。在此期间, 轴承材料的研究得到了多方面的发展, 如高碳铬轴承钢、渗碳轴承钢、高温轴承钢和特殊用途轴承材料等, 其中高碳铬轴承钢产量约为轴承钢总产量的 80% 以上, 在数量上仍占据着绝对优势。由于对轴承的要求越来越高, 轴承材料必须具有高纯净度、高可靠性和高疲劳寿命。以含 C 1.0%、Cr 1.5% 为代表的高碳铬轴承钢, 从它诞生至今, 化学元素的含量几乎没有变化, 但其疲劳寿命却有成倍甚至成几十倍的提高, 原因就在于轴承材料的纯净度提高了。轴承钢纯净度的提高, 主要依赖于冶金工艺的现代化、炉外精炼技术的普遍采用。

建国 50 年来, 我国轴承钢生产也和整个钢铁工业一样得到了飞速发展, 最高年产量已达 60 万 t 以上, 成为世界轴承钢生产大国之一。改革开放的 20 年, 冶金工艺的现代化水平有了大幅度提高, 电弧炉单炉容量已从 80 年代初期 10~20t 扩大到 50~100t, 偏心底留钢留渣操作和 LF-VD 精炼工艺与连铸配合, 轴承钢氧含量已由传统电弧炉大气下熔炼的 $(30 \sim 40) \times 10^{-6}$ 降到 10×10^{-6} 左右, 加之各特殊钢厂连轧机组的投产、辊底式连续退火炉的使用, 轴承钢的纯净度、轧材的尺寸精度、球化退火组织都已达到或接近国际先进实物水平。

为了总结我国轴承钢生产、科研所取得的成果, 分析国内外轴承钢生产工艺、质量水平存在的差异, 编委会邀请北京科技大学、

哈尔滨工业大学、北京钢铁研究总院及全国主要的特殊钢厂从事轴承钢科研、生产的学者、专家集体编写了《轴承钢》一书。《轴承钢》的编写出版将对我国轴承钢的科研、生产、开发、工艺技术及应用水平的提高起到积极的推动作用。

本书共分 8 章,各章撰写者为:

第 1 章 叶瑞强(大冶特钢)、刘德金(钢铁研究总院)

第 2 章 李 超(哈尔滨工业大学)、谢亚庆(大冶特钢)

第 3 章 王昌生(大冶特钢)、吴利生(上钢五厂)、张树军(北满特钢)、徐明德(大冶特钢)、褚翰林(钢铁研究总院)

第 4 章 邹铸新、王昌生、李 民(大冶特钢)

第 5 章 李 民(大冶特钢)、王有铭(北京科技大学)、刘永长(大连特钢)、李幼安(大冶特钢)

第 6 章 魏果能(钢铁研究总院)、王昌生、李 民、周德光(大冶特钢)

第 7 章 汪家龙(上钢五厂)

第 8 章 胡定安(大冶特钢)、刘德金(钢铁研究总院)

本书在编写过程中,采用了不少单位提供的科研成果及数据资料,并得到了教授级高级工程师钱励、高级工程师李永恩、沈中砥、孙守信、胡昌木、明道钿和王华英、杨军、陈国斌等工程师的帮助,在此一并表示深切的谢意。

鉴于编著者的水平有限,缺点和错误在所难免,恳请批评指正。

《轴承钢》编委会

特殊钢丛书

已出版的:

不锈钢

低合金高强度钢

现代电弧炉炼钢

特殊钢炉外精炼

电工钢

模具钢

合金结构钢

微合金非调质钢

高温合金

钎钢与钎具

目 录

1 轴承的工作条件及其对轴承材料的要求	1
1.1 轴承的工作条件	1
1.2 对轴承材料的性能要求	3
1.2.1 轴承钢的纯洁度	3
1.2.2 轴承钢的均匀性	7
1.3 轴承钢的发展历史	8
1.4 轴承钢(或轴承用材料)的分类	9
1.4.1 高碳铬轴承钢	9
1.4.2 表面硬化轴承钢	13
1.4.3 中碳轴承钢	16
1.4.4 不锈钢耐蚀轴承钢	17
1.4.5 高温轴承钢	17
1.4.6 防磁轴承钢	23
1.4.7 其他轴承材料	23
1.5 合金元素在轴承钢中的作用	29
1.5.1 碳	29
1.5.2 铬	30
1.5.3 锰	31
1.5.4 硅	32
1.5.5 镍	32
1.5.6 钼	33
1.5.7 钒	33
1.5.8 钨	34
1.5.9 铝	35
1.5.10 钛	35
1.5.11 铜	36

1.5.12 其他元素	36
2 轴承钢的组织转变	37
2.1 Fe—Cr—C 平衡状态图	37
2.2 加热时的转变	39
2.2.1 奥氏体的形核与长大	41
2.2.2 碳化物的溶解与奥氏体的均匀化	42
2.2.3 钢中合金元素的影响	43
2.2.4 原始组织的影响	44
2.2.5 加热速度的影响	45
2.2.6 奥氏体晶粒度及其控制	47
2.3 过冷奥氏体的转变	51
2.3.1 珠光体转变	51
2.3.2 过冷奥氏体的冷却转变图	57
2.3.3 马氏体转变与贝氏体转变	65
2.3.4 形变对奥氏体冷却转变的影响	85
参考文献	99
3 轴承钢的冶炼	101
3.1 原材料及辅助材料	101
3.2 轴承钢的传统冶炼方法	102
3.2.1 酸性平炉及双联法评述	102
3.2.2 碱性平炉及电—平炉混合冶炼法评述	104
3.2.3 碱性电弧炉法评述	106
3.3 轴承钢的炉外精炼	110
3.3.1 初炼炉工艺	111
3.3.2 精炼炉渣对轴承钢夹杂物的影响	118
3.3.3 真空冶金的一般规律	130
3.3.4 钢包吹氩精炼	138
3.3.5 炉外精炼装置的发展及其工艺演变	141
3.3.6 我国轴承钢炉外精炼实例	162
3.4 轴承钢的电渣重熔	194

II

3.4.1	重熔过程概述	194
3.4.2	重熔渣系	196
3.4.3	电渣冶炼工艺	201
3.4.4	电渣重熔轴承钢的冶金质量	206
3.5	轴承钢的真空熔炼	212
3.5.1	真空感应炉熔炼	212
3.5.2	真空电弧炉熔炼	217
3.5.3	真空感应炉 + 真空自耗电弧炉重熔	222
3.5.4	电渣重熔 + 真空自耗重熔	223
3.5.5	电子束重熔	224
3.5.6	其他熔炼方法	226
	参考文献	228
4	轴承钢的浇注	230
4.1	与浇注工艺有关的主要特性	230
4.1.1	液相、固相温度和两相区宽度	230
4.1.2	相对碳含量和硬化指数	231
4.1.3	轴承钢有关特性值计算结果	232
4.2	高碳铬轴承钢碳化物不均匀性	234
4.2.1	碳化物的存在和危害	234
4.2.2	碳化物不均匀性形成机理	235
4.3	轴承钢的模铸	239
4.3.1	模铸的方法	239
4.3.2	铸温和铸速	240
4.3.3	轴承钢用钢锭模	244
4.4	保护浇铸	254
4.4.1	钢流保护	254
4.4.2	模内钢液面保护	258
4.5	钢锭的缓冷	263
4.6	轴承钢的连铸	265
4.6.1	连铸轴承钢钢液准备	266

4.6.2	连铸工艺	270
4.6.3	连铸轴承钢的冶金质量	282
	参考文献	288
5	轴承钢的压力加工	290
5.1	轴承钢压力加工的工艺特点	290
5.2	轴承钢锭的开坯	291
5.2.1	钢锭的“红送”与“冷送”	291
5.2.2	钢锭的加热	293
5.2.3	钢锭开坯轧制	301
5.2.4	钢坯的冷却	303
5.2.5	钢坯精整	304
5.3	轴承钢棒材生产	304
5.3.1	钢坯加热	306
5.3.2	钢材轧制	318
5.3.3	轧后冷却与切断	322
5.3.4	钢材的精整	322
5.4	轴承钢成品轧制中的控制轧制和控制冷却	323
5.4.1	轴承钢热轧的组织变化	323
5.4.2	轴承钢控制轧制的类型和机理	326
5.4.3	轴承钢的控制轧制和控制冷却工艺的 组合类型	328
5.4.4	轴承钢轧后控制冷却工艺参数 对轧材组织的影响	330
5.4.5	轴承钢控制轧制、控制冷却和 在线球化退火新工艺	332
5.5	轴承钢的温加工	334
5.6	轴承钢的超塑性和其它轧制工艺	335
5.7	轴承钢冷拔材及钢丝生产工艺	336
5.7.1	传统的拉拔工艺	336
5.7.2	新型联合拉拔机组生产工艺	342

5.8 钢管生产工艺及装备	260
5.8.1 管坯准备	362
5.8.2 轴承钢管的轧制	366
5.8.3 冷拔 GCr15 轴承钢管的生产工艺	387
5.8.4 冷轧轴承钢管	397
参考文献	404
6 轴承钢的冶金质量及疲劳寿命	406
6.1 轴承钢的接触疲劳破坏	406
6.1.1 接触疲劳试验方法	406
6.1.2 接触应力的分析和计算	407
6.1.3 接触疲劳寿命试验结果的统计处理方法	412
6.1.4 接触疲劳破坏机理及组织变化、裂纹源、裂纹的萌生、扩展及破坏	414
6.2 微量元素对轴承钢质量的影响	420
6.2.1 氧	420
6.2.2 硫	422
6.2.3 钛、氮	423
6.2.4 镁、钙	424
6.2.5 铝、氢	425
6.2.6 砷、锡、铅、铈	426
6.3 轴承钢中的非金属夹杂物及其对疲劳寿命的影响	427
6.3.1 硫化物	428
6.3.2 Al_2O_3 夹杂物	434
6.3.3 球状夹杂物	440
6.3.4 氮化物夹杂	462
6.3.5 非金属夹杂物对疲劳寿命的影响	463
6.4 碳化物不均匀性及其对疲劳寿命的影响	474
6.4.1 碳化物液析	474
6.4.2 碳化物带状	476
6.4.3 碳化物网状	497

参考文献	504
7 轴承钢标准	507
7.1 我国轴承钢标准	507
7.1.1 我国轴承钢标准演变情况	507
7.1.2 我国轴承钢标准分类和简介	511
7.2 ISO 及各主要生产国轴承钢牌号和化学成分	521
7.3 ISO 及各主要生产国(瑞典、美国、日本、前苏联、德国) 轴承钢标准介绍	521
7.3.1 国际标准 ISO683/XV II《热处理钢、合金钢和 易切削钢》第 17 部分《滚珠和滚柱轴承钢》	521
7.3.2 瑞典 SKF 公司轴承钢标准	522
7.3.3 美国轴承钢标准	531
7.3.4 日本轴承钢标准	534
7.3.5 前苏联轴承钢标准	536
7.3.6 德国 DIN 17230 滚动轴承钢质量标准	537
8 轴承钢钢种特性与应用	539
8.1 GCr15	539
8.2 GCr15SiMn	562
8.3 G8Cr15	567
8.4 SKF24(GCr18Mo)	573
8.5 SKF25	576
8.6 GCr15SiMo	580
8.7 GCrSiWV(GCr15SiWV)	583
8.8 G20CrMo(AISI 4118)	588
8.9 G20CrNiMo(AISI 8620)	591
8.10 G20CrNi2Mo(AISI 4320)	599
8.11 G20Cr2Ni4	605
8.12 G55SiMoVA	610
8.13 Cr4Mo4V	615
8.14 W18Cr4V	627

1 轴承的工作条件及其对轴承材料的要求

1.1 轴承的工作条件

滚动轴承由内套圈、外套圈、滚动体、保持器四大件组成,在拉、压应力、剪切应力及摩擦力等交变负荷下工作。随着科学技术的发展,一些特殊用途的轴承向着高转速、高负荷、高温、低温、特大型、特小型、低噪声发展。例如,轴承转速 D_N 值已达 $4 \times 10^6 \text{ r/min}$;承受局部接触应力达 4000 MPa ;工作温度达 600°C 以上;超低温达到 -253°C ;有的轴承最大直径(外径)达 4.1 m 、质量达到 7700 kg ;而最小的微型轴承直径只有 1 mm 、内径仅 0.6 mm 、质量 0.17 g ;办公室自动化机器等小型轴承则要求抑制噪声。

一台机械设备的使用性能在很大程度上取决于滚动轴承的精度、可靠性和寿命。因此,对于滚动轴承的要求可以归纳为:

灵敏度:摩擦力矩应不大于 $0.147 \text{ mN} \cdot \text{cm}$,这样小的摩擦力矩,轴承粗糙度必须达到 $R_a = 0.012$ 精度,即在放大 30 倍下不能出现表面缺陷。

可靠度:一批轴承中合格率必须达到 99.9999% ,即在 100 万套轴承中只允许一套不可靠。这是对宇航器及飞机发动机主轴轴承提出的要求。

准确度:自动控制仪表要求轴承零件绝对尺寸改变不大于 $1 \mu\text{m}$ 。

在讨论对轴承材料性能要求之前,先介绍轴承钢及轴承寿命有关的几个概念。

疲劳寿命:是一个统计概念,即在一定负荷下,用破坏概率与循环次数之间的关系来表示,亦可只用转动小时数表示。 L_{10} (B_{10})表示损坏率为 10% 、 L_{50} (B_{50})表示损坏率为 50% 时的转数。为了定量地表述轴承寿命,采用表示静强度的韦布尔函数。用于

接触疲劳寿命时,这个函数可变换成下式:

$$\lg \lg \frac{1}{1-F} = \lg A + K \lg N$$

式中 F ——破坏概率;

N ——循环次数;

A 和 K ——对于同一批轴承或试样为常数。

参数 K 越大,寿命离散性越小。球轴承的 K 值平均为 1.1, 滚子轴承为 1.5, K 值与轴承材料和制造工艺的关系不大。参数 A 代表轴承寿命水平,它不仅与材料性能有关,而且与负荷有关。

疲劳强度:指在一定转速和转数条件下,滚动体至破坏时单位面积上的负荷值。

轴承寿命的高低,主要决定于轴承材料的质量、轴承的结构、轴承的制造工艺技术以及轴承的使用状况等四大因素。

表 1-1 列出的是轴承性能和特性及其对轴承材料的要求。

表 1-1 轴承性能和特性及其对轴承材料的要求

轴承性能要求	轴承应具有的特性	对轴承材料的要求
耐高荷重	抗形变强度高	硬度高
能进行高速回转	摩擦和磨损小	耐磨强度高
回转性能好	回转精度高 尺寸精度高	纯洁度、均匀度高
具有互换性	尺寸稳定性好	
能够长期使用	具有耐久性	疲劳强度高

造成轴承损坏的原因很多,表 1-2 所列诸因素中,材质和热处理工艺,特别是材料内部的非金属夹杂物类型及其数量和基体强度影响尤为明显。轴承制造因素和轴承结构也十分重要。日本某公司早在 20 世纪 80 年代初宣称,他们所制造的轴承由于以下 3 个原因使轴承寿命比原来提高 6 倍。

- (1)原材料质量的提高——全面采用真空脱气轴承钢;
- (2)轴承设计精益求精;
- (3)轴承精加工技术的应用。