

轴承钢的组织与性能

上海科学技术文献出版社

轴承钢的组织与性能

[苏] A. I. 斯别克托尔 等著

本溪钢铁公司一钢厂 翻译
托 顺 钢 厂
洛 阳 轴 承 研 究 所 审校

上海科学技术文献出版社

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОДШИПНИКОВЫХ
СТАЛЕЙ

АЗАРИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ СПЕКТОР
БЕРТА МОИСЕЕВНА ЗЕЛЬБЕТ
СОФЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА КИСЕЛЕВА

轴承钢的组织与性能

[苏] А. Г. 斯别克托尔、Б. М. 捷尔别特、С. А. 基谢列娃
苏联冶金出版社 1980

轴承钢的组织与性能

[苏] А. Г. 斯别克托尔 等著

本溪钢铁公司一钢厂
抚顺钢厂 翻译
洛阳轴承研究所 审校

*

上海科学技术文献出版社出版
(上海市武康路2号)

新华书店上海发行所发行
浙江洛舍印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 10.125 字数 244,000

1983年10月第1版 1983年10月第1次印刷

印数: 1--8,500

书号: 15192·262 定价: 1.25 元

《科技新书目》55-289

内 容 简 介

本书论述了广泛应用的高碳轴承钢、不锈轴承钢和耐热轴承钢的组织 and 性能问题, 阐明了金属材料的冶金质量、非金属夹杂物的含量和成分与冶炼方法的关系。还叙述了热处理时的组织转变, 冶金因素和热处理对轴承钢在使用条件下的机械性能、接触疲劳强度和组织稳定性的影响。

本书可供冶金工业和轴承工业的工程技术人员, 以及滚动轴承使用部门的专业工作者阅读, 也是高等院校金属学和热处理专业师生的一本有益的参考书。

参加本书译校工作有: 本溪钢铁公司一钢厂的马振腾、苏东升、徐景春; 抚顺钢厂的姚永丰、艾慰心和蔡哲士; 洛阳轴承研究所的陈东信、王令文、王中玉、赵芳洁、纪惠令、李次公、黄超、常家宽和贾刚。

序 言

机器制造业在增加产量的同时,还应提高产品的质量、技术水平、效率以及在使用中的可靠性与安全性。

机床、汽车、铁路车辆、航空发动机、轧钢机、精密仪器等绝大部分设备和机械的使用性能在很大程度上取决于最重要和最常用的部件之一,即滚动轴承的精度、寿命和可靠性。

滚动轴承的质量取决于本身的结构、制造工艺和金属材料质量。本书研究了与金属材料质量有关的问题,即轴承钢的熔炼与加工工艺(熔炼和压力加工方法)和金属学方面的问题(相的成分和显微组织)以及这些因素对轴承使用性能的影响。

对轴承钢性能的要求及其质量标准,完全不同于对机械制造业用的其它钢材和合金的要求。评定制造其它机械零、部件用的多数钢材与合金质量时,起决定作用的“常规”机械性能,对轴承来说就显得不太合适。滚动元件接触区的局部疲劳强度是评定轴承钢工作性能的主要指标。因此,书中特别注意到钢材的冶金因素和组织状态,对轴承在使用过程中的接触疲劳强度及其损坏的影响。同时,还研究了轴承钢在低温、常温和高温下的组织不稳定性,以及这种不稳定性对轴承的几何形状和尺寸精度变化的影响。

根据国家标准、国际标准和企业标准,书中对苏联和国外生产的轴承钢成分作了对比,介绍了对轴承钢冶金质量及其检验方法提出的最新要求。鉴于钢中非金属夹杂物对轴承工作能力有严重的影响,所以对夹杂物的组成、数量与冶炼和重熔方法,

夹杂物的研究方法和钢中污染程度的评定方法之间的相互关系特别重视。

在有关钢的热处理各章中，介绍了组织转变的动力学和形态学，以及先进的热处理方法和设备。同时，着重地阐述了对后几道生产工序有影响的几个问题，如表面脱碳，淬火变形和残余应力等。

本书除参考国内、外有关轴承钢方面的文献外，还引用了全苏轴承工业科学研究所、各轴承厂、乌克兰特殊钢科学研究院、中央黑色冶金科学研究院和黑色金属冶金厂的先进经验。

本书的第一、九、十一——十四和十六章为 A. I. 斯别克托尔所著，第二——四、七、八、十和十五章为 B. M. 捷尔别特所著，第五、六章为 C. A. 基谢列娃所著。

目 录

序 言	
第 一 章	滚动轴承金属材料的工作条件(1)
第 二 章	轴承钢的化学成分(7)
	常用轴承钢(铬钢和含钼与不含钼的铬锰 硅钢).....(7)
	耐蚀钢和耐热钢.....(12)
第 三 章	轴承钢的冶炼及压力加工方法概述.....(16)
	冶炼方法的一般评述.....(16)
	酸性平炉炼钢.....(18)
	电炉炼钢.....(19)
	熔体在钢包内的混合熔炼.....(22)
	真空冶炼、真空重熔和真空脱气(23)
	电渣重熔.....(28)
	压力加工.....(29)
第 四 章	对轴承钢质量的要求.....(33)
	钢材的品种和用途.....(33)
	表面缺陷和脱碳.....(34)
	低倍组织.....(36)
	显微组织.....(40)
	机械性能.....(47)
第 五 章	铬轴承钢中非金属夹杂物的检验和研究方法.....(48)
	低倍夹杂物的检验.....(49)

	用标准评级图鉴定高倍夹杂物·····	(50)
	用计算法测定钢中高倍夹杂物的污染度·····	(57)
	非金属夹杂物组成的测定方法·····	(59)
第 六 章	不同方法生产的轴承钢中的非金属夹杂物·····	(62)
	非金属夹杂物的污染度·····	(62)
	碱性电炉钢中的非金属夹杂物·····	(64)
	钢包中用炉渣处理的大容量炉钢中的非金 属夹杂物·····	(70)
	钢包中用氧化钙-氧化铝合成渣精炼的碱 性电炉钢中的非金属夹杂物·····	(75)
	液态熔融物搅拌法熔炼的电炉钢中的非金 属夹杂物·····	(80)
第 七 章	轴承的接触疲劳强度及寿命与冶金因素的 关系·····	(84)
	试验方法·····	(84)
	非金属夹杂物的数量和组成的影响·····	(85)
	钢中非金属夹杂物引起的微观应力的影响·····	(95)
	杂质和气体的影响 ·····	(101)
	冶炼和精炼工艺的影响 ·····	(108)
	寿命和钢中夹杂物的相互关系 ·····	(115)
	轧制规范的影响 ·····	(117)
	纤维方向的影响 ·····	(124)
第 八 章	切削加工 ·····	(126)
	轴承钢的切削加工性能 ·····	(126)
	切削加工时毛坯的变形 ·····	(131)
第 九 章	组织转变 ·····	(140)
	状态图 ·····	(140)

	加热时的转变	(142)
	过冷奥氏体的转变	(150)
	马氏体转变	(162)
	回火时的转变	(168)
	组织转变时的超塑性	(179)
	形变热处理时的转变	(184)
第 十 章	冶金因素对热处理组织转变的影响	(187)
	淬透性	(187)
	钢中奥氏体晶粒度	(192)
第十一章	热处理	(197)
	球化退火	(197)
	轴承零件的热处理工艺	(202)
	可控气氛	(209)
	真空加热	(215)
	淬火介质	(217)
	瞬时应力和残余应力	(223)
	套圈热处理时的尺寸变化	(233)
	套圈热处理时的形状变化	(237)
	套圈磨加工时的变形	(240)
第十二章	热处理对机械性能的影响	(242)
	硬度和塑性变形抗力	(242)
	强度性能	(245)
	强度的各向异性	(249)
	形变热处理的影响	(250)
第十三章	热处理对钢的接触疲劳强度和轴承寿命的 影响	(252)
	淬火和回火工艺对接触疲劳强度的影响	(252)

	热处理对轴承寿命的影响	(258)
	磨削-精研后加热的影响	(262)
	化学热处理的影响	(264)
第十四章	组织和尺寸的不稳定性	(266)
	III X 型钢低温下的不稳定性	(266)
	III X 型钢室温下的不稳定性	(268)
	高温下的不稳定性	(271)
第十五章	轴承零件的破坏	(281)
	破坏的基本形式	(281)
	疲劳裂纹的萌生	(282)
	工艺缺陷和使用缺陷	(289)
第十六章	滚动元件表面层的塑性变形	(295)

第 一 章

滚动轴承金属材料的工作条件

在大多数情况下,滚动轴承是在较小的动负荷条件下工作,因而可以用较脆的高碳钢制造,后经完全淬透和低温回火。轴承在某些场合下应用时,要求材料具有较高的动强度,因而须采用高温回火,后经表面淬火的钢,或者采用渗碳钢。

滚动轴承所承受的负荷经滚动体(钢球或滚子)从一个套圈传至另一个套圈,而滚动体之间由保持架隔开。施加负荷后,在滚动体与套圈的接触点上产生的接触应力会导致局部变形,从而形成接触面。通常,接触面呈椭圆形。接触椭圆的两轴长度之比与两接触体的主曲率有关,而这个比值由轴承的结构确定(图1)。

因此,当钢球与调心轴承的外圈球面接触时,接触面为圆形;而钢球与内圈滚道接触时,接触面为椭圆形(图1a),圆柱滚子轴承的接触椭圆呈条带状(图1b)。最大压力发生在椭圆或条带的中心上,它超过平均压力的50%。接触面的尺寸和接触压力与主曲率和接触体的尺寸有关。接触面的尺寸和接触压力与负荷的立方根成正比。轴承零件在工作时,在接触面上所承受的压力是相当大的,一般达2000兆帕,而重负荷轴承甚至可达4000兆帕。接触区的正应力除靠近接触面的边缘有较小的拉应力外,其余几乎均是压应力。最大切应力点在约等于接触面半径的 $1/2$ 深度处^[1]。轴承滚动时,应力的分布情况不变。

• 1 •

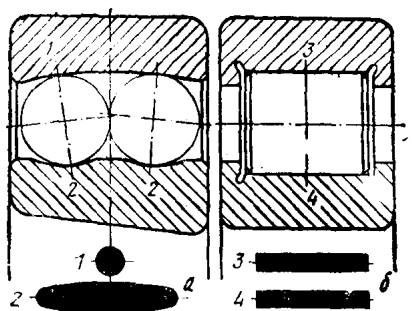


图1 接触面的形状。

a—外圈带球面的球轴承；b—圆柱滚子轴承

但是由于表面摩擦力的存在,使切应力增大^[2],从而使最大切应力的位置移向表面。这时,拉伸正应力也随之增大。轴承工作时在金属表面层发生的塑性变形会导致残余应力的产生。上述各种应力的叠加,使应力分布更加复杂化。

轴承的工作能力首先用其静负荷容量和动负荷容量来表示。静负荷容量系指极限负荷而言,在此负荷的作用下,接触区的残余变形量不超过规定的值(一般约为钢球或滚子直径的0.01%)^[3]。由于采用高硬度钢制造轴承,所以轴承具有较高的静负荷容量。动负荷容量系指轴承转完规定转数后仍未产生疲劳破坏时的负荷。高的动负荷容量同样要求轴承零件具有高的硬度。

迄今,对轴承的接触疲劳破坏机理尚未研究透彻,在产生初始裂纹的应力和初始裂纹的位置问题上尚有不同见解。根据材料的接触疲劳强度与脆性强度之间关系不大的观点,可以推测疲劳破坏主要是由切应力造成的。一般认为,金属均匀性和连续性的局部破坏(如非金属夹杂物、大颗粒碳化物、气泡、微裂纹以及其它冶金和加工工艺缺陷)会引起应力场的局部畸变,通常

导致应力增大。这种影响的程度取决于缺陷的尺寸和形状，缺陷的弹性和导热性以及缺陷与基体金属的结合程度。根据缺陷在接触面所处的位置，这些缺陷可使最大应力区的位置完全改变。

接触疲劳破坏起始于金属表面或表面下产生的微裂纹。这些微裂纹是由上述各种缺陷引起的。所有的裂纹扩展到工作表面会使小的金属单元剥离，结果形成剥落凹坑《麻点》。当在这些剥落区继续滚动时，很快形成二次裂纹，并且剥落扩展到大部分工作表面上，致使轴承完全破坏（见图 2）。

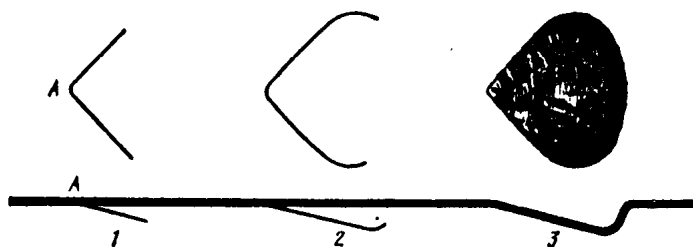


图 2 C. 沃维尤接触疲劳破坏(麻点)示意图。

1~3—剥落阶段；4—裂纹萌生区

通过接触面的滚动次数，亦即引起疲劳破坏的负荷循环次数大致与应力的十次幂成正比^[9]。在接触疲劳情况下，不存在疲劳极限，即不存在不引起破坏的安全应力。如果说疲劳极限存在的话，实际上也只能在不可能达到的试验时间内发现。

由于应力对接触疲劳寿命有很大的影响，引起应力集中的冶金缺陷对轴承的动负荷容量影响很大，而且往往是决定性的影响。

即使用同一种材料、在同一加工条件下制造的同一批轴承，其寿命也有很大的差别。轴承寿命可用破坏概率与循环次数或

转数之间的关系来表示，或者只用工作小时数的关系表示。为定量地表述这种关系，采用表示静强度的韦布尔函数。用于接触疲劳时，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是常数。

轴承寿命通常用 N_{50} 和 N_{90} 这两个统计值来表示。 N_{50} 表示运转的轴承中有 50% 达到了规定的循环次数，而 N_{90} 表示其中有 90% 的轴承达到了连续运转的规定循环次数。若用轴承的总转数或工作小时数来表示轴承寿命，则可分别采用 n_{50} 和 n_{90} 或 L_{50} 和 L_{90} 表示。同样也可采用对数平均寿命* L_{18} 来评定。

参数 k 越大，寿命离散性就越小。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。

在轴承接触表面之间的润滑油膜厚度对轴承寿命有很大影响。油膜厚度与润滑剂的性质、轴承负荷和旋转速度有关。工作表面的不平度越大，轴承正常工作条件下所需的润滑油膜就越厚。因此在制造轴承时，应力求通过精加工工序尽可能地减小工作表面的不平度，这就需要采用磨削性能好的钢材制造轴承。在低粘度的介质中（如煤油）工作时，轴承的摩擦近似于干摩擦，从而使钢的接触疲劳强度大大降低。

* 原文 *реднелогарифмическая долговечность* 可能有误，应为 *среднелогарифмическая долговечность*——校注

轴承在工作时的滚动摩擦是由于在接触面上产生局部相对滑动以及滞弹性内耗所引起的。对精密仪表轴承和陀螺仪轴承来说,滞弹性内耗的影响就更为严重,因此,要求轴承钢具有较高的微塑性变形抗力。

在接近于湿摩擦条件下工作时,轴承工作表面的磨损是由于润滑剂沾污或破坏了润滑条件产生的。对仪表轴承的工作表面质量要求特别高,即使是微小的磨损也要给予足够的重视。

为使轴承具有高的使用寿命以及能长期存放,对轴承钢的尺寸稳定性提出了相当高的要求。高碳钢淬火和低温回火后的组织中含有在使用和存放温度下易发生转变的不稳定相。这种转变的结果会使钢的比容发生变化,从而使零件尺寸发生变化。对工作在高温下的轴承零件来说,除比容的变化外,还会因应力和组织转变的同时作用产生塑性变形。塑性变形是使钢的尺寸发生变化的另一个原因。尺寸变化产生的不良后果是:轴承在使用过程中会因间隙变小而发生“卡死”现象;套圈安装过盈量较小时,可能独自绕轴转动;滚动体的直径发生变化,使个别钢球和滚子出现过载;由于各支承轴承的尺寸变化均不相同,致使轴的旋转精度遭到破坏等。轴承零件加工精度的允许误差值略能说明尺寸稳定性所要求的水平。根据零件尺寸和轴承精度等级,制造时的相对误差一般在 $10^{-3} \sim 5 \times 10^{-5}$ 毫米/毫米范围内。轴承在使用过程中的尺寸变化只占制造误差的很小部分,约为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 毫米/毫米。

对于长期在高温下工作的轴承,重要的是保持其硬度不变,因为硬度决定着轴承的静负荷容量、动负荷容量以及钢的组织 and 尺寸稳定性。因此,在 $120 \sim 250^{\circ}\text{C}$ 范围内工作的轴承应采用耐热性较高的低合金钢制造,而在更高温度下工作的轴承则应采用耐热工具钢制造^[4]。化工、原子能以及其它工程部门,一般

采用高碳不锈钢制造的耐腐蚀轴承。除对负荷容量的一般要求外,这种轴承还应具有抗腐蚀性介质的能力,即抗水、酸、碱、低温液体(液态氢、液态氧)和碱性金属化合物等腐蚀的能力。这些腐蚀性介质同时也应当成为润滑剂。轴承在特殊介质中工作时破坏的主要原因之一就是腐蚀机械磨损^[6]。在轴承磨损机理中,氧的影响最大。轴承在真空中工作时的磨损要比在空气中工作时的小。用耐腐蚀钢制造的轴承要比碳钢制造的轴承磨损小。在高真空下,如果轴承在缺少润滑剂的条件下工作,则其材料的磨损会因咬住而加剧^[6]。

第 二 章

轴承钢的化学成分

鉴于原有的和新兴的工业以及农业部门对轴承使用性能的要求各不相同，故制造轴承套圈和滚动体所用之钢种和合金种类繁多。

广泛应用的高碳轴承钢大致可分为两类：

1. 在一般条件下工作的轴承钢(铬钢、铬钼钢、铬锰硅钢以及铬锰钼钢)。

2. 在腐蚀性介质中或高温条件下工作的轴承钢(耐腐蚀钢、耐热钢)。

此外，还广泛采用低碳渗碳轴承钢和少量采用具有特殊物理性能的合金。

常用轴承钢(铬钢和含钼与不含钼的铬锰硅钢)

早在1900年初就研制出的III X 15高碳铬轴承钢，由于加入了适量较便宜的铬元素，而具有较高的接触疲劳强度和较高的耐磨性。随着轴承尺寸的增大，要求钢具有足够的淬透性。为满足这一要求，提高了III X 15钢中硅、锰的含量，以形成III X 15 CT钢。许多国家是通过加入少量钼的方法来提高III X 15钢的淬透性。III X 15、III X 15 CT以及国外类似的钢种均属优质低合金过共析钢。这些钢可作为耐磨结构钢使用，