

轴承、材料及 表面工程研究

——罗虹论文选

罗 虹◎著

ZHOUCENG
CAILIAO

JI BIAOMIAN GONGCHENG YANJIU



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

责任编辑 王 旻

特邀编辑 孟苏成

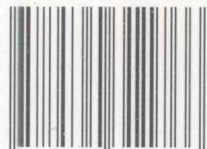
封面设计  H.C. CULTURE

轴承、材料及 表面工程研究

ZHOUCHENG CAILIAO
JI BIAOMIAN GONGCHENG YANJIU

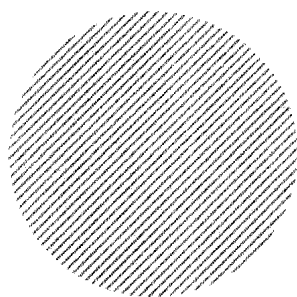
——罗虹论文选

ISBN 978-7-5643-1176-6



9 787564 311766 >

定价: 78.00元



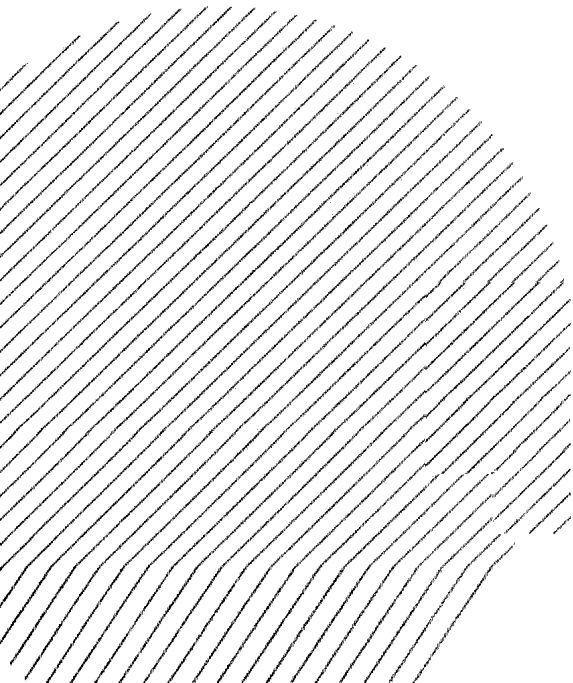
轴承、材料及 表面工程研究

ZHOUCHENG
CAILIAO

JI BIAOMIAN GONGCHENG YANJIU

——罗虹论文选

罗 虹◎著



西南交通大学出版社
· 成 都 ·

前 言

这是一本迟来的书，也是一本正当时的书。说迟是指我本人已停止科研工作 15 年，本书中的绝大部分工作都是那之前完成的。而说正当时，是因为经过这 17 年的企业经营发展过程，这些研究内容被一样样地应用到各种产品上，这期间又做了更加大量、细致的工作，走过了更加艰苦的过程，使这些研究终于展现出了我内心期望的效果，成就了风力发电机主轴轴承、变桨轴承、偏航轴承、增速箱轴承、轧钢机轴承、机床砂轮轴及主轴轴承、瓦楞辊等产品，使它们具有了各种不同于国内外同类企业所生产的产品特性或品质。故在我的眼中，这些当年的思想火花及智慧已经与上述这些产品结合为一体，成为了不可分割的部分，所以说正当时。

我 21 岁前，用了 7 年时间在全身心地学习长笛演奏，随着练习的深入，演奏的作品愈趋于完整，逐渐体会到优秀的艺术作品本身往往具有非常强的逻辑关系和结构完整性，乐器练习中这种无限次重复的方法，往往使练习者本身在潜移默化中也受到了严格的逻辑训练。关于这一点我感觉是受益颇深的，也影响了我科研及经营企业的方式。

本书收集了我自 1987 年至今在轴承、材料及表面工程领域所作研究的主要成果。这些技术成果被成功地应用在风力发电机主轴轴承、变桨轴承、偏航轴承、增速箱轴承、轧钢机轴承、机床砂轮轴及主轴轴承、瓦楞辊等产品上。其中大部分为国内外首次应用。其中，空心圆柱滚子轴承研究、瓦楞辊激光表面处理技术、轧钢机轴承强韧化研究、大功率激光表面处理技术在风力发电机轴承上的应用研究等在国内都是具有开创性的工作，也成为了京冶轴承的支柱产品。且空心圆柱滚子轴承的研究至今仍处于领先地位，并曾经被雷天觉先生称为是滚动轴承近 70 余年来在结构上的最大成功变革之一。瓦楞辊激光表面强化技术从 1996 年在我公司开始大规模应用，到 2002 年国内仅有我公司拥有该项技术。其后至今，此项技术已在全国大面积、广泛地被推广采用。大功率激光表面处理技术在风力发电机轴承上的应用，是我公司首创，并至今在世界范围仍然只有京冶轴承公司能够成熟掌握、使用；该技术使其产品在滚道硬度、齿面硬度、硬化层深度等性能方面取得了重要的进展，尤其对超大型风机轴承的开发将产生关键性的作用，使其具有更高的寿

命和可靠性，这些对海上风机的发展将是至关重要的。

关于表面工程的研究，本书中涉及高能束、化学热处理、镀层、金属喷涂、物理气相沉积等多个领域。就性能方面，研究了材料的摩擦磨损、接触疲劳、润滑、强韧性等。这种在方法和性能方面的交叉比较研究，使很多方法和工艺具有了较强的适用性，对企业开发更多产品提供了重要的支持。在多年的研究中，作者一直坚持所有的课题均面对工程应用，紧密结合产品和零件，文中的所有试验方法及试验条件设定均来自产品或零件的实际工况，所有研究项目均起始自产品或零件的失效分析。上述所有这些，使所取得的成果比较容易、成功地被运用到各种产品上，并取得了出乎意料成果。

作者认为，本书的出版，在研究方法上的特点和贡献应更大于在科研成果上的作用。

对于本书的出版，作者要感谢西南交通大学出版社孟苏成先生的大力帮助。同时，还要感谢罗西、苗青所做的整理工作。

罗 虹

2011年2月28日于北京

目 录

第一篇 空心圆柱滚子轴承研究

空心圆柱滚子轴承及其磨损问题	3
空心圆柱滚子轴承失效分析及提高耐磨性的研究	15
GCr15 钢等温马氏体转变及残余奥氏体研究	22
1C-1.5Cr 钢等温马氏体的 TEM 观察及其对残余奥氏体的影响	31
空心圆柱滚动体接触状况的分析研究	37
残余奥氏体对空心滚动体接触疲劳的影响	46
残余奥氏体对 GCr15 钢强韧性的影响	51
碳氮共渗提高空心圆柱滚子轴承寿命的研究	57
GCr15 钢块状残余奥氏体在滑动磨损中的行为	63
The behaviour of block-like residual austenite of 52100 steel in sliding wear	71
空心圆柱滚子轴承应力腐蚀磨损特征	80
空心圆柱滚子轴承的磨损与润滑	84
磨床主轴用多列空心圆柱滚子轴承失效分析	86

第二篇 表面工程研究

激光相变硬化钢在滑动与滚动磨粒磨损中的摩擦学行为	95
35CrMo 钢离子氮化与激光相变硬化复合处理及其耐磨性的研究	104
激光相变硬化对离子渗氮层的影响	111
电弧喷涂涂层及其滑动磨损行为	117
电弧喷涂技术在水轮机转轮空蚀修复中的应用	124

35CrMo 钢离子氮化层滚动磨料磨损研究	129
几种不同硬度材料的滑动磨粒磨损特征	134
镀铬层在固定磨料挤压作用下的磨损行为	143
磨粒磨损中基体表面形成复合材料层的作用机理及其 影响因素的考察	149
不同硬度材料在固定磨料挤压作用下的磨损机理研究	157
WS ₂ 和 MoS ₂ 溅射膜在油润滑下的摩擦学行为	159
射频溅射 MoS ₂ 、WS ₂ 固体润滑膜在脂润滑下的摩擦学特性	165
脂润滑下二硫化钨溅射膜的摩擦特性	172
低硬度薄膜厚度的简易检测方法	180

第三篇 失效分析

高速瓦楞辊的磨损失效分析	185
改进型轧机轴承失效分析	192
汽车减震器阀片失效分析及提高寿命的研究	196
风力发电机主轴轴承失效分析	203

第四篇 材料研究

Si ₃ N ₄ 陶瓷刀具在切削淬硬钢时的磨损行为	215
干摩擦条件下 Ti(CN)-Al ₂ O ₃ 复合陶瓷与金属摩擦副的 摩擦学特性研究	223
陶瓷刀具材料的评价	231
轧机轴承强韧化工艺的试验研究	234
GH49 合金在蠕变断裂过程中弯曲晶界的作用	245
《轴承、材料及表面工程研究——罗虹论文选》中文章发表时间及 期刊一览表	266

第一篇

空心圆柱滚子轴承研究

ZHOUCHENG CAILIAO JI BIAOMIAN
GONGCHENG YANJIU

空心圆柱滚子轴承及其磨损问题

罗 虹 刘家浚

(清华大学摩擦学研究所)

摘 要 空心圆柱滚子轴承是一种新型滚动轴承,其结构特点是滚动体的空心度大于 50%,无保持架,满装滚子和滚动体始终受有预负荷。它具有高刚度、高回转精度和高极限转速等特性,特别适用于机床主轴轴承。空心圆柱滚子轴承的主要失效形式是磨损和滚动体的弯曲疲劳断裂。

关键词 滚动轴承,空心滚子轴承,磨损

1 前 言

Miller 早在 1897 年就发现用金属带绕成的滚动体有较好的柔性,用其制造滚动轴承可减轻冲击载荷的影响^[1]。1947 年,有人曾对空心滚子轴承进行了更深入的研究,发明了带预负荷的空心滚子轴承,即在空心滚动体与内、外滚道间存在预应力^[2]。20 世纪 70 年代初,美国国家航空航天局(NASA)的研究人员也曾进行了一系列的试验研究^[3-5],主要是将空心滚动体应用于高速轴承,靠预负荷来防止滚动体在高加速度和大离心力下打滑。Bowen 指出预加负荷的空心圆柱滚子轴承除有这种优点外,还首先发现其具有高回转精度和高刚度的特性^[6-7],特别适用于机床主轴轴承。近年来,我国也开展了有关的研究,并发明了具有更佳性能的多列空心圆柱滚子轴承^[8-9],已有几十个单位将这种轴承成功地应用在多种机床产品或旧设备的改造上。

空心圆柱滚子轴承的优点与其承受的预负荷密切相关,但随着轴承的运转,过盈量会因磨损而逐渐减小,最终使轴承失效。特别是润滑介质不洁净或润滑条件不理想时,磨损将成为主要的失效形式^[10-12]。

2 空心圆柱滚子轴承的结构与特性

2.1 结构特点

空心圆柱滚子轴承的结构如图 1 所示。它是由带挡边的外圈、空心圆柱

滚子和不带挡边的内圈所组成（也可以是内圈有挡边而外圈无挡边），无保持架。内圈滚道的直径比装在外圈滚道滚动体的内接圆的直径稍大。因此，轴承装配之后空心滚动体因受预负荷的作用而略呈椭圆形。在装配应力和外载的作用下，空心度（即滚动体内孔直径与外径之比的百分数）对滚动体变形和内孔最大弯曲应力的影响如图 2 所示。

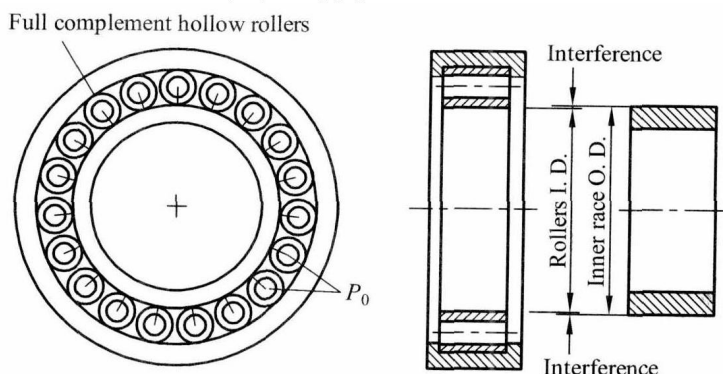


Fig.1 The preloading(P_0) of a hollow roller bearing

图 1 带预应力的空心圆柱滚子轴承 (P_0 为预负荷)

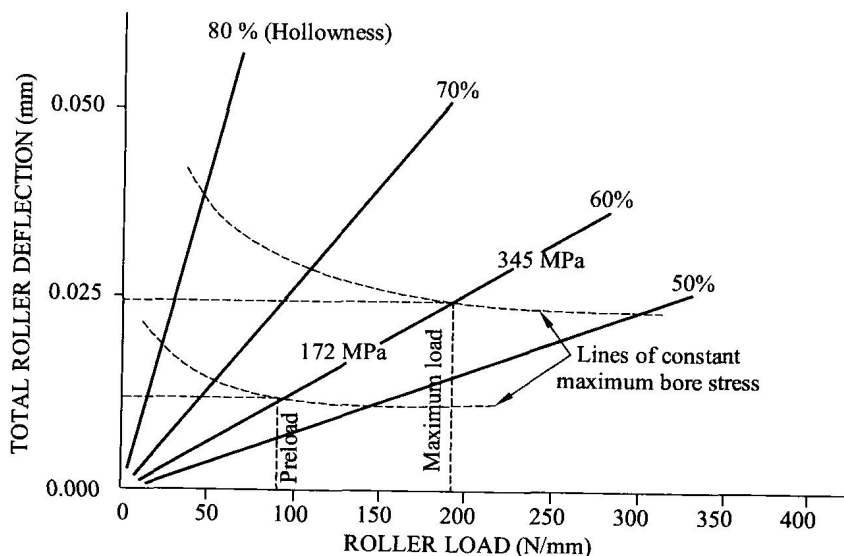


Fig.2 The effect of hollowness on the deflection and the maximum bore stress of roller with 12.7 mm diameter^[13]

图 2 空心度对滚动体 ($\phi 12.7$ mm) 变形及内孔最大弯曲应力的影响^[13]

这里所说的变形，既包括滚动体的弯曲变形，也包括接触处的接触变形。因为 50%空心度之滚动体的变形主要是接触变形，所以这更接近于实心滚子，

而 80%空心度的滚动体由于柔性太大, 承载能力低, 故此实际使用的空心度一般为 60%~70%。

多列空心圆柱滚子轴承增加了滚动体的列数, 因而采用较大的空心度不会降低其刚性。提高滚动体的柔性不仅能够增大轴承的阻尼特性, 而且更有利于吸收加工误差。根据理论推导, 空心滚动体的长径比 $L/D \leq 1.08$ 时, 其滚动力矩大于扭转力矩, 因而可以取消中挡边, 以利于提高多列滚道的同步度及其直径的一致性。采用多列空心圆柱滚子轴承的最大优点是可以进一步降低轴承原始滚道的中心偏移量。

2.2 高刚度

所谓刚度是指轴承内圈相对于轴承外圈移动单位距离所需要的载荷。图 3 所示是对相同尺寸的空心与实心滚子轴承的刚度进行的比较。由图可以看出, 在额定的负荷条件下, 空心圆柱滚子轴承的刚度比实心滚子轴承的大。这是因为除了空心圆柱滚子轴承满装滚子, 具有更多的滚动体承受载荷以外, 而更主要的则是其存在预应力, 使所有的滚动体均承受载荷 (见图 4); 相反, 由于实心滚子轴承存在间隙, 在比较低的载荷下只有少数的滚动体承受载荷, 故其接触变形比较大。随着载荷的不断增加, 进入接触状态的滚动体逐渐增多, 刚性的增加速度变快, 导致其比空心滚子轴承的更大。但是, 对于机床主轴负荷来说, 空心圆柱滚子轴承的刚度是足够的。

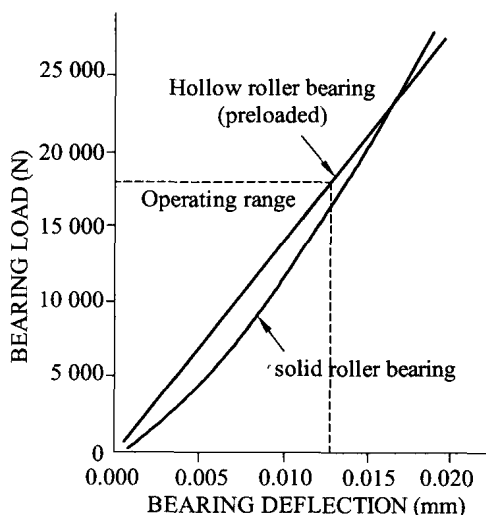


Fig.3 A comparison of solid and hollow roller bearing stiffness
(the inner diameter of bearing is 60 mm) ^[13]

图 3 内径 60 mm 的实心 and 空心滚子轴承刚度比较^[13]

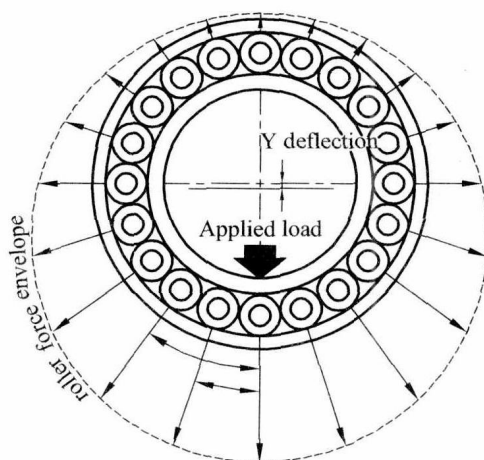


Fig.4 The roller load distribution with the applied radial load in a preloaded bearing^[13]

图 4 在径向载荷下含预应力轴承的滚动体承载分布^[13]

2.3 高回转精度

由于实心滚子轴承存在着径向间隙, 各种制造误差都直接反映到轴的径摆上, 故其回转精度低; 而空心圆柱滚子轴承无游隙, 零件的各种制造误差大部分可以凭借滚动体的柔性被吸收掉; 如果采用相同尺寸精度的零件进行装配, 则空心圆柱滚子轴承的回转精度可比实心滚子轴承的高两级^[14]。Bhateja 等^[15]曾经指出, 只要控制好零件的加工精度和适当的设计参数, 就很容易使主轴径摆小于 $1\ \mu\text{m}$ 。

据文献[9]报道, 反映空心圆柱滚子轴承回转精度的指标为轴承原始滚道的中心偏移量, 对其影响最大的因素是滚动体的尺寸偏差, 然而当加工精度达到一定水平之后, 再继续提高加工精度或降低滚动体尺寸分组误差等, 对减小轴承原始滚道中心偏移量的作用却都不大。最有效的途径是增加轴承滚动体的列数, 因为多列的偏移量比单列的小 $1.0 \sim 0.7^{n-1}$ 倍 (n 为滚动体列数)。采用多列空心圆柱滚子轴承, 回转精度可以满足精密机床 $0.2 \sim 0.8\ \mu\text{m}$ 轴心偏移的要求, 而且刚度也比动、静压轴承的大, 约为同尺寸实心滚子轴承的 $1.5 \sim 2.0$ 倍。这对于机床主轴具有重要的意义。

2.4 高极限转速

影响滚动轴承极限转速的因素很多, 其中最重要的是使用温度, 因为它对轴承润滑产生着很大的影响。轴承中的热量主要来自两个方面, 即保持架

摩擦和油的搅动。空心圆柱滚子轴承没有保持架,减少了热源,因而更适合于高速下工作。在高速试验时,空心圆柱滚子轴承很容易达到 $3.45 \times 10^6 DN$ 值。这主要是由于以下原因^[13]:

- a. 空心滚动体的重量轻,其离心力约为实心滚动体的 60%;
- b. 空心滚动体的表面积大,冷却条件好;
- c. 没有保持架,油可以在轴承中充分地流动;
- d. 预应力的存在使滚动体不易滑动,相邻滚动体可以保持一定的间隙;
- e. 空心滚动体具有很好的柔性,滚动中可以形成油膜而不会将油排出。

国外高速空心圆柱滚子轴承在 $3 \times 10^6 DN$ 值下连续运转 1 000 h 也没有发生过热和明显的磨损^[16]。一般空心滚子轴承的 DN 值比实心滚子轴承的高两倍^[8]。

3 空心圆柱滚子轴承的应力分析与失效特征

3.1 滚动体内孔弯曲应力分析

图 5 所示是空心滚动体每转动 90° 时应力幅沿壁厚的分布^[12]。可以看出,滚动体的弯曲疲劳寿命是受内孔应力控制的。对于高速轴承(超过 $1 \times 10^6 DN$ 值),由于油膜较厚而且空心滚动体的重量轻,以及滚动体的柔性增大而使接触应力得到改善,故此接触疲劳寿命往往可比弯曲疲劳寿命长^[13]。如空心球轴承在 $3 \times 10^6 DN$ 值下进行试验,内孔最大切向应力在从 470 MPa 的拉应力到 153 MPa 的压应力之间变化,内孔即在某些加工或材料缺陷处萌生疲劳裂纹,最后造成滚动体弯曲疲劳失效^[3]。

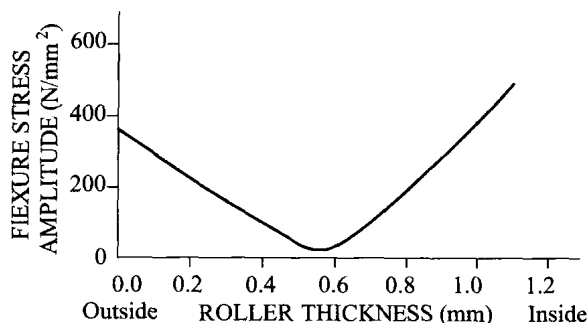


Fig.5 The distribution of stress amplitude along the thickness of roller^[12]

图 5 应力幅沿滚动体壁厚的分布^[12]

Nypan 等^[4]曾采用有限元应力分析与试验相结合,对空心球轴承进行了测算,结果表明当内孔拉应力在 480~550 MPa 时,球出现断裂失效,而在 280~

340 MPa 时未发生弯曲疲劳断。Bamberger 等^[5]曾进一步采用空心圆柱试样进行了试验,发现内孔拉应力在小于 379 MPa 时不出现弯曲疲劳,失效形式为接触疲劳麻点剥落;而当内孔拉应力大于 490 MPa 时则发生弯曲疲劳断裂。在一般机床轴承的设计中,滚动体内孔拉应力均不超过 345 MPa,因而空心圆柱滚子轴承可以保持比较高的工作寿命。

在使用过程中不允许出现空心滚动体的断裂。影响其断裂的因素包括空心度、使用载荷、材料性能和内孔表面状况等,其中影响最大的是滚动体的空心度。不同空心度下滚动体内孔弯曲应力随载荷的变化如图 2 和图 6 所示^[5],可见许用载荷是随空心度的增大而减小,特别是空心度超过 70%以后,这种影响就更加明显。

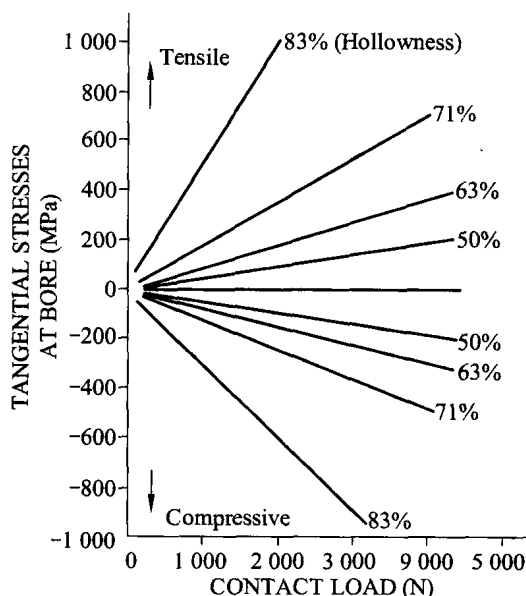


Fig.6 Calculated tangential stresses at bore of the hollow test bar as function of contact load

图 6 空心试棒内孔最大切向应力随接触载荷的变化^[5]

3.2 轴承接触应力分析

当轴承在超过 $1.5 \times 10^6 DN$ 值下运转时,滚动体所产生的离心力是不可忽视的,它能导致滚动体与外滚道间的赫兹应力增高,显著降低接触疲劳寿命。例如,内径为 150 mm 的实心滚子轴承在 $3 \times 10^6 DN$ 值下转动,当载荷从 8 900 N 增加到 17 800 N 时,内、外滚道的赫兹应力将由 1 138 MPa 和 1 413 MPa 分别增加到 1 331 MPa 和 1 579 MPa;但在相同条件下,如果采用空心滚动体,

则其与外滚道的接触应力可以减小 7%。图 7 示出了内径 150 mm 实心球轴承和 50%空心度球轴承在不同载荷下的理论疲劳寿命随 DN 值的变化（通过疲劳寿命计算所得 DN 值对轴承寿命的影响），可见在 $3 \times 10^6 DN$ 值和 17 800 N 载荷下，体积减小 50% 的空心球轴承的疲劳寿命比实心球轴承的高 50%^[3]。

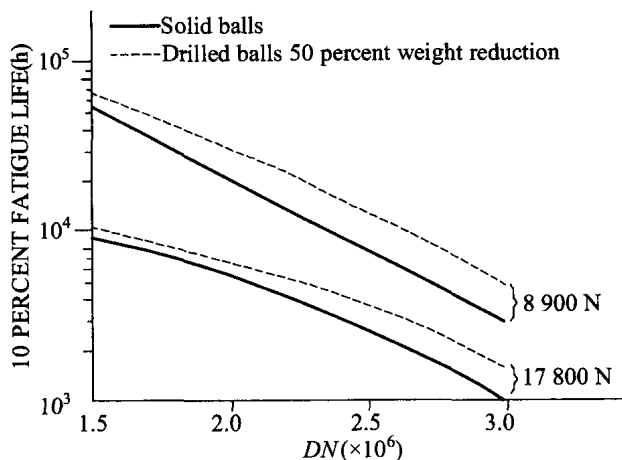


Fig.7 Theoretical fatigue life of 150mm bore ball bearing with solid and 50 percent drilled balls as function of DN value^[3]

图 7 内径 150mm 实心球轴承和 50%空心度球轴承在不同载荷下的理论疲劳寿命随 DN 值的变化^[3]

文献[17]采用相同材料（0.2%C 钢软氮化处理）以及相同外形尺寸的空心和实心试棒进行了接触疲劳试验，发现实心圆柱试样和空心圆柱试样的接触疲劳极限分别为 $900 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 和 $1\,300 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。两者的失效形式均为疲劳麻点剥落。

3.3 失效特征

3.3.1 磨损失效^[14]

由于空心圆柱滚子轴承的允许磨损量远比普通轴承的小，在未出现接触疲劳的情况下，只要表面发生了微量磨损，就可使轴承因过盈量消失而失效。因此，材料耐磨性已上升为主要的性能指标。

空心圆柱滚子轴承的磨损形式为滑动磨损，其磨粒主要来自材料脱落的碳化物^[18、19]以及润滑油中的污染物。引起滑动磨损的因素包括接触应力、角加速度和滚动体的组件质量等^[20]。特别是对满装滚子轴承，由于相邻滚动体在节圆处的速度方向相反，只能形成物理吸附油膜，当平衡间隙被破坏时，相邻滚动体就可能发生摩擦^[16]，如果润滑介质中有磨粒存在，当其从滚动体

之间通过时，即使平衡间隙未遭破坏也会造成磨损。

3.3.2 滚动体断裂失效

由于空心圆柱滚子轴承的结构特点，其在高速度条件下的接触疲劳寿命往往大于内孔弯曲疲劳寿命。例如，内径为 150 mm 的空心圆柱滚子轴承在 3.22×10^6 DN 值和 26 688 N 载荷下旋转了 1 008 h 没有出现接触疲劳，但是却有三粒滚动体因内孔表面的非金属夹杂物而引起了弯曲疲劳断裂^[16]。

研究表明，滚动体的空心度是影响失效的一个重要因素。表 1 列出的是采用外径为 9.5 mm 的空心圆柱试样进行接触疲劳试验的条件和试验结果^[5]。可以看出，在提高空心度的条件下，即使把载荷降低 54.4%，滚动体也仍然在很低的寿命下就发生了弯曲疲劳断裂。除此以外，内孔的加工粗糙度同样也是一个相当重要的影响因素，过大的粗糙度会引起应力集中。Sachs 等^[21]曾经指出，在表面粗糙度 $R_a=0.15 \sim 0.20 \mu\text{m}$ 的情况下，AISI 52100 钢的室温弯曲疲劳极限为 620 MPa (10^8 周次)，而上述试验中的内孔平均粗糙度为 $0.33 \mu\text{m}$ ，由此可以看出其影响之显著。

表 1 空心度对滚动体失效的影响

Table 1 The effect of hollowness on the failures of roller

No.	Hollowness (%)	Load (N)	Maximum tangential	Maximum Hertz contact	Failure models	Fatigue life 10 percent life
			stress at bore (MPa)	stress (MPa)		
1	71	2 050	379	4 480	Fatigue pit	13.9×10^6
2	83	934	490	3 450	Flexure fatigue fracture	0.5×10^6

4 空心圆柱滚子轴承的磨损

据文献[15]报道，当把空心圆柱滚子轴承应用于机床主轴时，其使用寿命是受磨损控制的。因此，采取各种手段来保持轴承正常工作所需要的过盈量，显然是进行空心圆柱滚子轴承应用研究的关键。

4.1 滑动磨损^[22]

试验表明，常规热处理的 GCr15 钢的滑动磨损机制主要是犁削，而造成表面犁沟的磨粒主要是碳化物颗粒。