内燃机
滑动轴承材料

张宝义 编著

机械工业出版社

本书较系统地叙述了内燃机滑动轴承系统的工况与润滑状态；轴承合金材料应具备的性能；轴承双金属的制造方法和轴承合金材料的金相结构及其对轴承合金材料性能的影响；轴承合金材料性能与使用寿命的关系；轴承合金材料的应用范围及其选用原则；内燃机滑动轴承常见损坏形式的图谱。并详细地介绍了内燃机滑动轴承合金材料及其试验研究方法，同时列举了广泛应用的内燃机滑动轴承合金材料的大量性能试验数据。本书是一本关于内燃机滑动轴承材料的专著，可供从事内燃机滑动轴承设计、生产和试验研究的工程技术人员以及高等院校内燃机专业的师生参考。

内燃机滑动轴承材料

张宝义 编著

责任编辑：钱既佳　责任校对：孙志鸽　刘秀芝
封面设计：刘　代　版式设计：乔　玲
责任印制：张俊民

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）
（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）
中国农业机械出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32 · 印张 11 1/8 · 字数 247千字
1989年12月北京第一版 · 1989年12月北京第一次印刷
印数 001—850 · 定价：10.70元

ISBN 7-111-00697-6/TK·31

序

本书是长春汽车研究所金属材料研究室张宝义工程师根据多年实际工作经验编写的有关内燃机滑动轴承材料的专著。书中全面、系统地论述了内燃机滑动轴承的载荷及润滑状态及其对轴承材料的要求；各种常用轴承材料的性能特点和应用范围；轴承合金的金相结构及其对轴承性能的影响；获得不同金相结构的工艺方法；轴承材料的试验技术及制造技术；以及内燃机轴承的损坏原因的诊断和分析等等。书中还收集了大量图表、数据，便于读者参考使用。

随着内燃机转速和比功率的日益提高，对轴承的设计和材料选用等要求日益严格。本书对于内燃机轴承设计、研究、制造部门的工程技术人员均有实用价值，亦可作为大专院校有关专业的选修或参考教材。希望本书的出版对有关专业技术人员能有所裨益。

陆孝宽

前　言

本书是笔者于1980年4月，为上海交通大学内燃机轴承专业研究生讲授《内燃机滑动轴承材料》，一稿的基础上，经修改、充实之后撰写而成。此后，笔者在其他场合也讲授了《内燃机滑动轴承材料》部分章节，并征求了一些轴瓦厂和发动机厂的工程技术人员的意见，他们认为《内燃机滑动轴承材料》有一定的参考与使用价值，希望得到一本系统叙述内燃机轴瓦材料的专著。此后，笔者认真收集了国内、外有关文献和资料，阅读并作了大量的笔记。同时又总结了所做的试验研究工作，写了"轴承合金金相组织与性能"、"汽车发动机轴瓦常见的损坏形式及其分析"和"几种常用的汽车发动机轴瓦双金属结合强度的测定"等文章，作为撰写本书的试笔。

这些文章先后发表在《汽车技术》杂志上，激起了笔者多年来想写一本《内燃机滑动轴承材料》的小册子的想法。这一想法得到原长春汽车研究所副所长、吉林工业大学名誉教授陆孝宽先生、中国汽车技术研究中心主任朱德照高级工程师的支持，他们审阅了《内燃机滑动轴承材料》的写作大纲，提出了不少指导性建议，并写了推荐信。

撰写时，遵照他们的指导性建议，较详细地叙述了内燃机滑动轴承材料及其性能的比较，材料的应用及轴承双金属制造工艺技术，还增加了轴承合金金相组织和轴承损坏形式图谱等内容，同时将国内、外近些年有关内燃机轴承材料及其试验技术的新发展，轴承表面镀层的改进等也写进本书。

笔者想通过本书的叙述，给从事内燃机滑动轴承设计和制造的工程技术人员对于内燃机轴承材料有一个较全面的了解。并列举了轴承材料试验研究方法及其获得的大量试验结果，为技术人员选择轴承材料和控制轴承双金属制造质量时作参考用。

这里，笔者向上海交通大学机械工程系672教研室主任王成焘、李柱国和吴世华副教授等，为他们给了笔者最早编写《内燃机滑动轴承材料》的机会，表示衷心感谢。向为撰写和出版本书提供条件、文献资料和付出劳动的汽车研究所的领导、同事和出版社的同志们致以谢意。对陆孝宽教授和朱德照高级工程师给予的关心和指导，笔者的感激之情是难以用语言表达的，谨以此小册子作为礼物，奉献给陆孝宽教授和朱德照高级工程师。

由于笔者才疏学浅，实际工作经验不够丰富，初次写这样的专业书，加之时间仓促，本书的不足之处，乃至错误在所难免，敬请广大同行和读者批评指正。

笔　者

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertong

引　言

滑动轴承材料，是机械制造工程中的一种结构材料。因此，同其它结构材料一样，也要求具有一定的机械强度。由于滑动轴承在机械中的特殊作用，它传递（或支承）载荷并相对滑动，所以，它还应具有小的磨损和动力消耗。这正是滑动轴承材料与一般结构材料的不同之处。

特别是内燃机滑动轴承，工作在较大的油膜压力、较高的油膜温度以及润滑油高温氧化生成有机酸腐蚀的条件下，所以，制造内燃机滑动轴承的材料还应具备一些良好的轴承特性，才能适应内燃机不同工况的使用要求，使之耐久而可靠地工作。

内燃机的可靠性和使用寿命、尺寸和重量，以及一些重要的经济技术指标，在很大程度上取决于制造它的主轴承和连杆轴承材料的机械物理性能及其轴承特性。这就十分确切地说明了轴承材料在内燃机设计与制造中的重要性。如果仅仅强调轴承材料对内燃机的重要性，而忽视了与之使用密切相关的设计计算、结构、加工装配、润滑油品质及润滑状态等也是不适宜的。众所周知，内燃机滑动轴承系统是典型的流体动力润滑系统，其工作状况完全依赖系统的润滑状态，而轴承系统的润滑状态又与轴承结构、加工装配精度、润滑油品质等紧紧地联系在一起，共同影响着轴承系统的可靠性和耐久性。使用实践不断证明，没有一个较理想的结构设计和较好的润滑状态，即使有性能"最佳"的轴承材料也是无法满足工作要求的。因此，任何脱离具体的轴承系统而强调轴

承材料性能的想法和作法都是不切实际的。迄今为止，尚无一种"最佳"的轴承材料，只有在一定使用条件下的较好轴承材料。正因如此，各种轴承材料都是由实际使用情况的要求而开发生产的，又因具有一定的良好性能而被应用和发展着。所以，任何一种轴承材料不可能而且也决不可能代替其它所有的轴承材料。

内燃机滑动轴承材料和制造技术的研究开发工作历来都受到设计和制造者的普遍重视。所以，从1839年英国人伊萨克·巴比特获得了第一个锡基合金轴承技术专利以后的100多年间，内燃机滑动轴承材料在各国都形成了各自的材料系列，而且通过专用的试验装置和研究方法，得到了十分有用的轴承材料性能数据，供内燃机设计和制造者使用。为了满足内燃机工作特性和载荷特点的不断变化及强化的要求，各国都在进行着极其广泛的研究开发工作，其规模之大和领域之广都是前所未有的。

近半个世纪来，在实验室内模拟发动机的各种工况进行轴承材料的性能测试，不仅得到了大量有用的数据，同时发展了一批新的轴承合金材料和质量可靠的制造技术。诸如铜铅合金和铅青铜轴承表面电镀第三层软合金，大大改善了轴承的使用性能，扩大了应用范围；用压延方法成功地大量生产了6%锡和20%锡的铝合金轴承双金属，粉末冶金轧制铝铅合金轴承的工业化生产，使铝合金轴承的应用有了新的增长；铝硅合金轴承材料的研究成功，为大功率柴油机应用增压技术和提高增压度做了技术准备；铝锌合金轴承材料的开发，克服了20%锡铝合金轴承材料某些性能的不足，又降低了制造成本；最近研究成功的铝硅锡合金，由于合金中含有软相和硬脆相、改善了轴承的摩擦学特性，是较好的轴承合金

材料。为适应高速增压强化发动机的设计与制造的要求，国外发展了长菱形轴承（Rhomboid-bearing）和螺旋轴承（Helix-bearing）[39]，并将铅锡合金镀覆到有双螺纹和单螺纹槽的轴承合金层表面上，更充分地发挥了轴承合金材料和镀层材料的良好轴承性能。镀层是现代内燃机滑动轴承不可分割的重要组成部分，铅合金镀层中的锡、铜和铟的扩散损失，降低了铅合金镀层的耐腐蚀性、耐磨性和抗疲劳强度，影响轴承的可靠性与使用寿命。国外通过大量的试验研究工作，开发了二金属栅层[43]和三金属栅层[44]系统，更好地防止或减缓了镀层内锡和铟的扩散损失，从而稳定了镀层的轴承性能，提高了轴承的可靠性和使用寿命。

总之，内燃机滑动轴承合金材料的构成发生了巨大的变化，这无疑对提高发动机的可靠性和耐久性，改善其经济技术指标，减少功率损耗和对环境的污染是十分有利的。

在机械制造工程中，内燃机滑动轴承合金材料的研究与开发工作始终居于首位，一些轴承合金材料总是先在内燃机上积累了一定的使用经验之后，才能推广应用到机械制造工程的其它领域中去。

在内燃机众多的轴承系统之中，以曲轴主轴承和连杆轴承系统中的工作载荷、润滑状态等最为复杂和典型，使用的轴承合金材料亦最多。所以，本书试图对内燃机曲轴主轴承和连杆轴承系统的工况及其特点，应用的合金材料种类，它们的性能及使用范围，试验装置和方法，轴承双金属的制造技术及其对轴承合金材料使用性能的影响等，作较完整系统的叙述。

目　次

引言
第一章　内燃机轴承的工作特点及状态……1
第一节　内燃机轴承的工作特点……1
第二节　轴承工作状态及对材料的要求……2
一、轴承的工作状态……2
1、液体（润滑）摩擦……4
2、边界（润滑）摩擦……4
3、干摩擦……5
4、混合摩擦……5
二、对轴承材料的要求……6
1、油膜压力……7
2、油膜厚度……8
3、油膜温度……9
4、润滑油流动状态……10
5、轴承材料应具备的性能……11
第三节　轴承材料性能及其相对比较……12
一、疲劳强度……12
二、承载能力……18
三、抗咬粘性……20
四、顺应性……22
五、嵌藏性……24
六、耐腐蚀性……26
七、耐磨性与减磨性……28
八、机械强度……31
九、导热性和热膨胀系数……32

十、轴承双金属的结合强度 ……34
十一、轴承材料的工艺性及其成本 ……34
第二章 合金金相结构与性能 ……37
第一节 轴承合金金相结构概述 ……38
第二节 轴承合金材料金相结构 ……41
一、巴氏合金 ……41
1. 锡基巴氏合金 ……41
2. 铅基巴氏合金 ……45
二、铜铅合金及铅青铜 ……49
1. 铜铅合金及铅青铜的金相组织 ……50
2. 合金元素对金相组织的影响 ……52
三、铝基合金 ……53
1. 高锡铝合金 ……54
2. 低锡铝合金 ……56
3. 铝铅合金 ……56
4. 铝硅合金 ……59
5. 铝锌合金 ……61
6. 铝锑镁合金 ……62
第三节 轴承合金金相组织与性能 ……63
一、巴氏合金 ……66
1. 锡基巴氏合金 ……66
2. 铅基巴氏合金 ……68
二、铜铅合金和铅青铜 ……68
三、铝基合金 ……69
1. 铝锡合金 ……70
2. 铝铅合金 ……71
3. 铝硅合金 ……73
第三章 轴承材料试验技术 ……75
第一节 试验装置试验 ……80

一、疲劳试验装置及其试验 ……81
1．轴承双金属弯曲疲劳试验机 ……83
2．液压加载试验机及其试验方法 ……86
3．离心加载试验机及其试验方法 ……94
二、咬粘试验装置及其试验 ……109
1．擦伤试验装置及其试验 ……110
2．无润滑试验机及其试验 ……112
3．轴套试验机及其试验 ……114
4．KY型轴承材料抗咬粘试验机 ……120
5．Vega试验机 ……121
6．其它试验装置试验 ……125
三、嵌藏性试验装置及试验 ……130
1．Underwood试验机试验 ……130
2．Laakirchen动载荷试验机试验 ……132
四、腐蚀试验 ……134
1．器皿试验 ……134
2．"回流"试验 ……136
3．试验机试验 ……137
4．穴蚀试验 ……139
五、磨损试验 ……141
六、结合强度试验 ……142
1．轴承双金属结合强度试验 ……143
2．镀层结合质量的检验 ……151
第二节　发动机台架试验 ……152
1．加速疲劳试验 ……154
2．嵌藏性试验 ……155
3．抗咬粘性试验 ……155
4．腐蚀试验 ……155
5．顺应性试验 ……155
第三节　装车道路试验 ……158

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertong

第四章　轴承材料……161
第一节　轴承合金材料及其发展……161
一、巴氏合金……163
二、铜基合金……165
1．铜铅合金和铅青铜……165
2．强化铅青铜H-116……170
3．铜镍合金……170
三、铝合金……171
1．铝锡合金……171
2．铝锡铅合金和铝铅合金……[illegible]
3．铝硅合金……[illegible]
4．铝硅铜合金……[illegible]
5．铝锌合金……[illegible]
四、轴承合金材料的新发展……[illegible]
1．铅锡硅合金……191
2．铝锡硅铜合金……195
第二节　轴承衬(钢)背材料……198
一、钢背材料的含碳量……199
二、不同工艺方法要求的钢带材料……200
三、轴承钢背材料的屈服点……202
第三节　镀层材料……203
一、铅合金镀层材料……204
1．镀层厚度……205
2．镀层的承载能力和疲劳强度……206
3．镀层的耐磨性与减磨性……210
4．镀层的嵌藏性与顺应性……213
5．镀层合金材料的硬度……214
6．镀层材料的耐腐蚀性……215
7．镀层材料的抗穴蚀性能……219
二、锡镀层……223

1. 硬度 ……224
2. 耐磨性 ……224
3. 疲劳强度 ……225
4. 耐腐蚀性 ……226
5. 抗穴蚀能力 ……226
第四节 内燃机滑动轴承材料的选用 ……227
一、轴承合金材料的承载能力和疲劳强度 ……228
二、轴承合金材料的其它性能 ……233
三、轴承合金材料的选用原则 ……238
四、轴承合金材料的使用范围 ……240
第五章 轴承双金属的制造工程 ……249
第一节 轴承双金属的制造工程 ……253
一、巴氏合金轴承双金属的制造工程 ……254
二、铜铅合金（或铅青铜）轴承双金属的制造工程 ……258
1. 带形连续浇铸工艺 ……258
2. 粉末烧结工艺 ……260
三、铝基合金轴承双金属的制造工程 ……264
1. 低锡铝合金轴承双金属的制造工程 ……264
2. 20%锡铝合金轴承双金属的制造工程 ……268
3. 铝铅合金轴承双金属的制造工程 ……270
第二节 镀层的电镀与发展 ……274
一、铅锡合金层的电镀 ……275
1. 镀液及电镀操作 ……276
2. 镀液及工作条件对镀层质量的影响 ……278
3. 工艺操作对镀层质量的影响 ……280
4. 镀层的退除 ……283
二、铅铜合金层电镀 ……284
三、镀层的发展 ……286
第六章 轴承的损坏及其分析 ……289

第一节 内燃机轴承损坏图谱 ……292
一、疲劳损坏 ……292
二、擦伤损坏 ……295
三、热胀损坏 ……297
四、异物微粒造成的损坏 ……297
五、腐蚀损坏 ……298
六、穴蚀损坏 ……301
七、制造与装配偏差造成的损坏 ……304
八、其它损坏 ……308
第二节 内燃机轴承损坏的判断方法 ……312
附录一 轴承及其双金属金相样品的制备 ……314
附录二 国外轴承合金材料标准 ……320
附表1 ISO4383—1981《滑动轴承——薄壁滑动轴承用多层金属材料》 ……320
附表2-1 联邦德国DIN1703—1952《轴承合金材料标准——巴氏合金部分》 ……322
附表2-2 联邦德国DIN1716—1963《轴承合金材料标准——铜合金部分》 ……324
附表3 苏联轴承合金材料标准 ……325
附表4 日本轴承合金材料标准 ……326
附录三 国外部分厂家的轴承合金材料牌号及其化学成分 ……330
附表1 美国克里维特公司轴承合金材料的标准成分与用途 ……330
附表2 英国格雷西尔金属公司轴承合金材料牌号与成分 ……334
附表3 英国注德浮尔公司轴承合金材料牌号与成分 ……335
附表4 联邦德国格里科金属公司滑动轴承合金材料牌号与成分 ……337

附表5 联邦德国卡尔·斯密特公司铝合金轴承材料牌号、
成分及机械物理性能 ……338
附表6 奥地利米巴滑动轴承公司轴承合金材料牌号、
成分及其用途 ……340
附表7 日本大同金属公司轴承合金材料牌号、
成分及其用途 ……342
附表8 日本NDC公司轴承合金材料牌号、
成分及其用途 ……343
附表9 美国D. A. B. industries, inc.
轴承合金材料牌号及成分 ……344
参考文献 ……345

第一章　内燃机轴承的工作特点及状态

第一节　内燃机轴承的工作特点

往复式活塞发动机曲轴轴颈、轴承、轴承间隙及其间隙内润滑油等构成了轴承系统。理想状态是轴颈与轴承的表面间被一层厚厚的润滑油膜分开，其磨损很小，轴承的使用寿命相当长。实际上，在发动机的一个工作循环内，润滑油油膜厚度随着曲轴转角的变化而变化，其厚度并不相同，总有一最小润滑油膜厚度区段。最小油膜厚度决定了轴承系统的磨损速度和损坏形式。所以，轴承系统的磨损速度和损坏又在一定程度上决定着内燃机的可靠性和使用寿命。

因此，内燃机曲轴轴承系统是一个十分复杂的系统，有如下的特点：

1）由于内燃机的比功率大，轴承所占有的空间小，且负荷较大，且载荷的大小和方向随时间的变化而变化；

2）较高的工作温度，主要是轴承系统内相对滑动产生了大量摩擦热，还受内燃机燃烧生成热的影响。轴承表面的温度一般在100～170℃范围内；

3）润滑油中残存的水份、盐份等杂质，燃料及其燃烧产物以及冷却系统中的冷却水等渗入，或者在95℃以上高的工作温度下润滑油氧化和添加剂分解，使润滑油稀释和老化，生成的有机酸等，都能引起轴承材料的腐蚀磨损；

4）内燃机连杆的运动速度变化很大，当瞬时有效速度

为零时，润滑油膜形成较困难；

5）制造和装配的偏差，以及运转中轴承系统的热膨胀及其复杂的变形，致使轴承与轴颈的相对位置发生改变，造成轴承局部的油膜破坏，引起轴颈与轴承的擦伤，甚至咬粘；

6）发动机制造和装配过程中，残留的金属切屑和型砂、运转中产生的磨粒以及通过各种途径侵入的尘埃微粒等污染了润滑油，引起轴承系统的磨粒磨损。

由于内燃机轴承系统具有上述特点，可以想象影响其工作状况的因素是很多的，而且有的因素甚至是难以控制的，以致于使内燃机滑动轴承系统常常处于边界润滑或混合摩擦状态。这样，轴承与轴颈的磨损（或其它损坏）就在所难免了。理所当然必须选用性能较好的轴承材料。

第二节　轴承工作状态及对材料的要求

一、轴承的工作状态

如上所述，内燃机在额定工况下运转，轴承系统的理想润滑状态是轴颈与轴承表面之间有一层润滑油膜使它们彼此分开，载荷通过润滑油膜作用到轴承表面上。对于连杆轴承而言，这个载荷是燃气压力和曲柄-连杆机构往复运动所产生的离心力与惯性力之合力，其大小、作用方向及变化速度等都随着曲轴转角（时间）的改变而变化。因此，轴承的润滑油膜厚度亦相应改变。轴承载荷对轴承系统的润滑油膜厚度的影响，可以通过轴承的工作特性数（索氏数）$S_0=(D^2/C^2)(DL/W)\mu N=(D^2/C^2)(\mu N/P)$ 明显地看出，随载荷的增加，轴承的索氏数（S_0）减少，润滑油膜变薄，润滑状态恶化，轴承系统的摩擦磨损加剧。从上式还可以看出影响轴承工作特性数（S_0）的因素，还有轴承的有效宽度（L），曲轴

此为试读，需要完整PDF请访问：www.erton