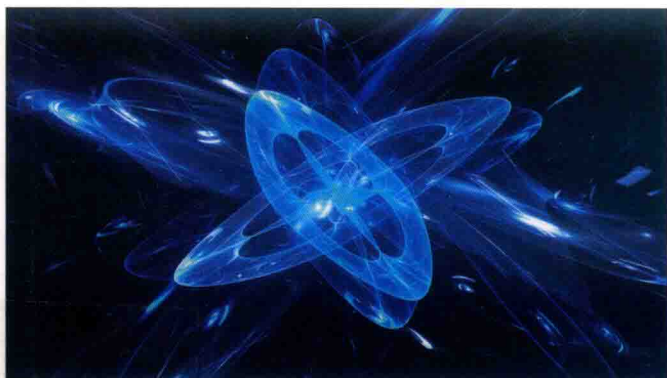


制 · 造 · 业 · 高 · 端 · 技 · 术 · 系 · 列

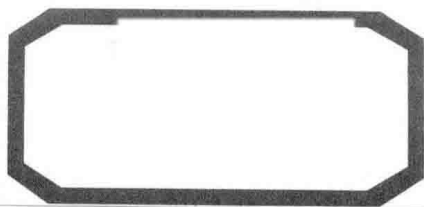
高速精密轧辊磨床 动静压轴承技术



吴怀超 著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

制造业高端技术系列



高速精密轧辊磨床 动静压轴承技术

吴怀超 著



机械工业出版社

本书针对高速精密轧辊磨床国产化过程中的轴承技术问题,较为系统地介绍和论述了液体滑动轴承在轧辊磨床上的应用,高速精密轧辊磨床液体动静压轴承的研发意义与现状,以及研究内容与方法;二是对高速精密轧辊磨床动静压轴承设计和参数计算进行了介绍;三是采用遗传算法对该轴承进行了优化;四是对该轴承在不同调节位置时的一些基本性能进行了揭示,包括静力学性能、模态性能、谐响应性能和热性能;五是对该轴承的流固耦合性能进行了深入的研究和分析;六是对与该轴承配套的主轴及润滑供油系统所涉及的相关技术和内容进行了详细的研究与分析;七是对该轴承的基础性实验平台进行了介绍与研究,内容包括实验平台的机械系统、液压系统和控制系统。

本书立足于国内轧辊磨床生产厂家的现实需求和现有技术基础,力求从理论上对高速精密轧辊磨床动静压轴承所涉及的技术进行较为全面的揭示,以便为其产业化提供理论资料和技术支持。全书行文通俗易懂,分析深入浅出,并配有详尽的图表。

本书适合广大从事油膜轴承技术和轧辊磨床技术的科研和工程技术人员、高校教师和研究生们阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速精密轧辊磨床动静压轴承技术/吴怀超著. —北京:机械工业出版社, 2019.8
(制造业高端技术系列)

ISBN 978-7-111-63283-2

I. ①高… II. ①吴… III. ①精密磨床—静压轴承—技术
IV. ①TG584 ②TH133.36

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第150297号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:周国萍 责任编辑:周国萍 刘本明

责任校对:郑婕 封面设计:马精明

责任印制:张博

北京铭成印刷有限公司印刷

2019年9月第1版第1次印刷

169mm×239mm·11.5印张·221千字

标准书号:ISBN 978-7-111-63283-2

定价:89.00元

电话服务

客服电话:010-88361066
010-88379833
010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com
机工官博:weibo.com/cmp1952
金书网:www.golden-book.com

机工教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

目前,我国能够制造出轧辊磨床整机的厂家屈指可数,其中,具有一定规模和相当实力的厂家只有险峰机床厂、上海机床厂有限公司和昆山华辰机器制造有限公司3家。但到目前为止,国内各企业生产的能用于工业实际的轧辊磨床的砂轮线速度大多在 45m/s 以下。通常,磨削按砂轮线速度 v 的高低分为普通磨削($v < 45\text{m/s}$)、高速磨削($45\text{m/s} \leq v < 150\text{m/s}$)和超高速磨削($v \geq 150\text{m/s}$),因此国产轧辊磨床目前只停留于普通低速磨削水平,还没有达到高速磨削甚至超高速磨削的水平,而德国、美国和日本等发达国家应用于工业生产的轧辊磨床的砂轮线速度已达 80m/s 以上。

近些年,国内轧钢、冶金、有色金属加工、造纸、橡胶、印染等行业发展迅速,尤其在国家产业结构升级调整的政策下,国内钢铁行业对新材料、新功能和新技术应用的需求越来越强烈,传统的铸铁轧辊和合金钢轧辊正在逐渐被高速钢轧辊所替代。高速钢轧辊具有良好的韧性、淬透性、热稳定性、抗热裂性和耐磨性等综合性能,已成为实现企业节能降耗、提质增效和转型发展最合适的选择。目前高速钢轧辊已逐渐在一些主流钢铁企业得到推广应用,其节能降耗效果非常显著,特别在热轧行业显得尤为突出。然而,任何事物都具有两面性,高速钢材质的轧辊相对于国内目前常用的铸铁轧辊和合金钢轧辊来说难磨得多,采用目前国产的轧辊磨床来磨削高速钢轧辊,其效率很低,难以满足现代钢铁行业的需求。为了适应高速钢轧辊磨削的需求,研发国产高速精密轧辊磨床已刻不容缓,国内轧辊磨床生产厂家对此问题已有明确的认识。

轧辊磨床的砂轮线速度突破 45m/s 这道“门槛”,绝不是线速度简单的提升,它牵涉到轧辊磨床的方方面面,是轧辊磨床技术水平“质”的提升,其中,最为关键的是轧辊磨床的轴承技术。轧辊磨床是一种精密磨床,其磨削精度要求高,一般都采用油膜轴承,包括纯静压、纯动压和动静压轴承,其中动静压轴承代表着油膜轴承的发展方向,是高速精密轧辊磨床首选的轴承。然而,工程实践表明,国内现有的应用于轧辊磨床的油膜轴承,无论是纯静压的、纯动压的,还是动静压的,均无法应用于高速精密轧辊磨床,因为在高速精密轧辊磨削工况下,传统的油膜轴承会出现各种问题,严重时会出现

“抱轴”和“烧瓦”等现象，因而，要想研发出高速精密轧辊磨床，首先要解决的是其轴承技术。为此，应该根据国内轧辊磨床生产企业的实际情况，突破国内传统低速油膜轴承的结构局限，研发出一种新型的能应用于高速精密轧辊磨床上的油膜轴承。

在国家自然科学基金等项目的支持下，在校企合作的基础上，根据高速精密轧辊磨床油膜轴承的运行特点，本书作者设计出了一种适合高速精密轧辊磨床的动静压油膜轴承。该轴承采用轴承本体和轴承套过盈配合的结构形式，并且可根据不同的磨削速度和工作负载的情况对轴承进行调节，从而以不同的油膜结构来适应不同工况的需求，极大地提高了其应用范围和运行效率。经过多年的研究，已形成了对该轴承较为完整的研究内容体系，包括轴承的设计、轴承的优化、轴承的静力学性能、轴承的动态性能、轴承的热性能、轴承的流固耦合性能、轴承配套的主轴及润滑供油系统、轴承的实验平台等。本书特对此轴承的上述研究成果进行归纳和总结。

本书的形成得益于作者多年来指导的研究生的研究工作，是研究生们刻苦钻研和辛勤付出的结晶，在此，要特别感谢以下研究生所做的具体工作：张晓斐、曹刚、殷松、令狐克均、孟祥杰、陈诗陶、晏文孟、沈瑞芳、孙官朝、李哲、张慧娟；本书的形成还要特别感谢合作企业险峰机床厂的付恒勋总工程师和吴长城工程师，感谢他们的无私付出和大力支持；本书的研究工作得到了国家自然科学基金（51465008，51165002）、贵州省高层次创新型人才计划（“百”层次）项目（黔科合平台人才[2016]5659）、贵州省科技计划项目（黔科合平台人才[2017]5788号）以及贵州省留学人员科技活动项目择优资助重点项目（黔人项目资助合同（2018）0001号）的支持。

国内目前尚未研发出高速精密轧辊磨床，本书中对高速精密轧辊磨床动静压轴承的研究成果还需工程实践进一步验证。囿于作者的水平和时间，书中错误和不妥之处实为难免，敬请读者批评指正。

吴怀超

2019年8月于贵阳

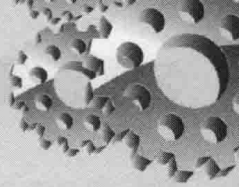
目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 概述	1
1.2 液体滑动轴承在轧辊磨床上的应用	3
1.2.1 液体静压轴承在轧辊磨床上的应用	3
1.2.2 液体动压轴承在轧辊磨床上的应用	5
1.2.3 液体动静压轴承在轧辊磨床上的应用	6
1.3 高速精密轧辊磨床动静压轴承的研发意义与现状	8
1.4 高速精密轧辊磨床动静压轴承的研究内容与方法	11
第 2 章 高速精密轧辊磨床动静压轴承的设计及参数计算	14
2.1 高速精密轧辊磨床动静压轴承的结构设计方案	14
2.2 高速精密轧辊磨床动静压轴承油腔及导油槽的设计	18
2.2.1 静压腔的设计	18
2.2.2 动压腔的设计	20
2.2.3 导油槽的设计	21
2.3 动静压轴承材料和润滑油的选择以及参数计算	22
2.3.1 轴承材料的选择	22
2.3.2 轴承润滑油的选择	23
2.3.3 轴承的主要结构参数及工作参数	24
第 3 章 基于遗传算法的高速精密轧辊磨床动静压轴承的优化	27
3.1 高速精密轧辊磨床动静压轴承优化设计的数学模型	27
3.1.1 设计变量	27
3.1.2 目标函数	28
3.1.3 约束条件	29
3.2 高速精密轧辊磨床动静压轴承优化模型的求解	30

3.2.1	优化算法的确定	30
3.2.2	优化模型的 MATLAB 编程求解	32
3.3	高速精密轧辊磨床动静压轴承的优化结果	40
第 4 章	高速精密轧辊磨床动静压轴承的力学性能和热性能	43
4.1	高速精密轧辊磨床动静压轴承的受力分析	43
4.2	动静压轴承在不同调节位置时的静力学性能	46
4.3	动静压轴承在不同调节位置时的模态性能	51
4.4	动静压轴承在不同调节位置时的谐响应性能	56
4.4.1	轴承本体位于正中间调节位置时的谐响应性能	57
4.4.2	轴承本体位于最右端调节位置时的谐响应性能	68
4.4.3	轴承本体位于最左端调节位置时的谐响应性能	79
4.5	动静压轴承在不同调节位置时的热性能	90
第 5 章	高速精密轧辊磨床动静压轴承的流固耦合性能	95
5.1	高速精密轧辊磨床动静压轴承流固耦合模型的建立	95
5.1.1	固体域模型	95
5.1.2	流体域模型	96
5.2	高速精密轧辊磨床动静压轴承油膜流场和温度场的分析	98
5.2.1	油膜流场分析	98
5.2.2	油膜温度场分析	101
5.3	基于流固耦合作用的动静压轴承的静力学性能	103
第 6 章	高速精密轧辊磨床动静压轴承配套的主轴及供油系统	114
6.1	高速精密轧辊磨床动静压轴承配套的主轴	114
6.2	高速精密轧辊磨床动静压轴承配套的供油系统	117
6.2.1	动静压轴承配套供油系统的设计及工作原理	117
6.2.2	动静压轴承配套供油系统液压元件的参数及选型	122
第 7 章	高速精密轧辊磨床动静压轴承的实验平台	132
7.1	高速精密轧辊磨床动静压轴承实验平台的总体方案	132
7.2	高速精密轧辊磨床动静压轴承实验平台的机械系统	134
7.2.1	实验平台的传动方式	134

7.2.2 实验平台的机械结构及工作原理	137
7.2.3 实验平台的加载装置	139
7.3 高速精密轧辊磨床动静压轴承实验平台的液压系统	140
7.3.1 实验平台的液压加载系统	140
7.3.2 实验平台液压加载系统的性能分析	143
7.3.3 实验平台的液压润滑供油系统	150
7.4 高速精密轧辊磨床动静压轴承实验平台的控制系统	151
7.4.1 实验平台的控制方案	151
7.4.2 实验平台控制系统的变频器和 PLC 选型	154
7.4.3 实验平台的强电控制系统	161
7.4.4 实验平台的弱电控制系统	164
参考文献	171



第 1 章 概论

1.1 概述

轧辊磨床主要用于轧钢、冶金、有色金属加工、造纸、橡胶、印染等行业的磨削，可加工各种工作辊、支承辊、压光辊、烘缸等^[1]。目前，我国能够制造出轧辊磨床的厂家屈指可数，其中，具有一定规模和相当实力的厂家只有险峰机床厂、上海机床厂有限公司和昆山华辰机器制造有限公司 3 家^[2]。图 1-1 所示为国内险峰机床厂生产的某型数控轧辊磨床的结构，它主要由砂轮架、头架、尾架、中心架、测量装置、砂轮床身、工件床身、拖板、操纵台及防护罩等部件组成，可对造纸行业中烘缸及钢铁行业、橡胶行业中的轧辊进行磨削，能够完成中凸（凹）曲线辊面以及圆锥形辊面等部位的磨削^[3]。

在轧辊磨床中，具体执行磨削功能的机械部件是磨头，图 1-2 所示为国内险峰机床厂生产的某型数控轧辊磨床的磨头结构^[3]。磨头主要由带轮、主轴、后轴承、前轴承、偏心套、砂轮、节流器及床身等零部件组成，其工作原理为：磨头由带轮带动主轴旋转，主轴又带动砂轮旋转来磨削轧辊，主轴由前、后两个径向轴承支撑，前、后两个径向轴承润滑油液的供油及调压由单独的供油系统和毛细管节流器实现；为了实现中凸或中凹面的磨削加工，该磨头采用了一个中高机构带动偏心套转动的方式来实现。磨头作为一台轧辊磨床的核心机械部件，其性能好坏直接决定着整台轧辊磨床磨削精度的高低，而影响磨头性能的关键因素是支持磨头主轴旋转的前、后两个径向轴承，因此，一台轧辊磨床的磨头采用何种径向轴承直接影响着该轧辊磨床的磨削精度。

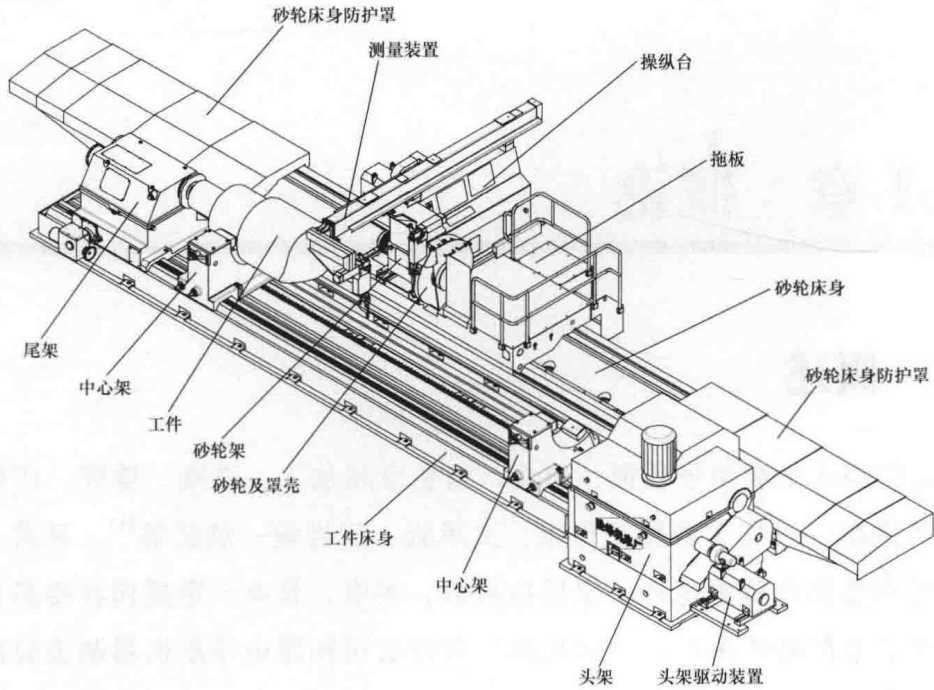


图 1-1 险峰机床厂生产的某型数控轧辊磨床的结构

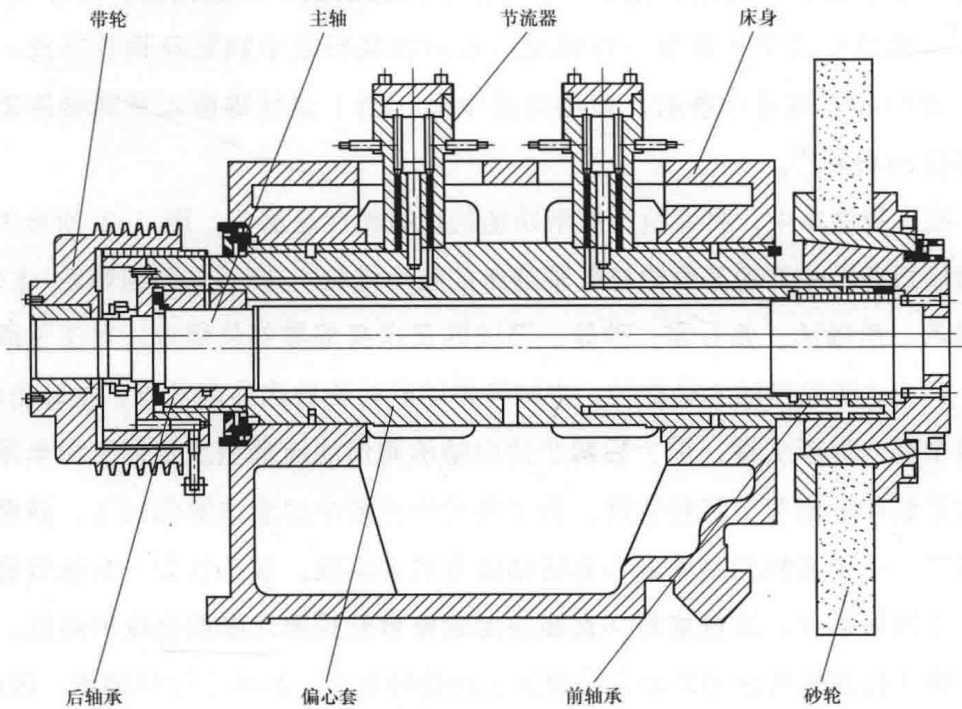


图 1-2 险峰机床厂生产的某型数控轧辊磨床的磨头结构



目前, 轧辊磨床磨头中的前、后两个径向轴承一般采用的是液体滑动轴承。液体滑动轴承按润滑油膜形成机理可分为液体静压轴承、液体动压轴承和液体动静压轴承三种^[4-6]。液体静压轴承是利用供油系统将具有一定压力的润滑油液输入轴承的静压腔中, 人为地迫使轴和轴瓦两表面分离, 借助润滑油的静压力来承受外载荷^[7]; 液体动压轴承是利用轴和轴瓦两表面间的相对运动和几何形状, 把润滑油液带进轴和轴瓦的摩擦面之间, 依靠流体压力膜将两表面分离, 借助流体在楔形间隙中的运动产生的动压力来承受外载荷^[7]; 液体动静压轴承是在液体静压轴承和液体动压轴承的基础上发展起来的新型液体滑动轴承, 它同时具备静压效应和动压效应两种作用, 液体动静压轴承是目前最受青睐的一类液体滑动轴承, 其应用越来越广泛, 它代表着液体滑动轴承的发展方向^[7, 8]。为了研发能适应高速精密轧辊磨削的液体滑动轴承, 首先需要深入分析各种液体滑动轴承在轧辊磨床上的应用情况, 以便为高速精密轧辊磨床液体滑动轴承的设计提供理论支撑和技术支持。

1.2 液体滑动轴承在轧辊磨床上的应用

1.2.1 液体静压轴承在轧辊磨床上的应用

液体静压轴承的结构形式有很多, 诸如有周向回油槽的静压轴承、无周向回油槽的静压轴承、内部节流静压轴承等^[4, 9]。有周向回油槽的静压轴承由于油腔之间有回油槽隔开, 相邻油腔之间没有内流, 互不影响; 无周向回油槽的静压轴承油腔之间没有回油槽, 油腔间有内流, 当轴在旋转时, 有一定的动压效应; 内部节流静压轴承将节流器直接制造在轴承中, 主要适用于节流

器安装有困难的场合。液体静压轴承的油腔主要有矩形油腔和油槽形油腔，两种油腔在同样轮廓尺寸下，只要四周的封油面尺寸相等，则油腔的有效承载面积相等^[4]。

轧辊磨床上应用的液体静压轴承主要是有周向回油槽的静压轴承和无周向回油槽的静压轴承，油腔的结构有的采用矩形油腔，有的采用油槽形油腔。图 1-3 所示的液体静压轴承是应用在国产 M84100B 轧辊磨床上的静压轴承，该轴承属于无周向回油槽的静压轴承，油腔采用的是油槽形油腔^[7]。

如图 1-3 所示，在轴承的周向上开有四个油槽形油腔，主轴起动时，先启动供油系统使四个油槽形油腔中充满一定压力的润滑油液，从而使主轴浮起与轴瓦分开，实现全液体摩擦，避免了主轴和轴瓦在开机时的干摩擦。静压轴承的供油系统有恒流量供油系统和恒压供油系统，在轧辊磨床中常使用的是恒压供油系统。恒压供油系统要求在各油腔和供油系统之间必须分别接一个节流器。主轴运转时，因供油系统一直在供油，油腔中始终充满带有压力的润滑油液，在磨削力等外载荷的作用下，各油腔的间隙发生变化，导致各油腔所需流量发生变化，通过节流器的节流作用，各油腔压力发生变化，于是，油腔间便产生压力差，利用油腔间油液的静压力差来抵抗外载荷。主轴制动时，由于供油系统还在供油，油腔中仍充满压力油液，在油液的静压力作用下，轴和轴瓦不会发生金属的接触。

液体静压轴承因具有摩擦阻力小、使用寿命长、转速范围广等优点，在轧辊磨床上得到应用，但由于静压轴承须配备一套专用的较大功率的供油系统，对油液的过滤精度要求高，且噪声大。目前，随着高速磨削技术的发展，静压轴承在数控轧辊磨床上的应用日益减少。

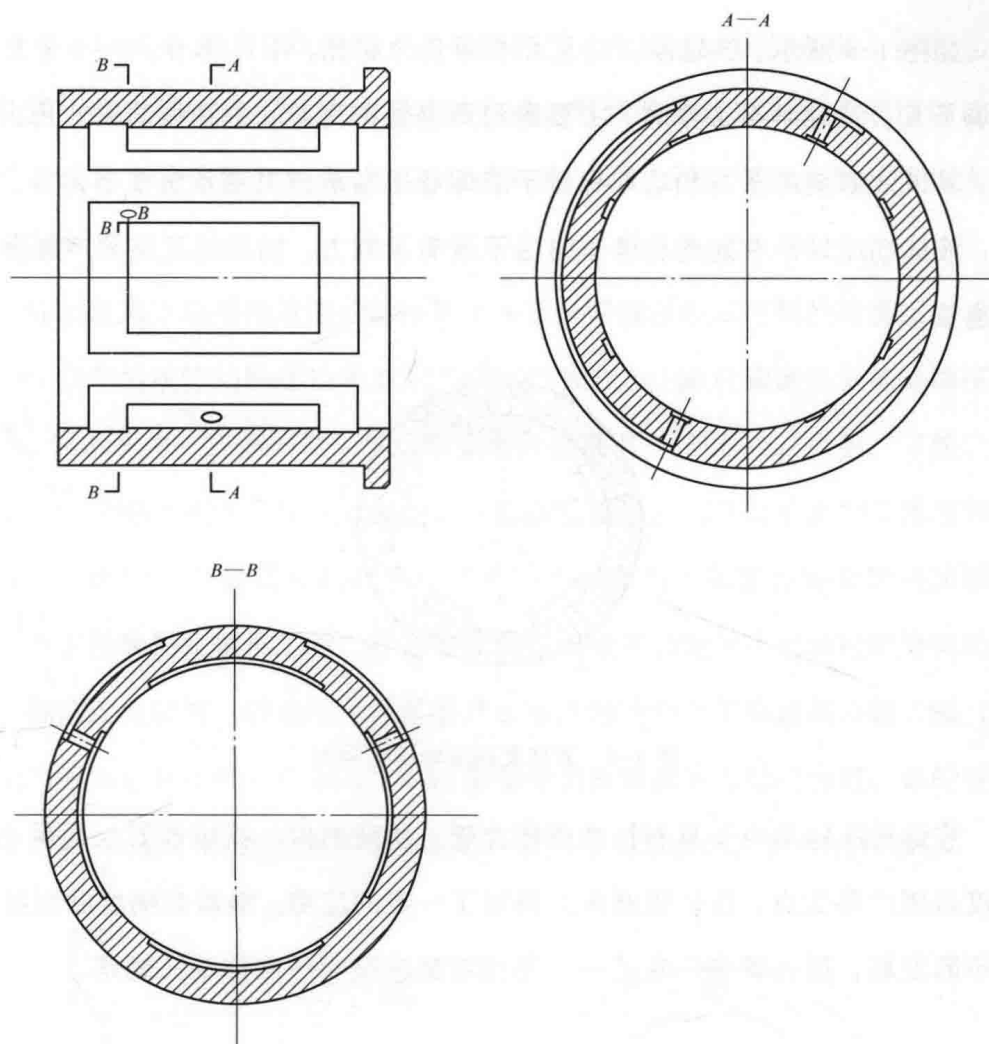


图 1-3 国产 M84100B 轧辊磨床所用的液体静压轴承

1.2.2 液体动压轴承在轧辊磨床上的应用

液体动压轴承是靠轴和轴瓦间高速相对运动在楔形间隙中形成的压力油膜来承受载荷的,其结构分为全圆轴承、剖分式全圆轴承和部分瓦轴承^[10]。磨床上应用的液体动压轴承常见的是部分瓦轴承,尤其是三块瓦和五块瓦动压轴承。图 1-4 为常见的五块瓦动压轴承结构图^[11]。

如图 1-4 所示, 该轴承 1 号瓦和 2 号瓦为底瓦, 不可调节, 3~5 号瓦为可调节瓦。该轴承在工作时, 主要是利用主轴和瓦之间的油楔动压作用, 因而, 其供油系统的压力和功率相较于液体静压轴承的供油系统要小得多, 但是, 液体动压轴承在起动和停车时由于没有承载力, 轴和轴瓦间会产生摩擦和磨损。

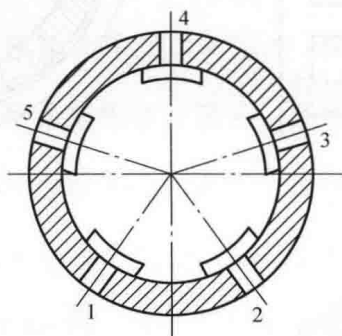


图 1-4 五块瓦动压轴承结构图

液体动压轴承由于具有抗冲击能力强、承载力大、抗振性好、功耗小、速度范围广等优点, 在轧辊磨床上得到了一定的应用。随着高精度磨削技术的不断发展, 国外著名厂家的一些高精度磨床采用了液体动压轴承。

1.2.3 液体动静压轴承在轧辊磨床上的应用

液体动静压轴承是综合了液体静压轴承和液体动压轴承而发展起来的一种新型轴承, 相较于纯静压轴承, 由于利用了动压效应, 从而提高了轴承的承载能力和刚性, 降低了供油系统的功耗; 相较于纯动压轴承, 由于利用了静压作用, 起动力矩小, 起动和制动时因存在静压力从而避免了轴和轴瓦之间的干摩擦^[12-14]。液体动静压轴承代表着液体滑动轴承的发展方向^[4, 5]。

目前, 液体动静压轴承的结构形式亦有多种, 但其本质上是在纯动压轴

承的适当位置开设适当数量和大小静压腔，在动压效应的基础上再增加静压作用；或者将纯静压轴承的深油腔变浅，利用阶梯浅腔的作用来增加动压效应；或者干脆将静压腔设计加工成曲线形油槽，利用楔形油槽的作用来增加动压效应。

轧辊磨床上应用的液体动静压轴承主要是阶梯浅腔式结构的动静压轴承。图 1-5 所示的液体动静压轴承是应用在国产 MJK84160 轧辊磨床上的动静压轴承^[7]。该轴承为“三静一动”型，即该轴承总共有 4 个油腔，上腔、下腔、前腔 3 个腔为静压腔，后腔为动压腔。3 个静压腔是人工在轴承上加工出来的，后部动压腔是轴和轴瓦在相对运动过程中由于磨削力和重力共同作用而形成的。当主轴装配在轴承上时，要通过反复调试使主轴能用手比较轻松地转动，当主轴高速旋转时，该动压承载区便产生液体动压力来承载磨削负载。图 1-5 所示的液体动静压轴承在 MJK84160 等型号的轧辊磨床上运行良好，砂轮线速度能达到 45m/s，是我国液体动静压轴承应用在轧辊磨床上的典型代表。

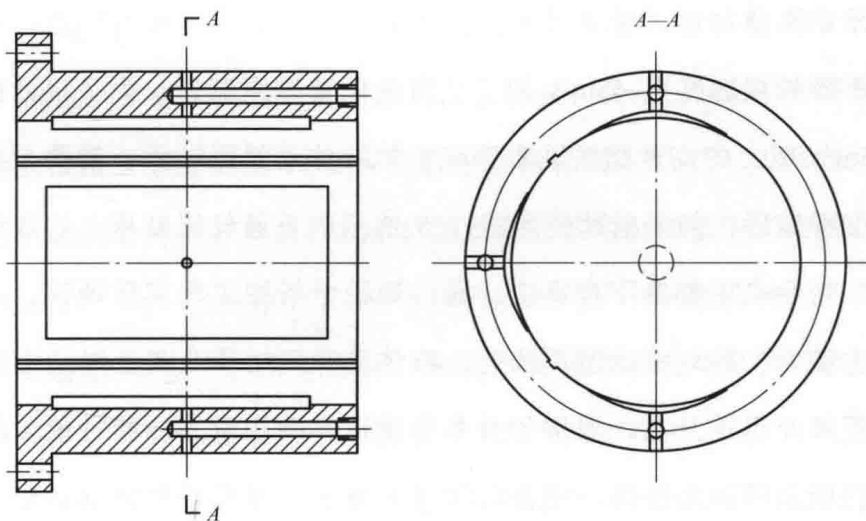


图 1-5 国产轧辊磨床常用的动静压轴承

上面列举的各种液体滑动轴承是目前成熟的产品，应用于国内外各种典型的轧辊磨床上。这些轴承的性能良好，但有一个共同的缺点就是只能应用于砂轮线速度低于 45m/s 的普通轧辊磨床，而不能应用于高速精密轧辊磨床。由于液体动静压轴承代表着液体滑动轴承的发展方向，是应用于高速精密轧辊磨床上最适合的液体滑动轴承类型，为此，国内外很多学者曾经将图 1-5 所示的经典液体动静压轴承进行各种改进，拟用于高速精密轧辊磨床上，但最终效果均不好。

1.3 高速精密轧辊磨床动静压轴承的研发意义 与现状

通常，磨削按砂轮线速度 v 的高低分为普通磨削 ($v < 45\text{m/s}$)、高速磨削 ($45\text{m/s} \leq v < 150\text{m/s}$) 和超高速磨削 ($v \geq 150\text{m/s}$)^[1, 15]。如上所述，图 1-5 所示的液体动静压轴承目前在国产轧辊磨床上应用极为广泛，但其只能应用于砂轮线速度在 45m/s 以下的普通低速轧辊磨床。为了设计出能应用于 45m/s 以上的高速精密轧辊磨床中的液体动静压轴承，需要分析当砂轮线速度提高后，如果继续使用图 1-5 所示的普通轧辊磨床上的液体动静压轴承，将会产生哪些不良反应。通过理论分析和工程实际调试，这些不良反应主要为：砂轮线速度提高时，液体动静压轴承及其主轴的温度因线速度的提高而迅速升高，温度的升高会迅速影响轴承的油膜性能，从而严重破坏轴承油膜的温度场、压力场和流动性能，进而导致轴承的动压承载能力和油膜动压刚性不足以承受高速精密轧辊磨床主轴的运行，严重时会出现“烧瓦”现象^[16]。为此，在参考传统低速液体动静压轴承设计方法的



基础上,应突破传统轴承的结构局限,根据高速精密轧辊磨床液体动静压轴承的运行特点,设计一种新型的液体动静压轴承。

由于受各种条件的限制,轧辊磨削与其他磨削加工一样,其磨削速度一直处于较低水平。直到20世纪30年代,德国切削专家 Carl J. Salomon 提出了磨削温度与其速度两者之间关系的假设,高速磨削才有了确定的发展方向^[17]。自此,高速轧辊磨削也有了广阔的发展空间。目前,德国、日本和美国等发达国家尤其重视高速、超高速磨削技术。据报道,在这些国家的实验室里已完成了砂轮线速度为 250m/s、350m/s、400m/s 的实验研究^[1]。据亚琛工业大学的 Koeing 和 Ferlemann 宣称,他们所在的实验室已经采用了线速度达 500m/s 的超高速砂轮,这一速度突破了当前机床与砂轮的工作极限^[17-19]。在实际生产使用方面,日本已有砂轮线速度为 200m/s 的磨床在工业中使用;德国的砂轮线速度为 80m/s 和 120m/s 的磨床已广泛应用于工业生产中^[1]。我国高速磨削起步较晚,1958 年才开始研究高速磨削技术。至 1977 年,全国已有 17 个省市 770 台磨床采用 50m/s 高速磨削技术^[18]。1982 年,湖南大学进行了 60m/s 高速强力凸轮磨削工艺试验研究,且于 2000 年中国数控机床展览会上推出了线速度达 120m/s 的数控凸轮轴磨床^[18, 19]; 20 世纪 80 年代初,以东北大学为主开发的 YLM-1 型双面立式半自动修磨生产线,磨削速度达 80m/s^[18, 19]; 广西大学于 1997 年前后开展了 80m/s 高速低表面粗糙度的磨削试验研究^[18, 19]。尽管如此,与国外高速磨床已大规模用于工业生产的现状不同,国内在高速磨削方面的技术还不是很成熟。

高速磨削技术发展的同时亦促进了轧辊磨削技术的发展。近些年,国内轧钢、冶金、有色金属加工、造纸、橡胶、印染等行业发展迅猛,尤其在国家产业结构升级调整的政策下,国内钢铁行业对新材料、新功能和新技术应