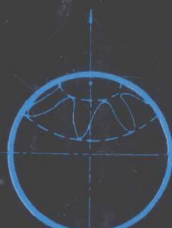
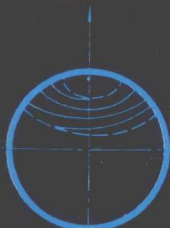
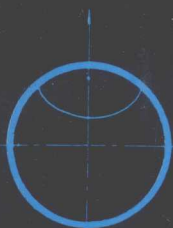


钢球研磨力学原理

GANGQIU YANMOLIXUE YUANLI

朱晨 著



河南科学技术出版社

钢球研磨力学原理

朱 晨 著

江苏工业学院图书馆
藏书章

河南科学技术出版社

元 00.00 售 宝

内 容 提 要

本书是一部应用力学专著,也是钢球和轴承行业的一部新的基础理论书籍,内容全系作者自己的研究成果。主要由六章组成:第一章,钢球研磨运动规律分析;第二章,钢球表面研磨迹线分布规律分析;第三章,钢球研磨力学机理分析;第四章,钢球研磨运动动力分析;第五章,力学分析在钢球研磨加工中的应用;第六章,力学分析在钢球研磨改革中的应用。全书采用解析法,并紧密联系工程实际,对钢球传统的同轴二研磨盘研磨方式和新型的同轴三研磨盘研磨方式统一进行分析,较系统深入地研究了钢球研磨加工和研磨改革中所涉及的种种力学问题,较深刻地揭示和阐明了有关钢球研磨的一系列重要基本规律,这在国内外尚属首次。

本书既有理论意义,又有实用价值。主要读者对象是机械行业特别是轴承行业的广大工程技术人员。本书既可作为高等院校有关专业的教学参考书和教材,又可作为广大理工科学生学习理论力学和其它有关课程的参考读物,有助于提高运用多种力学知识分析和解决工程实际问题的能力。

钢球研磨力学原理

朱 晨 著

责任编辑 王茂琛

河南科学技术出版社出版

(郑州市农业路73号)

黄委会印刷厂印刷

新华书店发行

850×1168毫米 32开本 6.625印张 165千字

1995年12月第1版 1995年12月第1次印刷

印数:1—1500册

ISBN7-5349-1769-7/T·360

定 价:10.00元

前言

作者长期从事力学(包括振动)结合机械工程的理论和应用研究。最近若干年来主要对“工程防振滑振松力学原理”和“钢球研磨力学原理”进行研究。前一项原理,内容主要是提出动态自锁概念和建立动态自锁理论,并应用于解决工程中广泛存在的振动致滑和振动致松问题。后一项原理,是关于对钢球研磨问题进行多方面的力学分析所得出的有关规律的统称,因此内容远比前一项原理为多。本书就是作者将最近几年对后一项原理进行研究所获得的成果汇总整理而写成的。

我们的研究工作得到湖南钢球厂李茂龙总工程师的支持和帮助。李茂龙高工认真审读了本书早期和最后的书稿,并着重联系生产实际对书中有关的内容和论述积极热情地提出宝贵意见。我们的工作还得到中国轴承工业协会技术委员会钢球分会一些主要领导的重视和支持。湖南省力学学会、湖南省机械工程学会和湖南省振动工程学会的有关专家对本书最后书稿作了审阅并热情地写了《介绍这本书》。本书的出版得到湘潭大学有关领导和部门的关怀和资助。作者在此一并表示感谢。

当今世界对新型的同轴三研磨盘研磨方式及其研磨机的具体探索可以说是开始不久,工作还处在试验研究阶段,有关的理论尚未系统建立,而全面深入研究和论述“钢球研磨力学原理”的书籍则更还没有。本书是一个尝试,它的公开出版,希望能填补国内外这方面论著的一项空白,对促进钢球和轴承科学事业和工业生产的发展起到积极的作用。

由于本书内容全是作者自己的研究成果,在理论研究基本告一段落和书的内容基本组成以后,还经历了一段较长时间的反复

推敲修改和不断充实完善,包括与工厂和生产实际的积极联系。虽然采取了十分严谨的态度,但由于钢球研磨涉及的因素繁多,问题复杂,再加上研究条件(特别是试验条件)和作者水平的限制,深感仍有部分研究和书中有的内容不很尽人意。对书中可能存在的_不当甚至错误之处,敬请读者指正。

朱 晨

1993年12月于湘潭大学

目 录

引论	(1)
第一章 钢球研磨运动规律分析	(11)
§ 1-1 最一般情形同轴三研磨盘研磨方式钢球无打滑研 磨运动的运动学方程	(11)
§ 1-2 最一般情形同轴三研磨盘研磨方式钢球无打滑研 磨运动解	(13)
§ 1-3 关于同轴研磨盘研磨方式钢球无打滑研磨运动的 一个普遍定理	(14)
§ 1-4 钢球自转轴对公转轴相对空间方位的几种角度表 示	(15)
§ 1-5 同轴三研磨盘研磨方式各种情形分类	(16)
§ 1-6 上研磨盘为平盘情形同轴三研磨盘研磨方式钢球 无打滑研磨运动解	(18)
§ 1-7 有关 V 形槽形状的一个特殊函数	(19)
§ 1-8 上研磨盘为平盘情形同轴二研磨盘研磨方式钢球 无打滑研磨运动解	(20)
§ 1-9 上研磨盘为平盘情形同轴二研磨盘研磨方式的一 些特殊情形	(22)
§ 1-10 上研磨盘为平盘情形同轴二研磨盘研磨方式钢 球自转轴和自转角速度矢量方向的图解确定	(25)
§ 1-11 对上研磨盘为平盘情形同轴二研磨盘研磨方式	

钢球无打滑研磨运动规律的分析	(27)
§ 1-12 上研磨盘为平盘情形同轴二研磨盘研磨方式钢球无打滑研磨运动参数图表(不计小参数 r/R 项的影响)	(31)
§ 1-13 关于小参数 r/R 项对钢球研磨运动规律的影响	(40)
§ 1-14 上研磨盘非平盘情形同轴二研磨盘研磨方式钢球无打滑研磨运动解	(41)
§ 1-15 同轴二研磨盘和三研磨盘两种研磨方式与钢球的两类无打滑研磨运动:“不变相对方位”无打滑研磨运动和“变相对方位”无打滑研磨运动	(44)
§ 1-16 钢球无打滑研磨运动的运动学逆问题及其解	(46)
第二章 钢球表面研磨迹线分布规律分析	(48)
§ 2-1 钢球无打滑研磨运动中有关坐标系的设立	(48)
§ 2-2 同轴二研磨盘和三研磨盘两种研磨方式钢球无打滑研磨运动的统一研磨迹线理论	(51)
§ 2-3 钢球两种研磨方式的两类研磨运动与钢球表面的两类研磨迹线	(54)
§ 2-4 三接触点的第一类研磨迹线在钢球表面的分布规律分析	(56)
§ 2-5 三接触点的第二类研磨迹线在钢球表面的分布规律分析	(60)
第三章 钢球研磨力学机理分析	(66)
§ 3-1 研磨盘与钢球在三接触点处的两种相对转动:“枢转”和“滚转”及其对钢球研磨的作用分析	(67)
§ 3-2 对三接触点处表面接触变形和接触应力的分析计	

算	(73)
§ 3-3 对三接触点处摩擦力矩的分析计算	(76)
§ 3-4 关于钢球研磨力学机理的分析与阐述	(81)
§ 3-5 影响钢球研磨的主要力学因素归纳	(88)
第四章 钢球研磨运动动力分析	(90)
§ 4-1 钢球无打滑研磨运动中的惯性力和陀螺力矩	(91)
§ 4-2 钢球无打滑研磨运动的动态静力分析	(92)
§ 4-3 关于三接触点的表面接触变形、接触应力和摩擦力矩与研磨压力的关系	(101)
§ 4-4 对存在“研磨压力限制范围”问题的探讨	(102)
§ 4-5 对存在“研磨盘极限转速”问题的探讨	(107)
§ 4-6 钢球无打滑研磨运动条件的确立与研磨压力和研磨盘转速的确定	(109)
§ 4-7 关于钢球研磨运动动力学方程及初步分析	(112)
第五章 力学分析在钢球研磨加工中的应用	(119)
§ 5-1 钢球研磨的主要几何和力学参数及其对钢球研磨各方面因素影响的综合分析	(119)
§ 5-2 对三接触点研磨能力和综合研磨性能问题的探讨	(129)
§ 5-3 关于 V 形槽两侧角 γ_1 和 γ_2 选择问题的分析	(131)
§ 5-4 关于研磨压力角 γ_0 对钢球研磨的作用及有关分析	(137)
§ 5-5 对研磨压力 Q_0 和研磨盘转速 Ω 的进一步分析及有关规律	(142)
§ 5-6 对同盘钢球研磨前容许尺寸偏差的分析	(150)
§ 5-7 关于钢球研磨功率 W 的分析及有关规律	(158)

§ 5-8	关于钢球研磨中的摩擦问题和对滑动摩擦系数 f 的有关分析	(166)
第六章 力学分析在钢球研磨改革中的应用		(169)
§ 6-1	同轴三研磨盘研磨方式钢球“变相对方位”研磨运动条件的分析	(169)
§ 6-2	同轴三研磨盘研磨方式钢球自转轴倾角 β 在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 全范围变化的分析	(174)
§ 6-3	同轴二研磨与三研磨盘两种研磨方式钢球研磨的主要不同力学特点对比总结	(179)
§ 6-4	同轴三研磨盘研磨方式的重要力学特性及其对钢球研磨影响关系的图解和分析	(183)
§ 6-5	同轴三研磨盘研磨方式实现钢球“变相对方位”研磨的有关方案与研磨盘转速计算	(185)
§ 6-6	关于同轴三研磨盘研磨方式的实现:对三研磨盘和多研磨盘研磨机有关问题的阐述	(192)
结束语		(197)
参考文献		(203)
介绍这本书		(204)

引 论

近代机器和仪器向高速和高精度发展,对滚动轴承提出了越来越高的要求。钢球是滚动轴承(球轴承)的重要零件,其制造精度和加工质量对轴承的性能特别是动态性能(振动、噪声、摩擦力矩等)有极重要的影响。由于钢球是形状独特的球形零件,在加工中其全部表面都是加工面,又都是与外界的接触面,在工作中还都是工作面,加之对精度和质量的要求又非常高,因而其制造工艺过程也非常特殊。作为终加工工序的研磨(特别是最后一道精研),对钢球的尺寸和形状精度、表面粗糙度和表面质量起着最后的决定性作用。随着对钢球精度和质量要求的不断提高,对钢球加工方面的要求自然也越来越高,钢球研磨是高精度和超高精度机械加工。钢球研磨又是一种非常特殊的磨削,最大特点是要逐点磨出整个钢球的高精度和高质量球形表面,由于同时参与磨削的区域和磨削量都极微小,就必须使钢球经历大数量和长时间的循环研磨,才能使其整个表面获得处处机会均等的研磨,最后达到高精度和高质量要求,因而它又是一种十分耗时的机械加工。鉴于上述这两个方面,如何不断提高钢球的研磨精度和研磨效率,就一直是钢球生产中一个非常重要的研究课题。

然而,人们早就观察到,影响钢球研磨精度和研磨效率的因素非常多,可谓不胜枚举,归结起来,也有力学的、机械的、物理的、化

学的等等各方面的因素,因此,研究提高钢球的研磨精度和研磨效率,又是一个十分复杂的课题。我们经过分析认为,在对钢球研磨众多的影响因素中,最基本也是最重要的,应是构成钢球研磨力学机理的有关因素,这里面既有宏观的因素,也有微观(细观)的因素。本书主要从宏观方面和从力学角度致力于“钢球研磨力学原理”的研究。的确,由于钢球研磨运动和研磨机理的特殊性,在钢球研磨加工和研磨改革所遇到和所需解决的许多问题中,含有丰富的力学内容,并广泛涉及到刚体力学(运动学和动力学)、弹性力学(接触理论)、摩擦学(滑动摩擦和滚动摩擦理论)、振动理论、热力学等多种力学学科。正确分析和解决钢球研磨所涉及的各种力学问题,对钢球研磨加工和研磨改革无疑都具有十分重要的意义。其中,特别是研磨方式改革,包括探索新型研磨方式,研制新型研磨机,开展新的研磨试验,等等,不仅是为了进一步提高钢球的研磨精度和研磨效率,而且是为了适应科技发展的更高要求,发展超高精度球和特殊材质球(比如陶质球)的研磨加工和生产。然而,截止到目前,国内外还没有人专门从力学角度对钢球研磨所涉及的各种力学问题作过系统深入的研究和论述,也没有一部这样的专门著作。本书就是在这方面所作的一个尝试。

更高钢球传统的研磨方式是同轴二研磨盘研磨方式,原理见图1。这种形式的同轴二研磨盘研磨机又分为立式和卧式两种,在生产中立式应用得更为广泛。为明确起见,本书的全部分析都是针对立式进行,包括同轴二研磨盘研磨方式和同轴三研磨盘研磨方式(同轴三研磨盘研磨方式参看图2)。在工程中广泛应用的传统同轴二研磨盘研磨方式,上研磨盘不转(角速度 $\Omega_0 = 0$),并为平盘(研磨

压力角 $\gamma_0 = 0$, 工程上称为“正压”), 下研磨盘匀速旋转(角速度 Ω), V 形槽(本书对下盘面上所有具有 V 形截面的同轴圆环沟槽的简称)两侧角(或称 V 形槽形角) $\gamma_1 = \gamma_2 = 45^\circ$ ($\gamma_1 = \gamma_2$ 工程上称为“正沟”)。同轴二研磨盘研磨机在长期的生产实践中得到不断的改进, 其结构和性能已发展得相当完善, 特别是对工程中有广泛用途的中小规格钢球采用大批量和小批量循环精研的作法, 无论是产品的精度和产量都能满足绝大多数工业对钢球的需要, 尤其是对小规格钢球的大批量生产, 这种研磨方式和方法恐怕一时还很难为其它的研磨方式和方法所取代。

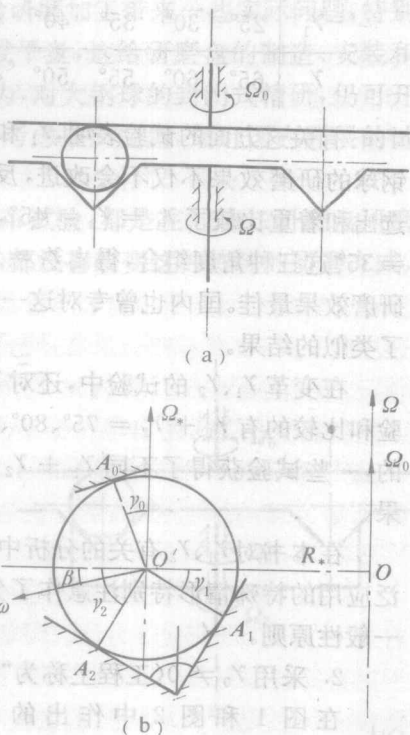


图1 同轴二研磨盘研磨方式原理图

对这种传统研磨方式, 为了不断提高研磨精度和研磨效率, 国内外都曾作过许多改革试验, 较多的试验是改变角度 γ_1, γ_2 和 γ_0 。现对这方面的改革和试验情况概述如下。

1. 采用 $\gamma_1 \neq \gamma_2$ (工程上称为“偏沟”) γ_1 和 γ_2 的变化范围都是 $[0^\circ, 90^\circ]$ 。工程上在一般情况下都是采用 V 形槽顶角 $\gamma_1 + \gamma_2 = 90^\circ$ 。经过试验和对比的大体有以下一些 (γ_1, γ_2) 角度组合:

γ_1	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°
γ_2	65°	60°	55°	50°	45°	40°	35°	30°	25°

有关这方面的试验表明, γ_1 和 γ_2 都应在 45° 附近变动, 否则, 钢球的研磨效果不仅不会改进, 反会恶化。国外较早的试验⁽¹⁾ 曾选出和着重比较了 $\gamma_1 = \gamma_2 = 45^\circ$, $\gamma_1 = 35^\circ$, $\gamma_2 = 55^\circ$, $\gamma_1 = 55^\circ$, $\gamma_2 = 35^\circ$ 这三种角度组合, 得出 $\gamma_1 = 35^\circ$, $\gamma_2 = 55^\circ$ 这一角度组合综合研磨效果最佳。国内也曾专对这一角度组合作过一些试验, 并得出了类似的结果。

在变革 γ_1 , γ_2 的试验中, 还对 $\gamma_1 + \gamma_2 \neq 90^\circ$ 开展过试验。经试验和比较的有 $\gamma_1 + \gamma_2 = 75^\circ, 80^\circ, 85^\circ$ 和大于 90° 甚至有大到 120° 的, 一些试验获得了不同 $\gamma_1 + \gamma_2$ 对不同尺寸规格钢球的试验结果。

在本书对 γ_1 , γ_2 有关的分析中, 对 $\gamma_1 + \gamma_2 = 90^\circ$ 这一工程上广泛应用的特殊情形特别注意作了分析, 并着重提出了选择 γ_1 , γ_2 的一般性原则。

2. 采用 $\gamma_0 \neq 0$ (工程上称为“偏压”)

在图 1 和图 2 中作出的 γ_0 是正值。 γ_0 的变化范围是 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 。试验表明: γ_0 应在 0° 附近变动, 否则, 钢球的研磨效果不仅不会改进, 反而会恶化。国外较早的 $\gamma_0 \neq 0$ 试验⁽²⁾ 表明: $|\gamma_0|$ 如取合适的值, 能同时提高钢球的研磨精度和研磨效率, 并得出 γ_0 的最佳范围为 $10^\circ \sim 15^\circ < |\gamma_0| \leq 20^\circ$ 。

本书对于 γ_0 对钢球研磨的作用问题, $\gamma_0 \neq 0$ 情形的应用问题, 以及 γ_0 与 γ_1 , γ_2 相配合的选择问题等, 都作了一定的分析。

然而, 上述 $\gamma_1 \neq \gamma_2$ 和 $\gamma_0 \neq 0$ 这两项改革并未在生产中得到普遍的推广应用。究其原因, 主要可能是: 中小规格钢球广泛采用大批量和小批量循环精研, 钢球的研磨精度和生产效率已都能很好地满足需要, 而采用 $\gamma_1 \neq \gamma_2$ 和 $\gamma_0 \neq 0$ 并不能在钢球研磨精度和研

磨效率上产生多大改观,还会给研磨加工带来一些实际问题,特别是 $\gamma_0 \neq 0$,上研磨盘就不能作成平盘,这给研磨盘的制造、安装和调试都会带来不便。但我们认为,对大钢球的封闭式精研,仍可开展 $\gamma_1 \neq \gamma_2$ 方面的改革试验,并考虑推广应用。最近国内开展的试验也表明了这点。

上述关于 γ_1 、 γ_2 和 γ_0 的改革试验,都是在同轴二研磨盘研磨方式范畴之内所作的改革试验,都没有改变这种传统的研磨方式。

随着科学技术的发展,由于对滚动轴承的性能特别是动态性能的要求越来越高,由于特殊材质球(比如陶质球)的出现和应用,等等,要求人们在继续应用和发展同轴二研磨盘研磨方式和同轴二研磨盘研磨机的同时,积极探索具有更高研磨精度和研磨效率的新型研磨方式和具有更好研磨性能的新型研磨机。

同轴三研磨盘研磨方式是在同轴二研磨盘研磨方式基础上发展起来但又具有明显不同特点的一种新型研磨方式,其原理图见图2。

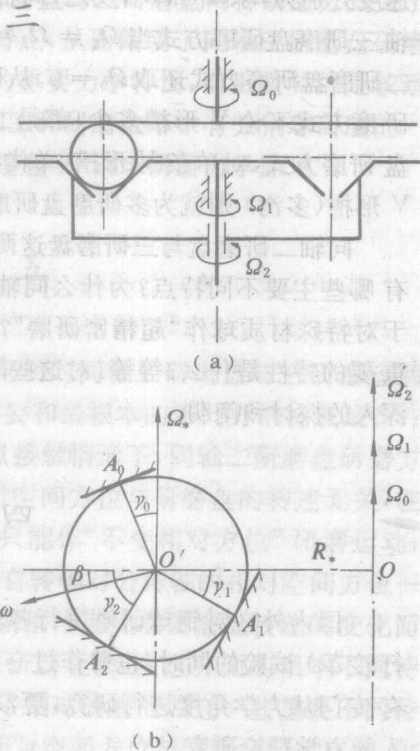


图2 同轴三研磨盘研磨方式原理图

了这种研磨方式,但直到最近一些年来,才从国外开始对之作出具体探索,在按其原理制出的同轴三研磨盘研磨机上进行新的钢球研磨试验,并将它探讨应用于特殊材质球(如陶瓷球)的“超精密研磨”^[3]。

比较图 1 和图 2 我们可以清楚地看出,两种研磨方式从原理上存在有紧密的内在联系:同轴三研磨盘研磨方式就是将同轴二研磨盘研磨方式下盘 V 形槽两侧分开为两个研磨盘,这样就成为三个研磨盘:上盘、下内盘和下外盘,三个研磨盘各自独立旋转,角速度分别为 Ω_0 、 Ω_1 和 Ω_2 ;反之,同轴二研磨盘研磨方式也就成为同轴三研磨盘研磨方式当 $\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega$ 时的特殊情形。传统的同轴二研磨盘研磨方式还取 $\Omega_0 = 0$ 。从研磨机的结构上,同轴二研磨盘研磨方式不论 V 形槽多少,都是二研磨盘研磨机;但同轴三研磨盘研磨方式,对单条 V 形槽(单沟)为三研磨盘研磨机,而对多条 V 形槽(多沟)则就为多研磨盘研磨机。

同轴二研磨盘与三研磨盘这两种研磨方式在钢球研磨上究竟有哪些主要不同特点?为什么同轴三研磨盘研磨方式能被探讨用于对特殊材质球作“超精密研磨”?这种新型研磨方式所具有的最重要的特性是什么?等等。对这些问题,显然都应该从理论上作出深入的探讨和阐明。

四

国内外在对钢球研磨进行各种改革(主要指对 γ_1 、 γ_2 和 γ_0 进行变革)试验的同时,也曾作过一些理论上的探讨和分析,但都没有专门从力学角度进行研究,更没有对这些改革统一展开系统深入的力学理论研究。

我们注意到了钢球研磨运动和研磨机理的特殊性,注意到了

钢球研磨加工和研磨改革中许多问题都与力学有密切的联系,以及注意到了同轴二研磨盘研磨方式与同轴三研磨盘研磨方式存在有紧密的内在联系,于是,我们将同轴二研磨盘与三研磨盘这两种研磨方式置于同一个理论框架中进行统一的分析,采用解析法,较系统地深入地研究了钢球研磨加工和研磨改革中所涉及的种种力学问题,并对其中一些重要和有实际意义的问题我们提出了自己独到的见解(包括与某些通常的认识有所不同的见解),作出较深刻的分析与阐述,从而取得了较丰富和系统的研究成果。我们的研究不仅较深刻地揭示出同轴二研磨盘与三研磨盘两种研磨方式关于钢球研磨的主要不同的力学特点,从而阐明了同轴三研磨盘研磨方式作为一种新型研磨方式的重要力学特性,而更重要的是较系统地揭示和阐明了钢球研磨加工和研磨改革中有关钢球研磨的一系列重要的基本规律,首次组建起了“钢球研磨力学原理”。

五

本书从理论上所揭示和阐明的同轴二研磨盘与三研磨盘两种研磨方式关于钢球研磨最重要和最根本的不同力学特点是^[4,5]:在研磨盘与钢球为理想化三点接触情形下,同轴二研磨盘研磨方式钢球自转轴对公转轴的相对空间方位与研磨盘的转速无关,在钢球研磨中恒保持不变,钢球只能作“不变相对方位”研磨运动;而同轴三研磨盘研磨方式钢球自转轴对公转轴的相对空间方位一般与研磨盘转速有关,在钢球研磨中能随着研磨盘转速的变化而变化,钢球能作“变相对方位”研磨运动。由这方面的根本不同特点,又导致这两种研磨方式关于钢球研磨的其它一些重要不同特点。钢球的自转轴对公转轴的相对空间方位与研磨盘转速有关,钢球在研磨中能实现“变相对方位”研磨运动,这就是同轴三研磨盘

研磨方式作为一种新型研磨方式关于钢球研磨的最重要的力学特性。最近有文献^[6]明确指出：“研磨极小球形偏差的钢球，必须使钢球在研磨工具中经常改变方向。”显然，同轴三研磨盘研磨方式恰恰具有这种能使钢球在研磨中经常“改变方向”的特性。我们认为，正是由于同轴三研磨盘研磨方式具有这种重要特性和所导致的其它方面的一些重要特点，才使得它能被用作超高精度球和特殊材质球新的研磨试验。

本书内容全属作者自己的研究成果，书的体系及书各就是依据这些内容确定的。主要内容由六章组成。全书力求做到理论分析严谨，并紧密结合钢球研磨加工和研磨改革实际，使本书既有理论意义又有实用价值。

六

研究钢球研磨运动问题，本应先从钢球的受力分析开始，建立起包括钢球研磨运动微分方程在内的基本方程，并求解基本方程，获得钢球研磨运动方程；然后再对钢球作研磨运动规律分析和其它方面的分析。然而我们注意到，钢球在研磨中的受力情况非常复杂：钢球主要受到研磨盘的作用，但研磨盘与钢球实际并非是理想化的三点接触，而是三个有限面接触；钢球还要受到研磨液的作用，研磨液是一种二相和多相介质；同一V形槽中相邻钢球有时还相互作用，会涉及二体或多体碰撞问题；等等。许多作用力不仅很复杂，而且大多是未知的或变化着的，变化又与钢球的研磨运动密切相关。此外，还应将同盘中所有同时经受研磨的钢球合同研磨盘一起作为一个系统来分析，因而还要考虑钢球与研磨盘之间的相互作用。整个系统是一个开放和耗散系统，在钢球研磨中还存在着发热和散热。综上所述，要严格建立起完备的钢球研磨运动基本