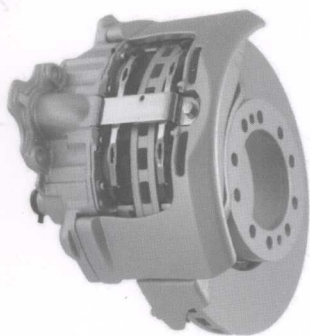


盘式制动器 结构性能分析

朱永梅 张 建 著



 科学出版社

盘式制动器结构性能分析

朱永梅 张 建 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以 24.5 吋车用盘式制动器为研究对象,系统阐述制动系参数选择及制动器的设计计算,开发了制动器参数化设计系统;开展 24.5 吋盘式制动器结构强度试验研究,完成关键零部件强度的有限元分析和结构优化;开展 24.5 吋盘式制动器的热机耦合试验研究,完成紧急制动工况和连续制动工况下制动器温度场、应力场分析;开展制动器摩擦材料分析及试验研究,揭示盘式制动器摩擦磨损机理;介绍制动器性能检测技术,研制制动器总成疲劳试验台。

本书既可供从事盘式制动器设计、制造与使用的工程技术人员参考,也可供相关专业的研究人员及在校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

盘式制动器结构性能分析/朱永梅, 张建著. —北京: 科学出版社, 2016.11

ISBN 978-7-03-050828-7

I. ①盘… II. ①朱… ②张… III. ①盘式制动器-结构性能-性能分析 IV. ①TH134

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 289198 号

责任编辑: 邓 静 / 责任校对: 桂伟利
责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2016 年 11 月第一次印刷 印张: 11 1/4

字数: 213 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

盘式制动器在汽车制动系统中扮演着重要角色，因其制动过程的复杂性，一旦发生安全事故，往往导致财产及人员的重大损失。因此，盘式制动器的结构性能分析一直是业内科研与工程人员关注的重点。

本书是作者根据多年对盘式制动器的结构和性能研究的成果撰写而成的。针对盘式制动器在结构设计、强度校核、热力学、摩擦磨损及性能检测方面，参考制动器相关标准与规范，以数值计算、理论分析和试验研究为主要手段，分析高压大型盘式制动器的结构性能。全书共6章，分别为汽车制动器概述、制动系参数选择及制动器的设计计算、盘式制动器关键零部件性能分析、盘式制动器热机耦合研究、盘式制动器摩擦磨损机理、制动器性能测试方法和装置。本书在反映盘式制动器研究前沿的同时，又体现出研究成果的实用性，对盘式制动器的设计开发、应用和检测具有很好的指导意义。既可供从事盘式制动器设计、制造与使用的工程技术人员参考，也可供相关专业的研究人员及在校师生参考。

本书由朱永梅教授和张建博士对全书架构与各章内容进行顶层设计、详细规划，并带领研究团队进行书稿撰写。参与本书撰写的成员有朱永梅（第1章），朱永梅、张奔（第2章），张建、姚凯（第3章），张建、谭雪龙（第4、5章），朱永梅、刘亚威（第6章）。此外，研究生杜嘉俊也参与了部分编写工作。本书的部分研究工作得到了江苏省前瞻性联合研究项目（BY2015065-04）、江苏省高校自然科学研究面上项目（15KJB460008）、江苏省道路载运工具新技术应用重点实验室（BM20082061505）及江苏恒力制动器制造有限公司的资助，特别感谢江苏恒力制动器制造有限公司董事长徐旗钊的鼎立支持，在此一并表示衷心的感谢。同时，本书的出版得到了科学出版社的大力支持和帮助，作者也在此表示真诚的感谢。

限于时间和水平，本书内容难免存在欠妥之处，诚挚欢迎广大读者批评指正！

作 者

2016年6月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 盘式制动器发展历程	1
1.2 盘式制动器结构原理	3
1.2.1 钳盘式制动器结构	3
1.2.2 液压和气压盘式制动器结构	4
1.2.3 盘式制动器优缺点	6
1.3 制动摩擦材料的发展和特性	7
1.3.1 制动摩擦材料的发展	7
1.3.2 摩擦材料的技术要求及组成	7
1.3.3 摩擦材料的分类	8
1.4 盘式制动器热应力问题研究现状	9
1.4.1 热机耦合数值计算	9
1.4.2 温度场	10
1.4.3 摩擦副间的传热分析	10
1.5 盘式制动器摩擦学问题研究现状	11
1.5.1 制动摩擦学行为和机理	11
1.5.2 磨损模型分析	14
1.5.3 热摩擦磨损数值计算	14
1.6 盘式制动器制动性能检测技术研究现状	15
1.6.1 制动器制动性能	15
1.6.2 制动器制动性能检测	15
参考文献	18
第 2 章 制动系参数选择及制动器的设计计算	23
2.1 制动系主要参数及其选择	23
2.1.1 制动力与制动力分配系数	24
2.1.2 同步附着系数及最大制动力矩	26
2.1.3 盘式制动器主要参数的确定	29

2.2 制动器的设计计算	31
2.2.1 盘式制动器总制动力矩计算	31
2.2.2 制动器效能因数及磨损特性计算	32
2.2.3 热容量和温升计算	34
2.2.4 制动性能的校核	35
2.3 制动器主要零部件的结构设计及强度计算	36
2.3.1 杠杆的计算	36
2.3.2 支架的计算	37
2.3.3 支架连接螺栓的计算	38
2.3.4 导销的计算	39
2.4 制动驱动机构结构形式的选择与设计计算	40
2.4.1 制动气室设计	40
2.4.2 储气筒	41
2.4.3 空气压缩机的选择	41
2.5 制动器参数化设计系统开发	42
2.5.1 系统总体设计框架	42
2.5.2 全局参数变量选择	43
2.5.3 人机交互界面设计	46
参考文献	49
第3章 盘式制动器关键零部件性能分析	50
3.1 结构强度试验研究	50
3.1.1 支架疲劳台架试验	50
3.1.2 应力测量试验	51
3.2 盘式制动器总成分析	53
3.2.1 钳体受力分析	53
3.2.2 支架受力分析	54
3.3 盘式制动器关键零部件的有限元分析	54
3.3.1 钳体静力学分析	54
3.3.2 支架静力学分析	56
3.4 盘式制动器支架的疲劳分析及结构优化	64
3.4.1 盘式制动器支架疲劳分析	64
3.4.2 支架结构优化	66
3.5 盘式制动器支架磨损特性	69
3.5.1 支架磨损数值建模	70

3.5.2 支架磨损数值计算结果分析	72
参考文献	81
第 4 章 盘式制动器热机耦合研究	83
4.1 热机耦合试验研究	83
4.1.1 温度测量方法	83
4.1.2 试验设备与内容	84
4.1.3 试验结果与分析	84
4.2 热机耦合理论模型建立	86
4.2.1 盘式制动器三维模型建立	86
4.2.2 盘式制动器有限元模型建立	86
4.2.3 边界条件确定	88
4.3 对流换热系数计算方法研究	90
4.3.1 基于解析法的对流换热系数	90
4.3.2 基于 ANSYS CFD 的对流换热系数	91
4.3.3 求解结果对比分析	95
4.4 紧急制动工况下热机耦合数值计算结果分析与试验验证	96
4.4.1 温度场分布特性研究	96
4.4.2 应力场分布特性研究	100
4.4.3 接触压力分布特性研究	102
4.5 连续制动工况下热机耦合数值计算结果分析与试验验证	102
4.5.1 温度场分布特性研究	102
4.5.2 应力场分布特性研究	105
4.5.3 接触压力分布特性研究	106
参考文献	107
第 5 章 盘式制动器摩擦磨损机理	109
5.1 盘式制动器摩擦材料分析及试验研究	109
5.1.1 摩擦材料组成	109
5.1.2 销盘式小样摩擦磨损试验	110
5.1.3 惯性台架试验	113
5.2 树脂基复合摩擦材料摩擦磨损规律分析	114
5.2.1 摩擦磨损数学模型建立	114
5.2.2 摩擦磨损仿真分析	118
5.2.3 压力分布对摩擦材料表面接触压力的影响	121
5.2.4 压力分布对摩擦材料摩擦磨损特性的影响	125

5.3 盘式制动器热摩擦磨损研究	128
5.3.1 热摩擦磨损数值模拟方法的实现	128
5.3.2 热摩擦磨损数学模型建立	130
5.3.3 紧急制动工况下热摩擦磨损仿真分析	130
5.3.4 温度对磨损深度、接触面积及接触压力的影响	134
5.4 盘式制动器热磨损失效机理	137
5.4.1 摩擦片主要磨损形式	137
5.4.2 温度对摩擦片磨损类型的影响	141
参考文献	142
第 6 章 制动器性能测试方法和装置	144
6.1 制动器试验标准简介	144
6.2 制动器性能测试试验及方法	145
6.2.1 制动器效能试验	145
6.2.2 制动器热衰退恢复试验	146
6.2.3 制动衬片/衬块磨损试验	147
6.2.4 制动器疲劳强度台架试验	148
6.3 制动器总成疲劳试验台架研制	149
6.3.1 制动器总成疲劳试验台架设计要求	149
6.3.2 总体方案	151
6.3.3 机械传动系统	153
6.3.4 工装夹具设计	153
6.3.5 测控系统	154
6.3.6 支撑系统	156
6.4 工装夹具参数的正交优化	158
6.4.1 正交试验简介	158
6.4.2 工装夹具正交试验设计	159
6.4.3 工装夹具参数优化	162
6.4.4 总结	168
参考文献	168

第 1 章 概 述

1.1 盘式制动器发展历程

汽车制动系统是汽车底盘四大系统(传动系统、行驶系统、转向系统、制动系统)之一^[1]。它的功能包括:使行驶中的汽车减速甚至停车;使下坡行驶的汽车速度保持稳定;使已停驶的汽车保持不动等。汽车制动系统由制动器和驱动机构组成。制动器俗称刹车,它依靠制动摩擦副之间的摩擦作用实现制动,是制动系统中起执行功能的零部件。制动器工作时,一般是通过其中的固定元件对旋转元件施加制动力矩,使后者的旋转速度降低,同时依靠车轮与路面的附着作用,产生路面对车轮的制动力,以使汽车减速,其实质就是一个能量转换的过程,它通过制动器摩擦副之间的机械摩擦作用,将车辆行驶时产生的动能转换成热能消耗掉,从而起到减速和制动的作用。

凡是利用固定元件与旋转元件工作表面的摩擦作用产生制动力矩的制动器,都称为摩擦制动器。摩擦制动器可分为盘式制动器和鼓式制动器两种。鼓式制动器也叫块式制动器,是靠制动块在制动轮上压紧来实现刹车的。鼓式制动是早期设计的制动系统,其刹车鼓的设计 1902 年已经使用在马车上了,直到 1920 年才开始在汽车工业广泛应用^[2]。鼓式制动器的主流是内张式,它的制动块(刹车蹄)位于制动轮内侧,在刹车时制动块向外张开,摩擦制动轮的内侧,达到刹车的目的。近 30 年中,鼓式制动器在轿车领域上已经逐步退出让位给盘式制动器。但由于成本比较低,仍然在一些经济类轿车中使用,主要用于制动负荷比较小的后轮和驻车制动。

盘式制动器也称为钳盘式制动器,又称碟式制动器。20 世纪 20 年代,汽车设计师们已经设计并制造出早期盘式制动器,随着研究的不断深入,以及结构设计的不断改进,制造装配工艺的提升,其各项性能指标已经逐渐可以满足使用要求。30 年代后期,设计师最初将盘式制动器应用到军事工业上,早期用于装备飞机和坦克以及物资运输的核心工具列车上。逐渐的,盘式制动器卓越的性能为广大的汽车设计师所青睐,汽车设计师开始尝试将盘式制动器应用到汽车制动,盘式制动器逐渐应用到民用工业领域。

早在 20 世纪 60 年代,欧、美、日等汽车工业强国的已经在大力推广应用汽车盘式制动器,应用领域涉及轿车、轻型车及中型车,现今,盘式制动器在这些国家的应用已经非常普遍,欧美的轿车已经出台强制性措施,全部使用盘式制动器,而且目前国际通用的标准性文件也是由这些国家制定。而早在“千禧年”欧美就将盘

式制动器指定为城市公交的标准配置^[3]。目前世界上主流的制动器制造企业有克诺尔、韦伯科、博世、美驰、汉德等。80年代初，韦伯科公司开始研制了第一代气压盘式制动器并随后逐步进入了实用阶段。80年代中后期，美驰公司研制并开始小批量生产气压盘式制动器。经过几十年来的发展，生产气压盘式制动器的技术已经比较成熟，形成了系列产品，根据适用的轮毂尺寸要求，产品包括 16 吋、17.5 吋、19.5 吋到 22.5 吋多种规格，可满足不同车型的制动需求。

盘式制动器在我国车辆系统上的应用相对较晚，我国从 1997 年开始在大客车和载重车上推广盘式制动器及 ABS 防抱死系统，2004 年 7 月 1 日交通部强制在 7~12m 高Ⅱ型客车上“必须”配备后，国产盘式制动器得以发展。目前，宇通公司、厦门金龙客车、丹东黄海客车、安凯等国内知名的大型厂家均已在批量生产带盘式制动器的高档客车。2004 年 3 月红岩公司率先在国内重卡行业中完成了对气压盘式制动器总成的开发。2005 年元丰中国重汽卡车事业部在提升和改进卡车底盘的过程中，将 22.5 吋气压盘式制动器成功应用到重汽斯太尔重型卡车前桥上。气压盘式制动器在重汽斯太尔卡车前桥上的成功应用，解决了令整车厂及用户困扰已久的传统鼓式制动器制动啸叫、频繁制动时制动蹄片易磨损、雨天制动效能降低等一系列问题。与此同时陕西重汽、北汽福田、一汽解放、东风公司、江淮汽车等国内大型汽车厂均完成了盘式制动器在重型汽车方面的前期试验及技术储备工作，气压盘式制动器在某些方面将成为未来重卡制动系统匹配发展的新趋势。

中国人口众多、客流量巨大，决定了客运车辆数量和密度非常高，但是相当一部分司机职业素养与驾驶技能较差，违章违法现象频繁发生，这种比较混乱的通行秩序增加了车辆对紧急制动系统的依赖和使用频率。另外，我国平原、高原、山地、丘陵、盆地分别占国土面积的 14%、25%、33%、10%、18%，其地形地貌的险恶程度远超欧美，客车在这种地形地貌上修建的公路体系中行驶，对制动系统的要求远高于欧美国家。目前中国盘式制动器使用情况与欧美对比如表 1.1 所示。由表可以看出国内客车行业最高规格的气压盘式制动器仅为 22.5 吋，在同比气室压力下最大制动力矩约比美国的 24.5 吋制动器低 11%；且国内气室压力标准为 0.8MPa，比国外的 1.2MPa 低 50%。

表 1.1 中国盘式制动器使用情况与欧美对比

	中国	欧洲	美国
制动器的规格/吋 (以盘式为例)	16, 17.5, 19.5, 20, 22.5	16, 17.5, 19.5, 22.5	16, 17.5, 19.5, 22.5, 24.5
气制动的胎压标准 /MPa	0.8	1.2	1.2

欧洲和美国有着雄厚的汽车零部件工业基础，在制动摩擦材料领域，欧洲的飞乐多(FERODO)、优力(JURID)、奔士德(Bendix)、泰克斯塔(Textar)、博世、卢卡

斯等品牌的摩擦片享誉世界。欧洲的瓦博科、克诺尔、卢卡斯，美国的德纳、美驰、德尔福等制动器生产厂商的制动器质量可靠，性能稳定，在 1.2 MPa 的制动气压条件下，这些商用车供应商所提供的客(货)制动器的制动效能，是现阶段我国国产客车制动器产品所不能比拟的。

近几年来，双前挡玻璃客车大量普及，半层客车、卧铺客车以及双层座位客车、电池驱动型电动客车、各种燃气客车、双燃料客车纷纷出现，使得客车的整备质量大大提高。有的 12m 客车整备质量达到了 14.2t，超过我国最早引进的德国尼奥普兰 316 型 12m 城际大客车 2.7t，而制动器仍然为 0.8MPa 气室压力下的 22.5 吋盘式制动器，这些因素造成国内客车的制动性能远低于欧美国家，交通事故发生概率增加。因此，考虑增加制动气压，在客车和校车上运用 24.5 吋盘式制动器，可明显改善我国客车制动孱弱、制动器制动效能不足的现状，进一步提高中国客车和客运的安全性。

1.2 盘式制动器结构原理

1.2.1 钳盘式制动器结构

盘式制动器的固定元件则有着多种结构形式，大体上可分为两类。一类是工作面积不大的摩擦片与其金属背板组成的制动块，每个制动器中有 2~4 个。这些制动块及其促动装置都装在横跨制动盘两侧的夹钳形支架中，总称为制动钳。这种由制动盘和制动钳组成的制动器称为钳盘式制动器。另一类固定元件的金属背板和摩擦片也呈圆盘形，制动盘的全部工作面可同时与摩擦片接触，这种制动器称为全盘式制动器。钳盘式制动器过去只用作中央制动器，但越来越多地被各级轿车和货车用作车轮制动器。全盘式制动器只有少数汽车(主要是重型汽车)采用为车轮制动器，由于散热条件较差，实际应用远没有钳盘式制动器广泛。这里只介绍钳盘式制动器。钳盘式制动器又可分为定钳盘式和浮钳盘式两类。

定钳盘式制动器，如图 1.1 所示，跨置在制动盘上的制动钳体固定安装在车桥上，它不能旋转也不能沿制动盘轴线方向移动，其内的两个活塞分别位于制动盘的两侧。制动时，制动油液由制动总泵(制动主缸)经进油口进入钳体中两个相

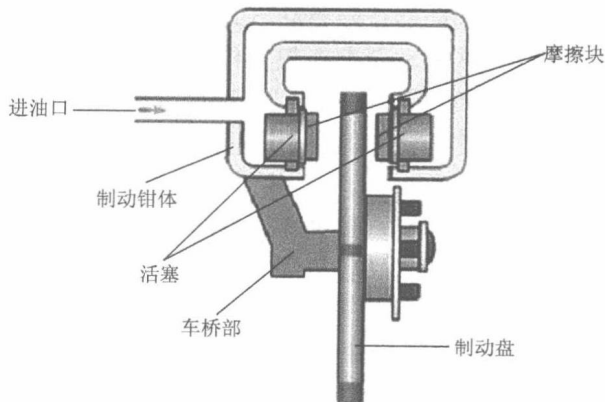


图 1.1 定钳盘式制动器

通的液压腔中，将两侧的摩擦块压向与车轮固定连接的制动盘，从而产生制动。

这种制动器存在以下缺点：油缸较多，使制动钳结构复杂；油缸分置于制动盘两侧，必须用跨越制动盘的钳内油道或外部油管来连通，这使得制动钳的尺寸过大，难以安装在现代化轿车的轮辋内；热负荷大时，油缸和跨越制动盘的油管或油道中的制动液容易受热汽化；若要兼用于驻车制动，则必须加装一个机械促动的驻车制动钳。

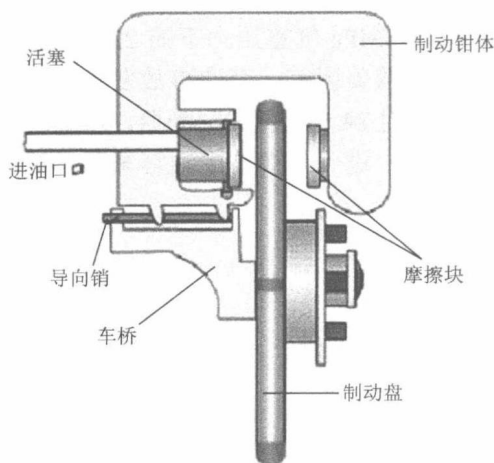


图 1.2 浮钳盘式制动器

浮钳盘式制动器，如图 1.2 所示，制动钳体通过导向销与车桥相连，可以相对于制动盘轴向移动。制动钳体只在制动盘的内侧设置油缸，而外侧的摩擦块则附装在钳体上。制动时，液压油通过进油口进入制动油缸，推动活塞及其上的摩擦片向右移动，并压到制动盘上，并使得油缸连同制动钳体整体沿销钉向左移动，直到制动盘右侧的摩擦片也压到制动盘上夹住制动盘并使其制动。与定钳盘式制动器相反，浮钳盘式制动器轴向和径向尺寸较小，而且制动液受热汽化的机会较少。此外，浮钳盘式制动器在兼充行车和驻车制动器的情况下，

只需在行车制动钳油缸附近加装一些用以推动油缸活塞的驻车制动机械传动零件即可。浮钳盘式制动器逐渐取代了定钳盘式制动器。

1.2.2 液压和气压盘式制动器结构

盘式制动器按照驱动方式可以分为液压盘式制动器和气压盘式制动器，但是由于液压盘式制动器存在扭矩传递效率低、漏油、维修不方便等问题，基本只应用于重型起重机上；气压盘式制动器无制动增势作用，制动过程平和，盘式制动器能大大改善城市客车的制动噪声状况，大大提高了商用车（尤其是城市公交车）制动的环保性和舒适性。

液压盘式制动器通常由摩擦副、施力装置和松闸装置组成。其摩擦副由制动盘和摩擦盘组成。工作表面就是摩擦盘的两侧面，施力装置通常采用特制蝶形弹簧。液压盘式制动器通常采用常闭式设计，安全可靠，在港口大中型起重机上应用非常广泛。在起重机起升机构或钢绳变幅机构的设计中，往往将低速轴的大卷筒与摩擦盘作为一体，用液压盘式制动器作为低速轴制动器。对于起升机构或钢绳变幅机构这些具有位能性负载机构的低速轴制动，液压盘式制动器通常也被称为安全制动器。

液压盘式制动器制动时,如图 1.3 所示,油液被压入内、外两轮缸中,其活塞在液压作用下将两制动块压紧制动盘,产生摩擦力矩而制动。此时,轮缸槽中的矩形橡胶密封圈的刃边在活塞摩擦力的作用下产生微量的弹性变形。放松制动时,活塞和制动块依靠密封圈的弹力和弹簧的弹力回位。由于矩形密封圈刃边变形量很微小,在不制动时,摩擦片与盘之间的间隙每边只有 0.1mm 左右,它足以保证制动的解除。又因制动盘受热膨胀时,其厚度只有微量的变化,故不会发生“托滞”现象。矩形橡胶密封圈除起密封作用外,同时还起到活塞回位和自动调整间隙的作用。如果制动块的摩擦片与盘的间隙磨损加大,制动时密封圈变形达到极限后,活塞仍可继续移动,直到摩擦片压紧制动盘为止。解除制动后,矩形橡胶密封圈将活塞推回的距离同磨损之前相同,仍保持标准值。

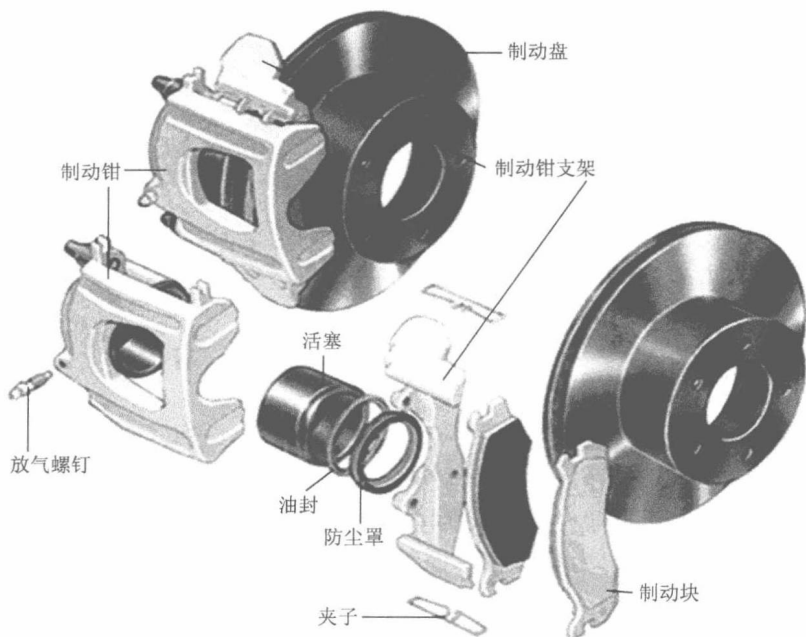


图 1.3 液压盘式制动器基本结构

气压盘式制动器的基本结构包括制动盘、摩擦片、钳体、支架、气室等,如图 1.4 所示。钳体是浮动的,可以相对制动盘轴向移动,钳体的外侧固定一个摩擦片,使外侧的摩擦片可以随钳体的轴向移动而移动,钳体内侧的摩擦片一侧设有传动机构,制动过程中气室将力通过传动机构传给内侧摩擦片的同时,其反作用力传到钳体上,钳体产生的相反运动促使外侧摩擦片也靠向制动盘,从而使两摩擦片夹紧制动盘而实现制动。

气压盘式制动器结构非常紧凑,非常适合大批量装配线生产,有利于预调和在

线质量检测的控制,从而使产品质量有了明确的保证。其作为主动安全的总成件,要求左右前后制动器的功能必须动作协调一致,制动力矩的增长速度也要求无差别的一致,由于不存在增势作用,随着气压开关的打开,四个制动器(或左右两个)的制动力矩输出应稳定而可靠。

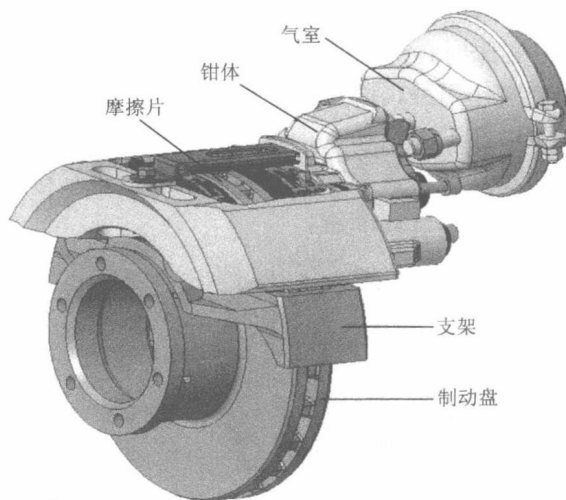


图 1.4 气压盘式制动器基本结构

1.2.3 盘式制动器优缺点

与鼓式制动器相比,盘式制动器具有以下优点:

(1) 一般无摩擦助势作用,因而制动器效能受摩擦系数的影响较小,即效能较稳定,而鼓式制动器尤其是增力式鼓式制动器对摩擦系数非常敏感。

(2) 盘式制动器的输出力矩平稳,而鼓式制动器的输出力矩曲线中间是马鞍形,起点和终点有翘曲的现象。

(3) 在输出制动力矩相同的情况下,盘式制动器的质量和尺寸比鼓式要小。

(4) 盘式制动器的制动盘对摩擦衬块无摩擦增力作用,还因为制动摩擦衬块的不长,其工作表面的面积仅为制动盘面积的6%~12%,故热稳定性较好。

(5) 盘式制动器浸水后效能降低较少,而且只需经一两次制动即可恢复正常,而水对鼓式制动器的影响较大。

(6) 车速变化对盘式制动器的影响较小,而对鼓式制动器的影响较大。

(7) 制动盘的沿厚度方向的热膨胀量极小,不会像制动鼓的热膨胀那样使制动器间隙明显增加而导致制动踏板行程过大。

(8) 较容易实现间隙自动调整,维修较简便。

然而,尽管盘式制动器具有很多突出的优点,但其也存在一些缺陷:

(1) 由于摩擦面积小, 单位压力较高, 摩擦片工作温度相对较高, 所以对摩擦材料的性能要求更为苛刻。

(2) 由于盘式制动器本身没有增力作用, 所以需要为其配备制动助力装置。

(3) 盘式制动器对油缸密封性能要求较高, 对制动液、橡胶圈及车轮轴承润滑剂的抗热性能要求较高。

1.3 制动摩擦材料的发展和特性

1.3.1 制动摩擦材料的发展

汽车制动摩擦材料是汽车摩擦式制动器的关键材料。摩擦材料的发展大致经历了三个时期: ①20 世纪 70 年代中期以前, 石棉型摩擦片占主导地位; ②70 年代中期至 80 年代中期, 由于石棉被确认为是一种强致癌工业原料, 所以摩擦材料向非石棉型摩擦片过渡, 如半金属型制动摩擦材料、烧结制动摩擦材料、代用纤维增强或聚合物黏结制动摩擦材料、复合纤维制动摩擦材料等; ③80 年代中期至今, 新型摩擦片大发展并得到工业化生产、大规模应用。

1.3.2 摩擦材料的技术要求及组成

1. 摩擦材料的性能要求

摩擦材料应满足以下性能要求^[4]:

(1) 合适稳定的摩擦系数和磨损率。理想的制动摩擦材料应该有适宜稳定的摩擦系数和合适的磨损率, 做到“柔性”摩擦, 尽量避免“热衰退”。

(2) 具有良好的机械强度和物理性能。制动摩擦材料必须具有足够的机械强度, 以保证在加工或使用过程中不出现破损与碎裂, 以免造成制动失效的严重后果。

(3) 制动噪声低。环境保护要求车辆制动应尽量减少制动噪声, 一般汽车制动时产生的噪声不应超过 85dB^[5]。

(4) 对偶面磨损较小。制动摩擦材料应具有良好的摩擦学特性, 在制动过程中不应将对偶件(即摩擦盘或制动鼓)的表面磨成较重的擦伤、划痕、沟槽等过度磨损的情况。

2. 制动摩擦材料的组成

(1) 有机黏结剂 黏结材料的作用是把各组分保持在一起, 形成摩擦材料的基体, 因此, 黏结材料的性能优劣是影响摩擦材料摩擦磨损性能的关键因素。目前常用的黏结材料为酚醛树脂或其改性树脂, 由于纯酚醛的硬度和脆性大, 耐热性差,

因此对其使用环境要求严格,无法适应摩擦材料的发展要求,所以各类改性后的酚醛树脂得到了广泛关注^[6,7]。

(2) 纤维增强材料 增强纤维的作用是提高摩擦材料的强度以更好承受剪切和冲击力,常见的增强纤维有碳纤维、玻璃纤维、金属纤维和芳纶等^[8,9]。

(3) 填料 为了改善摩擦材料的加工性能并提高其耐磨性,通常在摩擦材料组分中加入硫酸钡、长石粉、云母和铅石等矿物填料^[10,11],目前常用的填料有两类:一是无机粉状物填料,如石墨、铜粉、铁粉等;二是颗粒状物填料,如焦炭、蛭石等。

(4) 摩擦性能调节剂 主要是用来稳定摩擦系数,减少摩擦片和制动盘的磨损,常用的摩擦性能调节剂有氧化铝、氧化硅和硅酸锆^[12,13]等。

1.3.3 摩擦材料的分类

1. 石棉类制动摩擦材料

石棉类制动摩擦材料主要以石棉纤维作为增强纤维的一种有机基复合制动摩擦材料。石棉纤维具有熔点高、摩擦系数大、机械强度良好且与黏结剂有强的吸附力,具有优良的综合摩擦学性能。20世纪70年代以前,被广泛应用,并长期占据主导地位。但是,由于石棉的传热性能很差,不能迅速散发汽车制动产生的摩擦热,会导致刹车片热衰退层变厚,增加材料的磨损。同时,生产过程及使用中汽车制动导致石棉挥发对人体呼吸器官有严重损害的物质。

2. 金属基制动摩擦材料

金属基制动摩擦材料主要分为熔铸金属和粉末冶金制动摩擦材料两种。熔铸金属主要指铸铁、青铜等,因其易黏结和高温、高速下摩擦系数低等缺点已被其他材料所取代。粉末冶金制动摩擦材料主要有铜基和铁基两种。它主要是以金属粉末为基体,加入适当减摩剂和增摩剂烧结而成。此类摩擦材料使用寿命较长,但其价格高、制动噪声大、对偶磨损大等缺点使其应用受到了一定限制。

3. 半金属基制动摩擦材料

半金属基制动摩擦材料采用金属纤维或金属非金属复合纤维替代石棉纤维生产制动摩擦材料。其特点是具有优良的综合摩擦学特性,但也存在振动噪声大、边角脆裂等缺点。

4. 碳纤维制动摩擦材料

碳-碳复合摩擦材料是用碳纤维为增强材料制成的一类摩擦材料。其摩擦性能十分优异,具有高强度、高韧性及优良的抗摩擦性能。目前,飞机和赛车都采用了C-C

复合摩擦材料^[5]。但也存在摩擦系数不稳定,抗氧化性能差等缺点。我国在 C-C 复合制动材料制备技术上处于国际领先水平。

5. 工程陶瓷基复合制动摩擦材料

这种材料是用陶瓷纤维为增强材料制成的一类摩擦材料。具有高热容量、低磨损率以及抗热冲击的特点,且具有较高的摩擦系数。但是工程陶瓷存在容易断裂的严重缺点,制约了它的广泛应用。近几年发现,工程陶瓷基体经纤维或晶须增强后,不仅强度提高,而且韧性大大上升,为它在制动摩擦材料领域的广泛应用提供了可能。

6. 复合纤维基制动摩擦材料

这种材料是目前最新发展的一类非石棉摩擦材料,采用两种或两种以上纤维作为增强材料,经过特定的工艺将其和基体材料进行混合。这样可兼顾各方优点,充分发挥各种纤维自身的优点,研制出性能优良、成本较低的制动摩擦材料。目前,复合纤维基制动摩擦材料所采用的纤维以无机纤维为主,有时也加入少量的有机纤维。

1.4 盘式制动器热应力问题研究现状

盘式制动器制动过程中,制动盘与摩擦片在气室压力的作用下产生挤压,形成的摩擦力做功发热,产生较高的热流密度,尤其对于装有高压大型盘式制动器的车辆来说,热流密度可以到达 $M \cdot W/m^2$ 数量级别,大大提高了摩擦副间的温升速度和最高温度,加剧温度分布的不均匀性,在制动盘面产生较大的热应力,温度和热机械耦合作用下的热应力周期性反复作用在制动盘上,这极易造成制动盘表面出现热应力疲劳,产生热裂纹,从而造成制动盘失效。

1.4.1 热机耦合数值计算

早期,采用数值计算法求解制动盘热机耦合问题时,都是利用二维轴对称模型来计算的。例如,Valvano^[14]、Zagrodzki^[15]、Jung^[16]等采用 ABAQUS/HKS 研究了摩擦热引起的热弹性接触难题;易茂中^[17]、吴萌玲^[18,19]等也建立了制动盘的二维轴对称模型,分析了制动盘表面温度。但是这种模型在接触条件上面有所失真,将导致弹性变形计算错误^[20]。因此,在轴对称模型的基础上,研究学者开始尝试取制动盘的一部分进行分析。李继山^[21]、丁群^[22]、杨莺^[23]、Choi^[24]、郑剑云^[25]等取部分制动盘模型为研究对象,分析了制动盘表面的应力场与温度场,计算时假设 85% 的客车动能转化为热能,将其施加在制动盘和摩擦片的接触区域,这种计算方法考虑了能量在制动盘和摩擦片之间的分配关系,对比二维模型有一定的进步。在以上研