

王 涛 朱文坚 编著

摩擦制动器

—原理、结构与设计



华南理工大学出版社

摩 擦 制 动 器

——原理、结构与设计

王 靖 朱文坚 编著

华南理工大学出版社

内 容 提 要

本书从制动摩擦原理出发,着重分析了制动副的摩擦学特性,阐述了制动摩擦温度的计算与热应力分析、摩擦副材料及其选择,介绍了蹄式、盘式、带式等摩擦制动器的结构、特点及设计计算,并介绍了制动摩擦的性能评定标准及试验方法。

本书可作为机械设计、运输工程、摩擦学等专业的大学、研究生选修课教材和教学参考书,也可供从事机械设计与生产的工程技术人员阅读参考。

〔粤〕新登字12号

——原理、结构与设计

王 涛 朱文坚 编著

*

华南理工大学出版社出版发行

(广州 五山 邮码510641)

各地新华书店经销 林业印刷厂印装

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 8.125 字数: 187千

1992年12月第1版 1992年12月第1次印刷

印数 1—3000

ISBN 7—5623—0387—8/TH·19

定价: 5.20元

前 言

制动器是机械设备中不可缺少的部件之一，如飞机着陆，火车、汽车行驶中的减速、停止、起重设备的升降、位置的控制等都需要在传动系统中装设制动器。目前大多数采用的是摩擦制动器，即以摩擦力作为制动力，使运动物体达到减速、停止的目的。因此，制动器的质量与制动副摩擦性能的关系很大。为保证制动的安全可靠性和寿命，就应保持和稳定一定的摩擦力和制动副表面的耐摩性。凡是影响制动副摩擦磨损性能的因素，均会影响其制动性能的改变及变化规律，尤其以制动过程中动能转变为热能，使摩擦表面温度急剧上升的影响最大，制动副材质的选配及相应的结构参数设计都与此有关。

为了适应机械产品可靠性不断提高的要求，随着高性能摩擦制动器的开发、新材料的应用与研究，我们从“摩擦学”原理和系统分析法出发，结合在制动摩擦方面已做过的一些研究工作，阐述了制动摩擦的基本特性及规律，介绍了摩擦副材料的选配和无石棉衬片材料的研究动向，以及几种主要摩擦制动器的结构特点及其参数的设计计算。但如何利用制动摩擦热来稳定摩擦力和强化摩擦表面，还有待进一步探讨。而有利于摩擦热的散出或吸收，则是制动器结构设计、参数选择必需考虑的问题。

本书适合于高等学校机械设计、运输工程、起重设备、矿山机械等专业学生作选修课教材和研究生参考书，也可供

在职的有关设计、维修工程技术人员、研究人员参考。

本书由王涛主编并编写第二、三、四、五、九章，第一、六、七、八章由朱文坚编写。

目前国内尚未有这方面的书籍，我们希望能抛砖引玉。由于编者水平所限，如有误漏之处，殷切期望广大读者予以批评指正。

编 者

1991年12月于广州

目 录

第一章 概论

- §1-1 摩擦制动器的作用及要求…………… (1)
- §1-2 摩擦制动器的分类及特点…………… (3)
- §1-3 摩擦制动器性能的评价及主要指标…………… (10)

第二章 制动摩擦原理

- §2-1 制动摩擦特性…………… (14)
- §2-2 制动副的磨损…………… (21)
- §2-3 制动摩擦过程中的相变及结构变化…………… (27)
- §2-4 制动摩擦过程中的“氢脆”现象…………… (29)
- §2-5 制动摩擦中的表面膜…………… (32)
- §2-6 制动摩擦副的系统分析…………… (37)
- §2-7 制动摩擦噪声…………… (39)

第三章 制动摩擦时的温度计算

- §3-1 制动摩擦热分析理论基础…………… (42)
- §3-2 制动摩擦副温度场、摩擦表面平均温度及闪点温度的
计算…………… (44)
- §3-3 反复瞬时制动工作状态下的温度计算…………… (68)
- §3-4 考虑 T^* 和 T_c 相互影响时, 温度计算方法的发展…………… (78)

第四章 制动摩擦中的热应力

- §4-1 制动过程中摩擦表面的热裂现象及分析…………… (80)
- §4-2 制动鼓的热应力计算…………… (83)
- §4-3 盘式制动器的热应力…………… (87)

第五章 制动摩擦副材料

- §5-1 制动摩擦副材料的分类及对材料性能的要求…………… (90)
- §5-2 有机石棉摩擦衬片材料…………… (94)

§5-3	粉末冶金摩阻材料.....	(104)
§5-4	无石棉有机摩擦材料.....	(112)
§5-5	制动鼓(盘)材料.....	(119)
§5-6	制动摩擦副材料的选择.....	(122)

第六章 蹄(块)式制动器

§6-1	概述.....	(125)
§6-2	外蹄(块)式制动器的结构.....	(126)
§6-3	外蹄块式制动器的选择和设计计算.....	(130)
§6-4	内蹄式制动器的结构.....	(138)
§6-5	内蹄式制动器的设计.....	(148)

第七章 盘式制动器

§7-1	盘式制动器的分类、特点及应用.....	(169)
§7-2	盘式制动器的结构及设计计算.....	(172)
§7-3	全盘式制动器的结构和计算.....	(184)
§7-4	多盘式制动器的结构与计算.....	(189)
§7-5	锥盘式制动器的工作原理与计算.....	(194)
§7-6	载荷自制盘式制动器简介.....	(197)
§7-7	盘式制动器的主要零件.....	(201)

第八章 带式制动器

§8-1	带式制动器的分类、特点及应用.....	(204)
§8-2	带式制动器的结构与计算.....	(209)
§8-3	带-块式制动器的结构与计算.....	(215)
§8-4	铰链块式制动器.....	(219)
§8-5	制动带.....	(221)

第九章 摩擦制动器性能的测试方法

§9-1	制动副摩擦磨损性能的测试.....	(229)
§9-2	制动蹄(块)粘接强度的测试.....	(238)
§9-3	摩擦制动器性能的评价方法及试验规范.....	(242)

第一章 概 论

§1-1 摩擦制动器的作用及要求

利用运动表面相接触时所产生的摩擦阻力达到减速或终止运动目的的装置称为摩擦制动器或机械制动器（因为制动力的产生和能量的转换方式是通过机构来实现的）。它具有结构简单、工作可靠的优点，早已广泛地应用在各种机械设备中而成为重要的组成部件之一。飞机下降着陆时，巨大的动能就是通过盘式制动器中的衬片与制动盘的摩擦作用转化为热能，从而使高速运动的飞机逐渐减速直至停止在跑道上所规定的位置。飞机着陆时的安全性，在很大程度上取决于制动器的可靠性；火车行驶中的减速、到站时运动的停止，是通过制动系中轮箍与闸瓦间的摩擦阻力而产生；各类汽车在不同路面上行驶时转弯、下坡的减速，紧急刹车、停车等就是通过装在轮胎处的转鼓（盘）与蹄片（衬片）间的摩擦达到减速、刹车的目的，其摩擦的稳定性直接影响到汽车的制动性能。在起重设备中，无论是龙门吊、塔吊、一般起重吊以及升降机（包括电梯）、矿山和建筑提升机等，重物垂直和水平的提升和摆动支持的到位、停止等也都是靠运动的转轮（制动轮）与制动块之间摩擦作用产生的制动力矩来实现调速、终止运动的目的。制动摩擦副的工作特性将直接影响起重、升降机械设备的使用质量和安全可靠性能。

因此，凡是运动的机械设备需要减速或停止，都可以利用摩擦阻力来实现制动目的，制动器在轻工机械、纺织机械中也得到广泛的应用。

摩擦制动器的主要功能在于调速和终止运动，但装设在不同的机械设备中，其作用亦有所不同，但基本要求是一致的，即：

（1）应有足够的摩擦制动力矩，因为这是保证安全可靠性的基本条件。无论是起重机升降还是车辆行驶，这个条件都是必需的。所需的摩擦阻力矩由起重量或车辆行驶速度和载重量来确定。

（2）制动副所产生的摩擦阻力矩稳定性好，即受外界条件的变化（速度、温度、湿度、驱动力等）影响小。

（3）制动器结构简单，散热性好，操作维修方便。

（4）噪音低、污染少。

摩擦制动器实质就是一个能量转换器。它是利用摩擦将运动的机器或机构的动能全部或部分转换为热能，并通过制动器与外界环境的热交换来散热。因此，凡是有利于摩擦热导出和热交换，都有利于稳定制动阻力矩。故选择摩擦副材质和进行制动器的结构设计，都是从有利于摩擦热的散出来考虑。随着起重量或载重量及行驶速度不断的增大，高速重载下所产生的摩擦热也十分庞大，摩擦表面单位面积吸收的能量增大了几倍到数十倍。制动摩擦的基础研究表明：为满足和保持所需的制动力矩，摩擦热的散出是一个重要方面，摩擦热的吸收和利用也是不可忽略的另一面，已有不少专利文献发表。随着制动摩擦学的深入研究，将为新型结构和高性能的摩擦制动器的设计提供理论基础。

§1-2 摩擦制动器的分类及特点

一、摩擦制动器的分类

由于制动工况条件不同，对制动性能的要求不一样，摩擦制动器的种类也是多种多样的。按制动器的功用和使用的对象不同，摩擦制动器可分为：

航空摩擦制动器 { 减速制动
停机制动

火车摩擦制动器 { 行车减速制动
停车制动

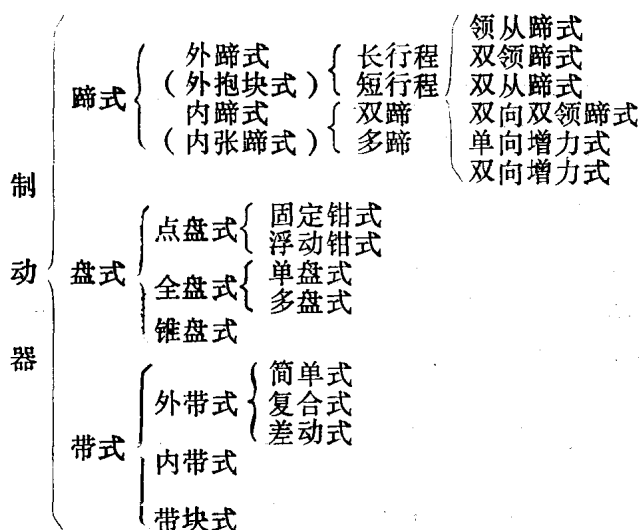
汽车摩擦制动器 { 行车制动
驻车制动
减速制动

起重设备制动器 { 升降起吊制动
水平移动制动

工程机械制动器 { 减速制动
驻车制动

纺织机械制动器：停机制动

按制动器摩擦副的结构型式不同，可分为：



蹄式制动器中外蹄（块）式制动器是由两个外置蹄块在径向夹持制动轮外表面因摩擦而产生制动力矩，主要应用在起重设备及火车制动系中。而内蹄式制动器是两个内置制动蹄在径向向外紧压制动鼓（轮）内表面来产生摩擦阻力矩。这类制动器广泛应用于起重机运行机构和各类车辆制动系中。

盘式制动器中，摩擦副表面是在轴向方向受载后相互紧压而产生制动力矩。它具有结构简单、制动可靠、散热性好和抗热衰退性较高的优点，而且盘式制动器是轴向加载，对轴无附加的弯矩，适用于高速重载的制动条件，如飞机、重型车辆、高速火车、轿车、高速离心机等制动系中。

带式摩擦制动器是依靠挠性钢带上摩擦衬带与制动轮间产生的摩擦制动力矩。带式摩擦制动器的包角比蹄式的包角

大，故在相同条件下所产生的制动力矩比蹄式要大。但制动带的受力和磨损不均匀，只适用于结构紧凑、制动力矩大的场合，在轮式起重机、挖掘机及石油钻机上应用较广。

按制动副的工作环境，制动器可分为干式摩擦制动器和湿式摩擦制动器两种。前者的摩擦副是处在干摩擦条件下产生制动力矩，大多数结构型式的制动器属此类；后者的摩擦副是在润滑油冷却介质中，处于边界润滑工作状态下而产生制动力矩，这主要在盘式制动器中采用。

按摩擦制动器的工作传力状态，可分为常闭式和常开式两类。常闭式制动器是指在未工作时摩擦副表面受一定压力作用，相互紧贴处于闭合状态，或称“抱闸”，工作时才松闸。闭合力大多数是用弹簧产生，少数采用重块。这类制动器一般自重较大，上闸时有冲击力而影响驱动机构的寿命，常用于起重运输设备中的起升、变幅、运行机构的制动器中。常开式制动器，即制动摩擦副表面经常处于有一定间隙的脱开或“松闸”状态，需要制动时，才“闭合”使其制动摩擦副表面相互接触产生一定的摩擦阻力矩。由于制动力可以根据要求来调节，且制动平稳，故在起重设备的旋转机构中，尤其在各种车辆的运行机构或车轮中得到广泛的应用。

按产生摩擦制动力的驱动机构，可分为机械式、电磁式、磁液式、电液式、液压式、气压式、气液式等不同驱动方式的制动器。其中电磁式驱动由于闭合迅速、操作方便，广泛用于中等负荷起重和提升设备中。而液压和气压式，则工作平稳而迅速，制动效率高，寿命长，但密封要求高，结构复杂，主要用于车辆制动系中。

按摩擦制动力的作用方式分为自动作用式、操作式和

综合式三类。制动作用过程中，“抱闸”、“松闸”都能自动进行，摩擦制动力已先确定，无需专门操作去调节，称自动作用式。一般起重设备中采用的常闭式制动器即为自动作用式。常开式或各类车辆制动器，制动力的大小需要依据路面情况及要求人为地进行调节和停止。

二、摩擦制动器的主要性能参数

由于制动的工况条件不同，对摩擦制动器的功能及要求不一样，制动器性能的评定参数侧重有所不同，但制动器的主要性能参数一般有如下几个。

1. 制动力矩

这是保证制动性能的基本参数，也是选择制动器的主要依据。制动器的类型不同，确定制动力矩的方法有所不同：

对于垂直制动，主要是应保证被吊重物在提升输送过程中悬吊的可靠性，它是以垂直负荷为主，惯性质量次之，其制动力矩为

$$M_T = S_T M_1, \quad (1-1)$$

式中 M_1 ——换算到制动轴上的负载力矩， $N \cdot m$ ，

$$M_1 = \frac{M_i}{i} \eta$$

M_1 ——垂直负荷(重物及吊重)对轴的力矩， $N \cdot m$ ；

i ——制动轴到负载轴的传动比；

η ——从制动轴到负载轴的机械效率；

S_T ——保证重物可靠悬吊的制动安全系数，一般起

重机械 $S_T = 1.25 \sim 2.5$ ，矿山提升机 $S_T = 3$ 。

对于各种车辆运行中水平制动的制动力矩。

$$M_r = M_i - M_f \quad (1-2)$$

式中 M_i ——负载力矩，可换算为制动轴上传动系统的惯性力矩， $N \cdot m$ ，

$$M_i = \frac{E_p + E_g}{\varphi} \quad (1-3)$$

φ ——制动轴在制动时的转角， rad ；

E_p ——被制动体旋转质量动能或制动系统动能之和，

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{I_{e1} (\omega_1^2 - \omega_0^2)}{2} \\ &= \frac{(GD^2)_{e1} (n_1^2 - n_0^2)}{7160} \end{aligned} \quad (1-4)$$

I_{e1} 、 $(GD^2)_{e1}$ ——换算到制动轴上的等效转动惯量和飞轮矩， $N \cdot m^2$ ；

ω_0 、 ω_1 ——制动轴初始与终止角速度， rad/sec ；

n_0 、 n_1 ——制动轴初始与终止转速， r/min ；

E_g ——换算到制动轴上的所有直动质量的动能，

$$E_g = \frac{W(v_1^2 - v_0^2)}{2g}$$

W ——直动部分的总重量， kg ；

v_0 、 v_1 ——直动部分初始及终止速度， m/s ；

g ——重力加速度；

M_f ——换算到制动轴上的总摩擦力矩。

有时需要在规定的某一条件下（如下列）确定其负载力矩：

（1）定制动时间（ t ）

规定在 t 秒之内制动轴转速由 n_1 减为 n_0 时的制动力矩：

$$M_T = \frac{(GD^2)_e (n_1 - n_0)}{375t} \quad (1-5)$$

式中 $(GD^2)_e$ ——等效飞轮矩, $N \cdot m^2$;

t ——制动时间, s.

(2) 定制动转角

在规定制动转角 φ 内其制动轴转速由 n_1 减为 n_0 时的制动力矩:

$$M_T = \frac{(GD^2)_e (n_1^2 - n_0^2)}{7160\varphi} \quad (1-6)$$

式中 φ ——制动轴转角, rad.

(3) 定制动距离

车辆行驶 L 距离内, 转速由 n_1 减为 n_0 时的制动力矩:

$$M_T = \frac{(GD^2)_e (n_1^2 - n_0^2) R}{7160Li} \quad (1-7)$$

式中 R ——转轮半径, m;

i ——制动轴到车轮轴上的传动比;

L ——规定的制动距离, m.

$$\text{或} \quad M_T = \frac{(GD^2)_e \cdot i (v_1^2 - v_0^2)}{283000LR} \quad (1-8)$$

完全制动时, $n_0 = 0$, $v_0 = 0$, 则

$$M_T = \frac{(GD^2)_e v_1 n_1}{4500L} \quad (1-9)$$

2. 制动的效能因数 (K)

它表明了制动器的抗衰退性能, 其定义是指制动衬片与制动鼓(轮)或盘之间的摩擦力 (F) 与作用于蹄或块上的制动力 (驱动力 P_N) 之比值, 即制动器的效能因数

$$K = \frac{F}{P_N}$$

或

$$K = \frac{F_{F1} + F_{F2}}{P_N} \quad (1-10)$$

制动器的制动因数，也是各制动蹄或块的制动因数之和。对一定几何结构参数的制动器，制动效能因数仅是衬片材料摩擦系数的函数。制动过程中，摩擦温度、相对滑动速度，压力及相对湿度等的改变，都会影响衬片材质摩擦系数的变化，因此制动因数-摩擦系数曲线的斜率，可作为制动器的敏感度，即相对于一定摩擦系数值（ μ ）或 μ 值变化时力矩的变化率也就反映了制动性能的稳定程度或制动器的抗衰退性能。

$$S_B = d(K) / d(\mu) \quad (1-11)$$

不同结构型式的摩擦制动器，其制动因数及敏感度不相同，从表1-1中可看出，盘式制动器的制动因数较低，其敏感度较小。制动因数过大，将会引起过高的敏感度 S_B 而使制动稳定性恶化。当 $S_B = \infty$ 时，若对制动蹄（块）施加很小的力，则主蹄产生的制动力矩急剧增大而锁死车轮（抱死），这种现象必须防止。但这也是盘式制动器比鼓式制动器优越之处，也是它能在轿车中得到广泛应用的重要原因之一。

表1-1 不同结构型式制动器的 K 及 S_B

制动器类型		K	$\Delta K (\%)$	S_B	抗衰退性能
盘式制动器		0.7	+14~-14	2	好 ↓ 差
内蹄式制动器	领-从蹄	2.0~2.8	+21~-21	8	
	双领蹄	2.5~3.5	+36~-28	12	
	双向增力	3.0~7.0	+51~-33	4	

3. 制动器的额定吸热率

它是制动器的热特性指标，表明制动时在单位时间内制动器所能吸收的热负荷。摩擦制动过程中大量的动能转换为热能时，衬片及对偶件材质所能承受的最大热负荷与制动工况条件有关，连续制动时的额定吸热率为：

$$Q_D = \frac{\Delta T_{\text{max}} \alpha F_K}{1 - \exp(-\alpha F_K t / c \gamma V)} \quad (1-12)$$

式中 ΔT_{max} ——制动盘最高的体积温度；

α ——传热系数；

F_K ——制动器的散热面积；

γ ——比重；

c ——比热；

V ——制动盘的体积；

t ——连续制动时间，s。

反复继续制动时，若第一次制动后的蓄热 q 不散出，经 n 次制动后所达温度为

$$T_n = \frac{q}{c \gamma V} \cdot \frac{1 - \exp(-n \alpha F_K t_n / c \gamma V)}{1 - \exp(-\alpha F_K t_n / c \gamma V)} \quad (1-13)$$

§1-3 摩擦制动器性能的评价及主要指标

一、制动时的运动方程

摩擦制动器工作过程的实质是将具有一定质量的运动物体在旋转或往复运动中的动能转变为热能。运动的减缓和停止，取决于衬片与制动盘（鼓）间的摩擦力或摩擦力矩及作