



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



普通高等教育铁道部规划教材

# 列车制动

(第二版)

饶忠 主编 陆啸秋 主审



中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

## 内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材和铁道部规划教材,是在原高校教材《列车制动》基础上修订而成的。作者从制动的基本概念、闸瓦制动与黏着等内容讲起,由点到面,并将铁路上应用最为广泛的各种自动制动机的共性抽象出来,集中作综合阐述,力图在尽量少的课时里让读者对“列车制动”先有一个总体的了解,再在此基础上具体讲解各型客货车空气制动机与机车上的JZ-7型空气制动机、DK-1型电空制动机。教材后半部分重点介绍了列车制动计算、制动性能试验、高速和重载列车制动以及CRH2型动车组制动系统等内容。

本书可作为高等学校铁路特色机械工程专业(含铁路机车车辆和机车运用等专业)本科教材,也可以供相关专业的技术人员学习使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

列车制动/饶忠主编. —2版. —北京:中国铁道出版社,2010.2  
普通高等教育铁道部规划教材. 普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-113-10645-4

I. ①列… II. ①饶… III. ①列车—制动装置—高等学校—教材 IV. ①U260.35  
中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第014885号

书 名:列车制动(第二版)  
作 者:饶 忠 主编

---

出版·发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:赵 静 电话:(010)51873181

封面设计:崔丽芳

责任校对:孙 玫

责任印制:陆 宁

---

印 刷:三河市华丰印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16 印张:15.75 插页:4 字数:392千

版 本:1998年12月第1版 2010年2月第2版 2010年2月第8次印刷

印 数:18001~21000册

书 号:ISBN 978-7-113-10645-4

定 价:37.00元

---

### 版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部联系调换。

电 话:(市电)(010)51873170,路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

## 第二版前言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,同时也是普通高等教育铁道部规划教材,是由铁道部教材开发领导小组组织编写,并经铁道部相关业务部门审定,适用于高等院校铁路特色专业教学以及铁路专业技术人员使用。本书为铁道机车车辆系列教材之一。

从本书第一版开始出版发行到现在,已经超过十年了。在这十年多的时间里,随着我国改革开放的继续深入和综合国力的迅速增强,我国铁路也有了飞跃发展:高速客运专线一条接一条地修建,高速动车组如同雨后春笋越来越多,旅客列车运行速度大大提高;货物列车牵引重量越来越大,运行速度也在不断提高;列车制动技术日新月异,新的制动方式和新型制动机纷纷涌现,一些老式制动机已经基本被淘汰。为适应上述变化,不断推陈出新,我们在第二版中对本书作了如下修订:

(1)在“车辆制动机”部分,删去了 GK 型、GL 型制动机的详细阐述,增加了适应重载列车的 120-1 型制动机;

(2)在“机车制动机”部分,删去了 ET-6 型和 EL-14 型制动机的详细阐述,增加了“JZ-7 型制动机的重联阀”、“SS<sub>8</sub> 型电力机车 DK-1 型制动机新增的装置”等内容;

(3)在“高速列车制动”部分,增加了“高速动车组制动系统”和“CRH2 动车组制动系统”两章;

(4)在“重载列车制动”部分,增加了适应重载牵引的 EUROCONTROL 型制动机。

(5)在“列车制动计算”部分,增加了“高速动车组单位基本阻力公式”、“列车制动力等效二次计算法”、“列车制动距离电算”和“列车制动限速表电算”等内容(教材另附电算光盘)。

(6)在章节安排、文字阐述、例题、公式、数据、复习思考题和课外作业题等方面都进行了全面修订,并在“制动性能试验”一章的末尾增加了复习思考题。

本书由北京交通大学饶忠、彭俊彬合作编写,饶忠任主编,彭俊彬任副主编;铁道部运输局陆啸秋主审。在本书编写过程中,铁道科学研究院黄问盈、西南交通大学张开文和北京交通大学焦凤川都曾给予宝贵的支持和热心的帮助,在此表示衷心的感谢。

书中不妥及疏漏之处,欢迎读者指正。

编者

2010 年 1 月

# 第一版前言

铁路的机车车辆是编组成列车来运行的。机车和各个车辆之间或者动车组的动车与拖车之间,都要用车钩连成一体。为了在列车上坡、下坡和通过曲线时能够自由地折曲(车与车之间相互成一个角度,不在一条直线上),车钩之间要互相保持着一定的间隙,车钩后面还设有缓冲器。列车可以拉长,也可以压缩。但是,机车(动车)和各个车辆的制动装置不是互相独立的,而是互相连通的,是一个有机的整体。每个机车和车辆都有它自己的制动装置,但是,在编组成列车互相接通之后,就都要由本务机车或头车(操纵端)统一操纵,不能各行其是。由于列车编组很长,机车车辆及制动机类型复杂,各车的制动能力不同,所以制动时不可能完全同步,这就不可避免地要在各车之间发生冲撞;由于列车重量很大,速度又高,所以制动以后要经过相当长的距离才能停住。要想提高列车牵引重量或运行速度,仅仅换大功率机车是不够的,必须同时解决列车制动问题。

建国以来,我国铁路制动工业和科研队伍都得到了很大的发展,不但能自己生产成套的制动装置,而且还先后独立设计研制成功了车辆用的 GK、GL、103、104、120、F-8 等型空气制动机,机车用的 JZ-7 型空气制动机和 DK-1 型电空制动机,准高速列车用的“JZ-7 加电控”、“F-8 加电控”和“104 加电控”等制动机。其中,有些制动性能已经达到世界先进制动机的水平。在基础制动装置方面,对盘形制动、空重车调整、闸瓦间隙自动调整、防滑器、高磷闸瓦和合成闸瓦的研制,也都取得了可喜的成果。

本书是根据铁路高等学校机械工程专业(含机车、车辆和机车运用专业)“列车制动”课程的教学需要而编写的。在编写过程中,作者根据多年从事机车和车辆两个专业制动课教学的体会和经验,对教材内容的取舍和编排作了认真的考虑和调整,在写法上与过去同类教材相比,有一个明显的创新,内容上增加了许多新东西,理论上也提出了一些新概念,这对制动理论的丰富和完善将起到促进作用。

(1)本书最为突出的特点是把当今铁路上应用最为广泛的各种自动制动机的“共性”抽象出来集中作一个综合的阐述,这就是本书的第二章“自动空气制动机综述”。其中有:缓解稳定性和制动灵敏度,列车管局部减压,常用安定性和紧急灵敏度,常用急制动和减速充气缓解,列车管局部增压(加速缓解),二、三压力机构及制动机性能的“软”和“硬”,列车管压强对制动缸的间接控制,自动制动阀对列车管压强的间接控制,列车管减压量与制动缸压强的关系,列车管有效减压范围,空气波、制动波及其波速等等。在讲完这些“共性”之后再来讲机车车辆的各



种类型的制动机时,只需要着重指出它们各自的特点即可,既可避免大量的重复,又可由简单到复杂,循序渐进。在本书之前,尚未见有同类教材曾有这样的写法。

(2)在第一章讲“制动方式”的时候,首先介绍随后经常要用到的有关列车制动的若干基本概念或名词术语,较为详细地介绍闸瓦制动及其黏着限制问题,在此基础上再来简略地介绍其他制动方式,而不是一下子把各种制动方式统统罗列出来。另外,我们把基础制动、空重车调整、制动缸活塞行程调整等都提到第一章来,使“绪论”变成“列车制动总论”,即,对列车制动作一个总体的全面而又概略的介绍。

(3)本书介绍了十几年来我国铁路上出现的各种新型制动机,如车辆用的104C、120、F-8,准高速列车用的“JZ-7 加电控”、“F-8 加电控”、“104 加电控”等,并且简略介绍了高速和重载列车制动技术的特点和发展趋势。考虑到目前我国铁路上蒸汽、内燃、电力三种牵引动力并存的情况和制动系统的特殊性,本书对ET-6、JZ-7、DK-1这三种机车制动机都分别作了简略介绍,读者可根据需要任意选择。

(4)书中有关两种制动限速(紧急制动限速和常用制动限速)的理论和长大下坡道列车制动空走时间的理论公式,在大学本科“制动”教材中还是第一次出现。这是作者本人的科研成果。尤其是常用制动限速的应用,可以把《铁路技术管理规程》的货物列车和旅客列车的“制动限速表”的坡度由-20扩大到我国铁路的最陡下坡道-33,不仅有重要的理论意义,而且有重大的实际意义。

为了适应读者自学的需要,本书除“制动性能试验”一章外,每章的正文之后均列有复习思考题(有的还有课外作业题)。

本书由北京交通大学饶忠编写,西南交通大学张开文审阅,是铁路高等学校机械工程专业(含机车、车辆和机车运用专业)的教材,亦可供其他专业和有关部门的人员学习或参考。

编者

1998年11月

# 目 录

第一章 列车制动总论	1
第一节 列车制动的几个基本概念	1
第二节 踏面(闸瓦)制动与轮轨黏着	3
第三节 黏着系数的影响因素和计算公式	4
第四节 黏着限制、制动率和闸瓦摩擦系数	6
第五节 其他制动方式	9
第六节 制动机种类	12
第七节 基础制动装置和防滑装置	16
第八节 闸瓦压力的空重车调整	25
第九节 制动缸活塞行程的调整	27
复习思考题	34
第二章 自动空气制动机综述	35
第一节 缓解稳定性和制动灵敏度	35
第二节 列车管局部减压	36
第三节 常用安定性和紧急灵敏度	37
第四节 常用急制动、减速充气缓解与加速缓解	38
第五节 二压力、三压力机构及制动机性能的“软”和“硬”	40
第六节 列车管空气压强对制动缸的间接控制	43
第七节 自动制动阀对列车管空气压强的间接控制	44
第八节 列车管减压量与制动缸压强的关系及列车管有效减压范围	46
第九节 空气波和空气波速	49
第十节 制动波和制动波速	51
复习思考题	53
第三章 客货车辆空气制动机	54
第一节 104、103 型制动机	54
第二节 120、120-1 型制动机	60
第三节 F-8 型制动机	63
复习思考题	67
第四章 JZ-7 型空气制动机	68
第一节 JZ-7 型制动机的特点和组成	68



第二节	JZ-7 型制动机的分配阀 .....	69
第三节	JZ-7 型制动机的中继阀 .....	77
第四节	JZ-7 型制动机的自动制动阀 .....	78
第五节	JZ-7 型制动机的单独制动阀 .....	84
第六节	JZ-7 型制动机的综合作用 .....	86
第七节	JZ-7 型制动机的重联阀 .....	88
	复习思考题 .....	90
<b>第五章</b>	<b>DK-1 型电空制动机</b> .....	<b>91</b>
第一节	DK-1 型制动机特点和组成 .....	91
第二节	DK-1 的空气制动阀作用原理 .....	97
第三节	DK-1 型制动机的综合作用 .....	100
	复习思考题 .....	104
<b>第六章</b>	<b>列车制动计算</b> .....	<b>106</b>
第一节	概述 .....	106
第二节	制动减速力和常用制动限速 .....	107
第三节	列车制动力计算的等效二次换算法 .....	119
第四节	制动距离的计算 .....	125
第五节	紧急制动限速和列车最小换算制动率 .....	135
第六节	列车制动电算 .....	148
	复习思考题 .....	154
	课外作业题 .....	154
<b>第七章</b>	<b>制动性能试验</b> .....	<b>155</b>
第一节	制动性能试验的种类 .....	155
第二节	闸瓦试验台及闸瓦在该试验台上的性能试验 .....	156
第三节	现车溜放闸瓦试验 .....	158
第四节	微机控制 705 型试验台与 104/103 阀在该试验台上的性能试验以及 120 阀性能试验 .....	159
第五节	单车试验、列车试验、定置试验、专列静止试验和专列运行试验 .....	165
	复习思考题 .....	171
<b>第八章</b>	<b>高速和重载列车制动综述</b> .....	<b>172</b>
第一节	高速列车制动方式及发展趋势 .....	172
第二节	准高速列车电空制动机 .....	174
第三节	重载列车制动的纵向动力作用 .....	180
第四节	EUROTROL 型制动机 .....	183
	复习思考题 .....	193



<b>第九章 高速动车组制动系统综述</b> .....	194
第一节 高速动车组电制动系统.....	194
第二节 高速动车组空气制动系统.....	199
第三节 高速动车组防滑装置.....	208
第四节 高速动车组制动控制系统.....	211
复习思考题.....	219
<b>第十章 CRH2 型动车组的制动系统</b> .....	220
第一节 概述.....	220
第二节 CRH2 型动车组的压力空气供给系统.....	223
第三节 CRH2 型动车组的空气制动控制系统.....	225
第四节 CRH2 型动车组空气制动系统的气路原理.....	229
第五节 CRH2 型动车组的“滑行再黏着”控制.....	231
第六节 CRH2 型动车组制动控制系统的作用.....	233
复习思考题.....	240
<b>参考文献</b> .....	241



# 第一章

## 列车制动总论

人为地制止物体的运动,包括使其减速、阻止其运动或加速运动,均可称之为“制动”。反之,对已经施行制动的物体,解除或减弱其制动作用,均可称之为“缓解”。

为使列车能施行制动和缓解而安装于列车上的一整套设备,总称为“列车制动装置”。有时,“制动”与“制动装置”均简称为“闸”,施行制动既可简称为“上闸”,亦可简称为“下闸”,使制动得到缓解则简称为“松闸”。

### 第一节 列车制动的几个基本概念

列车制动装置包括“机车制动装置”和“车辆制动装置”(对动力分散配置的高速动车组来说,可分为“动车制动装置”和“拖车制动装置”)。也就是说,在铁路列车中,不管是具有牵引动力装置的机车(或动车),还是被牵引的货车、客车(或拖车),都各自具有自己的制动装置。不同的是,机车(或动车组中的“头车”)除了像车辆一样具有使它自己制动和缓解的设备外,还具有操纵全列车(包括机车或头车自身及其他各车)制动作用的设备。

由制动装置产生的与列车运行方向相反的外力,称为“制动力”。这是人为的阻力,它比在列车运行中由于各种原因自然产生的阻力一般要大得多。所以,尽管在制动减速过程中,列车运行阻力(自然阻力)也在起作用,但起主要作用的还是列车制动力(人为阻力)。

制动装置一般可分为两大组成部分:

- (1)制动机——产生制动原动力并进行操纵和控制的部分。
- (2)基础制动装置——传送制动原动力并产生制动力的部分。

列车制动作用在操纵上按用途一般可分为两种:

(1)常用制动——正常情况下为调节或控制列车速度,包括进站停车所施行的制动。其特点是作用比较缓和而且制动力可以调节,通常只用列车制动能力的20%~80%,多数情况下只用50%左右。

(2)紧急制动——紧急情况下为使列车尽快停住而施行的制动(在我国,这种制动作用过去也称“非常制动”),其特点是作用比较迅猛,而且要把列车制动能力全部用上。

在动力分散的高速动车组上,除上述两种制动作用外,现在还有“非常制动”与“备用制动”之分:这里的“非常制动”并非“紧急制动”,其控制过程与常用制动相似,只是其制动力比较大,相当于常用制动力的140%~150%而已;“备用制动”则指的是在常用制动系统发生故障但情况并不紧急时使用的制动(另有一套装置)。

从司机施行制动(将制动阀手柄移至制动位)的瞬间起,到列车速度降为零的瞬间止,列车所驶过的距离,称为列车“制动距离”。这是综合反映列车制动装置的性能和实际制动效果的



主要技术指标。有的国家不用制动距离而用(平均)减速度作为其主要技术指标。两者实质是一样的,但是制动距离比较具体,减速度则较为抽象。两者的关系可用下式表示:

$$\left(\frac{v \times 1000}{60 \times 60}\right)^2 = 2 \cdot a \cdot s \quad (1-1)$$

即 
$$a = \frac{v^2}{2 \times 3.6^2 \times s} \quad (1-2)$$

或 
$$s = \frac{v^2}{2 \times 3.6^2 \times a} \quad (1-3)$$

式中  $v$ ——施行制动时的列车初速度,简称“制动初速”(km/h);

$s$ ——制动距离(m);

$a$ ——列车在制动距离内的平均减速度( $\text{m/s}^2$ )。

为了确保行车安全,世界各国都要根据本国铁路情况(主要是列车速度、牵引重量、信号和制动技术等)制订出自己的制动距离(或减速度)标准——“紧急制动距离限值”,即最大允许值,又称“计算制动距离”,其值以前在 700~1200 m 之间,也有更长的(现在的高速列车有的已长达 3000 m 甚至更长)。随着列车速度的提高,制动距离标准也要相应加长,这是不可避免的,也是必需的,否则,减速度就会高至人们无法承受的程度(参看第八章第一节)。

任何列车在任何坡道遇到任何紧急情况,都要保证在施行紧急制动后能在规定的制动距离限值内停车。但是,在设计机车车辆时要求的只是在空旷的平直道(即无隧道、无坡道、无弯道)以“构造速度”(机车车辆在构造上允许的最高速度)运行时,其紧急制动距离不超过限值。在下坡道,由于“坡道阻力”(列车所受重力沿轨道方向的向下的分力)与列车运行方向相同,变成了“坡道下滑力”,制动距离必然相应增长。在较陡的下坡道,为了满足制动距离限值的要求,列车运行速度必须限制得比构造速度低。这是按制动要求规定的限制速度,故一向称之为“制动限速”。下坡道越陡,制动限速越低。在坡度一定时,这个限速决定于列车的制动能力,制动能力越弱,该限速也越低。

紧急制动距离限值内停车的最高允许速度,只是制动限速的一种——“紧急制动限速”,对于制动能力较强的旅客列车,它确实就是真正的唯一的制动限速。但是,对于制动能力较弱的货物列车又遇到长大下坡道时,它就可能不是真正的制动限速了。这是因为,列车在正常情况下施行的是常用制动,只用部分制动能力,而且目前铁路货物列车普遍采用的制动方式是“踏面(闸瓦)制动”,闸瓦摩擦系数随速度的增高而减小,即速度越高,制动力越小。当货物列车以紧急制动距离限值内可以停车的允许速度运行而施行常用制动时,制动力可能克服不了坡道下滑力,无法控制列车速度。所以,制动能力较弱的货物列车运行于长大下坡道时,其限制速度可能比紧急制动限速还要低(速度低时制动力大一些)。这是一种由常用制动时力的平衡关系决定的另一种制动限速——“常用制动限速”(参看本书第六章第一节之四)。下坡道越陡,这个限速也越低,而且,它比紧急制动限速降低得快。在坡度一定时,它取决于常用制动时对列车制动能力的利用程度。常用制动限速和紧急制动限速两者相比较,较低者才是真正的制动限速。

安全第一,“不止不行”。对现代铁路来说,制动的重要性早就不仅仅是安全问题了。制动已经成为限制列车速度和牵引重量进一步提高的重要因素。要想“多拉快跑”,除了要有较大功率的牵引动力之外,还要有更大功率的列车制动装置。为什么牵引动力装置可以集中在机车或几个动车里,而制动装置却必须遍布全列车每一辆车呢?原因就在于制动功率需要比牵



引功率大得多。如果制动功率不足,在长大下坡道不能保证安全下岭,或者遇到紧急情况时不能保证在规定的制动距离内停车,则后果不堪设想。

为了提高铁路的运输能力,旅客列车和货物列车曾经向“重载”(扩编)方向发展,现在旅客列车正向“高速”方向发展,货物列车也要提速。无论高速(提速)还是重载(扩编)，“制动”都是一个非常关键的问题。制动问题如果没有解决,即使有了高质量的线路,有了功率很大的牵引动力,高速(提速)或重载(扩编)还是不可能实现的。

## 第二节 踏面(闸瓦)制动与轮轨黏着

从能量的观点来看,“制动”的实质就是将列车动能转变成别的能量或转移走;从作用力的观点来看,“制动”就是让制动装置产生与列车运行方向相反的外力(制动力),使列车产生较大的减速度,尽快减速或停车。采取什么方法将动能转化或转移,通过什么方法产生制动力,这是制动的一个基本问题——“制动方式”问题。

踏面制动,又称闸瓦制动,是自有铁路以来使用最广泛的一种制动方式。它用铸铁或其他材料制成的瓦状制动块(闸瓦)紧压滚动着的车轮踏面,通过闸瓦与车轮踏面的机械摩擦将列车的动能转变为热能,消散于大气,并产生制动力,参看图 1-1。在车轮转动中,闸瓦作用于车轮的法向压力  $K$  引起闸瓦作用于车轮的切向滑动摩擦力  $K \cdot \varphi_K$  ( $\varphi_K$  为闸瓦与车轮间的滑动摩擦系数)。由于车轮紧压在钢轨上,所以闸瓦摩擦力对轮心的逆时针方向的力矩  $K \cdot \varphi_K \cdot R$  在轮轨接触点又引起钢轨反作用于车轮的切向静摩擦力  $B$  ( $R$  为车轮滚动圆的半径)。这个力就是由制动装置引起的与列车运行方向相反的外力——制动力。在轮轨间保持静摩擦和忽略车轮回转惯性的情况下,制动力在数值上可以认为就等于闸瓦摩擦力,即

$$B = K \cdot \varphi_K \quad (\text{kN}) \quad (1-4)$$

或

$$B = \sum (K \cdot \varphi_K) \quad (\text{kN}) \quad (1-5)$$

式中  $\sum (K \cdot \varphi_K)$ ——作用于一个轮对、一辆车或一列车的闸瓦摩擦力总和(kN)。

显然,只要轮轨间静摩擦不被破坏,制动力将随闸瓦压力的增大而增大。

根据刚体平面运动学的分析,沿钢轨自由滚动的车轮,具有不断变化的瞬时转动中心。车轮和钢轨的各个接触点在两者接触的瞬间是没有相对运动的,轮轨间的切向作用力就是物理学上说的静摩擦力。其最大值(最大静摩擦力)是一个与运动状态无关的常量,它等于轮轨间的法向作用力  $N$  与静摩擦系数  $\mu$  的乘积。但这是一种难以实现的理想状态。倘若能达到这种状态,则可能实现的制动力最大值约为轮轨间的最大摩擦力。

另一种情况恰恰相反:轮轨间的切向作用力超过了维持静摩擦的极限值——最大静摩擦力,轮轨接触点发生了相对滑动,切向作用力将变成滑动摩擦力,其值比最大静摩擦力小很多,车轮在强大的闸瓦摩擦力矩作用下转速将显著减慢,直至停止转动,但列车速度并未同时显著降低,已停转的车轮在钢轨上滑行,钢轨和车轮踏面都被局部擦伤,制动力反而大大降低。这是一种应当竭力避免的不正常状态。

实际上问题比较复杂:车轮和钢轨在很高的压力作用下都有少许变形,轮轨间实际并非点接

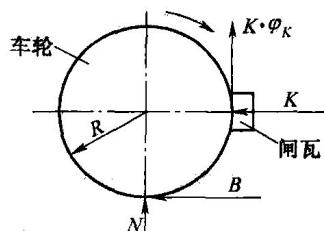


图 1-1 踏面(闸瓦)制动



触,而是椭圆形面接触;列车运行中不可避免地要发生各种冲击和振动;车轮踏面是圆锥形的,车轮在钢轨上滚动的同时,必然伴随着微量的轮轨间的纵向和横向滑动。所以,轮轨接触面不是纯粹的静摩擦状态,而是“静中有微动”或“滚中有微滑”的状态。轮轨之间的最大切向力实际上比物理学上的最大静摩擦力要小,而且与列车运动状态有关,随列车速度的升高而降低。因此,在铁路牵引和制动理论中,把“静中有微动”的状态称为“黏着状态”。在分析轮轨间切向作用力的问题时,不用静摩擦这个名词,而以“黏着”来代替它。相应地,把黏着状态下轮轨间切向摩擦力最大值称为“黏着力”,把它与车轮钢轨间垂直载荷之比称为“黏着系数”。

在列车运行中,由于制动力和惯性力不是作用在同一水平面内,又造成机车车辆前后车轮作用于钢轨的垂直载荷不均匀分配,即,各个车轮对钢轨的法向反力  $N$  并不相等。为便于应用,又假定轮轨间垂直载荷在运行中固定不变,认为黏着力的变化是由于黏着系数的变化引起的。这样一来,黏着力与列车速度的关系就被简化成了黏着系数与列车速度的关系。黏着系数也就成了假定值,称为“计算黏着系数”。由于它与假定不变的垂直载荷的乘积等于实际的黏着力,所以这个假定用于黏着力计算是可行的,实际上一直也是这样用的(只要提到黏着系数而又无特别说明,均指假定值或计算值)。

### 第三节 黏着系数的影响因素和计算公式

#### 一、黏着系数的影响因素

黏着系数的影响因素主要有两个:一个是车轮和钢轨的表面状况(参看表 1-1);另一个是列车运行速度。

轮轨间表面状态包括:干湿情况、脏污程度、是否有锈、是否撒砂以及砂的数量和品质等等。轮轨的湿度、脏污程度又与天气、环境污染状况和制动装置型式(有无踏面或轨面清扫设备)等因素有关。天气的因素包括:有风与否、下雨与否、风雨大小和持续时间、有无霜雪等等。在轮轨干燥而清洁

表 1-1 轨面状况对黏着系数的影响

轨面状况	轮轨黏着系数	
	未撒砂	撒砂
清洁干燥	0.25~0.30	0.35~0.40
润湿	0.18~0.20	0.22~0.25
有霜	0.15~0.18	0.22
雨雪	0.15	0.20
油污	0.10	0.15

时黏着系数较大。在轮轨刚刚潮湿、或有霜雪、油污时,黏着系数将明显减小。但如果连续大雨,钢轨被冲刷得很洁净,则钢轨虽然很湿,黏着系数也不会小。

在轨面上适当撒砂可以增大黏着系数,但是:

- (1) 高速行车时砂易被吹走,不能成功地撒在轨面上,效果较差;
- (2) 有霜雪、落叶或油污很厚时,撒砂效果很差,甚至无效;
- (3) 会加剧钢轨和机车车辆某些部件的磨损;
- (4) 撒砂过度还可能影响电气设备对道岔辙轨、岔心和信号装置的控制;
- (5) 砂的黏度、成分、硬度和湿度都必须符合一定的要求,符合要求的砂准备费用较大。

所以,撒砂的方法一般仅限于在黏着不良的地方,而且,主要用于改善机车或动车的牵引黏着而非制动黏着。

秋天的落叶也能引起严重污染。纷飞的落叶在轨面上被碾压成一层非常薄的黏膜,不易察觉但很黏很滑,可使黏着系数变得很小,曾经有过小到 0.05 的纪录。



轨面生锈对黏着系数的影响是双方面的：薄薄的一层黄锈可使黏着系数增大，但锈层较厚、特别是有点湿润的棕色锈层，则反而会使黏着系数明显减小。

闸瓦的材质对黏着系数也有影响：铸铁闸瓦能烧掉车轮踏面上的大部分杂质和油脂，而把铁、氧化铁和碳化微粒留下，使踏面变得稍粗糙一些，对改善黏着有利；合成闸瓦会在轮轨表面留下一层低黏着的废料，使黏着系数减小。

列车运行速度对黏着系数的影响主要是：随着制动过程中列车速度的降低，冲击振动以及伴随而来的纵向和横向的少量滑动都逐渐减弱，因而黏着力和黏着系数也逐渐增大，其增大的程度与机车车辆动力性能、轨道的情况等有关。

由此可见，黏着系数影响因素复杂多变，故黏着系数的变化范围很大，很难以一条曲线来表示。通常给出两条曲线，即给出一个范围。

## 二、黏着系数的计算公式

由于制动黏着系数是制动装置设计中首先需要选定的最基本的参数之一，所以许多国家都早就开展了对它的研究并取得了成果。中国铁路为了摸清符合自己国情的制动黏着系数的大小和变化规律，从 1988 年至 1991 年，先后在济南、上海和哈尔滨三个铁路局管内进行了试验研究，得出了可供中国机车车辆设计时选用的制动黏着系数公式如下（相应的曲线和数据分别参看图 1-2 和表 1-6）：

$$\text{干燥轨面 } \mu = 0.0624 + \frac{45.6}{v+260} \quad (1-6)$$

$$\text{潮湿轨面 } \mu = 0.0405 + \frac{13.5}{v+120} \quad (1-7)$$

表 1-2、表 1-3、表 1-4 和表 1-5 分别列出了美国西屋空气制动机公司(WABCO)、日本、前苏联以及欧洲其他一些国家的制动黏着系数或其计算公式。

在以上所述的图和表中，有的只给出一个值或一个范围，有的按轨面状况分别

给出了两条制动黏着系数与列车运行速度(km/h)的关系曲线，有的还考虑了机车车辆型式和轮对给钢轨的轴重对制动黏着系数的影响，可谓“五花八门，莫衷一是”。由此可见，黏着系数研究是何等的复杂和困难。

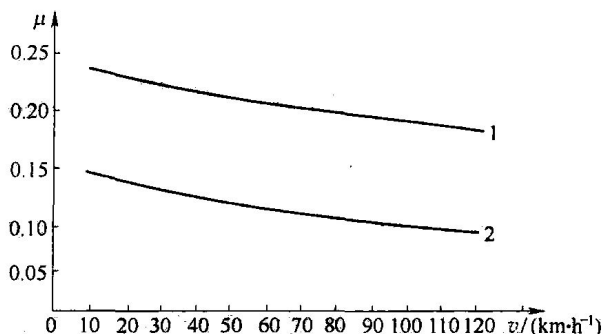


图 1-2 中国铁路推荐使用的实测制动黏着系数曲线

1—干燥轨面；2—潮湿轨面

表 1-2 美国 WABCO 的制动黏着系数

$v/(km \cdot h^{-1})$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
轨面良好	0.2300	0.1825	0.1625	0.1525	0.1475	0.1425	0.1400	0.1375	0.1350	0.1338	0.1325
轨面不良	0.1300	0.1163	0.1050	0.0980	0.0925	0.0875	0.0838	0.0813	0.0800	0.0788	0.7075

表 1-3 日本东海道新干线和国铁车辆设计事务所的黏着系数公式

东海道新干线		国铁车辆设计事务所
干燥钢轨	湿钢轨	$\mu = 0.24 \times \frac{1+0.0078v}{1+0.024v}$
$\mu = \frac{27.2}{v+85}$	$\mu = \frac{13.6}{v+85}$	



表 1-4 前苏联在设计制动装置时采用的黏着系数

机车车辆型式	$v$ /(km·h <sup>-1</sup> )	轮对给钢轨的轴重/t					
		6	10	14	18	22	26
货车	20	0.129	0.121	0.114	0.106	0.100	0.094
	100	0.097	0.091	0.085	0.080	0.074	0.070
	120	0.092	0.086	0.081	0.075	0.070	0.066
客车、保温车和动车	40	0.139	0.132	0.123	0.115	0.107	0.102
	140	0.106	0.099	0.093	0.087	0.081	0.077
	160	0.102	0.096	0.090	0.084	0.078	0.074
机车	20	—	—	—	0.118	0.109	0.103
	100	—	—	—	0.087	0.079	0.075
	160	—	—	—	0.080	0.070	—

表 1-5 欧洲一些国家规定的制动黏着系数

荷兰 (NS)	西班牙国铁 (RENFF)	奥地利 (OBB)	捷克 (CSD)	挪威国铁 (NSB)	瑞典国铁 (SJ)	西德联邦铁路 DB	芬兰国铁 (VR)
0.11~0.12	0.12	0.12	0.12~0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

表 1-6 中国铁路推荐使用的实测制动黏着系数

$v$ /(km·h <sup>-1</sup> )	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
轨面良好	0.238	0.231	0.225	0.220	0.214	0.209	0.205	0.201	0.197	0.193	0.189	0.186	0.182
轨面不良	0.153	0.144	0.137	0.131	0.125	0.120	0.116	0.112	0.108	0.105	0.102	0.099	0.097

## 第四节 黏着限制、制动率和闸瓦摩擦系数

### 一、黏着限制与制动率

有了黏着系数,相应的黏着力即制动时轮轨间切向作用力的最大值  $B_\mu$  可由下式算得:

$$B_\mu = \sum N \cdot \mu$$

式中  $\sum N$ ——一个轮对法向反作用力  $N$  的总和,它等于轴载荷。

在正常情况下,制动力不应大于黏着力,换句话说,制动力应受轮轨黏着的限制。即

$$B \leq B_\mu$$

或

$$\sum K \cdot \varphi_K \leq \sum N \cdot \mu \quad (1-8)$$

令  $\delta_0 = \frac{\sum K}{\sum N}$ , 并称之为轴制动率,可得

$$\delta_0 \leq \frac{\mu}{\varphi_K} \quad (1-9)$$

对于整个机车或车辆,式(1-8)中的  $\sum K$  可表示整车的闸瓦压力总和(kN),  $\sum N$  则表示整车所受的重力(kN)。令  $\delta$  为整车制动率,则

$$\delta = \frac{\sum K}{Q \cdot g} \quad (1-10)$$

式中  $Q$ ——整车(一台机车或一台车辆)的总重量(t);

$g$ ——重力加速度(m/s<sup>2</sup>)。

对于全列车,式(1-8)中的  $\sum K$  应为全列车的闸瓦压力总和(kN),  $\sum N$  则为全列车受到的重力(kN)。令  $\vartheta$  为列车制动率,可得



$$\vartheta = \frac{\sum K}{(G + \sum P) \cdot g} \quad (1-11)$$

式中  $G$ ——牵引重量(t);

$\sum P$ ——机车计算重量总和(t)。

由上述三式可知:机车、车辆或列车所具有的闸瓦压力总和与它所受的重力之比,都称为制动率,表示该车或该列车单位重力所具有的制动能力;制动率大于轮轨黏着系数与闸瓦摩擦系数之比就要发生滑行和擦伤,故闸瓦压力不能太大;但制动率太小了也不行,闸瓦压力太小则制动力不够,制动距离要延长(详见第六章第二节)。

## 二、闸瓦摩擦系数

在闸瓦压力一定的条件下,制动力的大小取决于闸瓦摩擦系数。

### 1. 影响闸瓦摩擦系数的因素

闸瓦摩擦系数的影响因素主要有四个:闸瓦材质、列车运行速度、闸瓦压强和制动初速。

闸瓦材质和列车运行速度对闸瓦摩擦系数的影响非常大。长期以来,机车车辆主要使用铸铁闸瓦。最早用的是含磷量 0.3% 的(普通)铸铁闸瓦,很不耐磨,而且其摩擦系数随列车速度的增高会大大降低。可是,列车高速时动能大,正需要较大制动力来使列车减速。普通铸铁闸瓦的上述性能正好与实际需要完全相反,所以,很快被含磷量为 0.7%~1.0% 的中磷(铸铁)闸瓦代替。中磷闸瓦的摩擦系数比普通铸铁闸瓦高约 35%,制动距离可缩短约 16%,在同样的制动条件下闸瓦温度较低,闸瓦磨损减轻约 30%,车轮踏面磨损也减轻约 47%。含磷量在 2.0% 以上的高磷(铸铁)闸瓦制动效果还要好。但是,随着含磷量的大大增高,闸瓦的脆裂性也变得十分严重,所以,高磷闸瓦要以“钢背”来加强,这样又增大了它的成本,使其价格太高,不易于推广。为此,北京铁路局、清华大学和铁道部科学研究院三方曾合作研制成功一种 BXT-1 型稀土铸铁闸瓦,其含磷量为 1.0%~1.3%,比中磷闸瓦高,比高磷闸瓦低。它的特点是加进了稀土元素,利用稀土的强化孕育作用,使其既具有高磷闸瓦耐磨、火花量小、寿命长的优点,又具有中磷闸瓦不易脆裂、不用“钢背”、工艺比较简单、价格比较便宜的优点,所以是中磷闸瓦较好的替代品。

闸瓦材质的另一大类是合成材料。用合成材料制造的闸瓦称为合成闸瓦(又称塑料闸瓦),它有下列优点:

(1) 可根据需要改变配方和工艺,使摩擦系数曲线与黏着系数曲线获得较好的吻合,即摩擦系数很大而且对速度的改变不太敏感(随速度而变的程度较轻或者说比较稳定)。

(2) 特别耐磨,其寿命一般在铸铁闸瓦的 4 倍以上,不会发生“磨托”事故。

(3) 制动时基本无火花,不会发生“烧车”或沿线火灾事故。

(4) 重量较小,仅为铸铁闸瓦的 1/3 左右。

(5) 车轮踏面磨耗也少,比用铸铁闸瓦可少一半。

合成闸瓦的研究和推广受到世界各国的极大重视。从第二次世界大战结束以来,合成闸瓦得到非常迅速的发展。我国铁路技术发展的政策也确定了将来要广泛采用合成闸瓦。为此,还引进了这方面的先进技术和专门的生产线。

合成闸瓦的缺点是对钢轨的湿润比较敏感,而且散热性能较差,易使车轮踏面发生热裂、剥离、金属镶嵌,甚至磨出沟槽。当然,这些问题也不是不能解决的。低弹性模量的闸瓦就是



一种比较成功的产品,已经获得广泛的推广应用。

为了适应高速列车制动的需要,人们还在继续研究采用新的闸瓦材质,如烧结材料、陶瓷铝等。

闸瓦压强对闸瓦摩擦系数也有一定的负影响。试验研究结果表明,铸铁闸瓦压强越大则摩擦系数越小。压强增大一倍,摩擦系数降低约 27%。所以,运用中闸瓦压强一般不要超过 1 200 kPa,设计时不要超过 1 000 kPa<sup>①</sup>。我国标记载重 50 t 及其以上的货车采用 GK 型制动机,闸瓦压强已超过 1 300 kPa,所以,常常发生“磨托”和“烧车”的事故。

对于需要增大制动力的机车车辆,不能一味地增大闸瓦压力。这是因为,闸瓦与车轮踏面的接触面积有一定的限制:闸瓦不可能太宽;太长时由于受力沿闸瓦长度的分布不均匀,又不起多大作用。所以,在闸瓦压强已经不能再增大时,要想法改进闸瓦材质以增大摩擦系数,或者采用“双侧制动”,用增加闸瓦数量的办法来增大闸瓦面积,从而增大闸瓦压力而不增大闸瓦压强(详见本章第七节)。

制动初速对闸瓦摩擦系数也有一定的负影响,我国是在 1963 年和 1978 年两次制动参数试验中先后发现和证实的。图 1-3 是 1978 年试验所得的某一组曲线,它表明在闸瓦材质、闸瓦压强和列车运行速度相同的情况下,制动初速越低,摩擦系数越大。

除上述主要影响因素之外,闸瓦摩擦系数还与气候条件、车轮踏面清洁情况以及轮瓦新旧程度等因素有关。由于影响因素多而复杂,很难用理论方法来推导,主要靠室内 1:1 的“制动摩擦副试验台”和在现场线路上进行成组车辆的“溜放试验”来实测。在溜放试验中由于缺乏列车运行

中基础制动装置传动效率(动效率)的数据,难以准确测定出真正的闸瓦摩擦系数值。

## 2. 闸瓦摩擦系数公式

在制定我国 1982 年 7 月 12 日颁布、1983 年 1 月 1 日开始实行的第二个《列车牵引计算规程》时,为了建立对客货车都适用的闸瓦摩擦系数公式,采用了按客货车基础制动装置复杂程度分别规定“动效率计算值”的办法<sup>②</sup>:客车定为 0.85(双侧制动,较复杂);货车当时定为 0.95(单侧制动,较简单)。由此,得出的中磷铸铁闸瓦摩擦系数公式如下:

$$\varphi_K = 0.64 \times \frac{K+100}{5K+100} \cdot \frac{3.6v+100}{14v+100} + 0.006 \times (110-v_0) \cdot \frac{v}{6v+100}$$

在 1998 年 10 月 15 日颁布、1999 年 4 月 1 日开始实行的第三个《列车牵引计算规程》中,上式被简化为

$$\varphi_K = 0.64 \times \frac{K+100}{5K+100} \cdot \frac{3.6v+100}{14v+100} + 0.0007 \times (110-v_0) \quad (1-12)$$

①:按铁道部关于制动风表单位换算的规定,制动时的空气压强均按 1 kgf/cm<sup>2</sup>≈100 kPa 换算。

②:我国第三个《牵规》的规定是:机车及客车闸瓦制动的计算传动效率均为 0.85,货车闸瓦制动为 0.90,客车盘形制动及其踏面制动单元亦为 0.90。必须指出,式(1-12)是按客车 0.85,货车 0.95 来建立的,机车参照客车取 0.85 还可以,货车闸瓦制动、客车盘形制动及其踏面制动单元定为 0.90 就不太合适了。

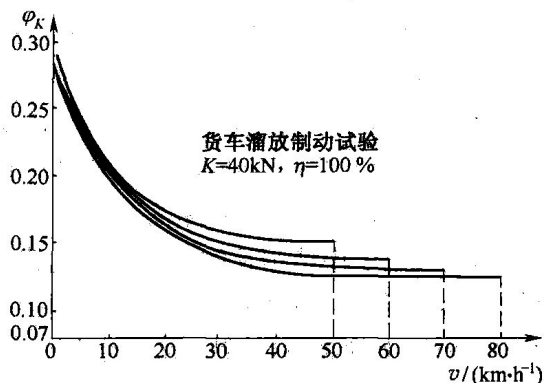


图 1-3 制动初速对中磷铸铁闸瓦摩擦系数的影响





式中  $K$ ——每块闸瓦作用于车轮的压力(kN);  
 $v_0$ ——制动初速(km/h);  
 $v$ ——制动过程中变化着的列车运行速度(km/h)。  
 其他材质的闸瓦的摩擦系数公式将在本书第六章中介绍。

## 第五节 其他制动方式

除闸瓦制动外,铁路机车车辆还有一些其他制动方式。

### 一、盘形制动

盘形制动(摩擦式圆盘制动)是在车轴上或在车轮辐板侧面装上制动盘,一般为铸铁圆盘,用制动夹钳使合成材料制成的两个闸瓦紧压制动盘侧面,通过摩擦产生制动力,把列车动能转变成热能,消散于大气,如图 1-4 所示。

与闸瓦制动相比,盘形制动有下列主要优点:

- (1)可以大大减轻车轮踏面的热负荷和机械磨耗。
- (2)可按制动要求选择最佳“摩擦副”(采用闸瓦制动时,作为“摩擦副”一方的车轮的构造和材质不能根据制动的要求来选择),盘形制动的制动盘可以设计成带散热筋的,旋转时它具有半强迫通风的作用,以改善散热性能,为采用摩擦性能较好的合成材料闸片创造了有利的条件,适宜于高速列车。

(3)制动平稳,几乎没有噪声。

但是,盘形制动也有它不足之处:

- (1)车轮踏面没有闸瓦的磨刮,轮轨黏着将恶化,所以,还要考虑加装踏面清扫器(或称清扫闸瓦),或采用以盘形为主、盘形加闸瓦的混合制动方式,否则,即使有防滑器,制动距离也比闸瓦制动要长。

(2)制动盘使簧下重量及其引起的冲击振动增大,运行中还要消耗牵引功率。

盘形制动的制动力

$$B = \sum \left( K \cdot \varphi \cdot \frac{r}{R} \right) \quad (1-13)$$

式中  $K$ ——闸片压力;

$\varphi$ ——闸片摩擦系数;

$r$ ——闸片作用半径;

$R$ ——车轮(滚动圆)半径。

铁路上采用盘形制动已经有 70 多年历史了。起初主要在欧洲动车组上用,后来,随着高速列车的发展,盘形制动也得到了相应的发展。闸瓦制动的散热能力在列车运行速度达到 160 km/h 以上时就不行了。与闸瓦制动相比,盘形制动更适合于高速列车。我国铁路从 1958 年开始,曾先后两次对盘形制动进行研究,并在广深线准高速客车上首先装车应用。

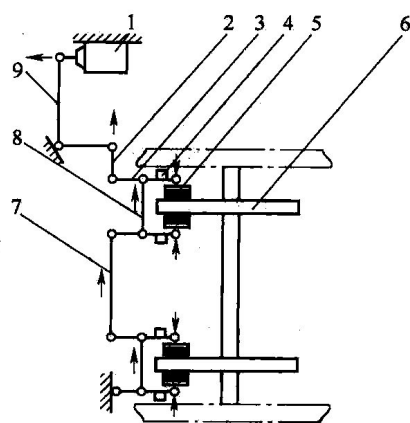


图 1-4 盘形制动

- 1—制动缸;2—拉环;3—水平杠杆;  
 4—缓解弹簧;5—制动块;6—制动盘;  
 7—中间拉杆;8—水平杠杆拉杆;9—转臂