



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

轮轨黏着行为与增黏

王文健 刘启跃 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

轮轨黏着行为与增黏

王文健 刘启跃 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统介绍轮轨界面黏着的影响因素、常见低黏着问题及增黏措施与损伤行为。全书共6章,第1章论述轮轨黏着的基本概念及研究方法,第2、3章分别介绍干态和水、油、树叶、防冻液等轮轨界面第三介质工况下的轮轨黏着行为,第4章从弹流润滑理论出发,结合第3章中的研究结果,建立水、油介质工况下的轮轨黏着数值仿真模型,第5章系统讨论不同增黏方法的增黏效果及对轮轨损伤行为的影响,第6章介绍轮轨黏着系数的测定及利用控制方法。

本书可供从事铁路机车车辆研究的相关专业院校、科研机构、机车车辆制造企业及铁路线路管理部门的研究生、研究人员和工程技术人员查阅、参考。

图书在版编目(CIP)数据

轮轨黏着行为与增黏/王文健,刘启跃著. —北京:科学出版社,2017.3
(博士后文库)

ISBN 978-7-03-052068-5

I. ①轮… II. ①王…②刘… III. ①轮轨黏着特性-研究 IV. ①U211.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 047631 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年3月第一次印刷 印张:12

字数:242 000

定价:85.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨 贾国柱 刘 伟

卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅 张文栋 赵 路

赵晓哲 钟登华 周宪梁

《博士后文库》序言

1985年,在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下,我国建立了博士后制度,同时设立了博士后科学基金。30多年来,在党和国家的高度重视下,在社会各方面的关心和支持下,博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中,博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分,专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助,对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说,适逢其时,有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神,是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大,但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤,博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才,“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下,博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年,为提高博士后科学基金的资助效益,中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作,通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作,收入《博士后文库》,由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望,借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌,激励博士后研究人员潜心科研,扎实治学,提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年,国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》(国办发〔2015〕87号),将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段,这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信,我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用,促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才,为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

轮轨黏着是铁路运输中基础性的关键科学问题之一,是轮轨关系和机车动力学研究的基础。随着我国铁路运输的迅速发展,尤其是高速、重载运输的发展以及机车技术的进步,机车功率不断提高,轮轨间需要传递的载荷日益增加,需要保证轮轨间良好的黏着状态以满足机车牵引功率的发挥。良好的轮轨黏着能有效地改善轮轨界面的工作性能、延长轮轨使用寿命,降低铁路设备的维护维修费用,有重大的经济意义。深入透彻地研究并阐明这个问题,才能从最根本上保障列车运行安全和乘客的生命安全。

轮轨系统作为一个开放的系统,受到多种因素的影响。我国幅员辽阔、气候多变,意味着我国铁路在更为复杂的气候条件下运行,复杂服役环境下的轮轨界面黏着行为成为保障铁路安全运行的关键所在。由低黏着造成的列车牵引能力不足而引起的最常见的结果是列车误点,直接影响铁路的正常运营。低黏着造成的制动力不足则导致制动距离变长,从而引起安全问题,甚至造成列车冒进信号、冲出站台或者列车相撞等严重的行车安全事故。2002年10月7日,由下雨造成的轮轨低黏着竟然使荷兰全国绝大部分铁路线路瘫痪了一天,因此轮轨界面低黏着问题的解决对保障铁路运输的安全具有极其重要的意义。

作者研究团队在国家自然科学基金青年基金项目(No. 50905148)、中国博士后科学基金面上项目和特别资助项目(No. 20100471657、No. 201104650)、中央高校基本科研业务费专项资金科技创新项目(No. SWJTU12CX037)、国家重点基础研究发展计划(973计划)项目子课题(No. 2011CB711103)等的资助下,借助大型轮轨模拟设备及数值仿真方法,比较系统地研究了轮轨界面黏着行为、增黏措施及损伤行为,相关研究成果汇集形成了本书。

本书共6章。第1章从轮轨关系角度,介绍轮轨界面黏着的定义和轮轨黏着的研究方法,综述国内外针对轮轨黏着行为的研究进展,并对轮轨黏着行为与增黏的基本研究内容进行介绍。第2章主要介绍干态工况下的轮轨黏着行为,包括轮轨黏着-蠕滑曲线,速度、轴重、曲线半径、轮径及新/旧模拟轮、车轮型面、低温环境、坡道条件等对轮轨界面黏着特性的影响及规律,为认识和揭示干态工况下轮轨黏着特性提供重要的支撑。第3章主要介绍第三介质工况下轮轨黏着行为,包括轮轨界面上常存在的水、油、落叶、防冻液等介质对轮轨界面黏着特性的影响及规律,介绍小比例轮轨几何型面轮轨黏着模拟试验方法及结果,为认识轮轨界面的低黏着提供了重要的结果。第4章介绍基于二维滚动接触理论和弹流润滑理论建立

的第三介质工况下的轮轨二维滚动接触数值模型及相关仿真结果,同时利用模拟试验验证了仿真结果的可靠性。第5章针对轮轨界面低黏着现象,介绍低黏着下轮轨的增黏与损伤行为,分析轮轨界面撒砂/氧化铝颗粒增黏、研磨子增黏、磁场作用下轮轨增黏过程中的损伤行为。第6章介绍目前国内外有关轮轨黏着系数的现场试验测量方法,综述讨论如何提高轮轨黏着系数的合理利用及控制方法。

本书的出版,得到了诸多支持与帮助。首先感谢所有参加课题研究的研究生,他们是申鹏博士、张鸿斐硕士、刘腾飞硕士、汪洪硕士、黄万亮硕士、师陆冰博士生、朱文涛硕士生、曹熙硕士生、林彬硕士生,正是他们的辛勤努力工作和积极配合,才保证了本书研究成果的顺利完成。当然也要感谢在研究过程中提供了众多帮助和支持的牵引动力国家重点实验室的金学松教授、温泽峰研究员、王衡禹副研究员,摩擦学研究所周仲荣教授、朱旻昊教授、钱林茂教授、陈光雄教授。最后要衷心感谢中国博士后科学基金会、科学出版社的编辑人员,是他们的直接支持和辛勤工作促成了本书的及时出版。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

王文健 刘启跃

2017年1月

于西南交通大学

目 录

《博士后文库》序言

前言

第 1 章 轮轨关系与黏着	1
1.1 轮轨关系	1
1.2 轮轨界面黏着	2
1.3 轮轨黏着研究方法	6
参考文献	9
第 2 章 干态工况下轮轨黏着行为	11
2.1 轮轨黏着-蠕滑曲线	11
2.2 速度对轮轨黏着影响	13
2.3 轴重对轮轨黏着影响	16
2.4 曲线半径对轮轨黏着影响	18
2.5 轮径及新/旧轮对轮轨黏着影响	19
2.6 车轮型面对轮轨黏着影响	21
2.7 低温环境下轮轨黏着行为	27
2.8 坡道条件对轮轨黏着影响	30
参考文献	32
第 3 章 第三介质工况下轮轨黏着行为	35
3.1 水介质工况下轮轨黏着特性	36
3.1.1 水介质对轮轨黏着系数的影响	36
3.1.2 水介质工况下速度的影响	38
3.1.3 水介质工况下轴重的影响	40
3.1.4 水介质工况下流量和水温的影响	41
3.1.5 水介质工况下表面粗糙度的影响	42
3.1.6 水介质工况下冲角的影响	44
3.1.7 水介质工况下坡度的影响	45
3.2 油介质工况下轮轨黏着特性	48
3.2.1 油介质对轮轨黏着系数的影响	49
3.2.2 油介质工况下速度的影响	50
3.2.3 油介质工况下轴重的影响	52

3.2.4	油介质工况下坡道的影响	52
3.2.5	油介质工况下表面粗糙度的影响	55
3.2.6	水油混合物的影响	56
3.3	树叶介质工况下轮轨黏着特性	58
3.3.1	树叶介质的影响	58
3.3.2	树叶与水介质共同作用的影响	59
3.3.3	树叶介质工况下轮轨黏着-蠕滑特性	60
3.4	防冻液介质工况下轮轨黏着特性	61
3.5	小比例轮轨几何型面的轮轨黏着模拟试验	63
3.5.1	试验方法简介	64
3.5.2	干态工况下试验结果	64
3.5.3	第三介质工况下试验结果	66
	参考文献	69
第4章	轮轨黏着数值仿真研究	73
4.1	轮轨黏着数值仿真模型	73
4.1.1	基本理论	73
4.1.2	基本方程及处理	77
4.2	油介质工况下轮轨黏着仿真	84
4.3	水介质和油介质工况下轮轨黏着仿真对比	86
4.4	数值仿真模型试验验证	90
4.4.1	试验方法简介	90
4.4.2	试验结果	90
4.5	研究展望	94
	参考文献	94
第5章	低黏着下轮轨增黏与损伤行为	96
5.1	轮轨低黏着与增黏措施	96
5.1.1	第三介质引起轮轨低黏着的机理	97
5.1.2	常见增黏措施及作用机制	99
5.2	轮轨界面撒砂/氧化铝颗粒增黏行为	102
5.2.1	增黏试验简介	103
5.2.2	轮轨增黏效果	108
5.3	增黏过程中轮轨损伤行为	111
5.3.1	撒砂对轮轨损伤行为影响	111
5.3.2	氧化铝颗粒对轮轨损伤行为影响	119
5.3.3	砂-氧化铝混合介质对轮轨损伤行为影响	134

5.4 研磨子增黏行为	142
5.4.1 研磨子增黏效果	143
5.4.2 研磨子对轮轨磨损与损伤影响	145
5.4.3 硬质颗粒与研磨子增黏效果对比	148
5.5 磁场作用下轮轨增黏行为	149
5.5.1 试验方法简介	150
5.5.2 水介质和油介质工况下磁场的增黏效果	150
5.5.3 不同磁场强度的增黏效果	152
5.5.4 磁场下速度对黏着的影响	153
参考文献	155
第6章 轮轨黏着系数现场测量与利用控制	158
6.1 轮轨黏着系数现场测量	158
6.1.1 特殊转向架系统	158
6.1.2 IWS 系统	159
6.1.3 机车自测黏着系数	160
6.1.4 加速度计算测量	161
6.1.5 手推式黏着测试仪	162
6.1.6 钟摆式摩擦测试仪	163
6.2 黏着系数利用控制	165
6.2.1 基于蠕滑速度和轮对角加速度判别的控制法	165
6.2.2 基于机车简化动力学模型的控制法	167
6.2.3 基于模糊算法和神经网络算法的控制法	171
6.2.4 其他方法	173
参考文献	175
索引	177
编后记	180

第 1 章 轮轨关系与黏着

1.1 轮 轨 关 系

1825 年 9 月 27 日,世界上第一条行驶蒸汽机车的永久性公用运输设施,英国斯托克顿—达灵顿的铁路正式通车,这是近代铁路运输业的开端。1876 年,英国商人在上海修建的淞沪铁路,被认为是在中国土地上修建的第一条铁路。经过 100 多年的发展,铁路机车从蒸汽机车时代发展到内燃机车时代,然后又跨越到电力机车时代。21 世纪以来,铁路运输业得到空前的发展,高速铁路网全球性的建设高峰时期已经到来。

截至 2016 年底,我国铁路营业里程已达到 12.4 万 km,其中高速铁路 2.2 万 km,居世界第一位,占世界高铁总里程的 60%以上。尤其京沪高铁、京广高铁、哈大高铁、兰新高铁等一批重大项目建成通车,基本形成了以“四纵四横”为主骨架的高速铁路网。根据我国《中长期铁路网规划》的规划目标,到 2025 年,我国高速铁路将达到 3.8 万 km 左右,在已有的“四纵四横”的基础上,形成以“八纵八横”主通道为骨架、区域连接线衔接、城际铁路为补充的新的高速铁路网^[1]。

伴随高铁的快速发展,高速铁路走出去已成为国家战略。继“客运高速”后,“货运重载”也成为中国铁路建设新重点。2014 年 4 月 2 日,大秦铁路成功组织实施了牵引重量 3 万 t 重载列车运行试验,成为世界上仅有几个掌握 3 万 t 铁路重载技术的国家之一,使我国重载铁路运输技术达到国际领先水平。

铁路运输系统的基本工作原理是借助于轮轨滚动接触作用,可以将数百吨甚至数万吨列车的重量传递到轨道上,并能沿轨道由低速到高速发生移动^[2]。如图 1.1 所示,车轮和钢轨分别具有不同的型面,当轮对沿轨道滚动时,每个车轮要传递几吨到几十吨载荷到钢轨,轮轨材料因挤压形成的接触斑面积仅有约拇指大小,轮对和钢轨不仅发生结构弹性变形、接触斑附近材料发生弹性变形,而且在接触斑处的小区域内出现塑性变形。轮对在轨道上滚动过程中,相对钢轨不仅存在横向滑动和纵向滑动,而且在轮轨接触界面之间还存在相对转动^[3~5],即产生轮轨自旋运动,因此轮轨接触斑存在有横向蠕滑力、纵向蠕滑力和自旋蠕滑力。当轮对发生横向运动和摇头运动时,尤其是车辆通过小半径曲线、轨缝和道岔时,轮轨之间将发生冲击振动。轮对过大的横移导致轮缘和钢轨内侧发生贴靠时,轮轨之间就要发生两点接触^[6]。

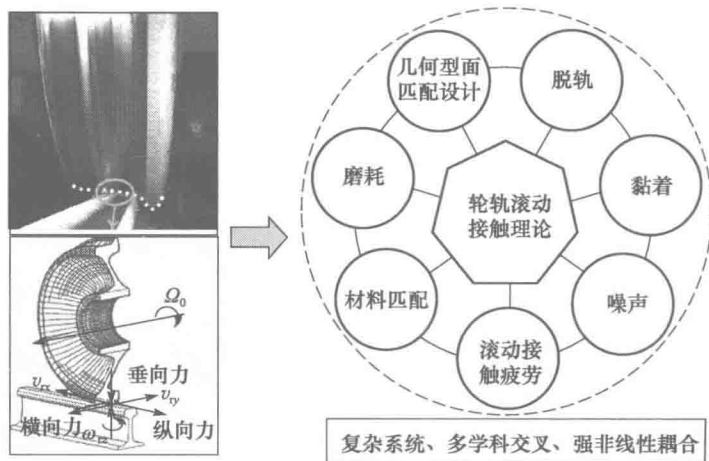


图 1.1 轮轨关系问题

轮轨关系研究涉及刚体运动几何学、机械设计、车辆动力学、摩擦学、固体力学(滚动接触力学、弹塑性理论、断裂力学和有限元等)、振动与噪声、热力学及材料学等方面的知识。此外,轮轨系统始终处在一个开放的环境中,轮轨接触容易受到外界环境的影响,经常服役于高寒、高温、高湿、腐蚀、雨雪、高原风沙、雾霾、柳絮等极其复杂的环境中。因此,轮轨关系是一个复杂、多学科交叉、强非线性耦合系统。随着铁路事业的发展,多年来轮轨关系研究已逐渐分化为若干个既相互独立又相互关联的分支。目前轮轨关系研究内容主要包括轮轨磨损、滚动接触疲劳、轮轨材料匹配、轮轨黏着、脱轨、轮轨噪声、轮轨几何型面匹配设计等方面^[3](见图 1.1)。

轮轨关系问题作为铁路运输中基础性的关键科学技术问题之一,是国际性难题,为此世界各国尤其是铁路发达国家都投入了大量的人力和物力开展轮轨关系系列问题的研究^[3]。为促进这项世界性难题的研究,国际轮轨系统接触力学和磨损会议(International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems)、国际重载运输大会(International Heavy-haul Transport Congress)、国际轮轴大会(International Wheelset Congress)和国际车辆系统动力学会议(International Symposium on Dynamics of Vehicle on Roads and Tracks)等都设专题交流讨论轮轨关系问题的研究进展。

1.2 轮轨界面黏着

铁路运输过程当中,通过车轮与钢轨接触斑之间的黏着-蠕滑来传递牵引力。因此,轮轨界面黏着特性是影响列车牵引与制动的最直接也是最主要的因素,轮轨

界面的黏着行为直接影响机车牵引功率的发挥、轮轨表面损伤、列车运行稳定性和列车制动等诸多方面。机车处于牵引工况时,当机车的牵引力大于轮轨黏着力时,将造成车轮的持续空转,使车轮踏面和钢轨表面形成擦伤^[7]。机车处于制动工况,当机车的制动力大于轮轨黏着力时,将造成车轮的打滑,车轮打滑也会使钢轨和车轮表面形成擦伤,如图 1.2 所示。车轮与钢轨擦伤会成为列车运行过程中的随机激励,对车辆的稳定性和平稳性造成严重影响。擦伤还有可能导致车轮和钢轨表面出现热裂纹、疲劳裂纹等一系列问题,严重的可能成为断轨的诱发因素。同时车轮和钢轨的擦伤也会增加机车车辆和轨道的维护成本。

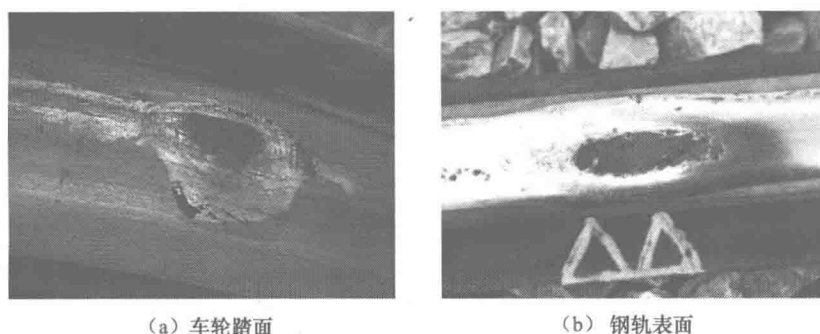


图 1.2 轮轨擦伤

在车轮载荷 P 的作用下(见图 1.3),轮轨接触区发生弹塑性变形,形成椭圆形接触斑。当车轮受到驱动力矩 M 作用向前滚动时,车轮和钢轨材料在接触区周围发生弹塑性变形,从而在轮轨接触面之间产生切向力 F ,且 $F=M/r$ (r 为车轮半径)。车轮切向力 F 即为牵引力,使机车车轮滚动前行。轮轨表面的这种接触状态常称为黏着,黏着是一种状态、现象^[8]。轮轨界面黏着是一个动态随机变量,受到很多复杂因素的影响,它会随时间、地点和环境因素的不同而发生变化。根据 Hertz 接触理论,新轮轨接触区域近似为一个椭圆,这个椭圆接触斑又分为黏着区和蠕滑区,如图 1.4 所示^[9]。

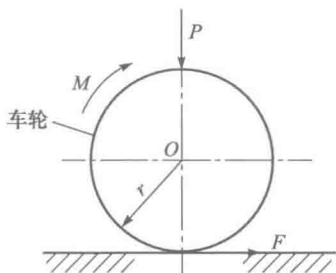
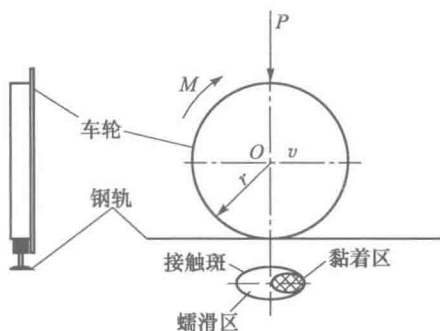


图 1.3 车轮滚动模拟

图 1.4 轮轨黏着和蠕滑区^[9]

黏着系数是表示车轮与钢轨界面之间黏着状态的重要指标^[7]。它表示了车辆的牵引力或制动力传递给钢轨的可能程度,具体地说,是车轮圆周方向的切向力与车轮垂直载荷之比的最大值。把轮轨界面传递的切向力 F 与垂向静载荷 P 的比值定义为黏着系数 μ :

$$\mu = \frac{F}{P} \quad (1.1)$$

轮轨接触区域可能达到的最大黏着,称为可用黏着。最大可能黏着力 $F_{\max}$ 则对应图 1.5 中车轮牵引力 F 的峰值,因此把 $F_{\max}$ 与静载荷 P 的比值定义为可用黏着系数 $\mu_{\max}$:

$$\mu_{\max} = \frac{F_{\max}}{P} \quad (1.2)$$

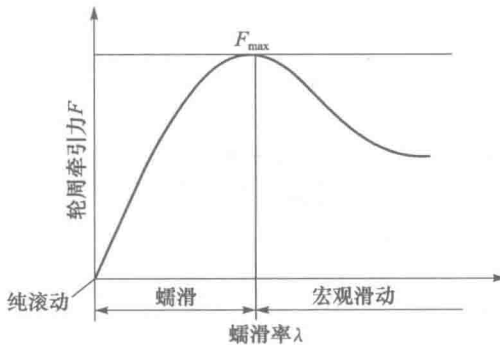


图 1.5 轮周牵引力与蠕滑率的关系

目前,除了黏着系数和可用黏着系数,还有假定黏着系数、要求黏着系数、计算黏着系数、利用黏着系数、黏着利用系数、制动牵引黏着系数等^[7]。

(1) 假定黏着系数:假定轮轨间的垂向载荷在运行过程中是固定不变的,即黏着力变化是由黏着系数的变化引起的,黏着力与运动状态的关系就简化成了黏着系数与运动状态的关系。此时,黏着系数就成为假定值,它和假定不变的轮轨间垂向载荷的乘积就等于黏着力^[10]。

(2) 要求黏着系数:是指轮轨间的切向力除以轮轨间的垂向载荷得到的比值。此时的切向力不一定是最大切向力。要使车轮不滑行,要求黏着系数必须小于或等于实际黏着系数。

(3) 计算黏着系数:它是根据线路上实测的轮轨黏着系数,再综合其他影响因素修正后得到的,也就是黏着系数公式所计算出的黏着系数^[7]。

我国内燃机车的计算黏着系数公式为(v 为速度,下同)

$$\mu_j = 0.248 + \frac{5.9}{75 + 20v} \quad (1.3)$$

我国电力机车的计算黏着系数公式为

$$\mu_j = 0.24 + \frac{12}{100 + 8v} \quad (1.4)$$

欧洲铁路常用的机车计算黏着系数公式为

$$\mu_j = 0.161 + \frac{7.5}{44 + v} \quad (1.5)$$

日本既有线机车车辆计算黏着系数公式为

$$\mu_j = \frac{32.74}{187 + v} \quad (1.6)$$

日本新干线动车组计算黏着系数公式为

$$\mu_j = \frac{13.6}{85 + v} \quad (1.7)$$

(4) 利用黏着系数^[7]: 根据不同应用条件的客观要求(如防滑器的摩擦磨损特性、是否装有闸瓦、闸片、车轮踏面状态、轴重转移状况、气候情况、运行区段线路情况、制动距离要求、列车最高运行速度等)进行人为选取。不同季节、不同地点、不同车型的利用黏着系数有所不同。在实际使用中,一般是先根据公式算得的黏着系数,再进行一定量的增减,作为设计依据。

(5) 黏着利用系数: 是把利用黏着系数与根据公式所得的黏着系数进行比较,将其比值作为黏着利用系数,它代表黏着利用程度。

(6) 制动牵引黏着系数: 轮对的运用工况是影响轮轨黏着系数的一个有效因素,因此制动黏着系数和牵引黏着系数大小是不同的,分别对应于轮轨系统的制动和牵引工况。

轮轨接触行为的复杂性和强非线性耦合作用,导致轮轨界面黏着特性的复杂多变,使黏着系数具有随机性,变化范围很大,受外界因素影响大,影响轮轨界面黏着的主要因素总结如图 1.6 所示。

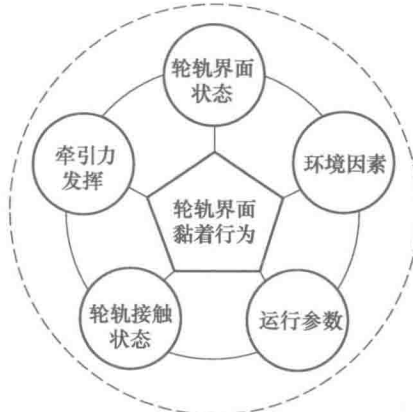


图 1.6 轮轨界面黏着影响因素

影响轮轨界面黏着的因素主要有:①轮轨界面状态,当轮轨表面存在第三介质污染物^[11](水、油、油脂、水油混合、冰、雪、落叶、表面氧化铁锈、雾霾、柳絮等)时,轮轨界面黏着特性将发生很大的变化,往往会造成轮轨黏着系数降低。例如,水介质对黏着的影响尤为常见并且是影响最大的因素。因为水的存在形式具有多样性,它包括液态水和蒸汽,如雾、露水等,会在轮轨表面形成很薄的水膜,对轮轨产生润滑作用,使得黏着系数迅速降低^[9]。②环境因素,当轮轨所处的外部环境因素改变时,如温度(高寒、高温)、湿度、磁场等发生变化时,轮轨黏着系数将随之改变。试验研究发现,相对湿度超过85%时轮轨黏着系数将急剧下降^[4]。③运行参数,主要包括速度、轴重、蠕滑率、轮径、曲线半径等参数,这些参数的影响主要取决于现场的应用条件。④轮轨接触状态:主要包括轮轨表面粗糙度、轨道线路工况(坡道、曲线半径)、冲角、气动载荷等。⑤牵引力发挥^[9],机车所用的传动形式在产生黏着的过程中起重要作用。交流牵引特性与轮轨接触特性非常吻合。在相似轨面污染的情况下,与用直流电机驱动车轮情况相比,采用交流电机驱动车轮能提高黏着力。因此,交流牵引动力能够在低速情况下产生高黏着,在高速情况下产生的黏着力也高于直流牵引动力。

1.3 轮轨黏着研究方法

轮轨界面黏着是一个复杂而多变的瞬态问题,而且很容易受外界条件影响,很难进行精确计算。目前针对轮轨黏着问题的研究主要有试验研究和数值建模仿真研究两种方法。

鉴于轮轨界面黏着的复杂性,轮轨黏着试验成为研究黏着特性的主要方法和手段,试验依靠不同类型和尺寸的试验机进行。目前主要试验方法有线路试验、全尺寸轮轨模拟试验、小比例轮轨模拟试验和小尺寸双盘对滚试验。

轮轨黏着线路试验一般通过实际运营的列车或专门试验列车在实际线路上开展试验,能真实测量实际运营过程中轮轨界面黏着系数的变化,但线路试验结果是现场综合影响因素的结果,一般获得的轮轨黏着系数变化较大,离散性大,不利于轮轨黏着行为影响的分析与研究,且线路试验由于耗时长、费用高而无法专门开展。日本在开发新型增黏喷砂器和增黏新材料过程中进行了多次线路轮轨增黏试验,为优化提高轮轨黏着行为提供了重要的结果^[12]。在日本新干线951型试验电车上进行的增黏试验中,洒水时铝磨耗粉末具有较好的残留效果,车辆完全没有发生滑行和空转。而在新干线961型试验电车上进行的下雪时的增黏试验中,在轨面上降雪5cm条件下使用增黏滑块减少头车第一轴车轮的滑行和空转,但从第二轴以后几乎没有发生滑行和空转现象^[13]。

全尺寸轮轨模拟试验是在实验室内进行与现场轮轨尺寸相同的轮轨黏着行为

试验,其模拟性好,能1:1地模拟轮轨接触关系,全尺寸轮轨模拟试验一般用来进行动力学性能试验和轮轨黏着试验。1971年,德国建成世界上第一台机车车辆整车四轴滚振试验台。该试验台主要用于测定机车车辆关键零部件的走行性能和机车车辆高速运行的动态性能,它对德国ICE高速列车的研制和发展起到了重要作用。西南交通大学牵引动力国家重点实验室研制了600km/h高速车辆滚振试验台,开展了不同运行工况下轮轨黏着试验研究^[14,15],利用全尺寸轮轨试验台研究了干态工况下轴重和滚动速度对轮轨黏着特性的影响,不仅得到了完整的黏着力与蠕滑率关系曲线,同时还得到了列车运行速度与轮轨界面黏着系数的变化关系,为认识高速轮轨黏着系数变化规律提供了很好的结果。

小比例轮轨模拟试验主要是为了更好地控制研究因素和降低全尺寸轮轨模拟试验所需的高昂成本,根据轮轨实际型面进行比例缩小的系列试验。20世纪80年代,美国伊利诺伊大学Kumar等^[16]研制了1:4.5 IIT-GMEMD轮轨试验机,用其试验了轮轨的蠕滑和黏着特性,利用此试验机研究了北美典型机车车轮在撒砂工况下的磨损情况,获得了不同撒砂工况下的Archard磨损系数。西南交通大学王夏鏊^[17]在上述试验机的基础上,成功研制了国内第一台比例1:4的JD-1轮轨模拟试验机,该试验机具有单轮轨和双轮双轨模式,能在实验室内模拟任一类型机车车辆车轮作用于任一类型钢轨上的各种工况,该试验机1992年获国家科技进步奖三等奖。该轮轨模拟试验机能较好地模拟轮轨界面黏着特性,我们利用此试验机研究了干态、水、油和树叶等介质工况下不同运行参数时的轮轨界面黏着特性^[18,19],对认识轮轨界面黏着和损伤行为提供了重要的试验手段。

无论全尺寸轮轨模拟试验机,还是小比例轮轨模拟试验机,进行轮轨界面黏着试验研究的成本都相对较高,且试验完成后对轮轨试样损伤分析更大大增加其试样制造成本。因此,研究人员设计开发了各种小尺寸双盘对滚试验机,其试验机主要结构为利用两个小直径滚轮模拟车轮和钢轨试样,电机直接驱动滚轮转动,通过改变转速可准确控制轮轨界面的蠕滑率,模拟轮轨试样按尺寸可直接从现场车轮踏面和钢轨轨头上截取加工而成,根据车轮和钢轨尺寸,试样尺寸直径一般为35~50mm,这也便于轮轨黏着试验后对试样进行相关微观测试分析,方便更换轮轨试样等操作,同时该类小尺寸双盘对滚试验机可精确控制试验参数和接触状态(速度、轴重、蠕滑率、冲角、轮轨材料、润滑剂、摩擦改进剂等)进行单一影响因素的分析,对认识轮轨界面黏着影响因素提供了非常重要的试验手段。Baek等^[20]使用双圆盘模拟轮轨试验机,研究了在水介质工况下的轮轨黏着特性,认为水介质工况下轮轨黏着系数较干态工况下急剧下降。王文健等^[21]利用小型滚动磨损试验机研究了水介质和油介质工况下研磨子对轮轨增黏与损伤行为的影响,为认识研磨子的增黏效果与损伤影响提供了很好的结果。Lewis等^[22~24]利用SUROS轮轨磨损试验机评价了不同水油混合介质对轮轨黏着的影响,研究了轮轨界面撒砂对电