

铁路有砟道床

井国庆 著
李成辉 主审

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

铁路有砟道床

井国庆 著
李成辉 主审



中国铁道出版社

2012年·北京

内 容 简 介

本书主要阐述有砟道床结构、道砟散体力学特性、离散单元法,对有砟道床进行相关数值模拟,总结高速铁路有砟道床施工与养护维修经验,同时对有砟道床新结构与技术进行相关探讨,尝试建立飞砟机理与防治措施理论体系,涉及传统及新型有砟道床的多个领域,特别是系统阐述离散单元法及其在有砟道床上理论应用。

本书内容广泛,资料丰富,理论与实际结合紧密,对铁路相关人员具有较高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

铁路有砟道床/井国庆著. —北京:中国铁道出版社,
2012. 11

ISBN 978-7-113-15242-0

I. ①铁… II. ①井… III. ①轨道(铁路)—研究
IV. ①U213. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 204097 号

书 名:铁路有砟道床
作 者:井国庆 著

策 划:张 婕
责任编辑:张 婕 洪学英 编辑部电话:(010)51873141 电子信箱:crph-zj@163.com
编辑助理:邱金帅
封面设计:郑春鹏
责任校对:孙 玫
责任印制:陆 宁

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:北京米开朗优威印刷有限责任公司

版 次:2012年12月第1版 2012年12月第1次印刷

开 本:720 mm×1 000 mm 1/16 印张:13.75 字数:247 千

书 号:ISBN 978-7-113-15242-0

定 价:60.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:市电(010)51873170(发行部)
打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

前言

铁路是社会重要基础设施,是卓越环保高效交通工具之一。铁路在综合交通体系中占有重要地位,为经济和社会全面、协调、可持续发展,发挥着有效促进作用。随着高速重载铁路建设、运营及养护维修模式与方法发展,传统有砟道床研究方法、理论模型、结构体系、质量标准、设计理念和养护内容与方法已经发生显著改变。与此同时普通铁路道砟道床作用机理与结构体系需要进一步加强研究,以应对高速铁路道砟飞溅、过渡段设计、道砟流化、道砟再利用、道砟-土工织物复合体系、道砟-道砟胶体系、道砟道床 RAMS 及 LCC 研究、现代养护维修优化等诸多涉及结构、安全、节能、环保可持续发展多方面需求。以上问题需要进一步从铁路运营条件下道砟-轨枕力学作用机理及本构模型、道砟道床结构相互作用体系与机理、道砟-外部机械养护维修相互作用机理与优化等方面进行精细化微观力学基础研究、多结构系统协同精细化研究。同时发展创新道砟道床测量、检测、监测新方法,引导和开创养护作业新模式,促进中国铁路环保绿色可持续发展。

作为轨道工程工作者,在我看来道砟美如玉,坚如钢,情如水,孕育于深邃大地,长于莽莽巨石,千锤万凿,脱骨慧手,十数年风雨兼程,披星戴月,冷漠挤压,无情冲击,即使粉化成尘,傲立泥浆,也粒粒铮铮!

道砟吟

千锤万凿出深山,
冲击磨耗若等闲。
粉骨碎身浑不怕,
要保轨道稳且坚。

本专著主要由北京交通大学井国庆博士撰写,李成辉教授主审。在编写过程中得到众多专家和学者鼎力支持与参与:西南交通大学陈嵘博士(第五章试验部分),铁道部工程管理中心教授级高级工程师赵东田博士(第九章),济南铁路局工务处总工教授级高级工程师吕关仁(第十章),以及蔡小培博士(第十一章第3节)。

向数十年专注道砟道床研究应用的曾树谷研究员致敬。

由于作者水平有限,本专著难免存在不足之处,希望读者在使用过程中多提意见,使本书日臻完善。

目录

第一章 绪 论	1
第二章 道砟单体物理性质	5
2.1 单体物理特性	5
2.2 颗粒老化	11
第三章 道砟道床物理力学性质	14
3.1 有砟道床结构	14
3.2 道砟物理特性	24
3.3 荷载影响因素	26
3.4 道床老化与脏污	32
3.5 中欧高速有砟道床差异	39
第四章 离散单元法道砟模型	43
4.1 数值仿真简介	43
4.2 离散单元法	48
4.3 道砟颗粒形状	52
4.4 循环荷载下道砟颗粒破裂	62
第五章 道砟胶-道砟试验与理论研究	69
5.1 前 言	69
5.2 道砟胶功用	70
5.3 室内试验	72
5.4 胶结道床力学性能	78
5.5 道砟胶现场应用	85
5.6 微观机理模型	88
5.7 结果与分析	91
5.8 结论与展望	94
第六章 道砟捣固稳定机理研究	96
6.1 概 述	96
6.2 研究方法与模型	98
6.3 计算结果与分析	101

6.4	动力稳定作业	104
6.5	结论与展望	110
第七章	吹砟车工作原理与养护	112
7.1	概 述	112
7.2	力学原理与方法	114
7.3	使用效果对比	117
7.4	结论与展望	120
第八章	飞砟机理研究	122
8.1	前 言	122
8.2	防治措施	130
8.3	飞砟力学机理和敏感性分析	131
8.4	结论与展望	137
第九章	高速有砟道床施工技术与工艺	138
9.1	前 言	138
9.2	道砟量计算	139
9.3	预铺道砟	143
9.4	MDZ 机组施工	149
9.5	质量验收	161
9.6	总结与展望	165
第十章	高速铁路有砟道床养护维修	167
10.1	前 言	167
10.2	线路维修内容及模式	167
10.3	线路长波不平顺检测技术	168
10.4	大型养路机械作业方式	175
10.5	线路维护质量	176
10.6	维修技术总结	179
第十一章	其他有砟道床技术初探	181
11.1	风沙线路道床脏污防治	181
11.2	沥青道砟道床	184
11.3	老化道砟再利用	192
11.4	横向约束方案	196
后 记		201
参考文献		203
致 谢		211

第一章 绪 论

铁路是国家重要基础设施与环保高效交通工具,在综合交通体系中占有重要地位,为经济和社会的全面、协调、可持续发展,发挥着有效地促进作用。有砟轨道在运营、施工、养护维修等方面具有优越性,我国及世界上很多国家将有砟轨道作为高速、重载铁路的主要结构形式,如世界范围内所有重载、普通线路均为有砟轨道结构,高速铁路上全部或者部分为有砟轨道结构。其实在中国高速铁路快速发展之前,世界上高速铁路结构形式以有砟占主导地位,如法国、西班牙、意大利高速铁路全部为有砟轨道结构。普通铁路有砟轨道应用范围广、历史悠久,有近 200 年历史。总体来说有砟轨道在世界范围内占铁路结构形式 95% 以上。中国高速铁路大规模发展改变了世界高速铁路轨道结构形式格局,然而由于运营管理和养护维修方面经验的缺乏,在运营过程中容易出现各种各样的问题,而且维修困难,一旦出现问题会对高速铁路正常运营造成较大影响。同时道砟作为有砟轨道结构的重要组成部分,对车辆行驶安全性、舒适性及轨道质量、维修养护有着重要影响。从某些方面讲,有砟轨道易于维修,在适用性和灵活性上体现出明显优势,符合轨道结构传统研究专家学派观点:轨道结构为边运营边维修结构体系,揭示了轨道结构可维修性和维修与运营矛盾的特点,尤其适合中国幅员辽阔、地质结构复杂、气候条件多样特殊国情下,满足修建、运营安全性与经济性综合特点。综上所述,有砟轨道结构作为一种极其重要的铁路轨道结构形式,有着巨大的应用前景和发展空间,有重要研究和应用价值。

有砟轨道结构优点也同时表明道砟道床缺点,需要经常性维修,占用轨道结构,维修成本高、周期频繁。相关国家研究表明,有砟道床维修成本占轨道结构总体维修成本 70% 以上。这是由于捣固机械养护维修加速道砟破裂与老化,形成所谓“记忆效应”,同时导致维修后道床质量状态降低和列车限速,即道砟破碎和道床阻力降低。研究结果表明,道床道砟粉化量中 20% 是由于道床捣固作业而引起的,捣固维修一次所产生的粉末与通过货运总量 100 万吨荷载作用相当(Selig, 1994; McMichael, 1995);英国铁路研究中心数据发现,道砟道床寿命周期被捣固维修作业消耗掉 50% 以上。同时三维离散单元软件仿真分析结果表明道床捣固作业后,道床横向稳定性最多可降低 40% (Tutumluer, 2006);吕关仁等现场试验



表明,道砟道床捣固维修后,道床纵横向阻力降低 40% 左右。因此,外部养路机械在维修作业的同时,对道床整体和微观破坏作用不容忽视,需要对道砟与养路机械相互作用机理进行深入研究。

道砟道床发展日新月异,环保可持续发展要求越来越高。新发展包括新结构、新工艺、新材料、新环境等多个方面,环保可持续发展要求道砟道床更稳、更强、更环保、更绿色。随着有砟道床技术发展,为了有效减缓有砟轨道劣化变形,新材料和新结构不断应用到轨道结构体系中,包括土工织物、道砟胶、石棉板垫层等。如利用土工织物进行既有劣化道床加固和道砟胶提高劣化道床阻力与稳定性(澳大利亚和英国)。如 Xitrack 高速铁路有砟道床体系,通过道砟胶对道砟表面的加固及深度的粘结,喷射道砟胶厚度每层为 10~25cm,增强道床纵横向稳定性,道砟边坡固定和稳定,减缓或消除道砟的粉化,防止翻浆冒泥(Stjepan Lakuši, 2009)。Brown 教授合作进行道砟-新型土工织物试验,结果表明,土工织物能够提供咬合力与限制道砟颗粒侧向位移,能够显著降低劣化道砟承载的轨枕沉降。西班牙高速铁路采用 Delta 石棉板垫层,降低道床振动和维修成本等。德国及日本采用新型、异型弹性轨枕或可再生高分子轨枕增强轨枕-道砟咬合力和摩擦力,降低道床振动,提高轨枕道床阻力;沥青有砟道床体系,可维修性和耐久性介于有砟道床和无砟轨道之间。以上不同结构形式、刚度、材料多层多系统复合作用体系作用机理以及影响规律基础研究,在我国铁路科学研究界研究相对匮乏。可持续发展则要求道砟道床绿色无污染,包括设计和维修过程。比如废弃道砟重复再利用问题在发达国家已经形成产业化和规范化;又如国外已经进行道砟道床环境污染防治研究,研究内容包括道砟道床散落接触网铜粉、脏污及由此在雨水作用下对环境的污染等。

高速和重载铁路发展对道砟道床提出了更稳、更强的要求,同时道砟道床遇到前所未有需要考虑的新问题。比如高速铁路飞砟是铁道工程专家始料未及的事情:道砟居然会在列车振动和负压风载作用下飞起来击打列车和轨道,甚至包括冬季严寒地区线路,列车上积雪或者冰块击打道床,导致道砟飞溅等。一粒毫不起眼的道砟会击打造价高昂的高、速列车,并引起不可控的危险。

有砟道床还需考虑的一个问题是排水,排水不良会导致道床翻浆冒泥,甚至极端情况下会导致道床失稳。

列车循环荷载作用下,钢轨产生高频振动,通过轨枕动力作用引起道砟粉化、老化及流动,进而引起道床累积变形等问题,尤其道砟的破碎机理与发展规律对道床设计与维修养护工作的优化有重要影响。其次是随着高速铁路和重载铁路的发展,轴重、频率、速度等诸多影响因素与传统有砟铁路有所不同。最后,当今时代与

社会发展对运营舒适性、安全性、环境保护、可持续发展等提出了更多更高的要求。比如在高速有砟铁路中出现很多新问题,如过渡段、道砟飞溅、桥上道砟流化、土工织物复合作用、道砟粉化、老化道砟再次利用、大型机械养护合理参数设置和优化问题等。以上问题的解决与突破迫切地需要从理论上对道砟基础应用进行深入研究。同时实际运营过程中,有砟轨道由于其结构的特殊性,如与水作用、道砟-轨枕(几何接触离散性、不同刚度体系匹配、动静态力学接触复杂力学行为)、短期与长期相互作用机理复杂,破坏形式多样,造成诸多安全隐患的出现。对于高速铁路有砟轨道,散体道床受到高速列车高频冲击振动的影响,破坏机制比普通铁路和重载铁路更为复杂。目前,铁路有砟轨道结构问题主要表现在以下几个方面:道砟-轨枕相互作用力学机理;道砟道床多层系统(包括复合材料与结构)相互作用;道砟道床机械养护维修机制与优化;道砟道床劣化延缓措施。

针对有砟轨道结构存在的诸多病害,目前所采取的养护维修技术方法和管理规定虽然能够在一定程度上减少病害的发生,起到一定的积极作用,但并不能从根本上解决问题。究其原因,主要是这些技术方法和管理规定更多的是基于工程经验,而对有砟轨道结构相互作用机理和变形规律认识不足,检测监测维修机制研究尚不成熟,许多深层次的理论和科学问题没有得到揭示。目前,国内外散体道床状态劣化机理及变形规律研究尚不够充分,特别是道砟劣化发生发展机理、道砟与大型养路机械相互作用、劣化道砟界定与判别、劣化道砟再利用等研究相当匮乏,对我国有砟轨道发展造成巨大障碍。

目前有砟道床研究重点表现在以下几个方面。

(1)铁路运营条件下道砟-轨枕力学作用机理及本构模型研究。微观层面上道砟-轨枕相互作用力学特性与机理没有得到充分解决,如道砟-轨枕散体接触、道砟颗粒微观劣化与宏观流变性之间关系。深入研究该问题一方面能增强道床稳定性与承载力,降低养护维修成本;另一方面有助于改善或者缓解道砟劣化发生与发展,如优化轨枕刚度与形状、弹性轨枕等。

(2)有砟轨道系统相互作用机理研究。道砟道床与下部结构(路基、桥梁)及新型土工织物(包括道砟胶、道砟垫、挤塑板等)等结构体系受力机理和影响规律需要进一步明确。同时道砟结构体系固化技术与结构体系作用机理,亟待解决。

(3)道砟-外部机械养护维修相互作用机理与优化。道砟捣固维修,类似中国传统中医理论,是药三分毒,在治疗恢复过程中对受体也造成伤害。捣固机械对道砟道床养护维修的破坏机理,微观破坏与维修后道床状态失稳研究,需要明确。养护维修机械对道砟道床造成两方面不利影响,道砟破碎和道床阻力降低。如道床

道砟粉化量中 20% 是由于道床捣固作业而引起的 (Selig, 1994); 英国铁路研究中心数据发现, 道砟道床寿命周期被捣固维修作业消耗掉 50% 以上。因此, 外部养路机械在执行养护维修作业的同时, 对道床整体和微观破坏作用不容忽视, 需要对道砟与养路机械相互作用机理进行深入研究, 优化维修周期与捣固参数, 宏观与微观相结合降低维修成本。

(4) 有砟轨道结构和维修深层次理论问题。采取科学手段进行轨道状态健康监测、检测、控制及养护维修是有砟轨道发展的首要问题。这一问题的解决依赖于对有砟轨道散体道床劣化机理及变形规律等科学问题的深入认识。只有深入研究有砟轨道散体道床力学特性、破坏机理以及复杂的演化规律等, 为有砟轨道设计及养护维修提供科学指导和理论依据, 才能实现有砟轨道运营安全控制从经验型到科学化的转变, 极大地促进我国有砟轨道结构发展。而要进行深层次机理问题研究, 有必要对道砟道床作用机理及演化规律进行微观力学定量分析, 研究道砟颗粒本身、道砟散体、道砟道床物理力学性质和影响规律。如将道砟道床检测与钢轨、路基检测三位一体综合系统分析, 更加有利于对轨道结构维修周期与维修成本优化, 在现今技术条件下是完全可行和必要的。

通过收集和分析国内外铁路道砟相关研究资料, 调研我国铁路道砟使用情况, 进行一系列道砟基本物理力学测试与试验, 结合离散单元法与其他仿真技术耦合平台进行微观研究, 对列车作用下道砟-轨枕动力相互作用问题进行分析, 建立并完善道砟道床研究内容与体系, 发展道砟道床加固理论与技术方案, 提出铁路养护维修方案并建立参数优化理论, 研究路线见图 1-1。

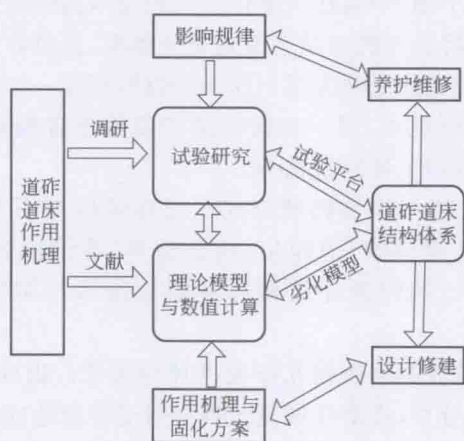


图 1-1 技术路线图

第二章 道砟单体物理性质

一般情况下,道砟散体力学性质是由以下四个主要因素决定:单个道砟颗粒力学性质,如大小、形状、表面粗糙度、颗粒破碎强度、磨损等;道砟散体力学特性,包括粒径分布、级配、空隙率或密度和含水率;荷载特性,包括当前状态应力、应力历史和应力路径;颗粒老化,主要是颗粒单体性质、级配特性和荷载的综合效应。

2.1 单体物理特性

单个颗粒物理和力学特性显著影响着静态和周期荷载作用下道砟的行为。在以下章节中,对单个道砟颗粒特性及其对道砟力学性能影响规律进行讨论与论述。

2.1.1 粒 径

世界范围内道砟粒径一般为 10~60 mm,由于运输、装卸、堆放和压实道砟,以及重型施工机械在道砟道床上运动与作用,必然导致其表面粗糙度、甚至粒径发生变化。首先颗粒本身尖锐角会折断、破碎,有些颗粒可能分裂成两半,甚至粉碎成若干小块。随着列车反复荷载作用次数的增加,道砟颗粒进一步老化,粒径逐渐减小。但即使经过几百万次列车荷载后,超过 90%道砟颗粒粒径仍在 10~60mm 范围内。

一些研究人员研究了粒径对道砟和其组合体力学行为的影响规律,所得研究结果并不完全一致,如一些专家通过试验结果证实,道砟散体材料摩擦角和剪胀角随着道砟粒径增大而增加(Kolbuszewski,2001;Frederick,2001)。相反,另一部分学者实验证明内摩擦角随最大粒径增加而降低的情况,见图 2—1(Marachi,et al.,2002)。而 Indraratna(2007)观察到类似结果,其研究表明在低围压(<300 kPa)下摩擦角峰值随粒径增加略有下降;在高应力水平(>400 kPa)下,粒径对摩擦角影响可以忽略不计。

一些学者同时指出,粒径较大的道砟,比粒径较小的道砟产生较高塑性应变。虽然较小粒径道砟在循环载荷下变形较小(即有较高阻力),但这种规律在荷载幅

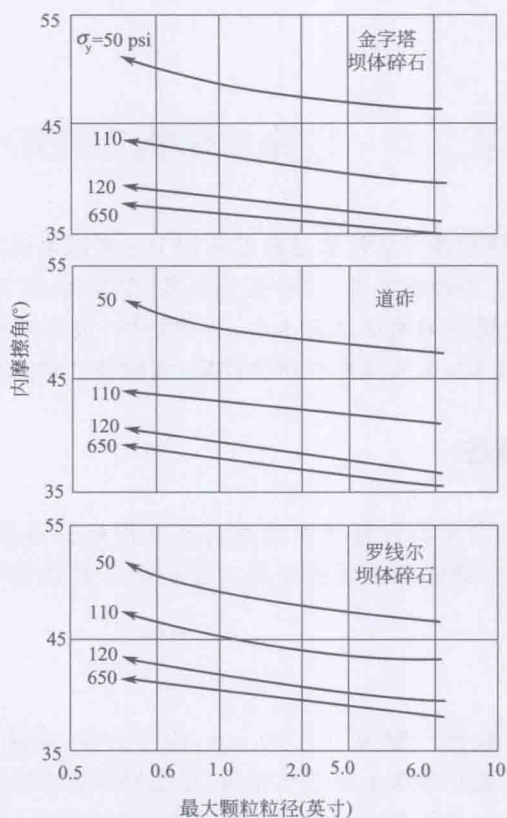


图 2—1 粒径对摩擦角的影响

(Marachi, et al., 2002 修正后)

度从 140 kPa 增加至 210 kPa 时立即失效;相反,在这种情况下,较大粒径道砟则能继续承受循环荷载,而没有任何失效迹象(Raymond, 1987; Diyaljee, 1987)。Raymond 和 Diyaljee(1987)相应得出结论,如果应力水平不超过某个临界值,小粒径道砟变形较小。不过与粒径较大道砟相比,小粒径道砟最终压实强度比较低。为了探讨粒径对道砟行为的影响,Janardhanam 和 Desai(1983)进行了一系列循环荷载下真三轴实验,结果表明,在不同应力水平下粒径似乎并不显著影响道砟散体应变。他们还得出结论,粒径不影响体积应变,但粒径显著影响道砟弹性模量,在所有封闭区间内平均弹性模量随粒径增大而增加,并在低围压下与平均粒径几乎成线性关系,见图 2—2。与此相反,Indraratna(2007)基于单调三轴实验结果,提出相对于粒径较小道砟,粒径较大道砟具有较小变形模量和泊松比。

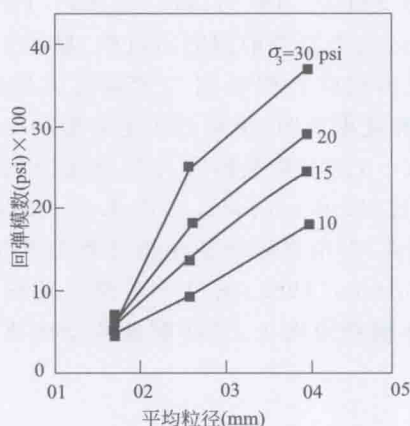


图 2—2 粒径对弹性模量影响(Janardhanam,1983)

考虑到不同粒径和级配优缺点,较大颗粒可以使轨道稳定,而较小的颗粒减少颗粒之间的接触力并减少破碎。Selig(1994)建议理想道砟粒径应为 10~50 mm,只允许少数颗粒超出此范围。

2.1.2 道砟颗粒形状

图 2—3 为典型道砟颗粒形状代表。颗粒形状参数包括扁平系数与长细比(Flat Elongated Ratio, F&E Ratio)、尖角指数(Angularity Index, AI)及表面质地(Surface Texture, ST)等指标。以上参数都对道砟单体颗粒及散体物理特性具有重要影响(Tutumluer, et al., 2001)。



图 2—3 典型道砟颗粒形状(Tolppanen,2001)

不同于粒径影响规律研究结果,研究人员对于颗粒形状对道砟及其散体力学响应影响有一定共识。一般情况下,棱角增加颗粒之间的摩擦互锁从而增加



抗剪强度(Indraratna,1998; Holz,1956; Leps,1970)。Holz 和 Gibbs(1956)认为新鲜道砟颗粒剪切强度远大于圆滑的河卵石道砟,见图 2—4。Tolppanen(2001)通过对比新道砟和老化后道砟表面得出二者显著区别在于尖角磨耗和消失。Vallerga (1957)提出明确证据表明,棱角分明道砟散体与接近圆形散体相比,前者内摩擦角较高,见图 2—5。而其他研究人员也得出类似结论,如内摩擦角主要取决于颗粒的多角程度(Kolbuszewski,1963; Leps,1970)。Jeffs(2007)和 Jeffs (2009)通过试验得出结论,尖角道砟同圆角道砟颗粒相比,在相同荷载条件下,前者产生沉降较少。Chrismer(1985)通过一系列三轴试验表明,随着道砟颗粒尖角数目增加,道砟散体剪胀角增大,道砟颗粒移动困难,从而导致道砟散体剪切强度增加。

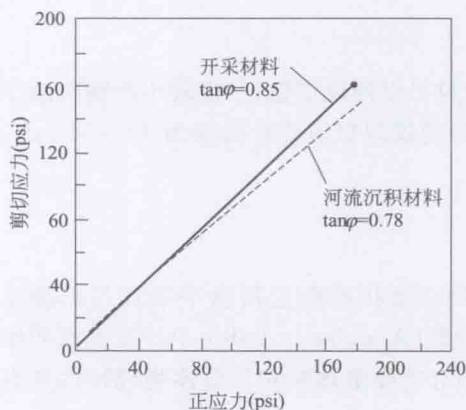


图 2—4 颗粒形状对强度的影响
(Holz,1956;Gibbs,1956)

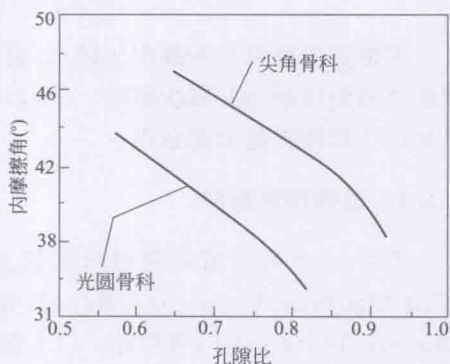


图 2—5 颗粒形状对摩擦角的影响
(Vallerga,et al.,1957)

Jeffs 和 Tew (1991)指出道砟颗粒形状取决于其生产过程和岩石本身力学性质。大多数规范都限制片状系数超过 3 的片状颗粒的百分比,并排除片状系数超过 10 的片状颗粒。道砟颗粒形状过于扁平、细长,则在相同外界条件下容易折断。同时也有研究者认为,片状系数增加导致道砟磨耗和破碎加剧,在列车循环荷载作用下导致永久变形增大,同时加速降低道床刚度(Selig, Waters,1994)。虽然大多数规范限制畸形颗粒,畸形颗粒是指过于扁平或细长道砟颗粒百分比,但是所允许道砟畸形颗粒百分比并不一致,取决于线路运营条件和道砟工艺生产水平(Jeffs,1989)。Raymond(1985)指出立方体道砟颗粒是高品质道砟最佳形状,Jeffs 和 Tew (1991)也支持该观点。

2.1.3 颗粒表面粗糙度

表面粗糙度或纹理被认为是影响内摩擦角的关键因素之一,从而影响道砟的强度和稳定程度。每一颗粒其表面都有着相同的“粗糙度”。“摩擦和摩擦力”都是基于荷载表面的粗糙度产生的,而道砟的抗剪强度取决于这些摩擦力的承受程度。Raymond(1985)提出颗粒形状和表面粗糙度是极端重要的,而这早已被确认为轨道稳定性主要影响因素。加拿大太平洋铁路公司认为表面粗糙度是比颗粒形状更重要的影响轨道稳定性的关键参数,并采取措施严格控制颗粒表面粗糙度,而不是直接控制颗粒形状(Raymond,1985)。Thom 和 Brown(1988)研究称道砟散体弹性模量随着颗粒表面粗糙度的增加而增加,并得出结论,塑性应变积累随表面粗糙度的增加而减缓。

因此大多数国家道砟规范都对道砟粗糙度有一系列规定,如采用岩石破裂道砟(尽量避免采用河卵石),道砟破裂面满足三个新鲜破裂面以上等(Raymond,1985)。这些规范确保道砟颗粒的最小表面粗糙度,并假设由于陈旧破裂面受到机械磨损和风化磨平的作用,新鲜破裂面有较高的表面粗糙度。由于循环荷载下颗粒的内部磨损,颗粒表面粗糙度随着时间的推移(即列车通过次数的增加)而降低,导致道砟产生碎屑。由于内磨损和尖角破损,表面粗糙度随时间逐渐降低,在数百万循环荷载后,导致道砟的内摩擦角和剪切强度大大降低。因此可以想象,单个颗粒的表面粗糙度显著影响道砟的力学行为,并最终影响轨道的稳定。

道砟实验室可以通过 Masal(1973)方法进行颗粒表面粗糙度(摩擦角)测定:将道砟颗粒通过浇筑固定材料在一立方体盒中,然后通过金刚石锯水平分开,然后通过右侧装置施加垂向力,移动立方体盒上表面,即可测定道砟颗粒粗糙度和摩擦角,见图 2—6。

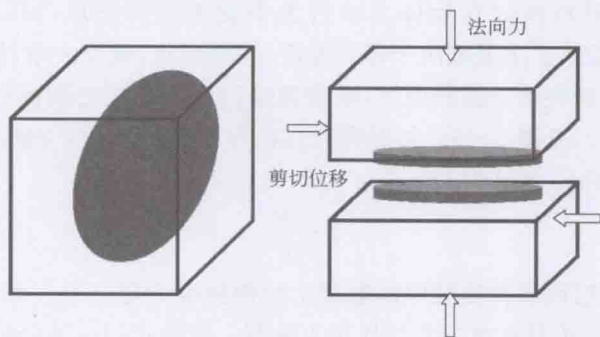


图 2—6 道砟颗粒表面粗糙度测量方法(Masal,1973)

2.1.4 母岩强度

母岩强度可能是直接影响道砟老化的最重要因素,而且间接影响轨道沉降和侧向变形。不同种类母材岩石岩性特征不同,其物理力学特性也不同,则碎石道砟材质检测指标也有较大的差别;同种名称的岩石,各自的宏观和微观岩性特征也有差别。通过道砟试验的经验,一般认为影响一组道砟质量等级的因素主要有岩石的矿物成分、结构、构造、岩石风化变质程度、岩石受动力作用强度等。比如花岗岩道砟和石灰岩道砟最大的差异在于稳定阶段前者弹性值比较恒定,而后者波动性很大,对行车安全和平稳都有很大的影响。因此,高等级道砟必须使用硬质道砟,确保道床良好的弹性和弹性均匀性。母岩强度包括抗压强度和抗拉强度两个方面。在相同的载荷和边界条件下,脆弱颗粒会产生更多的颗粒破损和塑性沉降。虽然大多数的道砟规范通常并不测试和规定母岩强度(例如,TS3402,新南威尔士州铁路基础设施公司),但对母岩强度要求隐含在选择标准中,其中包括岩石强度检查。高母岩强度也间接地反映于其他测试中,如“道砟破碎值”、“洛杉矶磨耗值”和“湿磨损值”等。这些测试结果共同表明道砟的耐久性和母岩强度。而且,为了提高道砟质量,母岩强度作为道砟质量指标也可以选择性地包括在规范内。如中国碎石道砟规范对母岩相关检验进行相应规定:进行资源性材质检验;新建采石场及既有采石场转移开采面或工作面岩层材质、种类有明显变化时;采石场每生产道砟 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ (年产量少于 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的采石场,时间不超过1年),应按相关规定的各项内容进行一次生产检验。

2.1.5 抗压强度

单个颗粒抗压强度是影响颗粒老化的重要因素,它包括载荷下颗粒断裂和尖角破碎、折断。颗粒破碎在散体力学行为中发挥重要作用(McDowell, Bolton, 1998)。颗粒抗压强度主要取决于母岩强度、颗粒形状、颗粒大小、加载点和加载方向等。岩石颗粒断裂始于拉伸破坏,断裂强度可由平压板之间的径向压缩间接测量(Jaeger, 1967),见图2—6。如果颗粒直径 d 受径向压力 F ,表征拉应力 δ 可由式(2—1)给出(Jaeger, 1967):

$$\delta = \frac{F}{d^2} \quad (2-1)$$

式(2—1)与巴西试验测试中的混凝土拉伸强度的定义是一致的,在这个测试中混凝土圆柱被压缩并在拉应力的作用下断裂。应用式(2—2)(McDowell, Bolton, 1998)和Nakata等人(2001)描述道砟颗粒拉伸破坏强度 δ_t 。