

高速铁路施工技术

(隧道工程分册)

中铁二局股份有限公司 卿三惠 等 编著

高速铁路施工技术 (隧道工程分册)

中铁二局股份有限公司 卿三惠 等 编著

中国铁道出版社

2013年·北京

内 容 简 介

《高速铁路施工技术》系列丛书,分为《概论分册》、《路基工程分册》、《桥梁工程分册》、《隧道工程分册》、《轨道工程分册》、《“四电”工程分册》、《施工测量分册》、《工程试验与检测分册》8个分册出版。

《高速铁路施工技术(隧道工程分册)》主要介绍高速铁路隧道的结构构造、技术标准及施工技术。重点突出隧道洞口工程、开挖与支护、二次衬砌、防排水、附属构筑物、辅助坑道,施工通风与防尘、超前地质预报、施工监控量测,不良地质与特殊岩土隧道、明挖隧道、TBM隧道、盾构隧道等的施工方法、施工工艺、质量检测及控制标准等内容。

该书理论联系实际,论述深入浅出,内容系统完整,可作为铁路施工企业员工的技术培训教材,也可供高速铁路施工、设计、科研人员及大专院校土木工程专业的师生学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速铁路施工技术·隧道工程分册/卿三惠等编著. —北京:
中国铁道出版社,2013.11
ISBN 978-7-113-17385-2

I. ①高… II. ①卿… III. ①高速铁路—铁路施工②高速铁路—铁路隧道—隧道施工 IV. ①U238

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第232434号

书 名:高速铁路施工技术(隧道工程分册)
作 者:中铁二局股份有限公司 卿三惠 等

责任编辑:冯海燕 张卫晓 电话:010-51873371 电子信箱:bjbfhy@126.com

封面设计:崔丽芳

责任校对:孙 玫

责任印制:郭向伟

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:北京铭成印刷有限公司

版 次:2013年11月第1版 2013年11月第1次印刷

开 本:787mm×1092mm 1/16 印张:22.25 字数:555千

书 号:ISBN 978-7-113-17385-2

定 价:57.00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:(010)51873170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

主 编 简 介



卿三惠,男,1956年生,贵州省息烽县人,工学博士,教授级高级工程师,国家注册土木工程师。1982年~2006年在中铁二院工程集团有限公司从事铁路工程勘察设计25年(其间任院副总工程师8年),2006年至今任中铁二局股份有限公司总工程师。历经南防、南昆、黎湛、株六、水柏、黔桂、渝怀、遂渝、达成、大丽、玉蒙、滇藏、京津、京沪、武广、广珠等新(改)建铁路的前期研究、勘察设计及施工实践,长期致力于工程勘察设计技术与结合工程的科学试验研究,多项成果获国家、省(部)级奖励,为铁路的事业技术进步作出了积极的贡献。

勘察设计:《水柏铁路北盘江大桥工程地质勘察》获铁道部工程勘察一等奖及国家银奖;《渝怀铁路圆梁山隧道工程地质勘察》、《黔桂铁路工程地质勘察》、《高烈度地震区铁路工程地质与环境地质综合选线》获省(部)工程勘察一等奖;《水柏铁路选线设计》、《时速200公里遂渝铁路路基工程设计》分获省(部)工程设计一、二等奖。

科技研究:《京津时速350公里铁路线路工程技术及应用》获铁道部科学技术特等奖;《时速350km高速铁路CRTSⅡ型板式无砟轨道施工技术及相关设备研究》、《海底隧道钻爆法施工关键技术》、《富水砂卵石地层土压平衡盾构施工关键技术》、《大跨径曲线梁非对称外倾式钢箱拱桥施工关键技术》获省(部)科技进步一等奖;《客运专线独塔斜拉连续刚构组合桥施工关键技术》、《客运专线无砟轨道制造与施工成套设备及工艺研究》、《遂渝铁路一次铺设跨区间无缝线路轨道关键技术试验研究》、《超深埋大断面隧道群施工关键技术》、《特殊环境修建复杂洞室群地铁车站整体洞桩法施工关键技术》获省(部)科技进步二等奖;《红层软岩地区建造时速200公里客货共线铁路路基关键技术》、《超浅埋地铁大断面长距离水平冻结施工技术》、《高压富水地层超深埋特长隧道施工技术》、《城市地下互通立交隧道群施工技术》、《高瓦斯特长隧道建设关键技术》获省(部)科技进步三等奖。

学术成就:公开发表科技论文30余篇,对山区铁路选线设计、工程地质及水文地质勘察、岩溶和软弱地基处理、滑坡或边坡工程治理、复杂地质隧道灾害防治、高速铁路设计与施工、路基填料试验等技术问题进行了有益的研究和探索;主编出版《西南铁路工程地质研究与实践》、《土木工程施工工艺》(包括路基路面、桥

梁、隧道及地铁、铺架与“四电”、房建五个分册)、《高速铁路隧道工程施工技术指南》、《铁路隧道施工安全技术规程》、《工程项目管理标准化手册》,参编出版《铁路路基填筑连续压实控制技术规程》、《铁路混凝土支架法现浇施工技术规程》、《CRTS II型板式无砟轨道施工质量验收标准》、《高速铁路地基处理手册》、《铁路工程声屏障施工技术指南》等技术专著、规范、标准、手册;研发国家级工法5项、省(部)级工法10项;获国家授权发明专利12项、实用新型专利5项。

社会荣誉:2000年以来,先后荣获“全国铁路火车头奖章”、“四川省工程勘察大师”、“四川省学术和技术带头人”、中建协和中施协“全国技术创新先进个人”、中国中铁总公司“突出贡献中青年专家”和“十一五科技创新标兵”等社会荣誉。

《高速铁路施工技术》系列丛书编委会

主任：唐志成

副主任：邓元发

委员：方国建 张次民 林原 刘剑斌 王云波
曾永林 邓爱民 卿三惠 蔡伟 熊志勇
崔江利 张文杰 李政 邓文华 陈道圆
湛明朗 卢鹏 胡建 郜小群 刘世杰
韩兴旭 陈叔 唐浩先 刘学力 葛庭栋
杨守泰

主编：卿三惠

各分册主要编写人员：

《概论分册》 卿三惠 李雪梅 谭均平 卿光辉
《路基工程分册》 卿三惠 胡建 贺志荣 黄能 张代富
伍帮勇 蒋浩然 黄国庆 蒋开春 魏二剑
钟维章
《桥梁工程分册》 卿三惠 郜小群 钱纪民 唐浩先 韩兴旭
李友明 吴明 周祖清 蒲伟 雷宇
白晓红 彭亮英 王强 陈杰 韩伟
肖勇 姚道雄 李华月 向锐 张顺勇
谭祥国 曹新恒
《隧道工程分册》 卿三惠 刘世杰 马辉 刘卫华 胡力绳
钟友江 李庆生
《轨道工程分册》 卿三惠 陈叔 陈杰 陈孟强 陈希成
申超 林国辉 陈建波 孙韵全 褚利民
彭福 樊小冬 陈太权 来琼 胡笑纹
李保尔 方华
《“四电”工程分册》 卿三惠 何勇军 代伯寿 张强 唐小川
鲁健 汤国林 石芸 何国华 彭明勇
李非凡 徐旭 王正国 周聚杰 何锐庚
林安普
《施工测量分册》 卿三惠 段太生 李学仕 杨维裕 郭平
方明 何军
《工程试验与检测分册》 卿三惠 刘学力 杨育红 陈涛 彭清福
孙凯 刘炎培 钟卫翔

统审：卿三惠

编辑：韦慎

序

高速铁路是当今世界的一项重大技术成就,它集中反映了一个国家铁路线路结构、列车牵引动力、高速运行控制、高速运输组织和经营管理等方面的技术进步,也体现了一个国家的科技和工业水平。高速铁路是社会经济发展的必然产物,有利于促进国家或地区间城市一体化发展进程,在经济发达、人口密集的地区经济和社会效益非常显著。高速铁路以其速度快、安全性好、正点率高、全天候运行、舒适方便、输送能力大、能耗低、污染轻等一系列技术优势,已成为世界许多国家和地区旅客运输发展的共同趋势。

20世纪60年代以来,高速铁路在日本、德国、法国、意大利、西班牙、韩国等发达国家蓬勃兴起。截止2012年底,全世界高速铁路运营里程总长24 000 km,分布在20个国家和地区。列车的最高试验速度从1964年10月世界上第一条高速铁路日本东海道新干线达到210 km/h后也在不断被刷新。1981年2月法国TGV达380 km/h;1988年5月德国ICE最高试验速度达406.9 km/h;1990年5月18日法国TGV-A型高速列车最高试验速度达515.3 km/h;2007年4月3日法国TGV-V150超高速列车最高试验速度达574.8 km/h,创造了有轨列车瞬间最高试验速度的世界纪录。这些瞬间高速(最高试验速度)说明轮轨技术是可以高速的,但不能真正运行。我国高速铁路建设过程中,从安全、可靠、适用、经济四个指标进行研究的结果表明,决定高速铁路运营速度的路基、桥梁、隧道和线路结构应按350 km/h的标准建设和配置机车,验收速度应按额定速度的110%验收;从经济运营角度分析,根据空气动力学试验,250 km/h是高速铁路的经济速度。因此,我国城际铁路一般按该速度进行建设。

20世纪90年代以来,中国政府致力发展高速铁路,开展大规模的高速铁路试验研究。大体经历三个历史进程:

1997年~2007年,实施既有线改造和六次大提速。通过既有线改造和六次大提速,掌握了200~250 km/h高速铁路修建技术,使全国旅客列车最高运行速度从120 km/h以下提高到200 km/h以上的既有线路营业里程达到6 003 km。

1999年~2007年,新建160~200 km/h试验线。1999年8月开工建设秦沈客运专线,2002年11月27日“中华之星”列车在该线上试验最高速度321.5 km/h,2003年10月12日按200 km/h开通运营;2002年11月开工建设客货共线遂渝铁路,2005年5月“长白山”列车在该线上试验最高速度234 km/h,2006年4月1日按200 km/h开通运营。2007年4月18日,新建广深铁路三、四线采用“和谐号”动车组按200 km/h开通运营,成为我国第一条客货分线,实现完全公交化的城际客运专线。

2004年以来,全面新建250 km/h和350 km/h高速客运专线。2004年1月

国务院发布《中长期铁路网规划》，并于2008年进行调整，确定了“到2020年建设高速客运专线16 000 km以上”的发展目标。从此，中国铁路拉开了以“四纵四横”客运专线和城际快速客运系统为重点的大规模高速铁路建设序幕。2005年6月开工建设中国第一条250 km/h客货共线铁路合宁铁路，2008年4月按200~220 km/h开通运营；2005年7月4日开工建设中国第一条350 km/h的京津城际高速铁路，2008年6月24日和谐号动车组在该线上最高试验速度394.3 km/h，2008年8月按300 km/h开通运营；2011年1月中国CRH380BL型和谐号动车组在350 km/h的京沪高速铁路线上创造了中国铁路无砟轨道列车的最高试验速度487.3 km/h，2011年6月按300 km/h开通运营，标志着中国高速铁路技术已步入国际先进水平。其中长距离、温差大、无缝轨道技术处于世界领先水平。

截止2012年底，中国已建成高速铁路运营里程9 356 km，在建高速铁路长度达12 700 km，居世界第一。

中国铁路按照“安全、可靠、适用、经济、先进”的技术方针，通过原始创新、集成创新和引进消化吸收再创新，在工程建设、高速列车研制、列车运行控制、系统集成、运营维护、客运服务等技术领域实现了重大突破，形成具有自主知识产权的高速铁路技术标准体系，全面掌握了高速铁路设计、施工、运营、维修等关键技术，实现了具有世界先进水平的客运动车组、施工装备的国产化。目前，中国已成为世界上高速铁路发展最快、运营里程最长、运营速度最高、在建规模最大、系统技术最全、集成能力最强的国家。

为总结高速铁路的建设经验，中铁二局股份有限公司组织国内铁路技术专家及工程技术人员，在全面系统地总结我国高速铁路试验研究及建设实践的基础上，广泛吸收世界高速铁路建设的先进技术，精心编著完成的具有中国特色的《高速铁路施工技术》系列丛书，终于出版了。

该丛书理论联系实际，论述深入浅出，内容系统完整，图文并茂，展现了当今高速铁路施工的最新技术及应用前景，具有较高的理论和实用价值，可以引领我国的高速铁路建设。

借本丛书出版之际，谨以此序向多年来为我国高速铁路建设作出突出贡献的广大科技人员，以及为本丛书的出版付出辛勤劳动的各位编审人员表示感谢。

我将本丛书推荐给从事高速铁路设计、施工、科研、教学等工作的人员和广大非专业读者。相信本丛书的出版，将有助于推动我国高速铁路施工技术的不断进步，实现富民强之本。

中国工程院院士

2013年5月



前 言

2004年1月,国务院发布《中长期铁路网规划》,并于2008年进行调整,确定了“到2020年建设客运专线16 000 km以上”的发展目标。从此,中国铁路拉开了以“四纵四横”客运专线和城际快速客运系统为重点的大规模高速铁路建设序幕。截止2012年底,中国已建成高速铁路运营里程9 356 km,在建高速铁路12 700 km,成为世界上高速铁路发展最快、运营里程最长、运营速度最高、在建规模最大、系统技术最全、集成能力最强的国家。

为总结我国高速铁路的建设经验,中铁二局股份有限公司组织国内铁路技术专家及工程技术人员,在全面系统总结我国高速铁路试验研究及建设实践经验的基础上,广泛吸收国外先进技术,精心编著而成《高速铁路施工技术》系列丛书。

全套丛书包括《概论分册》、《路基工程分册》、《桥梁工程分册》、《隧道工程分册》、《轨道工程分册》、《“四电”工程分册》、《施工测量分册》、《工程试验与检测分册》共8个分册。

1.《概论分册》,主要介绍高速铁路的概念、作用、技术经济优势、主要技术特征;高速铁路基础设施(线路、路基、桥梁、隧道、轨道)的特点;国内外高速铁路的成就与发展趋势,重点突出我国高速铁路的技术创新成果及应用前景;高速铁路的系统集成、技术体系和技术标准体系等内容。

2.《路基工程分册》,主要介绍高速铁路路基的结构构造、技术标准及施工技术,重点突出地基处理、路堤填筑、路堑开挖、路基过渡段、路基支挡结构、路基边坡防护、路基防排水、路基堆载预压、路基沉降观测与评估等的施工工艺、质量检测及控制标准等内容。

3.《桥梁工程分册》,主要介绍高速铁路桥梁的结构构造、技术标准及施工技术。重点突出桥梁基础与墩台、预应力混凝土简支梁、连续梁、结合梁以及拱桥、斜拉桥、组合桥等桥式结构;钻孔灌注桩、钢围堰、预应力混凝土简支梁预制与架设、节段预制拼装、连续梁悬臂施工、原位支架法及移动模架施工、转体施工、无支架缆索吊装施工、大跨度桥梁施工监控、桥梁支座、桥面附属工程等的施工工艺、质量检测及控制标准等内容。

4.《隧道工程分册》,主要介绍高速铁路隧道的结构构造、技术标准及施工技术。重点突出隧道洞口工程、开挖与支护、二次衬砌、防排水、附属构筑物、辅助坑道,施工通风与防尘、超前地质预报、施工监控量测,不良地质与特殊岩土隧道、明

挖隧道、TBM 隧道、盾构隧道等的施工方法、施工工艺、质量检测及控制标准等内容。

5.《轨道工程分册》，主要介绍高速铁路轨道的结构构造及轨道的制造、运输、铺设、精调施工技术、质量检测与控制标准等内容。轨道结构的界面限定为路基基床表层以上、桥梁桥面混凝土保护层以上、隧道仰拱混凝土层以上的工程实体。重点突出 CRTS I 型、CRTS II 型双块式无砟轨道，CRTS I 型、CRTS II 型、CRTS III 型板式无砟轨道，板式无砟道岔、长枕埋入式无砟道岔施工技术；有砟轨道及道岔施工技术；无缝线路施工技术；轨道施工组织方案等。

6.《“四电”工程分册》，主要介绍高速铁路“四电”系统集成的概念、程序、内容、模式、主要原则和措施、接口管理、RAMS 管理、EMC 技术管理、风险管理、系统兼容性和匹配性、集成试验和环境保护方案；重点突出高速铁路通信、信号、牵引供电系统施工技术及电力系统供电技术，包括系统构成、关键施工技术、质量控制要点与相关接口施工、试验与检测技术等。

7.《施工测量分册》，主要介绍高速铁路施工测量体系；精密测量控制网施工复测与加密测量；路基、桥梁、隧道工程施工控制测量及竣工测量；施工期间建筑物变形监测；轨道控制网测量、各类轨道板铺设施工测量、工程竣工测量；测量仪器设备配置的基本要求等。重点突出各工序环节的测量内容、方法、技术要点及质量检验、控制标准等内容。

8.《工程试验与检测分册》，主要介绍高速铁路试验与检测的主要技术标准及施工中混凝土、路基、桥梁、隧道、无砟轨道、无缝线路的试验检测技术，重点突出高速铁路区别于普通铁路对原材料的特殊技术要求与相应的试验检测方法，以及混凝土、无缝钢轨等结构实体的试验检测等内容。

本丛书理论联系实际，内容系统完整，工程实例丰富，展现了当今高速铁路施工的最新技术及推广应用前景，可作为铁路施工企业员工的技术培训教材，也可供高速铁路设计、施工、科研人员及大专院校土木工程专业师生学习和参考。

本丛书编撰过程中，引用了大量的参考文献资料，特向原作者个人和单位表示感谢。由于编者水平所限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请读者批评指正，以便不断完善。

中铁二局总经理



2013年5月于成都

目 录

1 概 述	1
1.1 高速铁路隧道的发展现状	1
1.2 高速铁路隧道的特点	2
1.3 高速铁路隧道的分类	4
1.4 我国高速铁路隧道施工需要应对的主要技术难题	7
1.5 我国现行高速铁路隧道设计、施工主要规范规程	11
2 施工准备	12
2.1 施工调查	12
2.2 设计文件核对	13
2.3 施工方案选择及施工资源配置原则	13
2.4 施工作业指导书编制	14
2.5 施工场地及临时工程	14
3 高速铁路隧道洞口工程施工技术	18
3.1 洞口边仰坡开挖及支护	18
3.2 截排水设施	21
3.3 洞门及缓冲结构	21
3.4 明 洞	23
4 高速铁路隧道施工超前地质预报技术	27
4.1 概 述	27
4.2 隧道超前地质预报工作方法	31
4.3 超前地质预报方法选择	34
4.4 地质分析法超前地质预报	35
4.5 物探法超前地质预报	43
4.6 超前水平钻探预报技术	60
4.7 超前地质预报信息管理	63
5 高速铁路隧道开挖施工技术	64
5.1 隧道开挖施工的特点	64
5.2 隧道开挖方法的分类	64

5.3	隧道开挖一般规定	65
5.4	超欠挖控制	66
5.5	钻爆作业技术要点	67
5.6	装渣、运输及弃渣	70
5.7	全断面法	72
5.8	台阶法	77
5.9	中隔壁法	83
5.10	双侧壁导坑法	85
5.11	其他开挖方法	87
6	高速铁路隧道支护施工技术	89
6.1	大管棚施工	89
6.2	超前小导管施工	94
6.3	锚杆施工	97
6.4	钢架、W型钢带施工	102
6.5	喷混凝土施工	106
6.6	隧底处理	110
6.7	隧道注浆施工	115
7	高速铁路隧道二次衬砌施工技术	125
7.1	概 述	125
7.2	衬砌结构的形式及构造	125
7.3	模筑混凝土衬砌的施工	129
7.4	仰拱及底板施工	137
7.5	主要设备配置	139
8	高速铁路隧道防排水施工技术	141
8.1	概 述	141
8.2	防水系统设计与施工	142
8.3	结构排水系统设计与施工	162
8.4	施工排水系统	165
8.5	隧道涌水量估算与涌水段防排水	169
8.6	寒冷地区隧道防排水	172
9	高速铁路隧道施工监控量测技术	177
9.1	概 述	177
9.2	监测项目与监测方法	177
9.3	监控量测数据分析	180
9.4	监控量测信息反馈	181

=====	
9.5 监控量测技术发展趋势	182
10 高速铁路隧道附属构筑物施工技术	186
10.1 联络通道	186
10.2 水沟与电缆槽	188
10.3 泄水洞	193
10.4 附属洞室	194
11 高速铁路隧道辅助坑道施工技术	195
11.1 概 述	195
11.2 辅助坑道设置	195
11.3 辅助坑道施工工艺流程	201
11.4 辅助坑道施工技术要点	201
12 高速铁路隧道施工通风与防尘	217
12.1 压入式通风	217
12.2 巷道式射流通风	226
12.3 隧道施工通风管理及检测	231
12.4 隧道施工防尘	232
13 不良地质及特殊岩土隧道施工技术	235
13.1 概 述	235
13.2 富水软弱破碎围岩隧道施工	235
13.3 岩溶隧道施工	240
13.4 高地应力(岩爆)隧道施工	251
13.5 瓦斯隧道施工	258
13.6 挤压和膨胀性围岩隧道施工	265
13.7 风积沙隧道施工	269
13.8 黄土隧道施工	274
13.9 高原冻土地地区隧道施工	275
14 明挖隧道施工技术	278
14.1 概 述	278
14.2 围护体系与地基加固施工	278
14.3 基坑降水施工	289
14.4 基坑开挖施工	291
14.5 钢支撑施工	294
14.6 主体结构施工	297



15 TBM 隧道施工技术 299

 15.1 概 述..... 299

 15.2 施工准备..... 302

 15.3 TBM 掘进施工 306

 15.4 TBM 运输系统 310

 15.5 仰拱预制块的生产及铺设..... 310

16 盾构隧道施工技术..... 312

 16.1 概 述..... 312

 16.2 施工准备..... 313

 16.3 盾构机进出洞..... 315

 16.4 盾构掘进施工..... 321

 16.5 盾构管片制作..... 329

 16.6 盾构隧道防水施工..... 334

参考文献..... 339

1 概 述

高速铁路行车速度高,基础设施技术标准高,尤其是线路平纵断面曲线半径远大于一般铁路,在山岭地区选线设计时必然出现大量的桥隧工程方案,隧道工程在线路总长度中所占比例和长大隧道数量也随之提高。以我国云、贵、川山岭地区新建高速铁路为例,隧道长度占线路长度的比例高达70%以上。就隧道建造施工技术而言,高速铁路隧道与一般铁路隧道之间的差异主要体现在隧道净空断面面积大小、洞口结构和轨道结构形式等方面。

1.1 高速铁路隧道的发展现状

随着世界高速铁路的迅猛发展,高速铁路隧道的建设规模越来越庞大。截至2005年底,全世界已建成的高速铁路隧道总长度已超过1300 km,其中日本784 km、法国50 km、德国210 km、西班牙15.8 km、意大利71 km、英国26 km、韩国116 km、中国台湾地区44 km。

世界上建设高速铁路最早的国家是日本,1964年建成运营的日本东海道新干线是世界上第一条高速铁路。考虑工程建设的经济性,也因当时对隧道空气动力学缺乏相关的实践经验,日本新干线隧道的净空断面积较小,单洞双线隧道断面净空有效面积只有62~64 m²,是目前世界各国双线高速铁路隧道中断面积最小者。为了与已建成的新干线相匹配,在适应较小的隧道净空断面面积条件下,日本高速列车头部都设计为流线型,车体也加强了密封性,扩大隧道断面的方法至今没有采用。考虑到高速铁路空气动力学特性,日本高速铁路隧道都采用单洞双线断面,较少采用双洞单线的断面。即使长度大于20 km的隧道,如八甲田隧道、岩手一户隧道、饭山隧道等,也没有采用两座单线隧道方案。早期的新干新隧道内一般采用碎石道床,后来修建的隧道内一般采用无砟轨道,并且以板式无砟轨道居多。

除日本外,德国、韩国、法国、意大利、英国、西班牙、荷兰、瑞士等国家和中国台湾地区已建成高速铁路隧道。其中,德国规定高速铁路单洞双线隧道的净空有效面积,客货共线铁路为82 m²,客运专线铁路为92 m²,是世界各国高速铁路中较大的,且基本上都采用无砟轨道;韩国首尔至釜山高速铁路单洞双线隧道净空有效面积采用107 m²,是世界各国高速铁路隧道中断面最大的。一般隧道内采用有砟轨道,特长隧道和后期修建的高速铁路隧道多采用无砟轨道。

我国高速铁路建设起步较晚,但发展更为迅速,已经是世界上高速铁路运营总里程最长的国家。进入21世纪以来,目前已建、在建和拟建的铁路隧道总长度超过5000 km,其中,高速铁路隧道2000 km以上,超过世界其他国家高速铁路隧道的总和。我国各客运专线中,长度大于10 km的特长隧道共有8座,分别是石太线的太行山隧道(27839 m)和南梁隧道(11526 m)、合武线的大别山隧道(13256 m)和金寨隧道(10766 m)、温福线的霞浦隧道(13099 m)、武广线的大瑶山一号隧道(10081 m)、广深港线的狮子洋隧道(10800 m)、厦深线的大南山隧道(12701 m)。其中狮子洋采用盾构法施工,其他隧道均采用钻爆法施工。

我国在充分研究和吸取国外高速铁路隧道建设经验基础上,制定了高速铁路隧道的净空有效面积标准(表 1-1),是世界上高速铁路隧道净空有效面积较大的国家,仅次于韩国。采用较大的隧道净空有效面积增加了隧道建设期的资金投入和施工难度,但降低了对机车车辆密封性和牵引能力等方面的技术要求,更利于保障列车的舒适度和安全性,降低运营成本。同时,我国规定设计行车时速小于等于 250 km、长度小于 6 000 m 的高速铁路隧道内的轨道结构与全线轨道结构一致,一般采用有砟轨道;设计行车时速高于 250 km、长度大于 6 000 m 的高速铁路隧道内采用无砟轨道。

表 1-1 中国高速铁路隧道净空有效面积标准 (单位: m^2)

序号	类别	单线	双线
1	200 km/h 客运专线兼顾货物运输	52(53.6)	80(85)
2	250 km/h 高速铁路	58(60)	92
3	300~350 km/h 高速铁路	70	100

注:括号内数值为客运专线兼顾双层集装箱运输条件下,考虑特定接触网高度等因素的面积。

1.2 高速铁路隧道的特点

高速铁路的主要服务对象是旅客,高速铁路建设的首要目标是保证乘客在列车高速运行过程中的舒适度和安全性,并且能保证列车以设计的运行速度按时到达目的地。

相对于普通铁路隧道,高速铁路隧道的特点主要是与列车空气动力学相关。当列车进入隧道时,原来占据着空间的空气被排开,空气的黏性及隧道壁面和列车表面的摩阻作用使得被排开的空气不能像在隧道外那样及时、顺畅地沿列车两侧和上部形成绕流。于是,列车前方的空气受到压缩,列车后方则形成一定的负压,产生一个压力波过程。这种压力波又以声速传播至隧道口,形成反射波,回传、叠加,产生一系列复杂的空气动力学效应。

表 1-2 列示了高速铁路隧道空气动力学效应,这种空气动力学效应对旅客的舒适感、列车运行速度和安全性产生重大影响。

表 1-2 高速铁路隧道空气动力学效应及影响

空气动力学效应		对隧道设计和运营的影响
瞬变压力	车内瞬变压力	旅客舒适度,洞内养护人员危害
	车内压力波动幅度与频率	旅客和乘务员的健康
	隧道内压力峰值	隧道衬砌和设施的气动荷载
	车体内外压差	车辆结构的气动荷载
洞口微气压波(爆破噪声)		隧道口声环境和建筑物安全
列车空气阻力	平均阻力	牵引计算
	过程阻力	限坡
空气流动	列车风	洞内维护人员和隧道设施的安全
	空气动压	

相对于普通铁路隧道,高速铁路隧道的研究必须考虑空气动力学效应,更突出以下几个方面的特殊性。

(1)隧道净空有效面积和列车横截面积。瞬变压力是高速铁路隧道空气动力学效应的主要指标,影响瞬变压力的因素包括隧道净空有效面积、隧道长度、隧道壁面摩擦系数以及列车横截面积、车形、列车长度、列车表面摩擦系数等。试验表明,诸因素中列车速度 v 和阻塞比 β 是对隧道内压力及列车上压力波动程度起主导作用的因素。在线路设计行车速度确定的情况下,阻塞比是主要可变因素。

阻塞比 $\beta=A_t/A_v$,由隧道净空有效面积 A_v 和列车横截面积 A_t 决定。

隧道净空断面还对列车的牵引动力产生影响。对于高速铁路空气阻力是总阻力的主要组成部分。在隧道中这种阻力又将比在明线运行时有明显的增加,这是线路设计时需要考虑的。按非恒定流模型计算高速列车的空气阻力,在隧道内的空气阻力最大可达到明线阻力的2.05倍(双线)和2.42倍(单线)。在其他计算条件不变的情况下,列车速度越大,空气阻力最大值越大;隧道断面越大,对降低空气阻力的作用越大。

(2)隧道的洞口形式。高速铁路隧道洞口形式对隧道洞口的微气压波影响重大。高速列车进入隧道,前方的空气受到挤压以声速传播至隧道出口,骤然膨胀,产生一个被称为微气压波的次生波。由于微气压波的产生伴有影响环境的爆破噪声,并会对邻近建筑物产生危害。因此,与消减瞬变压力一样,微气压波成为高速铁路隧道设计中的重要课题。

列车从无边界的空间骤然进入被轮廓所限定的有限空间,致使前方空气受到挤压是产生微气压波的根本原因。在隧道洞口设置净空断面积大于隧道净空断面积的缓冲结构,可以缓解列车运行空间条件骤变的程度,从而起到消减微气压波的作用。缓冲结构的形式按断面变化的规律可分为两类:断面渐变的喇叭形和断面突变的阶梯形。此外,研究还表明,在缓冲结构上开窗能显著改善或缓解微压波的作用,最佳开口率为0.3左右。对不开口的缓冲结构断面积取隧道断面积的1.55倍最佳;开窗的缓冲结构断面积取隧道断面积的1.3倍时即有显著效果;缓冲结构的长度宜在隧道洞径的2倍之内。

(3)列车头部形状。高速铁路隧道洞口产生的影响环境和危害邻近建筑物的爆破噪声由微气压波造成,而微气压波主要取决于列车进入隧道诱发的第一个压缩波(或称“首波”)。试验表明,列车头部形状(主要指标是其细长比)对第一压缩波峰值的影响很大。以 $v=350\text{ km/h}$ 为例,长细比为1、2和3的流线型车头,压力峰值分别为钝形车头的73%、58%和50%,压力梯度也呈下降趋势。因此,选择长细比大的流线形车头是缓解微气压波的一个重要措施。

(4)车辆密封性。车辆内部的瞬变压力与旅客乘车舒适度有直接关系,隧道内瞬变压力向车辆内传递的规律取决于车辆的密封性和车体的刚度两个因素。当车辆完全不密封,即车内外空气的质量交换完全无阻尼时,车外压力与车内压力相等;当车辆完全密封,即车内外空气无质量交换、车体的刚度又较大时,则车外的压力瞬变对车内无影响。实际上,以上两种极端情况都是不存在的。车辆密封性对缓解压力波动程度的作用可以归为滞后和衰减,在线路条件一定的情况下,车辆的密闭性往往决定了旅客乘车舒适度。

采用较小的隧道净空有效面积,如日本新干线,可以节约前期建设投资,但需要在车辆的密封性和车体的刚度方面加大投入,从全寿命周期成本角度考虑不一定经济。因此,国际上较晚修建的高速铁路隧道,如德国、韩国、中国等,一般采用较大的隧道净空有效面积。

(5)隧道结构的耐久性。试验表明,高速列车运行引起的冲击振动和空气压力波动是影响结构耐久性的主要因素。隧道内空气动力荷载最大值都为kPa量级,作用在衬砌法向方向的荷载为纵向方向荷载的2~6倍,对隧道衬砌的安全性不会产生明显影响,但对隧道衬砌结构