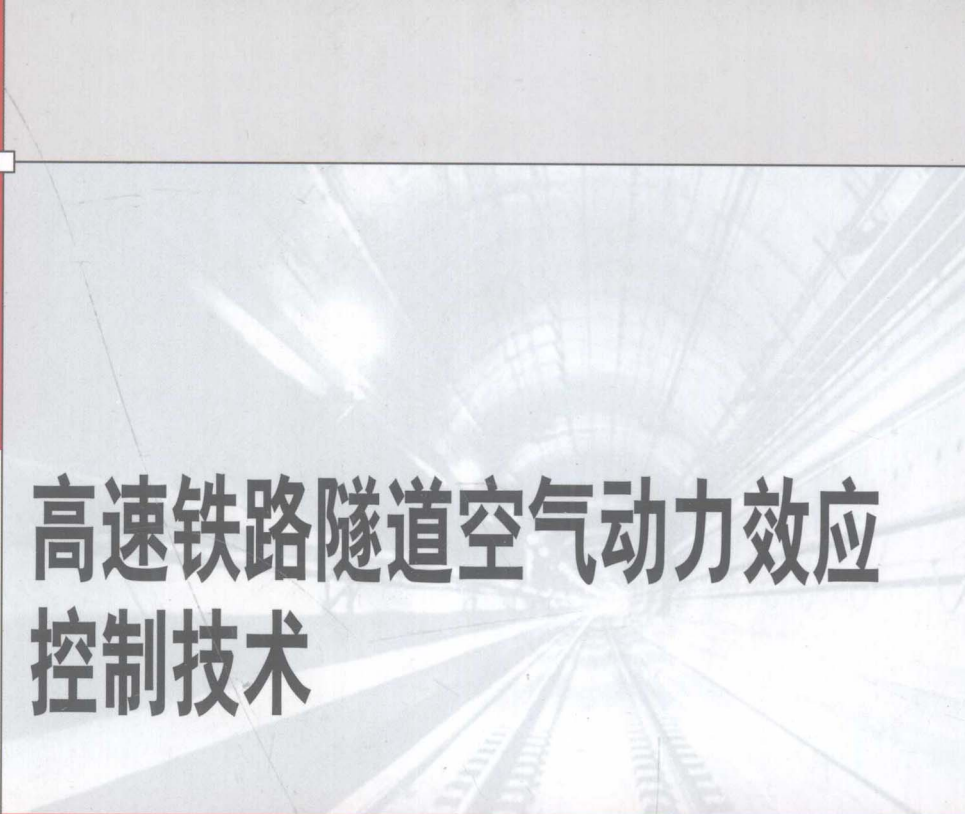




高速铁路隧道空气动力效应 控制技术

王英学 高 波 朱 丹 著
肖明清 徐向东 赵文成



科学出版社

高速铁路隧道空气 动力效应控制技术

王英学 高 波 朱 丹 著
肖明清 徐向东 赵文成

科学出版社

北 京

前 言

高速铁路运输作为节能、环保的运输方式，一直是我国交通运输行业发展的主方向，它不仅承担了电煤、粮食等重要战略物资的运输，也是人们中长途出行的首选交通工具。20 世纪 70 年代，日本和欧洲各国开始高速铁路的建设。我国从 20 世纪末开始建设高速铁路，经过十几年的发展，我国高速铁路建设已经进入快速发展阶段。郑西、武广、京沪等时速 350km 客运专线的建设和正式运行，标志着我国高速铁路技术的成熟和完善。

我国幅员辽阔，山岭众多，而高速铁路的列车运行速度快，要求线路曲率半径大、线路平顺，在高速铁路的线路中必然出现大量的隧道工程。根据规划，客运专线隧道建设总长度将超过 1000km，已经开工和即将开工建设的高速铁路隧道长度近 900km。高速铁路隧道的设计不同于低速运行的铁路隧道，不仅要考虑结构的安全性和耐久性，同时要考虑高速列车通过隧道时所引起的气动效应对车上乘客和隧道出口外环境的影响。20 世纪 70 年代，日本高速铁路的行车速度达到 200km/h 时，就曾出现相关的车隧气动效应问题。

根据研究表明，当列车速度超过 200km/h 时，空气阻力占总阻力的 60% 以上，成为运行的主要阻力；高速列车穿越隧道时，会在隧道出口产生低频噪声，引起窗户震动和音爆现象；列车通过隧道时会引起车厢内压力波动，乘客的耳部不适，使列车的舒适度降低等。如果不在隧道的设计和建设初期对隧道和车辆采取相应的技术措施，将会对乘客和周围环境造成影响，并直接制约高速铁路事业的健康发展。

本书是在对国内外高速铁路隧道车隧气动效应研究文献和成果调研分析的基础上，总结多年来的研究成果撰写而成，以期为高速铁路车隧气动效应的治理和隧道建设提供参考和借鉴。

全书共 4 章，包括绪论、高速铁路隧道空气动力学基本理论及研究方法、缓解空气动力效应的主要措施、典型工程应用。各章节的分工如下：第 1 章由西南交通大学高波撰写；第 2 章、第 3 章由西南交通大学王英学撰写；第 4 章由中铁第四勘察设计院集团有限公司的教授级高工朱丹、肖明清、徐向东、赵文成撰写；全书由王英学统稿定稿。

在撰写过程中，博士生导师王建宇研究员对本书的内容规划给予了悉心指导，北京交通大学的骆建军副教授给出了很多建议，中铁二院工程集团有限责任公司赵万强教授级高工、陈赤坤教授级高工、郑长青高工，中铁第一勘察设计

院集团有限公司的教授级高工王新东、高工张竹清，西南交通大学土木工程学院地下工程系的申玉生副教授、周佳媚副教授、全晓娟副教授给出了许多建议和指导。在此对他们一并表示感谢。

由于时间仓促，书中难免存在一些疏漏或不足之处，敬请专家及读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 世界高速铁路的发展概况	1
1.1.1 国外高速铁路发展情况	2
1.1.2 我国高速铁路发展情况	5
1.2 高速铁路隧道气动效应研究	6
1.2.1 高速铁路隧道的特点	6
1.2.2 世界各国及地区高速铁路隧道技术要点	6
1.2.3 我国高速铁路隧道的特点	8
1.2.4 车隧气动效应的解决方法	8
1.3 本书主要内容	12
参考文献	13
第 2 章 高速铁路隧道空气动力学基本理论及研究方法	14
2.1 车隧气动效应产生机理	14
2.1.1 车隧气动效应问题的提出——微气压波及瞬变压力	14
2.1.2 气动效应影响因素分析	17
2.1.3 列车的压力舒适度问题	24
2.1.4 隧道线路相关问题	30
2.1.5 小结	38
2.2 高速铁路隧道空气动力学研究方法	39
2.2.1 模型试验研究	39
2.2.2 数值模拟方法的研究	46
2.2.3 现场测试技术及方法	51
2.2.4 小结	55
参考文献	56
第 3 章 缓解空气动力效应的主要措施	59
3.1 洞口缓冲结构缓解效果分析及工程应用	59
3.1.1 断面扩大无开口型缓冲结构	59
3.1.2 喇叭形缓冲结构	65
3.1.3 开口型缓冲结构的作用机理	73

3.2 竖井缓解效果分析及工程应用	90
3.2.1 竖井缓解气动效应原理	90
3.2.2 竖井缓解气动效应参数分析	93
3.2.3 小结	99
3.3 横通道缓解效果分析及工程应用	99
3.3.1 横通道缓解气动效应原理	99
3.3.2 横通道缓解气动效应参数分析	103
3.3.3 小结	113
参考文献	114
第4章 典型工程应用	115
4.1 遂渝铁路缓解车隧气动效应措施研究	115
4.1.1 工程背景	115
4.1.2 无缓解措施车隧气动特性分析	115
4.1.3 有缓冲措施时车隧气动特性分析	124
4.1.4 小结	131
4.2 京沪铁路缓解车隧气动效应措施研究	135
4.2.1 工程背景	135
4.2.2 缓冲设施缓解微压波气动效应措施综合分析	136
4.2.3 小结	148
4.3 地下车站缓解车隧气动效应措施研究	149
4.3.1 工程背景	149
4.3.2 地下车站缓解压力舒适度综合措施分析	150
4.3.3 磁浮地下车站缓解压力微压波综合措施分析	175
参考文献	192

第 1 章 绪 论

1.1 世界高速铁路的发展概况

自 1903 年德国西门子公司生产首列速度达到 200km/h 以上的电力机车以来^[1], 高速铁路的发展已有一个世纪的历史了, 高速铁路事业有了突飞猛进的发展, 已经成为铁路现代化的重要标志。

铁路运输远远早于汽车运输, 1825 年 9 月 27 日, 世界上第一条铁路在英国 Stockton 和 Darlington 之间开通, 利用蒸汽机车牵引列车。19 世纪末, 铁路运输业进入第一个高速发展时期, 全球铁路总长超过 120 万 km。进入 20 世纪以后, 汽车、航空、水运和管道运输迅速发展, 汽车的短途客货运输量逐渐超过了铁路运输。尤其是高速公路网的形成, 不仅吸引了大量的中短途旅客, 而且大型集装箱运输能快捷方便地到达目的地, 使公路运输成为中短途货运的主要手段。各国铁路客货运输量逐年下降, 尤其是在发达国家出现了大幅度下降, 铁路运输业连年经营亏损。到了 50 年代, 在发达国家铁路运输业已成为夕阳产业。

1964 年 10 月, 日本建成世界上第一条现代化高速铁路——东海道新干线, 列车运营速度为 210~230km/h, 运行时间误差低于 1min, 耗能为汽车的 1/5, 无废气排放。这条高速线在几十年的运营中, 吸引了东京至大阪 90% 的乘客, 取得了举世瞩目的成就。由此, 铁路运输尤其是高速铁路运输引起世界各国的高度重视。

近二十年来, 一些经济技术发达的国家相继修建了高速铁路。高速铁路速度目标值一直在提高, 比过去的运营速度上了两个台阶。20 世纪 60 年代到 80 年代初, 列车速度由 210km/h 提高到 250km/h, 80 年代中到 90 年代末, 列车速度由 250km/h 提高到 300km/h。目前, 高速列车的线路运行速度达到 350km/h。在京沪线的试运行期间, 高铁启用国产“和谐号”CRH380A 新一代高速动车组。在沪杭高铁试运行期间, 最高时速达到 416.6km/h, 刷新世界铁路最高运行时速。

1970 年 5 月, 日本政府在第 71 号法律《全国新干线铁路整備法》中规定: “列车在主要区间能以 200km/h 以上速度运行的干线铁路称为高速铁路”。这是世界上第一个以国家法律条文的形式给高速铁路下的定义。1985 年 5 月, 联合国欧洲经济委员会将高速铁路的列车最高运行速度规定为: 客运专线 300km/h,

客货共线 250km/h。1986 年 1 月, 国际铁路联盟秘书长勃莱认为, 高速列车最高运行速度应不小于 200km/h。因此, 国际上目前将列车最高运行速度大于等于 200km/h 的铁路称为高速铁路, 我国把新建最高运行速度不小于 250km/h 和改建既有线最高运行速度不小于 200km/h 的铁路称为高速铁路^[2]。这就给出了高速铁路更为明确清晰的定义。

如果以国际铁路联盟规定的最高运行速度应不小于 200km/h 作为高速铁路的定义, 则符合条件的国家除中国以外, 还有日本、法国、德国、西班牙、英国、意大利、瑞典、芬兰、美国、韩国和俄罗斯, 以及巴黎—布鲁塞尔—科隆/阿姆斯特丹高速线(法国、比利时、德国和荷兰区域)和“欧洲之星”线(英国、法国和比利时区域)。下面对日本、法国、德国、西班牙、意大利、英国的高速铁路发展状况作简单介绍。

1.1.1 国外高速铁路发展情况^[3]

1. 日本

日本是世界上第一个运营高速铁路的国家, 1964 年开始东海道(东京—大阪)高速铁路运输。它的成功运营促进了其他高速干线(表 1.1.1)的建设。2006 年初, 新干线高速铁路网由 6 条专用线组成, 总长度为 2175.2km, 还包括两条改建线路——山形线和秋田线。根据日本的高速铁路网扩建计划, 预计至 2013 年还将建设 5 条高速线, 总长度为 1141.3km, 见表 1.1.1。

表 1.1.1 日本高速铁路线

线 路	线路长度/km	开始运营年份/年	最高速度/(km/h)
东京—大阪(东海道线)	515.4	1964	270
大阪—博多(山阳线)	553.7	1972/1975(分阶段)	300
东京—盛冈—八户(东北线)	593.0	1982/2002(分阶段)	275
东京—新潟(上越线)	269.5	1982	275
高崎—长野(北陆线)	117.4	1997	260
八代—鹿儿岛(九州岛线)	126.1	2004	260

2. 法国

法国高速干线和机车车辆的设计始于日本东海道新干线商业运营成功之后。1981 年首次在欧洲运营的 TGV 列车(高速列车)是经特殊制造的, 用于巴黎—里昂的旅客运输, 最高速度为 260km/h, 后来速度提高到 270km/h。目前这些线路称为 LGV 线路, 见表 1.1.2。

表 1.1.2 法国高速铁路线

线 路	线路长度/km	开始运营年份/年	最高速度/(km/h)
巴黎—里昂 (LGV 东南线)	427	1981/1983	270
里昂—瓦朗斯 (LGV 东南线)	83	1994	270
里昂环线	38	1992	270
巴黎—勒芒/图尔 (LGV 大西洋线)	282	1989/1990	300
巴黎—里尔—加来/比利时边界 (LGV 北欧线)	333	1993	320
巴黎环线	104	1995	—
瓦朗斯—马赛—蒙彼利埃 (LGV 线)	302	2001	300

3. 德国

德国第一批高速线路于 1991 年投入运营, 线路总长度达 2620km, 见表 1.1.3。允许最高速度为 280km/h (科隆—法兰克福线路最高速度为 300km/h)。

表 1.1.3 德国高速铁路线

线 路	线路长度/km	开始运营年份/年	最高速度/(km/h)
汉诺威—维尔茨堡	327	1988/1991	280
曼海姆—斯图加特	99	1991	280
柏林—汉诺威	264	1998	280
科隆—法兰克福	177	2002	300 (330)

4. 西班牙

目前, 在西班牙国营铁路 (REN FE) 网内有 4 条高速线路 (表 1.1.4), 运行 AVE 系列高速列车。

表 1.1.4 西班牙高速铁路线

线 路	线路长度/km	开始运营年份/年	最高速度/(km/h)
马德里—塞维利亚	471	1992	300
马德里—托莱多	74	2005	270
马德里—莱利达	481	2003/2005	200 (350)
马德里—巴塞罗那	640	2008	300

5. 意大利

意大利正式运营的高速线路有两条：新建专线罗马—佛罗伦萨，长 252km，用于运营旅客列车和货物列车及最高速度为 250km/h 的 ET R 系列动车组；在建线罗马—那波利之间的第一阶段，长度为 186km。自 2005 年 12 月运营以来的高速列车最高速度为 300km/h（表 1.1.5）。

表 1.1.5 意大利高速铁路线路

线 路	线路长度/km	开始运营年份/年	最高速度/(km/h)
罗马—佛罗伦萨	252	1977/1992（分阶段）	250
罗马—那波利（第一阶段）	186	1999/2005（分阶段）	300

根据意大利的高速网的扩建计划，其将新建复线区段，设计最高速度为 300km/h，旅客列车和货物列车混合运行（表 1.1.6）。

表 1.1.6 意大利铁路计划修建的新高速铁路

线 路	线路长度/km	竣工的年份/年
都灵—诺瓦拉—米兰（第一阶段）	84	2006 年交付运营
都灵—诺瓦拉—米兰（第二阶段）	41	2009
米兰—博洛尼亚	182	2007
博洛尼亚—佛罗伦萨	79	2008
罗马—那波利（下一个阶段）	18.5	2008
米兰—维罗纳	112	2008
维罗纳—威尼斯	100	2008
米兰—热那亚	54	2008

6. 英国

目前，英国有以下 3 条线路运行高速列车：

（1）伦敦—爱丁堡（东海岸干线），长度为 632km，包括改建线路，能够运行最高速度为 225km/h 的列车。

（2）伦敦—曼彻斯特（改建线路），长度为 296km，是长度为 642km 伦敦—格拉斯哥（西海岸干线）运输走廊的一部分。从 2004 年开始，此改建线路可运行最高速度为 200km/h 的列车。

（3）英国铁路与欧洲大陆高速铁路网干线铁路伦敦—拉芒什海峡隧道（海底隧道，总长度为 108km）的第一区段长 74km 的线路于 2003 年投入运营，可运行最高速度为 300km/h 的列车。

1.1.2 我国高速铁路发展情况

党的“十六大”以来,铁路现代化建设步伐加快,并取得了显著成绩,高速铁路发展成就尤为突出。自1997年以来,我国铁路进行了六次提速。

第一次:1997年4月1日,开行最高时速140km的40对快速列车和64列夕发朝至车。

第二次:1998年10月1日,最高时速达到140~160km。

第三次:2000年10月21日,提速范围主要是陇海线、兰新线、京九线和浙赣线。

第四次:2001年11月21日,提速范围主要是京九线、武昌—成都(汉丹、襄渝、达成)、京广线南段、浙赣线和哈大线。

第五次:2004年4月18日,京沪、京广、京哈等干线铁路提速区段列车最高时速可以达到160km/h。

第六次:2007年4月18日,我国铁路第六次大面积提速调图正式付诸实施,主要干线开始“时速200km”的高速运行,我国铁路开启“追风时代”。

至此,我国完成了对铁路既有线路的提速。进入高铁技术宠儿“和谐号”的时代,成为与德国的ICE、法国的TGV、欧洲的“欧洲之星”、日本的新干线系统并列的高铁系统。目前,我国已经有多条高铁线路投入运营,并有多条规划线路。

中国台湾的台北—高雄的高铁线路全长345km,设计时速为350km,于2000年开工建设,2007年投入运营。

我国内地目前已经开通的高铁线路及开通时间如下:

2008年8月1日,京津城际高铁通车;

2009年4月1日,石太客运专线通车;

2009年9月28日,温福、甬台温铁路通车;

2009年12月26日,武广高铁建成通车;

2010年1月28日,郑西高铁建成通车;

2010年4月26日,福厦高铁通车;

2010年5月1日,成灌高铁通车;

2010年7月1日,沪宁高铁通车;

2010年9月20日,昌九城际高铁通车;

2010年10月26日,沪杭高铁通车;

2010年10月26日,宁杭高铁通车。

我国规划建设的“四横四纵”高速铁路客运网已经初具规模。

“四纵”客运专线:

(1) 北京—上海,全长约1318km,纵贯京、津、沪和冀、鲁、皖、苏四

省, 连接环渤海和长江三角洲经济区。

(2) 北京—武汉—广州—深圳, 全长 2260km, 连接华北、华中和华南地区。

(3) 北京—沈阳—哈尔滨(大连), 全长约 1700km, 连接东北和关内地区。
秦皇岛—沈阳客运专线已于 2003 年建成。

(4) 上海—杭州—宁波—福州—深圳, 全长约 1600km, 连接长江、珠江三角洲和东南沿海地区。

“四横”客运专线:

(1) 徐州—郑州—兰州, 全长约 1400km, 连接西北和华东地区。

(2) 杭州—南昌—长沙, 全长约 880km, 连接华中和华东地区。

(3) 青岛—石家庄—太原, 全长约 770km, 连接华北和华东地区。

(4) 南京—武汉—重庆—成都(宁汉蓉), 全长约 1600km, 连接西南和华东地区。

根据我国《中长期铁路网规划》, 到 2020 年全国铁路营业里程达到 12 万 km 以上, 建设客运专线 1.6 万 km 以上^[2]。到 2012 年, 我国铁路营业里程将达到 11 万 km 以上, 其中新建高速铁路将达到 1.3 万 km。邻近省会城市将形成 1~2h 交通圈、省会与周边城市形成半小时至 1 小时交通圈。北京到全国绝大部分省会城市将形成 8h 以内交通圈。再经过几年努力, 到 2020 年, “人便其行、货畅其流”的目标将成为现实。而我国的高铁建设在分析总结前期建设经验和成果的基础上, 将很快进入快速发展期, 中国高铁事业的黄金时代将很快到来。

1.2 高速铁路隧道气动效应研究

1.2.1 高速铁路隧道的特点

高速铁路隧道与一般铁路隧道相比有较多不同之处。高速铁路隧道的特点主要与列车空气动力学相关。当列车进入隧道时, 原来占据空间的空气被排开。空气的黏性及隧道壁面和列车表面的摩擦阻力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统流。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, 因而产生一个压力波动过程。这种压力波动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。高速铁路隧道工程的研究涉及隧道的洞口形式、隧道及列车的横断面积、列车头部形状、车辆密封性、隧道结构的耐久性、洞内设施及轨道类型等一系列问题。

1.2.2 世界各国及地区高速铁路隧道技术要点^[2]

1. 日本新干线隧道

日本建设高速铁路隧道历史最久, 数量最多。日本新干线铁路隧道多采用单

洞双线断面,其净空有效面积只有 $62\sim 64\text{m}^2$,是目前世界各国双线高速铁路隧道中断面最小的。为提高乘车舒适度和降低洞口微气压波,日本新干线铁路隧道采用了提高列车密封性能和在洞口设置缓冲结构的措施。早期的新干线隧道内一般采用碎石道床,后来修建的隧道内一般采用无碴轨道结构,并且以板式无碴轨道居多。

2. 韩国高速铁路隧道

韩国首尔至釜山高速铁路列车运行速度设计目标值为 350km/h ,隧道净空有效面积 107m^2 ,是世界各国高速铁路隧道中断面最大的。一般隧道内采用有碴轨道,特长隧道和第二期修建的隧道多采用无碴轨道,洞口采用喇叭口状的斜切式结构。

3. 德国高速铁路隧道

德国早期修建的曼海姆—斯图加特和汉诺威—维尔茨堡高速铁路,隧道净空有效面积 82m^2 ,而2002年建成通车的科隆—法兰克福高速铁路隧道净空有效面积 92m^2 ;洞口形式大多采用帽檐式的斜切式结构,有利于提高乘车舒适度和减缓高速铁路隧道的空气动力学效应。德国高速铁路隧道设置有完善的防灾救援系统,隧道内两侧设有贯通的救援通道,洞口一般设有救助车辆停放场,并且通过便道与公路网连通,救援交通较为便利。

4. 法国高速铁路隧道

法国高速铁路隧道相对较少,其净空有效面积与各线路列车的运行速度密切相关。大西洋线的双线隧道净空有效面积为 $55\sim 71\text{m}^2$,巴黎地区联络线双线隧道净空有效面积仅有 58m^2 ,而北方线、东南延伸线和地中海线的双线隧道净空有效面积均为 100m^2 ,单线隧道净空有效面积为 70m^2 。法国大部分高速铁路隧道采用碎石道床结构,隧道内设置避车洞,侧壁上设人行扶手杆。

5. 西班牙高速铁路隧道

西班牙第一条高速铁路设计行车速度目标值为 300km/h ,双线隧道净空有效面积 75m^2 ;第二条高速铁路设计行车速度目标值为 350km/h ,双线隧道净空有效面积 100m^2 。

6. 我国台湾地区高速铁路隧道

我国台湾台北—高雄高速铁路设计行车速度目标值为 350km/h ,考虑隧道内空气动力学效应,净空有效面积采用 90m^2 。对于长度大于 3km 的隧道,为防

止列车出洞时引起突爆噪声,隧道洞口采用挑檐式、斜度为 45° 的斜切式结构,另设置缓冲结构扩大段,其净空有效面积是正常隧道段的1.5倍,顶部设两处开孔,将微气压波逐渐释放。台湾高速铁路隧道为避免影响区域水文变化,对长度大于3km的隧道,大部分设计为不排水型,并全部采用钢筋混凝土衬砌。

1.2.3 我国高速铁路隧道的特点^[2]

我国高速铁路隧道除具有各国高速铁路隧道的共性外,还具有如下特点。

1. 隧道座数多,长度长

已经开工和拟开工建设的高速铁路隧道达660余座,总延长超过890km,包括规划的高速铁路隧道,总延长将超过1000km。石太线太行山特长隧道是现今亚洲最长的山岭隧道,也是世界行车速度目标值最高的特长隧道之一;规划即将建设的青藏线西宁至格尔木段增建第二线的新关角隧道,设计客车速度目标值为200km/h,长度超过太行山隧道。

2. 隧道内行车速度目标值高,相关工程技术标准要求高

我国高速客运专线隧道设计行车速度目标值为350km/h,如京沪线、郑武线、武广线、广深港线、郑西线、哈大线,为世界上行车速度目标值最高的铁路线路。运营初期客货共线隧道设计行车速度目标值不小于250km/h,并且大部分隧道采用无碴轨道,技术标准要求高。

3. 隧道分布区域广,所处环境和地质情况复杂

我国高速铁路隧道分布在东北、华北、华东、中南、东南沿海及中西部地区,所通过的地形及地质情况异常复杂,尤其是武广客运专线隧道通过岩溶地区,郑西线、石太客运专线部分隧道在黄土地区,有下穿高速公路和既有建筑物的隧道,有位于自然保护区的隧道,有穿越珠江狮子洋水域的水下隧道,有穿越浏阳河和长沙市区的浏阳河隧道,有下穿天津市的海河隧道,还有通过采空区的山岭隧道等。总之,建设环境和地质情况复杂。

1.2.4 车隧气动效应的解决方法

由于高速列车在隧道中行驶产生的空气动力效应,如瞬变压力、空气动力阻力、气动噪声等,它们将影响旅客和作业人员的安全、舒适度,干扰洞口附近的环境,增加牵引能耗量或者降低隧道通过能力。这是关系到改善运营条件、提高经济效益和社会效益的重要问题,因此,在隧道设计中必须认真考虑。这也是高

速铁路隧道设计与一般隧道设计相比较的突出特点。

目前,在高速铁路的隧道设计中,绝大多数的隧道在设计中考虑了修建减缓车隧气动效应的工程设施。缓冲设施的设计是高速铁路隧道设计的重要内容,它直接影响着隧道断面的选取、车辆密封参数的选定、工程投资的大小及缓解气动效应的效果等多方面内容。

目前广泛采用的缓冲设施方案包括以下几种形式^[4]。

1. 增大隧道断面,减小阻塞比

增大隧道断面、减小阻塞比是降低车隧气动效应强度、提高列车舒适性的有效途径。在隧道断面扩大到一定程度以后,车隧气动效应可以达到缓解,甚至完全消除。

压缩波和微压波释放现象首先由日本学者提出并对其开展研究工作,其原因是:一方面,日本高速铁路建设时间较早,另一方面,日本高速铁路隧道选取的断面较小,容易引发压缩波和微压波释放现象的发生。例如,日本山阳新干线设计行车速度为 260km/h,隧道断面积较小,为 63.4m^2 ,而德国汉诺威—维尔茨堡高速铁路的设计速度为 250km/h,隧道断面积直墙为 82m^2 ,曲墙为 94m^2 。

增大隧道断面对于降低隧道气动效应会取得明显效果,但工程造价也有很大提高。当然,隧道断面的选取不仅要考虑工程造价,还需要考虑车辆的制造水平、密封性能、线路情况、人员对舒适度要求水平及体质情况等多种因素。

另外,对于既有线路提速的情况,扩大隧道断面将带来更大的施工难度和投资,对线路的运行也造成很大影响。

因此,线路断面的选取不仅要考虑现有的运营状态,还要考虑远期规划。

2. 改变隧道入口形式

为了降低瞬变压力和微气压波引起洞口附近的噪声干扰,可以在隧道入口处采取一些缓解压力的工程措施。

例如,在传统的隧道入口处外接一段明洞,并在其墙壁上开设通气孔(图 1.2.1)。英美有些专家认为,对这种入口边墙上的最佳开孔率为隧道横断面的 25%,沿边墙等距离排列。

3. 设置通风竖井

第七届国际铁路联盟(UIC)的试验研究报告采用 Vardy 教授的方法从理论上研究了两列列车在有通风竖井和无通风竖井的隧道中交会时,列车速度及列车进入隧道后的运行对瞬变压力的影响。

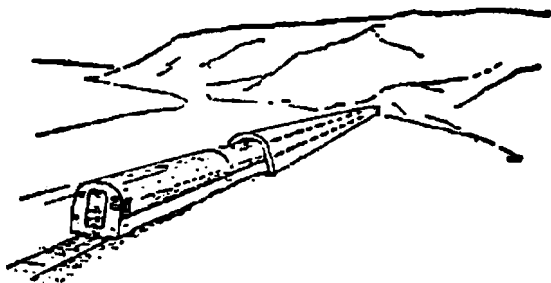


图 1.2.1 隧道洞口外接的开孔明洞

计算表明,通风竖井数量和位置的合理布置会使瞬变压力降低 50%。联邦德国铁路 (DB) 公司在 Ueberlingen 西部单线隧道中进行的试验,验证了通风竖井对瞬变压力的影响。

当考虑修建竖井 (或斜井) 时,应尽可能利用施工中留下的竖井,因此在确定施工竖井的位置时,最好能兼顾到高速列车中降低瞬变压力的要求。

4. 修建平行辅助隧道

对于特长隧道,往往因埋深很大不宜设置竖井,则可在行车的主隧道旁修建一座小断面的平行辅助隧道,且每隔一定距离用横通道与主隧道连通。

这种情况下运行时的主要特征是,每当列车经过一个横通道口就产生一次压力脉冲。虽其瞬变压力变化频繁,但强度较弱,使旅客较易承受。

5. 提高列车密封指数,改善列车性能

对于列车进出隧道所产生的压力波动最初反应在列车表面,通过列车车厢的空隙,压力才能进入车厢内部,引起乘客的乘坐舒适度降低。因此,对于具有一定密封性能的列车,车厢内外的压力波动是有一定的滞后效应的,通过改善列车性能,采用高密封指数的列车车厢可以明显改善列车车厢内的压力舒适性。同时,优化列车车型也可以使压力波动的强度有所缓解。

在解决车隧气动效应的问题上,从列车车辆与隧道工程角度都可以进行解决,到底选取哪种措施,才能取得更为有效且经济的效果呢?日本的新干线列车与隧道工程的优化可以为解决这类问题提供一个很好的范例^[5]。

日本的东海道新干线是世界上最早建成的高速铁路 (1964 年投入营运)。隧道净空断面用得较小 (隧道面积 $A_{\text{tm}} = 60.5 \text{ m}^2$, 阻塞比 $\beta = 0.22$)。在试验段进行试运行暴露了瞬变压力问题。那时,由于整个东海道新干线的隧道横断面已经确定,于是在车辆方面采取措施来满足旅客的舒适度要求。这种车辆不仅要求密封,制止瞬变压力传入车内,而且要求能提供新鲜空气。

在山阳新干线（隧道面积 $A_{\text{tun}}=63.4\text{m}^2$ ，阻塞比 $\beta=0.20\sim0.21$ ）的冈山—博多间进行试运行，又发现了微压波产生爆破噪声。其危害洞口建筑物，成为高速铁路运行引起的一种公害。日本铁路部门对此十分重视，在进行一系列试验研究的基础上，采取了以修建洞口缓冲棚为主的工程措施，并制定了设置标准，取得了良好的效果。

尽管如此，鉴于制造和维护密封车辆和修建洞口缓冲棚所引起的费用相当可观，还会带来运营的一些麻烦，在日本，仍然有人提出“是不是还是把隧道断面放大一些好”的议论。

根据计算，只要将净空断面从目前 $A_{\text{tun}}=63.4\text{m}^2$ ，放大到 82.4m^2 （同德国 NBS 一致），阻塞比相应降至 0.153，最大压力变化值至少将降低至目前的 75%，即可满足 JNR/JR 的舒适度标准（发生列车交会时除外）。从统计角度看，隧道造价粗略地同横断面积成正比。于是，有人将放大隧道断面同密封车辆两项措施作了经济比较，考虑车辆和隧道的寿命，得出的结论如下：

对于东海道—山阳新干线（由于两条线是联营的，所以合在一起考虑），加大断面更经济一些。对于东北和上越新干线，则还是密封车辆的经济性更好。当然，这种比较的结论主要同隧道在线路中所占的比重及线路运营的繁忙程度（即投入运营的车辆总数）有关（表 1.2.1、表 1.2.2）。

表 1.2.1 新干线隧道数量和投入运营的车辆

线 路	隧道数量/座	隧道总长/km	隧道占线路比例/%	车辆数/辆
东海道—山阳	208	348.3	30	2724
东北	111	112.3	24	332
上越	22	106.7	39	368

表 1.2.2 密封车辆与增大隧道断面附加成本的比较

线 路	最大速度/(km/h)	密封车辆/MYen	增大隧道断面/MYen
东海道—山阳	270	1.46×10^5	1.31×10^5
东北	240	1.78×10^4	4.21×10^4
上越	270	1.97×10^4	4.00×10^4

注：Yen 为日元。

由此可以看出，车隧气动效应是结构工程师与车辆工程师共同应对的问题，其最终的治理和解决也依赖于双方共同的努力和配合。

6. 控制微压波的其他工程措施^[6]

1) 在隧道中密集喷水

为了研究在长的风管中由部分反射和部分传播而导致入射压力波强度降低的现象，曾采用喷洒水和水帘幕法。在隧道中，使压缩波传播时通过密集喷洒的水