

板式无砟轨道充填层自密实混凝土的 研究与应用

王慧贤 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

板式无砟轨道充填层自密实混凝土的 研究与应用

王慧贤 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

作为起承力和调平功能的 CRTS III 型板式无砟轨道系统自密实混凝土调整层是一种特殊的自密实混凝土,也是板式轨道的关键工程材料之一。本书主要围绕材料配置时存在的三大技术难题开展可以满足特殊使用条件下的高流态、高均质自密实耐久混凝土(简称 FHDC)的充盈性数学模型、流变性能、体积稳定性能、耐久性能的研究,揭示特种自密实混凝土的材料—结构—性能—工艺之间的相关规律,建立可应用于长距离运输、长时间灌注、复杂薄壁空间结构、高精度要求等特殊使用条件下的自密实混凝土的材料,以及结构匹配设计、制备工艺、工程应用等方面的关键技术,以期为高铁充填层自密实混凝土的设计、制备与性能研究以及工程应用提供技术支撑。

本书适合从事自密实混凝土设计、施工、科研、管理的人员及生产人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

板式无砟轨道充填层自密实混凝土的研究与应用 /
王慧贤著. — 北京:中国水利水电出版社, 2014.12
ISBN 978-7-5170-2814-7

I. ①板… II. ①王… III. ①板式轨道—无砟轨道—
混凝土—充填法—研究 IV. ①U213.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第302718号

书 名	板式无砟轨道充填层自密实混凝土的研究与应用
作 者	王慧贤 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 7.5印张 178千字
版 次	2014年12月第1版 2014年12月第1次印刷
定 价	32.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

作为起承力和调平功能的 CRTS III 型板式无砟轨道系统自密实混凝土调整层是一种特殊的自密实混凝土,它的性能直接影响到轨道结构的平顺性、列车运行的舒适性与安全性,以及轨道结构耐久性和运营维护成本,它也是板式无砟轨道的关键工程材料之一。用于高速铁路的这种特种自密实混凝土,其材料配制有以下三大技术难点:①需具备 0~3h 超长时间可调的工作性能,满足高铁施工存在点线运输距离的不确定性以及灌注过程长时间性的问题,同时在此时间段内黏度值需精确可控,并满足在密闭大面积薄板 ($5350\text{mm}\times 2500\text{mm}\times 100\text{mm}$) 三维空间结构的充填性能;②为了满足高铁的行车舒适和安全性需求,适应高频率荷载的长期运行的服役环境,要求达到精密制造的水平(界面高差小于 0.3mm ,表面气孔率不大于 2%);③合适的力学性能、体积稳定性极高的耐久性和使用寿命。

本书依托国家 973 重点研究发展规划课题(2009CB623201),结合武汉城市圈城际高速铁路工程,针对高铁充填层自密实混凝土的主要技术瓶颈系统展开了高流态、高均质自密实耐久混凝土(High Flowability-Homogeneity-Durability Self-compacting Concrete,简称 FHDC)的研究,取得的主要成果如下:

(1) 提出了 FHDC 的设计原则。针对 CRTS III 型板充填层密闭大面积薄板空间结构的施工灌注技术,目前主要还是依赖于工程经验的问题,进行了充盈性、高精度界面控制、超长时间工作性能、长寿命等设计技术理论分析,建立了特种自密实混凝土的工作性能、力学性能、耐久性能、施工工艺方面的设计准则及其设计方案,为高速铁路无砟轨道充填层自密实混凝土的设计进行了理论基础分析研究。

(2) 掌握了 FHDC 超长输送时间下的流动性随时间变化的准确控制技术。针对长距离运输长时间灌注时流动度损失的关键问题,建立了水化热—流变模型(热—黏模型),系统研究了不同功能组分(减水、黏度改性、气相调控、矿物掺和料等)对水泥浆体初始水化历程及早期流变特性的变化规律,提出了

采用多元外加剂复合体系对水泥浆体依时流变特性的调控技术路线,为提升自密实混凝土的超长时间工作性能提供理论基础。

1) 提出了水泥初始水化流变特性模型,采用高精度黏度测试仪超低转速(0.01r/min)可准确在线检测水泥浆体的屈服应力值。研究表明,在屈服应力曲线上存在两个屈服应力突变值,第一突变值为浆体结构所能承受的极限剪切应力值,即浆体本身的屈服应力值 τ_0 ,把到达 τ_0 的时间记为 T_0 ,它依赖于水胶比、外加剂掺量、仪器设置参数等,通常是在搅拌结束5~20min达到,第二突变值为浆体从流体向塑性体转变时的结构突变值,本书定义为流变衰减屈服应力阈值 $\tau_{\max}$,对于不同的浆体,到达第二突变值所需的时间不同,但到达突变值时浆体结构的屈服应力值是确定的 $[\tau_{\max}=(80\pm5)\text{Pa}]$,把 $\tau_{\max}$ 处所对应的时间定义为流变衰减时间阈值 $T_{\text{阈}}$,根据这两个屈服应力突变值,可将水泥早期水化分为3个不同的阶段:Ⅰ:无结构的悬浮状态;Ⅱ:絮凝结构状态;Ⅲ:凝聚结构状态。

2) 建立水泥初始水化热一流变模型(热—黏模型),运用本书建立的流变特性模型,结合水化热模型,建立水泥水化热一流变模型(热—黏模型),结合水化动力学分析,提供水泥初始水化历程的热学参数及结构形成参数,将水泥水化进程中的化学反应状态及结构形成的物理状态结合起来。从而有效指导自密实混凝土在不同材料体系下初始 τ_0 设计,并为从搅拌到施工前及时调整流变衰减时间阈值 $T_{\text{阈}}$ 提供理论基础。

3) 各种功能外加剂组分对流变衰减时间阈值产生决定性的影响,在本试验条件下,功能组分随着掺量变化对流变衰减时间阈值的影响规律以及计算公式为: $T_{\text{阈}}=ax^2+bx+c$ (x 为功能组分的掺量, $T_{\text{阈}}$ 为不同掺量时的流变衰减时间阈值, a 、 b 、 c 为不同的系数)。功能组分不同,各个参数的值不同,减水功能组分为 $a=-119.05$, $b=31.786$, $c=0.8548$;黏度改性功能组分为 $a=-821.43$, $b=54.214$, $c=2.46$;引气功能组分为 $a=-304642$, $b=531.43$, $c=2.6209$;消气功能组分为 $a=0$, $b=806.45$, $c=2.6274$;矿粉功能组分为 $a=0.0013$, $b=-0.0634$, $c=2.6371$;粉煤灰功能组分为 $a=-0.0003$, $b=0.0234$, $c=2.4629$ 。

(3) 提出了FHDC充盈性与高精度界面测试方法与控制技术。针对高精密制造过程存在的黏度值过大充填不饱满、轨道板易上浮或者黏度值过小易离析泌水、界面产生浮浆层和气孔等问题,提出了用NL型可灌性仪评价充盈性和灌注界面性能的方法,并将该方法与施工现场常用检测指标——扩展度、

T_{50} 及J环高差相结合。提出了采用多元外加剂复合体系对FHDC的充盈性及高精度界面性能的有效调控技术。

1) 在原有L型仪的基础上,结合CRTSⅢ型轨道板充填层的特点对其形状尺寸及内部配筋进行了改进,增加了两个测试指标——充盈率及离析率,制备了可用来评价充盈性和灌注界面性能的NL型可灌性仪,提出采用充盈率来评价自密实混凝土充填状态,采用离析率对流动方向上不同区段混凝土的均质性做定量分析,采用拍照和Image-Pro图像软件进行处理的方式对自密实混凝土充填层的表面气泡进行评价。

2) 充填层自密实混凝土存在最佳的配合比参数,水胶比和胶凝材料总量分别为 $0.28\sim 0.32\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $550\sim 650\text{kg}/\text{m}^3$,一级粉煤灰为 $20\%\sim 40\%$,S95矿粉为 $5\%\sim 15\%$,减水剂为 $0.8\%\sim 1.2\%$,黏度改性剂为 $0.02\%\sim 0.04\%$,引气剂为 $0.0001\%\sim 0.005\%$,消泡剂为 $0.0005\%\sim 0.01\%$,粗骨料最大粒径在 $5\sim 10\text{mm}$,细骨料细度模数在 $2.5\sim 2.8$,含量范围为 $52\%\sim 56\%$,所配制出的C40充填层自密实混凝土综合性能较优,可满足流动性、充盈性、均质性及界面性能的要求。

(4) 建立了FHDC工程应用的关键技术。对大规模工业试验施工工艺进行了系统研究,包括搅拌工艺、运输工艺、灌注工艺,针对CRTSⅢ型板式无砟轨道结构特点,确定了合理的灌注工艺和成套灌注设备。所制备FHDC的主要技术指标为,灌注前:扩展度SF在 $650\sim 750\text{mm}$ 、J环高差 $B_J<12\text{mm}$,扩展时间 T_{50} 在 $2\sim 5\text{s}$,充盈率FR在 $90\%\sim 100\%$;离析率SR在 $5\%\sim 10\%$,含气量为 $3\%\sim 5\%$,硬化后:28d抗压强度不小于 40MPa ;56d电通量不大于 1000C ,56d抗冻性能不小于F300,56d干燥收缩不大于 400×10^{-6} 。该材料适用于高速铁路充填层工程结构,可提高轨道结构材料的使用寿命。

高铁实际施工工程应用研究表明,所制备的FHDC材料,有效保证了充填层自密实混凝土良好的工作性能、填充性能及较低的界面气孔率,揭板试验达到技术要求,通过权威部门检测耐久性达到指标要求。

在本书的研究过程中,得到了众多人士的帮助和支持。本书首先凝结了作者的博士生导师武汉理工大学马保国教授的大量心血,在此向他致以深切的谢意和崇高的敬意!研究期间,作者还得到了中南大学肖佳教授、武汉理工大学李相国副教授、蹇守卫副研究员、谭洪波博士后、黄健博士、张运华博士等前辈和同学的帮助和指点,以及中铁第四勘察设计院、湖北城际铁路有限责任公司、中建四局第六建筑工程有限公司在工程应用方面的支持,在此表示由衷的

感谢！最后，向所有关心和帮助过我的同志们，表示诚挚的感谢！

由于材料的性能受其多方面因素的控制和制约，本书的研究有一定的局限性。受专业素养、理论水平及可操作性能力的制约，本书研究中的方法、结构安排、文字表达等方面定会存在问题，敬请各位同行专家本着关心和爱护的态度，予以批评指正。

著 者

2015 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 高速铁路	1
1.1.2 无砟轨道技术	1
1.1.3 调整层所用材料及其研究进展	6
1.2 国内外研究现状及存在的问题	8
1.2.1 国内外研究现状	8
1.2.2 存在的问题	12
1.3 研究目标及内容	16
1.4 技术路线图	16
1.5 主要研究成果	17
1.5.1 FHDC 的设计理论基础	18
1.5.2 建立了水泥初始水化热—流变模型（热—黏模型）	18
1.5.3 FHDC 的充盈性及高精度界面测试方法与控制技术	19
1.5.4 FHDC 工程应用的关键技术	20
第 2 章 原材料及试验方法	21
2.1 主要原材料及其性质	21
2.1.1 胶凝材料	21
2.1.2 骨料	21
2.1.3 功能调整组分	22
2.1.4 水	22
2.2 试验方法	22
2.2.1 流变性能试验方法	22
2.2.2 力学性能试验方法	24
2.2.3 电通量试验方法	25
2.2.4 混凝土抗冻性试验方法	25

2.2.5	干燥收缩试验方法	25
2.2.6	早期抗裂试验	25
2.2.7	微观测试方法	25
第3章	FHDC 设计理论基础	26
3.1	FHDC 设计理论基础	26
3.1.1	密闭大面积薄板空间的充盈性设计技术理论分析	26
3.1.2	超长时间工作性能设计技术理论分析	30
3.1.3	高精度界面设计理论与技术	31
3.1.4	长寿命设计理论与技术	32
3.2	FHDC 设计准则	32
3.2.1	工作性能	32
3.2.2	力学性能	33
3.2.3	耐久性能	33
3.2.4	施工工艺	33
3.3	FHDC 设计方案	33
3.3.1	流动模型	33
3.3.2	两种设计方案	34
3.3.3	两种方案的比较	34
第4章	FHDC 流变性能与热—黏模型研究	35
4.1	水泥早期水化热—流变模型的提出	35
4.1.1	水化热性能	35
4.1.2	水泥浆体经时流变特性模型	36
4.1.3	水泥水化热—流变模型（热—黏模型）的提出	37
4.1.4	热—黏模型的动力学分析	38
4.1.5	热—黏模型的意义	40
4.2	功能组分对热—黏模型的影响规律	41
4.2.1	减水功能组分对水泥水化历程的调控作用机理	41
4.2.2	黏度改性功能组分对水泥水化历程的调控作用机理	44
4.2.3	气相调控功能组分对水泥水化历程的调控作用机理	47
4.2.4	矿物掺和料对水泥水化历程的调控作用机理	49
4.2.5	功能调整组分的优化调控技术路线	54
4.3	机理分析	55
4.3.1	XRD 测试	55
4.3.2	SEM 测试	56
4.4	本章小结	57
第5章	FHDC 的充盈性及高精度界面测试方法与控制技术	59
5.1	充盈性评价方法的建立	59

5.2	灌注界面气泡的评价方法	61
5.3	工作性能和灌注界面性能的影响因素分析	62
5.3.1	基准配合比设计	62
5.3.2	工作性能和灌注界面性能的影响因素	63
5.4	机理分析	70
5.4.1	混凝土中气泡的产生、破灭和稳定机理	70
5.4.2	均质性与表面气孔率的关系	72
5.5	本章小结	74
第 6 章	FHDC 基本性能及耐久性研究	75
6.1	配合比的确定	75
6.2	力学性能	76
6.2.1	强度	76
6.2.2	静力抗压弹性模量	78
6.3	体积稳定性能	78
6.3.1	干燥收缩性能	78
6.3.2	早期开裂性能	79
6.4	耐久性能	81
6.4.1	抗冻性能研究	81
6.4.2	电通量	83
6.5	本章小结	84
第 7 章	FHDC 工程应用研究	86
7.1	自密实混凝土施工工艺研究	86
7.1.1	搅拌工艺研究	86
7.1.2	运输工艺研究	88
7.1.3	灌注工艺研究	89
7.2	自密实混凝土质量控制	98
7.2.1	原材料质量控制	98
7.2.2	施工质量控制	99
7.3	自密实混凝土工程应用研究	100
7.4	本章小结	102
	参考文献	103

第 1 章

绪 论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 高速铁路

铁路是国家重要的基础设施、国民经济的大动脉和大众化交通工具，在综合交通运输体系中处于骨干地位^[1,2]。针对铁路运输能力不足的问题，国家提出了实现我国铁路跨越式发展的战略政策，并制订了《中长期铁路网规划》^[3-8]，根据该规划，我国将大规模建设高速铁路，建成“四纵四横”的快速客运专线以及 3 个区域（长江三角洲、珠江三角洲和环渤海）城际快速轨道交通系统，实现了主要繁忙干线客货分线运输，预计到 2020 年，我国铁路营业总里程将达到 10 万 km。

高速铁路是指通过改造原有线路，使营运速率达到 200km/h 以上，或专门修建新的“高速新线”，使营运速率达到 250km/h 以上的铁路系统^[9-13]。高速铁路是以现代高新科技装备的、全新类型的现代化铁路。由于运行速度快，且具有全封闭、全立交、高度自动化、舒适度高、安全性高、可靠性高等特点，使得高速铁路在许多国家得到快速发展^[14]。根据高速列车的支承和推进原理，高速铁路分为磁悬浮式（图 1-1）和轮轨式



图 1-1 磁悬浮列车

（图 1-2）。两者的区别如图 1-3 所示，轮轨式安全性好、造价相对较低，因此成为目前世界上成功投入商业运营的高速铁路^[15,16]。日本、德国和法国代表着世界高速铁路的科学技术水平^[17,18]，我国通过全面引进核心技术，实现了消化—吸收—再创新的飞跃，从 2008 年的第一条 350km/h 的京津城际高速铁路到 2010 年的最高 486km/h 的和谐号新一代高速动车试验列车的研制，说明我国已进入高速铁路快速发展时期^[19,20]。

1.1.2 无砟轨道技术

1.1.2.1 无砟轨道结构技术特点

高速铁路采用有砟轨道和无砟轨道两类轨道结构形式^[21]。高速有砟轨道和普通有砟

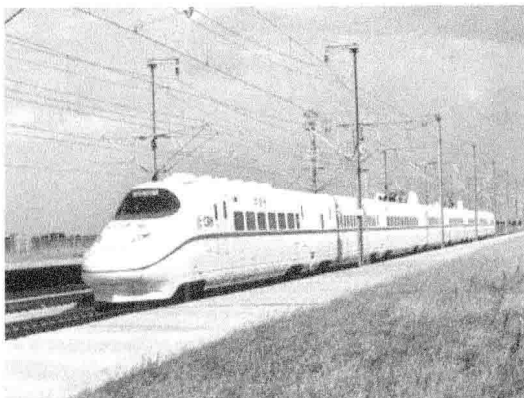


图 1-2 轮轨列车

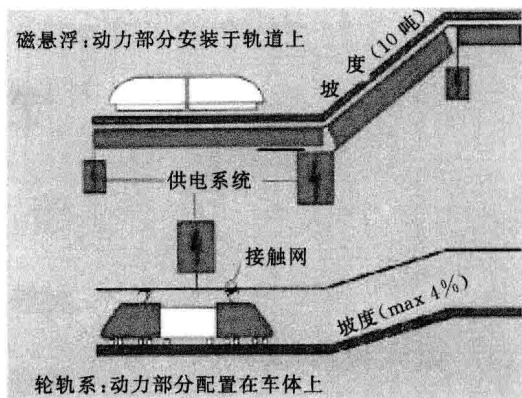


图 1-3 轮轨技术与磁悬浮技术的区别

轨道的不同之处在于轨道几何尺寸和道砟指标的要求严格，其大量应用主要以法国的高速铁路系统、德国曼海姆—斯图加特、汉诺威—维尔茨堡和意大利的高速铁路线为代表；无砟轨道没有道砟，主要由扣件系统或者弹性垫层替代原来的散粒道砟作为减振结构，主要以日本的山阳、东北及北陆等新干线以及德国的科隆—法兰克福、纽伦堡—英戈尔施塔特为代表^[22-30]。

有砟轨道具有建设费用较低、噪声传播范围相对小、建设周期短、弹性良好、破坏时修复时间较短、自动化及机械化维修效率较高、轨道超高和几何状态调整简单等优点。但在高速铁路上，石砟道床的变形极快，给轨道的维修造成了困难，同时还因为石砟变形的不均匀性造成了轨道的各种不平顺，影响高速列车的安全性和舒适性。无砟轨道具有整体性强、纵向及横向稳定性高、可持久保持轨道的几何尺寸、养护维修工作量较少、维修费用小以及使用寿命周期长等优点^[31]，因此无砟轨道正在国内外高速铁路上获得了越来越广泛的应用。

1.1.2.2 无砟轨道类型

无砟轨道自应用以来，就可按照结构类型分为很多种，在技术上也都拥有各自的特点。如今，国际上也并未对无砟轨道进行统一的系统分类。按无砟轨道的结构特点可分为整体结构式和直接支承结构式。整体结构式是指将起支撑作用的混凝土枕和混凝土基础通过浇筑或预制使它们一体化，因此整体结构式又分为预制式和现浇混凝土式。而直接支承结构式是指在原有的基础上直接铺设轨道的结构形式^[32]。

目前已有的无砟轨道结构类型很多，主要区别在于：①支承扣件的方式（有无轨枕）；②支承轨枕的方式（埋入道床板中/支承在道床板上/嵌入道床板中）；③道床板的材料（水泥混凝土/沥青混凝土）；④道床板的制作方式（预制/现浇）。根据这些结构方案不同，可将无砟轨道进行图 1-4 所示分类。

目前世界上应用较普遍的几种无砟轨道结构包括德国的雷达、旭普林、博格板以及日本的板式无砟轨道^[33-37]。为了发展我国的高速铁路，2006 年铁道部专家对世界各国无砟轨道形式进行分析研究，选用了单元板式无砟轨道结构——日本新干线板式 CRTS I 型及德国博格板式 CRTS II 型，作为我国现阶段发展无砟轨道的主要形式。在对国外技术进行

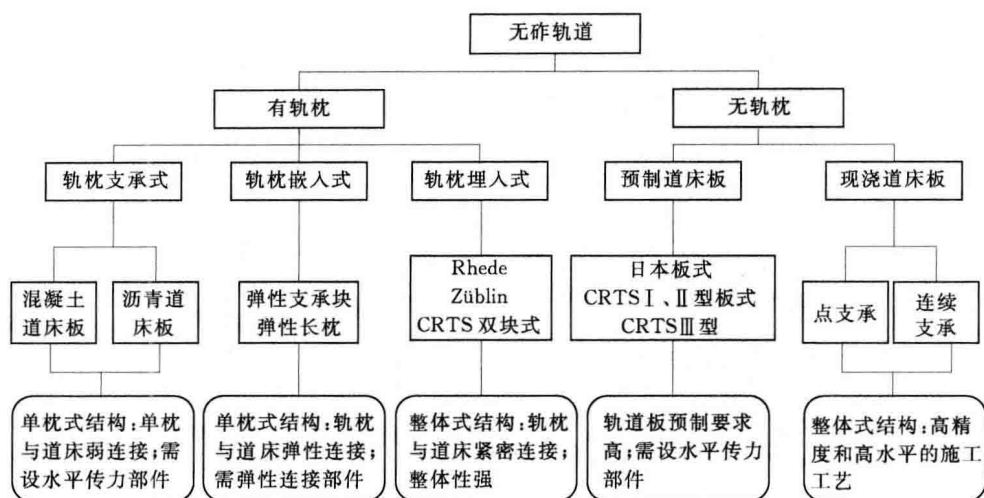


图 1-4 无砟轨道结构分类与系统特征

引进、吸收、再创新的基础上，我国自主研发了新型轨道结构形式——CRTS III 型板式结构。

1. CRTS I 型板式无砟轨道

CRTS I 型板式无砟轨道为预制单元板式轨道结构，在路基、桥梁、隧道地段结构组成相同，自上而下由轨道板、CA 砂浆调整层、钢筋混凝土底座、凸形挡台等组成^[38]，如图 1-5 所示。

该轨道结构通用性强，弹性好，施工进度快，可修性好。CRTS I 型板式轨道结构特点如下：①CRTS I 型板式轨道按明确的层状结构体系设计，并确保能够方便地维修或更换；②轨道板承担了钢轨定位、传力、承载的多重作用，为减小轨道板的设计强度和体积，采用比较坚实的混凝土基础；③为确保轨道板的定位，采用一层现浇、有较好的填充性能和传力能力的 CA 砂浆调整层；④为解决水平力的传递问题，在混凝土底座

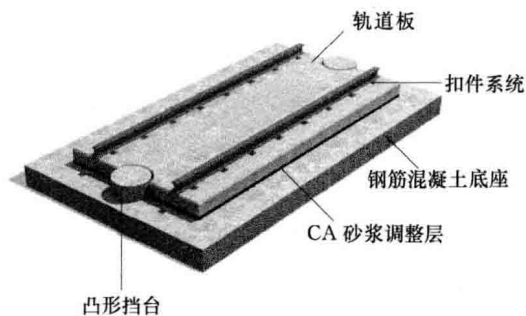


图 1-5 CRTS I 型板式无砟轨道

上设置圆形凸台结构作为专门的传力部件。板式轨道的传力机理十分明确。竖向荷载的传递：从上至下逐层传递。水平荷载的传递：通过凸形挡台作为主要的水平力传递部件。为减少水平力对凸台的冲击，在凸台和轨道板之间设置缓冲层^[39]。

2. CRTS II 型板式无砟轨道

CRTS II 型板式无砟轨道为预制板式轨道结构，在路基、隧道地段自上而下由轨道板、BMZ 砂浆调整层、支承层等组成，桥梁上由轨道板、BMZ 砂浆调整层、钢筋混凝土底座、滑动层、侧向挡块等组成。沿线路纵向轨道板、底座及支承层均为连接结构^[40]，如图 1-6 所示。

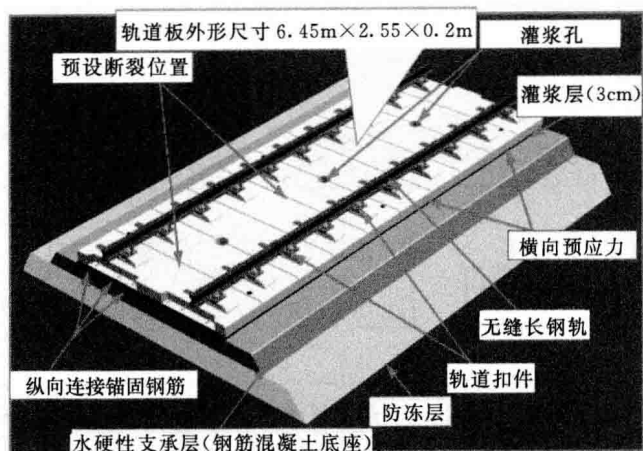


图 1-6 CRTS II 型板式无砟轨道

CRTS II 型板式轨道结构特点如下：①CRTS II 型板式轨道按明确的层状结构体系设计；②轨道板通过精确加工可以确保钢轨的精确定位，承力传力性能可靠、耐久，满足不同线路平面线形时轨道板纵连的需要；③纵连结构保证轨道结构连续性。路基上列车纵向力、温度力由轨道板与 BMZ 砂浆、支承层的层间粘接传递；桥梁上通过侧向挡块、锚固销钉及桥梁端端刺等结构传递；④轨道板采用预设裂缝（假缝）设计方案，一方面裂缝控制不超过 0.5mm，另一方面实现轨道板轨枕化；⑤桥上 CRTS II 型板式无砟轨道，需从梁轨相互作用的理论加以验算。

3. CRTS III 型板式无砟轨道

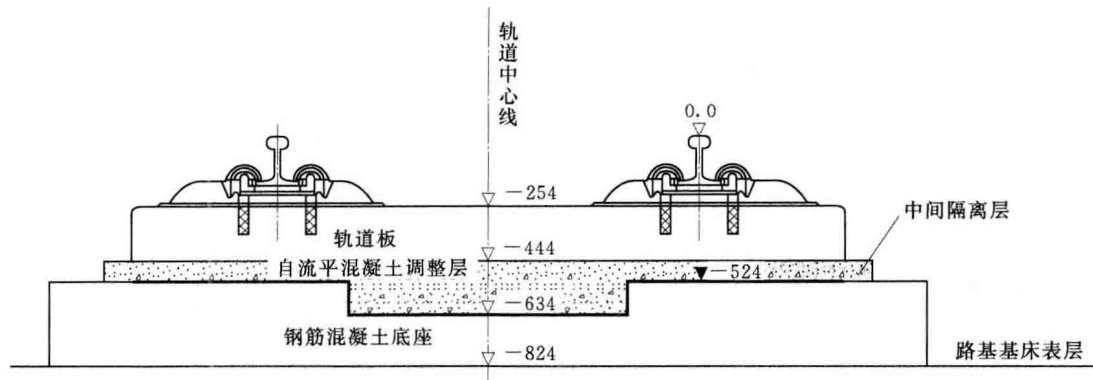
CRTS III 型板式无砟轨道结构由钢轨、扣件、轨道板、自密实混凝土、限位挡台、中间隔离层（土工布）和底座（路基上为支承层）等部分组成，如图 1-7（a）所示。桥隧地段采用单元板式结构，路基地段采用纵连板式结构。轨道板与自密实混凝土利用门型筋连接在一起，底座板在每块轨道板范围内设置限位挡台（凹槽结构），底座板与自密实混凝土层间设置中间隔离层。这种无砟轨道结构桥梁地段为单元板式，如图 1-7（b）所示，取消了 CA 砂浆作为板下填充层，而用自密实混凝土作为板下填充层，轨道板与自密实混凝土间设置 U 形连接钢筋，加强两者之间的连接。底座上设置两个凸台传递水平力及限位；路基地段采用纵连板式，板间填充树脂砂浆，板下填充自密实混凝土，支承层采用水硬性材料（HGT）^[41,42]。CRTS III 型板式无砟轨道的设计吸取了 CRTS I 型和 CRTS II 型板式两种无砟轨道的经验，目前已成功应用在成灌线全线，如图 1-7（c）所示。

1.1.2.3 高速铁路对轨道结构的要求

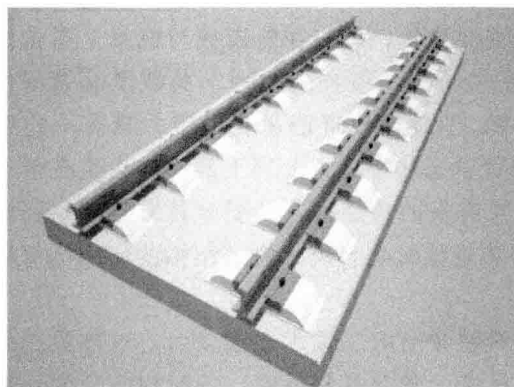
高速铁路的主要行车特点是速度快、密度大和小编组，目的是获得较高的安全性和良好的舒适性，故要求轨道结构必须具有高平顺性、稳定性且少维修。

（1）高平顺性。高平顺性的核心是保持轨道结构具有良好的几何状态，具体要求是：

1）使用精度高和可靠性高的轨道结构部件。轨道结构主要由钢轨、扣件、轨枕及枕下基础等部件组成的结构体。其中，钢轨直接支撑列车的运行，其合理外形、几何尺寸和



(a) 路基地段轨道结构组成



(b) 轨道板外形



(c) 已铺设 CRTSⅢ型板的成灌客专

图 1-7 CRTS Ⅲ型板式无砟轨道

良好的内在质量是高速列车运行高舒适性和高安全性的前提；轨下基础的高精度和高可靠性，是钢轨高度精确稳定几何位置的重要保障。

2) 铺设精度高。提高铺设精度是为了实现轨道初始高平顺性，避免了运营阶段轨道不平顺的产生及发展恶化。

3) 良好的养护维修质量。

(2) 高稳定性。高稳定性是指钢轨在高速运行条件下保持高平顺性与均衡弹性及维持部件有效性与完整性的能力，少维修或者免维修。具体要求是：

1) 使用高精度和高可靠性的轨道结构部件，提高轨道结构的系统性和耐久性，实现轨道长期高平顺性以及轨道部件的长期有效性和完整性。

2) 合理的轨道刚度，轨道应该具有良好的弹性，使轨道能缓冲振动与冲击，减弱噪声。

此外，应该保持沿线路纵向轨道弹性均匀。

(3) 少维修。高速铁路的铺设标准远高于普通铁路，同时要求养护维修达到更高的标准。由于我国的高速铁路要与既有线兼容、运量大、线路的使用率高、天窗时间很短，造成了运输与维修的矛盾。因此，为适应高速行车与繁重运输任务的需要，尽快实现高速铁

路的少维修具有极其重要的意义。

1.1.3 调整层所用材料及其研究进展

目前我国主要采用的 CRTS I 型（武广客专部分线路）、CRTS II 型（京津城际大部分线路、京沪客专大部分线路），这两种无砟轨道结构均采用水泥乳化沥青砂浆作为板下调整层。从材料特性、国外调研及国内建成线路的应用现状可以看到，无砟轨道结构体系中水泥乳化沥青砂浆应用是薄弱环节。

1.1.3.1 水泥乳化沥青砂浆的材料特性

水泥乳化沥青砂浆，英文名称 Cement Asphalt Mortar，常常缩写为 CA 砂浆，也称 CAM，是一种由水泥、细骨料（砂）、乳化沥青、混合料、铝粉、水及功能外加剂等多种原材料组成，经胶凝材料水硬化与沥青破乳胶结共同作用而形成的一种新型有机—无机复合材料^[43,44]。CA 砂浆是板式无砟轨道的关键结构材料，填充在轨道板与混凝土道床之间厚度约为 50mm 的扁平状空间内，主要起支承轨道板、缓冲高速列车荷载及减振的作用。使用 CA 砂浆作为填充材料主要有三大作用：①确保轨道能承受荷载并具有一定弹性；②填充轨道板与混凝土底座之间的空隙，确保轨道的平稳；③当下部结构发生变形或者破坏时，可进行修补。CA 砂浆作为全面支承轨道板的垫层结构，要求具有足够的强度和必要的弹性，以及优良的施工性，其性能的好坏直接影响到板式轨道结构的使用的舒适性、耐久性与安全性、维护工作量及经济性^[45,46]。

CA 砂浆的组成十分复杂、性能要求高、材料制备与施工技术难度较大，这些是制约板式轨道发展的瓶颈技术。CA 砂浆属有机—无机多元复合材料体系，各材料本身的特性对复合材料体系具有重要影响，同时二者之间的协同作用也显著影响 CA 砂浆的性能。CA 砂浆主要包含 I 型 CA 砂浆和 II 型 CA 砂浆两种类型。I 型砂浆中有机物所占比例较高（约为 30%），组料中水泥与沥青的用量相当，其性能特点主要为组成复杂、环境敏感性强、强度及弹性模量低。II 型砂浆中有机物所占比例较低（小于 15%），组成则以无机材料为主，性能上表现为水泥材料的基本特征，强度及弹性模量较高^[47-51]。

1.1.3.2 水泥乳化沥青砂浆破坏形式

CA 砂浆中有机组成受气候影响较大，严重影响 CA 砂浆的温度敏感性，如严寒气候会导致疏松及松裂。酷热气候导致 CA 砂浆弹性变化，影响线路的稳定性及平顺性。有机—无机组成匹配性不好，会出现乳液析出现象。CA 砂浆不均匀收缩导致轨道线路板与板之间不平顺，影响行车舒适性^[52-63]。

CA 砂浆调整层在工程上存在的主要问题：表面层被冲蚀，如图 1-8（a）所示；砂浆充填层与轨道板界面脱离—离缝，如图 1-8（b）所示；边缘砂浆硬碎，严重开裂与脱落，如图 1-8（c）所示；边缘里面几乎完全碎裂，造成轨道板下陷，如图 1-8（d）所示。

1.1.3.3 自密实混凝土

用于高速铁路无砟轨道调整层的自密实混凝土是高速铁路建设的关键工程材料，特殊工况下，自密实混凝土需形成特殊的技术体系才能满足要求。其组成材料、配合比、现场搅拌、运输和灌注质量均直接影响无砟轨道结构的耐久性、运行安全性和平顺性，自密实



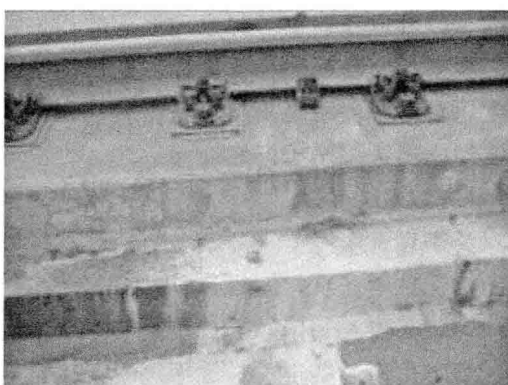
(a) 表面层被冲蚀



(b) 离缝



(c) 边缘砂浆硬碎



(d) 严重开裂与脱落

图 1-8 CA 砂浆调整层在工程上存在的主要问题

混凝土除了满足施工需要的工作性能和工程要求的力学性能外，还应达到高速铁路对材料耐久性的要求。因此，必须开发出高流态、高均质自密实耐久混凝土（简称 FHDC），以实现上述系列要求，并形成相应技术体系，以保证其长期安全的服役特性。

本研究来源于国家 973 重点研究发展规划课题（2009CB623201）以及与铁四院合作项目《武汉城市圈城际高速铁路无砟轨道充填层自密实混凝土技术深化研究》，2008 年“武汉城市圈”综改方案获国务院正式批复，武汉城市圈由“1+8”9 座城市组成，是指以武汉市为中心的 100km 半径内，整合 8 个中、小城市，形成湖北乃至长江中游最密集城市群，武汉城市圈城际铁路是其重点建设项目之一，城际铁路最先主要是建设武汉到黄石、孝感、咸宁和黄冈这 4 条线路，本研究依托武汉城市圈城际高铁工程，主要开展高流态、高均质自密实耐久混凝土的系统研究与开发，研究自密实混凝土的高流态、高均质、高耐久性技术，建立应用于长距离运输、长时间灌注等特殊使用条件下的特种自密实混凝土的材料设计、制备工艺、工程应用等方面的关键技术，为大幅度提高铁路工程的服役寿命提供关键材料与技术支撑。因此，本研究具有重要的现实意义和理论价值。