

文章编号: 1674—8247(2024)04—0076—06

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2024. 04. 014

# 大温差地区高速铁路钢桥面新型铺装应用研究

阿 勇<sup>1</sup> 李恩良<sup>2</sup> 高立强<sup>3</sup>

(1. 蒙冀铁路有限责任公司, 呼和浩特 010000; 2. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308;

3. 中铁大桥科学研究院有限公司, 武汉 430034)

**摘 要:**结合包银高速铁路乌海黄河桥主桥工程,从温度力影响、受力性能、对桥梁刚度和轨道平顺性的影响、耐久性和经济性方面,对大温差地区 UHPC 新型钢桥面铺装的应用效果进行了研究。结果表明:(1)在大温差地区,钢混组合桥面铺装层、剪力钉的温度工况应力分别为最不利组合应力最大值的 36% 和 11% 以上;(2)UHPC 新型钢桥面铺装具有良好的受力性能,设计方案可满足结构受力需求;(3)该新型钢桥面铺装可有效提升桥梁整体刚度和轨道平顺性,主跨活载挠度和轨道不平顺值分别减小 3.8% 和 13.1% 以上;(4)该新型钢桥面铺装能够有效提升桥梁钢桥面的耐久性,且具有良好的经济性;(5)UHPC 新型钢桥面铺装可在大温差地区高速铁路钢桥建设中进一步推广应用。

**关键词:**高速铁路; UHPC 铺装; 应用研究; 大温差地区; 钢桥面; 混合箱梁斜拉桥

**中图分类号:** U448.36; U443.33 **文献标志码:** A

76

## Study on Application of UHPC Steel Bridge Deck Pavement in High-speed Railways in Areas with Large Temperature Difference

A Yong<sup>1</sup> LI Enliang<sup>2</sup> GAO Liqiang<sup>3</sup>

(1. Mengji Railway Co., Ltd., Hohhot 010000, China;

2. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China

3. China Railway Bridge Science Research Institute Limited, Wuhan 430034, China)

**Abstract:** Taking the main bridge of the Wuhai Yellow River Bridge of Baotou-Yinchuan High-speed Railway as an example, this study explored the application of UHPC (Ultra-High Performance Concrete) as a new type of steel bridge deck pavement in areas with large temperature difference, in terms of the influences of temperature forces, structural performance, effects on bridge stiffness and rail smoothness, as well as durability and economy. The results show that:

(1) In areas with large temperature difference, the pavement layer of the steel-concrete composite bridge and the temperature condition stress of the shear connectors are at least 36% and 11%, respectively, of the maximum value of the most unfavorable combined stress. (2) The UHPC steel bridge deck pavement shows good structural performance and the design scheme can meet the structural stress requirements. (3) The UHPC steel bridge deck pavement can effectively improve the overall stiffness of the bridge and the smoothness of the track, with the main span live load deflection and track irregularity values decreasing by more than 3.8% and 13.1%, respectively. (4) The UHPC steel bridge deck pavement can effectively enhance the durability of the bridge's steel deck and offers good economic advantages. (5) The UHPC steel

收稿日期: 2022-12-27

作者简介: 阿勇(1972-),男,高级工程师。

基金项目: 中国铁路设计集团有限公司科技开发课题(7218126)

引文格式: 阿勇,李恩良,高立强. 大温差地区高速铁路钢桥面新型铺装应用研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(4): 76-81.

A Yong, LI Enliang, GAO Liqiang. Study on Application of UHPC Steel Bridge Deck Pavement in High-speed Railways in Areas with Large Temperature Difference[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(4): 76-81.

bridge deck pavement can be further promoted and applied in the construction of high-speed railway steel bridges in areas with large temperature difference.

**Key words:** high-speed railway; UHPC pavement; application research; area with large temperature difference; steel bridge deck; composite box girder cable-stayed bridge

超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete, UHPC)是一种新型水泥基复合材料,因其超高强度、少徐变、自密实、超高韧性、高耐久性等优异的力学性能在土建工程领域逐渐得到应用。国外从20世纪90年代以来陆续建成了多座UHPC桥梁<sup>[1-3]</sup>。近年来UHPC新型组合钢桥面在国内公路钢桥铺装维修领域应用较广,在铁路钢桥领域也逐渐投入了工程实践<sup>[4-5]</sup>,如蒙华铁路洞庭湖大桥和公安长江大桥、沪苏通长江公铁大桥、福厦铁路乌龙江大桥等都采用了此类新型铺装,均取得了较好的工程效果。然而,上述桥梁均位于长江中下游及东南沿海地区,环境温差相对较小。UHPC铺装属于钢混组合结构,环境温差对结构受力有较大的影响。因此,结合大温差地区高速铁路钢桥的建设研究UHPC的应用具有十分重要的意义。

## 1 工程概况

包银高速铁路线路设计时速250 km,双线有砟轨道,线间距4.6 m,采用ZK活载,最小曲线半径3 500 m。乌海黄河特大桥主桥位于内蒙古自治区乌海市与宁夏回族自治区石嘴山市交界处,为全线的控制性工程。桥址地区历年平均气温为9.84℃,历史极端最高和最低气温分别为41℃和-28.9℃,温差高达69.9℃,属于大温差地区<sup>[6]</sup>。

主桥为(80+80+310+80+80)m的半漂浮体系混合梁斜拉桥。采用花瓶型桥塔,桥面以上有效塔高89.5 m,两个主塔全高分别为111.5 m、115 m。主梁两端各121.2 m为混凝土箱梁,含钢混结合段的钢桥设置范围为399 m。主塔两侧分别布置14对平行钢丝斜拉索,标准抗拉强度为1 770 MPa,主桥立面布置如图1所示。

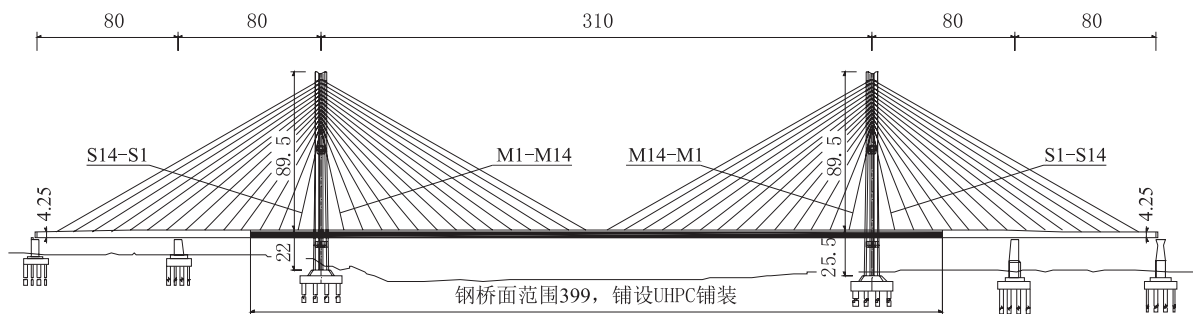


图1 主桥立面布置图(m)

钢箱梁标准梁高4.25 m,中心梁高4.336 m,采用带风嘴的单箱五室截面,箱梁全宽18.28 m,顺桥向横隔板间距5.25 m,每两个横隔板之间设置一道横隔板。桥面钢板除钢混结合段和主塔支点局部区域采用18 mm外,其他区域均采用16 mm。截面腹板、底板根据受力需要在不同区域采用16~40 mm厚钢板。

桥面宽16.0 m,共分为5个区域,行车道区宽9.0 m,2个人行道区均宽1.7 m,2个拉索检修区均宽1.8 m。在长399 m的钢桥面上铺设UHPC新型桥面铺装,其中行车道区挡砟墙内铺设60 mm厚UHPC层,人行道区的电缆槽内和拉索检修区竖墙之间的部分均铺设50 mm厚UHPC层。

## 2 铺装构造

UHPC桥面铺装主要由桥面普通钢板、防腐涂装、剪力钉、钢筋网、超高性能混凝土板构成。与常规铁

路桥面纤维混凝土铺装层<sup>[7]</sup>相比,UHPC内配置钢筋网片,并通过剪力钉与普通钢桥面板连接,形成共同受力结构。

行车道区域直接承受列车荷载,设置60 mm厚UHPC铺装;为提高人行道区和拉索检修区钢结构的耐久性,设置50 mm厚UHPC铺装。铺装范围内桥面板区域喷涂环氧富锌防腐底漆,在行车道区域和其他区域钢板上分别焊接M19×45 mm和M19×35 mm的剪力钉,并铺设 $\phi 10$  mm HRB400钢筋网,纵向间距均为10 cm,桥塔附近30 m范围内局部加密至间距5 cm,纵向钢筋在下,横向钢筋在上,钢筋保护层厚15 mm。剪力钉纵向布置间距一般为300 mm,并根据具体位置局部调整。行车道区域有道砟覆盖,较为隐蔽,因此在UHPC表面热撒2~3 mm厚的高粘弹沥青,以提升防水和防滑效果。其他区域基本外露,涂一层2 mm厚的聚氨酯防水涂料。

3 材料性能

UHPC 由硅酸盐水泥、粉煤灰、矿渣、石英砂和石英粉、钢纤维、水和减水剂等添加剂按一定的配合比混合而成,加水拌和后在标准养护条件下即可达到良好的和易性、超高强度、超强耐久性和低徐变性能,在蒸养条件下效果更好<sup>[8-9]</sup>。近年来国内外多家科研机构在 UHPC 研究方面取得了较多的成果,湖南大学、中铁大桥科学研究院、福州大学等多家单位均结合工程实践开展了大量的科研工作<sup>[10-12]</sup>。目前工程应用中 UHPC 设计基本性能指标如表 1 所示。

表 1 UHPC 材料性能指标表

序号	项目	技术要求
1	初凝时间/h	10~12
2	终凝时间/h	14~16
3	扩展度/mm	≥500
4	坍落度/mm	220~280
5	容重/(kN/m <sup>3</sup> )	25~26
6	28 d 弹性模量/GPa	≥40
7	28 d 抗折强度/MPa	≥22
8	28 d 抗压强度/MPa	≥120
9	28 d 极限抗拉强度/MPa	≥8
10	抗冻性能	≥F500
11	抗渗性能	≥P30
12	氯离子扩散系数[10 <sup>-12</sup> (m <sup>2</sup> /s)]	≤0.4
13	收缩应变	≤200

为研究钢-UHPC 组合桥面板在局部车轮压力作用下 UHPC 板静力开裂强度与构造参数的影响规律,中铁大桥科学研究院有限公司结合相关桥梁开展了试验研究,对 6 块钢-UHPC 组合桥面板纵向弯曲试件以及 6 块横向弯曲试件进行了两点对称负弯矩加载试验。

试验分析了不同纵、横向钢筋的摆放形式与多种钢筋布置间距对钢-UHPC 组合桥面板开裂强度的影响。设置了纵向钢筋在上与横向钢筋在上两种摆放形式,以及 50 mm、75 mm、100 mm 三种钢筋网间距。两类试验均采用两点对称加载方式,UHPC 面朝下放置,试验过程中记录各试件 UHPC 层表面出现 0.05 mm 宽度的裂缝时的名义拉应力,结果如表 2 所示。

由表 2 可知,组合桥面板纵、横向开裂强度相差较大,当钢筋的构造参数相同时,横向开裂强度显著低于纵向,在进行组合桥面板的设计时应应对 UHPC 层

表 2 不同钢筋布置的 UHPC 板开裂强度表

钢筋布置	0.05 mm 开裂应力/MPa	
	横向	纵向
间距 50 mm, 横向钢筋在上	19.4~20.8	21.2~30.0
间距 50 mm, 纵向钢筋在上	13.6~14.4	30.7~39.0
间距 75 mm, 横向钢筋在上	17.5~17.8	18.8~26.9
间距 75 mm, 纵向钢筋在上	11.6~12.0	21.2~29.2
间距 100 mm, 横向钢筋在上	12.7~13.3	16.3~23.8
间距 100 mm, 纵向钢筋在上	10.1~10.2	17.9~19.4

纵横向应力分别进行验算;减小钢筋间距可有效提高组合桥面板的开裂强度,增强其抗裂性能。

4 受力分析

4.1 数值模拟

采用 Midas Civil 对乌海黄河桥主桥进行整体空间有限元分析,提取 UHPC 铺装层第一体系受力结果,桥塔、主梁采用梁单元模拟,斜拉索采用桁架单元模拟,UHPC 铺装层采用双单元法与钢箱梁联合。模型计算考虑施工过程影响,钢主梁合龙后主要工序如下:桥面防护墙、竖墙施工→UHPC 铺装层施工→道砟、轨道结构、人行道盖板和栏杆等施工→二次调索→轨道精调,完成施工。

建立钢箱梁局部节段精细化模型,模型长度取 2 个节间长度 21 m,提取 UHPC 铺装层第二体系、第三体系受力结果,钢板采用板壳单元模拟,UHPC 采用实体单元模拟,剪力钉采用梁单元模拟。铺装层承受二期恒载、活载和附加力作用,假定铺装与桥面钢板之间无滑移。

根据当地气象资料,合龙温度采用 10℃±5℃,钢结构整体升降温分别按 37℃、-45℃计算,钢桥面非线性温差按 16℃计算;混凝土结构整体升降温分别按 22℃、-25℃计算,混凝土桥面非线性温差按 10℃计算;索梁温差按 ±15℃计算。

4.2 铺装层受力

根据施工顺序,恒载工况下铺装层应力是道砟及轨道结构等二期恒载和二次调索共同作用的结果,在整体模型中对铺装层在恒载、活载、温度等工况作用下进行第一体系受力计算,结果如表 3 所示。

由表 3 可知:

(1)成桥恒载工况,铺装层均承受压应力,跨中 M12 号拉索处压应力最大,为 3.0 MPa。

(2)ZK 活载工况,铺装层呈现拉压受力状态,最大拉应力、最大压应力分别为 7.1 MPa、7.9 MPa,基本相当。



表3 各荷载工况引起的 UHPC 铺装层应力表				
工况	最大拉应力/MPa		最大压应力/MPa	
	数值	位置	数值	位置
恒载	-	-	-3.0	M12号索
ZK活载	7.1	1号塔	-7.9	M12号索
沉降	0.7	M11号索	-0.8	M11号索
收缩	3.1	1号塔	-	-
徐变	-	-	-0.6	M7号索
整体升温	3.7	S3号索	-	-
整体降温	-	-	-4.0	S3号索
不均匀升温	1.8	1号塔	-1.2	中跨跨中
不均匀降温	1.2	中跨跨中	-1.8	1号塔
温度组合	5.3	1号塔	-5.6	1号塔
制动力	0.9	S3号索	-0.9	S3号索
最不利组合	10.6	2号塔	-15.5	M12号索

(3) 整体升温工况铺装层整体受拉,整体降温工况铺装层整体受压,最大拉应力、最大压应力为 3.7 MPa、4.0 MPa,基本相当。不均匀温度工况铺装层呈拉压受力状态,均在 2.0 MPa 以内。整体与不均匀温度组合工况最大拉应力、最大压应力达到 5.3 MPa、5.6 MPa,分别约为活载工况最不利应力的 75%、71%。

(4) 各工况进行最不利组合时, UHPC 铺装层最大拉应力、最大压应力为 10.6 MPa、15.5 MPa,温度工况最大拉应力、最大压应力分别约为最不利组合的 50%、36%。

在局部模型中施加活载和温度作用,活载采用 CRH 标准动车模型进行加载,轴重 17 t,得到铺装层第二体系、第三体系最大纵向、横向拉应力分别为 1.49 MPa、3.06 MPa。

对各体系应力进行叠加后得到 UHPC 铺装层最大纵向压应力为 15.5 MPa,小于抗压强度 120 MPa,最大纵向拉应力为 12.1 MPa,小于 0.05 mm 开裂强度 16.3 ~ 23.8 MPa;最大横向拉应力 3.06 MPa,小于 0.05 mm 开裂强度 12.7 ~ 13.3 MPa。故铺装层设计能够满足受力要求。

4.3 剪力钉受力

在整体模型中分别对各工况下剪力钉的受力进行计算,得到其第一体系下的最不利剪力,如表 4 所示。由表 4 可知,恒载、活载工况剪力钉剪力较大,分别达到 2.97 kN 和 2.79 kN,温度组合工况最大剪力 0.59 kN,约为活载工况的 21%,工况剪力相对较小;最不利组合时剪力钉最大剪力 5.58 kN,温度工况最大剪力约为最不利组合值的 11%。

表4 各荷载工况引起的剪力钉剪力表		
荷载工况	最大剪力/kN	位置
恒载	2.97	边跨S3号索
ZK活载	2.79	主塔
沉降	0.23	中跨跨中
收缩	0.04	主塔
徐变	0.00	边跨S3号索
温度组合	0.59	主塔
制动力	0.21	主塔
最不利组合	5.58	主塔

在局部模型中提取第二体系、第三体系下剪力钉最不利纵向、横向剪力分别为 10.46 kN、11.97 kN。

对 3 个体系的计算结果进行叠加,得到剪力钉最大纵向、横向剪力分别为 16.04 kN、11.97 kN,均小于抗剪承载力 87.9 kN。疲劳工况无需考虑第一体系剪力,剪力钉最大剪力为 11.97 kN,低于疲劳抗剪承载力 17.6 kN。故剪力钉布置能够满足受力及疲劳需求。

5 桥梁性能提升

5.1 刚度

UHPC 铺装与钢箱梁结合,增加了主梁截面的抵抗能力和桥梁整体刚度,从而减小了主梁的静活载挠度。采用不同铺装方案时主梁的静活载挠度如图 2 所示。由图 2 可知,与常规不锈钢桥面铺装相比,采用 UHPC 铺装方案可使主跨竖向静活载挠度从 425 mm 减小至 409 mm,减小率 3.8%。

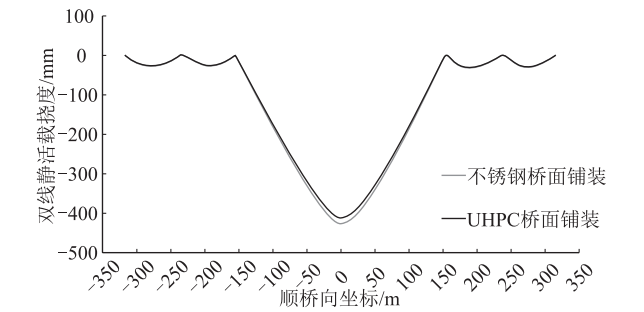


图2 不同铺装方案的主桥活载挠度图

5.2 轨道平顺性

高速铁路大跨径斜拉桥采用 UHPC 钢桥面铺装后,主桥的整体刚度和局部刚度得到了提升,从而提高了轨道平顺性。结合近年来的工程实践,对不锈钢桥面铺装和 UHPC 桥面铺装两种方案采用 60 m 弦按照中点弦测法对主桥的轨道高低不平顺值进行检算,如图 3 所示。由图 3 可知,与常规不锈钢桥面铺装相比,采用 UHPC 铺装方案可使边跨轨道高低不平顺值从 8.16 mm 减小至 7.09 mm,减小率 13.1%;主跨轨

道高低不平顺值从 3.43 mm 减小至 2.68 mm,减小率 21.9%。

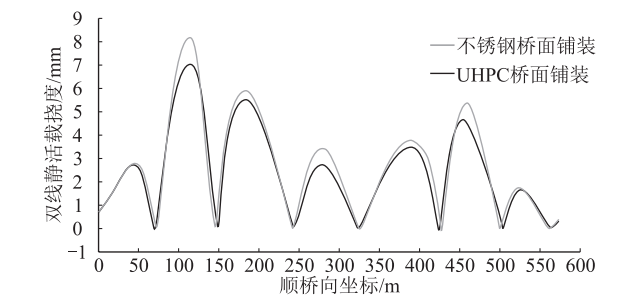


图3 不同铺装方案的轨道高低不平顺图

5.3 桥面耐久性

本桥对 16 m 宽的钢桥面在除防护墙、竖墙外的区域按 UHPC 铺装全覆盖设计,该铺装基层钢板采用 16 mm 厚普通钢桥面板,材质单一,焊缝简单,避免了不锈钢桥面板的两种不同材质焊缝的对接问题,运营期间板块之间开裂风险点相对较小,耐久性好。

另外,该铺装抗渗等级达到 P30 以上,防水性能良好,同时对铺装表面及其与防护墙、竖墙相接的角隅采用高粘弹沥青粉刷,实现无死角防水,从而对钢桥面实现全方位防护,进一步提高了钢桥面的耐久性<sup>[13]</sup>。

再者,与环氧沥青混凝土铺装、ECO 铺装及其他铺装相比<sup>[14-15]</sup>,UHPC 铺装桥梁设计基准期 100 年内无需更换,其自身也拥有良好的耐久性能。

6 经济性研究

铁路钢桥常用的桥面铺装形式主要有混凝土道砟槽板、不锈钢复合桥面板、环氧沥青混凝土、ECO 铺装等多种形式。混凝土道砟槽板二期恒载较大,导致主体钢结构用钢量的大幅增加,经济效果欠佳;不锈钢复合桥面板一般都加工成板单元并进行现场焊接,复合板焊接需要分基层、过渡层、不锈钢层分别焊接,焊缝工艺复杂,运营期焊缝开裂风险较高。环氧沥青混合料的配置工艺比较复杂,施工中对容留时间和温度要求十分严格,且其寿命在 15 年左右,桥梁服役期内需要多次翻修;ECO 铺装施工相对简单,但在寿命期内同样需要进行多次翻修<sup>[16]</sup>。不同铺装方案经济性对比情况如表 5 所示。由表 5 可知,UHPC 铺装在全寿命周期内的单平米造价最优,约为不锈钢桥面、环氧沥青混凝土、ECO 铺装的 93%、17%、26%。

表 5 不同铺装方案经济性对比表

桥面铺装方案	项目	初期成本/(元/m <sup>2</sup> )	全寿命成本/(元/m <sup>2</sup> )	备注
方案1: 不锈钢桥面	不锈钢桥面板环氧砂浆	1 950	1 950	设计寿命100年,按与普通钢板的价差计算
方案2: 环氧沥青混凝土铺装	70 mm厚双层环氧沥青防腐涂装	1 800	10 800	100年寿命期内翻修6次
方案3: UHPC铺装	UHPC、钢筋、剪力钉底漆涂装、高粘弹沥青	1 650	1 815	设计寿命100年,考虑边角高粘弹沥青正常维护
方案4: ECO铺装	ECO改性聚氨酯混凝土防腐涂装	1 700	6 800	100年寿命期内翻修4次

7 结论

通过对包银高速铁路乌海黄河桥主桥开展新型桥面铺装应用研究,得到主要结论如下:

- (1)在大温差地区,钢混组合桥面铺装的温度工况应力对设计影响较大,铺装层、剪力钉的温度工况应力分别为最不利组合应力最大值的 36% 和 11% 以上。
- (2)UHPC 新型钢桥面铺装具有良好的受力性能,设计方案可满足结构受力需求。
- (3)UHPC 新型钢桥面铺装可有效提升桥梁整体刚度和轨道平顺性,主跨活载挠度和轨道不平顺值分别减小 3.8% 和 13.1% 以上。
- (4)UHPC 桥面铺装能够有效提升桥梁钢桥面的耐久性,且具有良好的经济性。
- (5)UHPC 新型钢桥面铺装可在大温差地区高速铁路钢桥建设中进一步推广应用。

参考文献:

[1] 曹君辉,樊伟,李立峰,等. 基于 UHPC 的高性能桥梁结构研究与应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(11): 1-32.  
CAO Junhui, FAN Wei, LI Lifeng, et al. Research and Application of UHPC-based High Performance Bridge Structures [J]. Journal of Hunan University ( Natural Sciences ), 2022, 49(11): 1-32.

[2] 李锋,孔文艺,罗健,等. 超高性能混凝土(UHPC)的配制及应用探究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(7): 26-29.  
LI Feng, KONG Wenyi, LUO Jian, et al. Study on Preparation and Application of Ultra-high Performance Concrete ( UHPC ) [ J ]. China Concrete and Cement Products, 2019(7): 26-29.

[3] 蒲心诚,王志军,王冲,等. 超高强高性能混凝土的力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(6): 49-55.  
PU Xincheng, WANG Zhijun, WANG Chong, et al. Mechanical

- Properties of Super High-strength and High Performance Concrete[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(6): 49–55.
- [4] 阎培渝. 超高性能混凝土(UHPC)的发展与现状[J]. 混凝土世界, 2010(9): 36–41.
- YAN Peiyu. Research and Development in UHPC[J]. China Concrete, 2010(9): 36–41.
- [5] 魏林. 超高性能混凝土在沪通长江大桥上的应用[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(5): 85–89.
- WEI Lin. Application of Ultra-high Performance Concrete in Shanghai-Nantong Yangtze River Bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(5): 85–89.
- [6] 孙宗磊,李恩良. 包银高铁乌海黄河桥主桥方案研究[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(1): 75–84.
- SUN Zonglei, LI Enliang. Study on Main Bridge Scheme of Wuhai Yellow River Bridge of Baotou-Yinchuan High-speed Railway[J]. China Railway Science, 2022, 43(1): 75–84.
- [7] 李瑞俊. C55聚丙烯纤维高性能混凝土在铁路桥梁主体结构中应用技术研究[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(3): 29–35.
- LI Ruijun. Applied Research on C55 Polypropylene Fiber Reinforced High Performance Concrete in Railway Bridge[J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(3): 29–35.
- [8] 姚又琳,邵旭东. 大跨径钢—UHPC轻型组合梁斜拉桥力学与经济性能研究[J]. 公路工程, 2018, 43(1): 20–24.
- YAO Youlin, SHAO Xudong. Economic and Mechanical Properties of Large Span Cable-stayed Bridges with Lightweight Steel-UHPC Composite Beam[J]. Highway Engineering, 2018, 43(1): 20–24.
- [9] 刘琛. 高速铁路 UHPC 试验箱梁的设计与施工研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(8): 89–92.
- LIU Chen. Design and Construction Research of UHPC Test Box Girders for High-speed Railway[J]. China Concrete and Cement Products, 2019(8): 89–92.
- [10] 赵秋,陈平,陈宝春,等. 装配式钢—UHPC 组合桥面板试设计及性能研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(1): 94–99.
- ZHAO Qiu, CHEN Ping, CHEN Baochun, et al. Study of Trial Design and Performance of Assembled Steel and UHPC Composite Bridge Deck[J]. Bridge Construction, 2018, 48(1): 94–99.
- [11] 杨剑,方志. 超高性能混凝土梁正截面承载力[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(2): 23–30.
- YANG Jian, FANG Zhi. Normal Section Bearing Capacity of Ultra High Performance Concrete Beam[J]. China Railway Science, 2009, 30(2): 23–30.
- [12] 吴美艳,周尚猛. 超高性能混凝土组合钢桥面承载性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(3): 25–29.
- WU Meiyun, ZHOU Shangmeng. Test Study of Bearing Capacity of Ultra-high Performance Concrete and Steel Composite Bridge Deck[J]. Bridge Construction, 2017, 47(3): 25–29.
- [13] 李晓波. 铁路混凝土桥梁耐久性设计研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(5): 49–52.
- LI Xiaobo. Study on Durability Design of Concrete Bridge of the Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(5): 49–52.
- [14] 陈春红,陈浩锋. 环氧沥青混凝土钢桥面铺装疲劳寿命研究[J]. 中外公路, 2010, 30(3): 301–304.
- CHEN Chunhong, CHEN Haofeng. Study on Fatigue Life of Epoxy Asphalt Concrete Steel Bridge Deck Pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 30(3): 301–304.
- [15] 艾宗良,马庭林,袁明,等. 环氧沥青混凝土柔性防水保护层在铁路钢桥上的应用[J]. 钢结构, 2013, 28(4): 41–45.
- AI Zongliang, MA Tinglin, YUAN Ming, et al. The Application of Epoxy Asphalt Concrete Flexible Waterproof Protective Layer in Railway Steel Bridges[J]. Steel Construction, 2013, 28(4): 41–45.
- [16] 徐斌,王仁贵,徐速,等. ECO 改性聚氨酯混凝土铺装层力学仿真分析[J]. 公路, 2022, 67(12): 131–135.
- XU Bin, WANG Rengui, XU Su, et al. Mechanical Simulation Analysis of ECO Modified Polyurethane Concrete Pavement[J]. Highway, 2022, 67(12): 131–135.

(上接第 62 页)

- GUAN Zhenchang, ZHU Lingfeng, QIAO Liang, et al. Seismic Responses of Large-section Tunnel with Unsymmetrical Loading Based on Numerical Simulations[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(4): 927–938.
- [15] 王赶,杜建明,房倩,等. 水平地震力作用下浅埋偏压小净距隧道围岩压力计算方法研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(9): 133–139.
- WANG Gan, DU Jianming, FANG Qian, et al. Calculation Method of Surrounding Rock Pressure of Shallow Tunnels with Small Spacing under Horizontal Seismic and Unsymmetrical Loads[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(9): 133–139.
- [16] 赵富发,江学良,杨慧,等. 橡胶减震层对浅埋偏压隧道地震加速度响应影响的试验研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(4): 1622–1628.
- ZHAO Fufa, JIANG Xueliang, YANG Hui, et al. Experimental Study on the Influence of Rubber Shock Absorbing Layer on Seismic Acceleration Response of Shallow Buried Bias Tunnel[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(4): 1622–1628.
- [17] TB 10003–2016 铁路隧道设计规范[S].
- TB 10003–2016 Code for Design of Railway Tunnel[S].