

烧结铝矾土骨料在土木工程中的 研究及应用进展

刘亚林¹, 李承泽¹, 李 淑², 魏 亚³

(1. 北京科技大学 国家材料服役安全科学中心, 北京 102206; 2. 中铁十四局集团建筑工程有限公司, 济南 250200; 3. 清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 本文介绍了烧结铝矾土(CB)骨料的制备工艺、产品分级、物理及力学性能等, 并全面回顾和总结国内外学者对CB骨料在制备超高性能混凝土(UHPC)、改善UHPC力学和体积稳定性、提升道路表面耐磨性、抗滑性能以及在制备抗冲击水泥基材料等方面的研究成果和最新进展, 并系统阐释了CB骨料对材料各项性能的影响机理。本文结果表明: ①CB骨料主要由高强且化学性能稳定的刚玉和莫来石构成, 其力学性能(强度、硬度、耐磨性等)显著优于花岗岩、石灰岩等常规骨料; ②较低氧化铝含量的CB骨料孔隙率较高, 适合作为内养护介质以有效降低UHPC收缩及开裂风险, CB骨料自身高强度及内养护对水化程度的促进, 共同提升UHPC力学性能; ③高氧化铝含量的CB骨料(>80%)以其更高硬度及耐磨物理力学性能特点适合制备特殊路面表层, 可显著提升道路初始及长期耐磨、抗滑性能, 形成的一种高耐磨表面处理技术(HFST), 已在国内外已广泛应用; ④CB骨料高强及高硬度特性可有效磨损冲击弹丸端头或吸收更高的冲击破坏能量, 从而显著提高水泥基材料的抗冲击性能。

关键词: 烧结铝矾土骨料; 超高性能混凝土; 高耐磨表面处理; 抗滑性能; 抗冲击水泥基材料

中图分类号: TU528; U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)01-0001-20

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240564

Research and application progress of calcined bauxite aggregates in civil engineering

LIU Ya-lin¹, LI Cheng-ze¹, LI Shu², WEI Ya³

(1. National Center for Materials Service Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing 102206, China;
2. China Railway 14th Bureau Construction Engineering Corporation Limited, Jinan 250200, China; 3. Department
of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This study introduces the preparation process, product classification, physical and mechanical properties of calcined bauxite (CB) aggregate, and comprehensively reviews and summarizes the achievements and progress of worldwide researches on CB aggregate in the preparation of ultra-high performance concrete (UHPC), improving the mechanical properties and volume stability of UHPCs, improving the abrasion and skid resistance of pavement, and preparing impact resistant cement-based

收稿日期: 2024-05-22.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52438008).

作者简介: 刘亚林(1989-), 女, 副研究员. 博士. 研究方向: 超高性能混凝土材料与应用. E-mail: yalinou@ustb.edu.cn

通信作者: 魏亚(1976-), 女, 教授, 博士. 研究方向: 交通基础设施材料与结构韧性、智能化. E-mail: yawei@tsinghua.edu.cn

materials the influence mechanism of CB aggregate on the properties of the materials is explained systematically. The results show that: ① CB aggregate is mainly composed of high strength and chemical-stable corundum and mullite, and its mechanical properties (strength, hardness, wear resistance) are significantly better than those of granite, limestone and other conventional aggregates. ② CB aggregate with lower alumina content has higher porosity, which is suitable for serving as internal curing agent to effectively reduce UHPC's shrinkage and cracking risk; the high strength of CB aggregate and the promotion of hydration degree due to internal curing jointly improve the mechanical properties of UHPC. ③ CB aggregate with high alumina content ($>80\%$) is suitable for the preparation of special road surface due to the aggregate's special properties of high hardness and high wear resistance, which can significantly improve the initial and long-term abrasion and skid resistance of the pavement, a thereby developed technology named as high friction surface treatment (HFST) has been widely used in foreign countries. ④ The high strength and hardness characteristics of CB aggregate can effectively wear the impact projectile end or absorb higher impact damage energy, thus significantly improving the impact resistance of cement composites.

Key words: calcined bauxite aggregate; ultra-high-performance concrete; high friction surface treatment; skid-resistance; impact resistant cement-based materials

0 引言

骨料作为当今广泛使用的建筑材料之一,主要在水泥混凝土或沥青路面材料中起骨架和填充作用。相比于土木工程中的常用骨料,如花岗岩、玄武岩等,一种具有更高强度、硬度、耐磨性的人工骨料,即烧结铝矾土(Calcined bauxite, CB)骨料近些年来受到国内外学者的关注,在一些有特殊功能需求的土木工程领域进行了应用。

CB 骨料的主要晶体成分为强度高且化学稳定性优异的刚玉和莫来石,通过将铝土矿烧结、破碎等工艺制成。早在 1972 年, Dews 和 Bishop^[1]就对 CB 骨料的物理化学性质进行了研究,发现 CB 骨料具有优异的抗滑性和耐磨性,此后各国学者开展了 CB 骨料在土木工程多个领域的研究。1981 年,丹麦学者 Bache^[2]首次将 CB 骨料用于制备超高性能混凝土(Ultra-high performance concrete, UHPC),在实验室高温养护条件下得到了抗压强度 280 MPa 的 UHPC。2005 年, Iskander 和 Stevens^[3]将 CB 骨料应用于道路工程中,采用该骨料制备的高抗滑路面表层可以有效降低行车滑移导致的交通事故率。2010 年, Quek 等^[4]设计了含 CB 骨料的水泥基功能板,相比含花岗岩骨料的功能板具有更好的抗冲击性能。近年来,煅烧工艺制备的 CB 骨料是一种良好的耐火材料,广泛用于制备耐火浇筑料^[5]。2021 年, Liu 和 Wei^[6]利用 CB 骨料的含孔特性,将其用作 UHPC

内养护介质,制备了收缩显著降低、力学性能提升的 UHPC 材料,有助于解决 UHPC 收缩开裂问题。由上可见,在过去的几十年里,国内外学者对 CB 骨料在不同土木工程领域的应用开展了较多的试验和理论研究,但目前这些研究还缺乏系统的整理和综述。因此,本文对其研究及应用进展进行总结,并对其后续研究提出相关建议。

1 CB 骨料特性

1.1 CB 骨料生产工艺、矿物组成及微观形貌

CB 骨料是通过将铝土矿破碎后在 1 450~1 700 °C 高温下煅烧等工艺制成。铝矾土熟料的制备工艺有两种。第一种是铝矾土矿石生料经过竖窑、回转窑等高温烧结后成为铝矾土熟料。铝矾土煅烧时的变化主要分为 3 个阶段:①分解阶段(400~1 200 °C,包括高岭石的加热分解反应和水铝石的分解);②二次莫来石化阶段(1 200~1 400 °C,二次莫来石的生成产生较大体积膨胀,达到 10%,致使烧成料疏松、气孔率增大);③重烧结晶阶段(1 400~1 500 °C 及以上,由于液相的作用,气孔率降低,物料趋向致密,刚玉和莫来石晶体长大)^[7]。第二种制备工艺是均化合成法,如图 1(a)所示^[8],近年来使用较多,其是指铝矾土矿石经过破碎、磨细、配料、成型和煅烧工艺生产的组成均匀的矾土熟料^[9]。

CB 骨料主要化学组成为 Al_2O_3 , 其次为 SiO_2 、

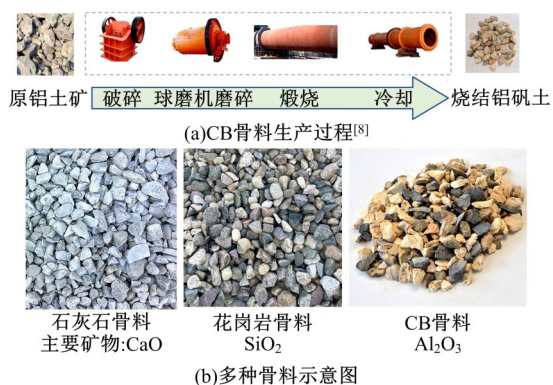


图1 CB骨料生产过程及多种骨料示意图

Fig. 1 Production process of CB aggregate and illustration of different aggregates

TiO₂等,而常规骨料如花岗岩、玄武岩和砂岩中主要化学成分为SiO₂,石灰岩、白云岩中主要成分是CaO^[10],多种骨料的示意图如图1(b)所示。基于X射线衍射(XRD)测试,得到CB骨料中主要的晶体结构形式为刚玉(Corundum, α -Al₂O₃)和莫来石(Mullite, 3Al₂O₃·2SiO₂),它们都具有良好的化学稳定性和极高的强度^[1,6,11]。刚玉、莫来石均是非常坚硬、耐磨的物相,两者相比莫来石硬度略低。Dews和Bishop^[1]通过立体显微镜对CB骨料进行测试,并根据颜色、纹理、硬度及刚玉和莫来石含量差异进行分类,发现CB骨料表现为黑色、灰色、棕色、橙色、白色等,刚玉成分含量越

高,骨料颜色越深。

商用CB骨料产品有1~3 mm、3~5 mm、5~8 mm等粒径形式,CB骨料表面经显微镜放大后可观察其粗糙形貌及孔隙,如图2(b)所示。Liu和Wei^[6]采用扫描电镜(SEM)观察了CB骨料的表面形貌,刚玉微观形貌更接近球形或六边形晶体^[12],莫来石晶体更近似于针状或柱状^[13],图2(c)中显示的刚玉和莫来石晶粒形成大而交织的晶体^[14],且一些针状莫来石晶体随机定向并相互连锁,图2(d)中所示的组分主要是互连的刚玉晶体^[14],这两种表面类型都具有粗糙微观纹理,且含有孔洞和孔隙。

1.2 CB骨料物理特性与力学性能

CB骨料根据Al₂O₃含量(刚玉和莫来石总量)分为不同品级,例如88#CB骨料表示其Al₂O₃含量大于88%。表1给出了各品级CB骨料近期市场价格,可见Al₂O₃含量越高,价格越贵。表2汇总了文献中CB骨料与其他骨料在多种性能指标上的对比数据(密度、模量、硬度、压碎值等),其中#80CB骨料的压碎值为8,远小于花岗岩骨料的压碎值32.7(压碎值越小,骨料越坚硬)。通过纳米压痕测得75#CB骨料模量为207 GPa^[15],且文献报道CB主要晶体成分刚玉的抗压强度高达2 000 MPa^[16]或莫来石的弹性

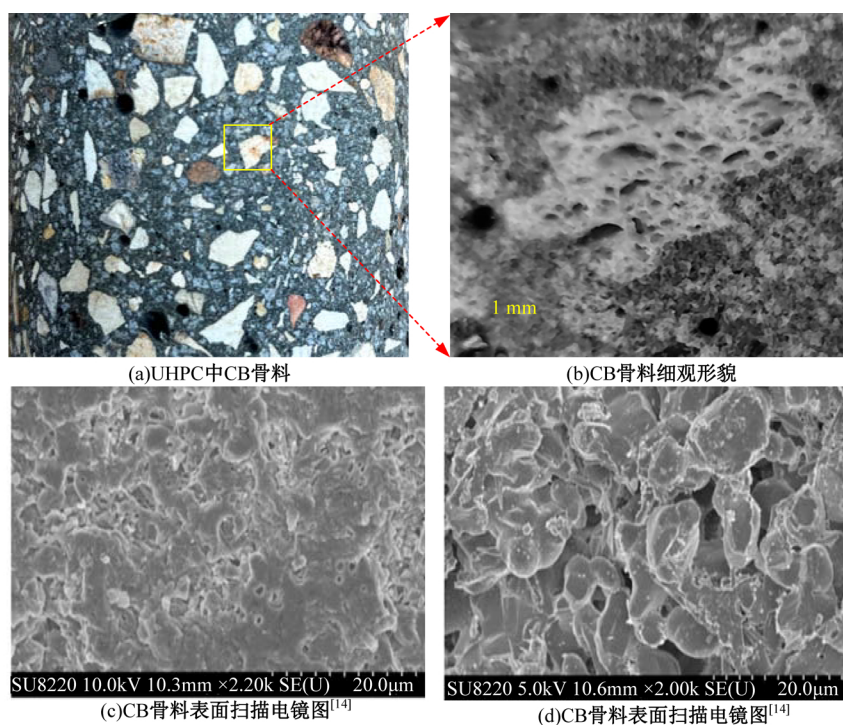


图2 CB骨料宏观、细观、微观形貌

Fig. 2 Macroscopic, mesoscopic, and microscopic morphology of CB aggregate

模量为 224 GPa^[17],而花岗岩、玄武岩等骨料弹性模量在 70~90 GPa^[18]。

表 1 各品级 CB 骨料价格

Table 1 Different grade CB aggregate price	
CB 骨料品级	价格/(元·吨 ⁻¹)
50#	680
60#	820
70#	1 300
80#	1 800
85#	2 300~2 600
87#	2900
88#	3 000~3 150
90#	3 600

表 2 CB 骨料与常规骨料多项性能对比

Table 2 Comparison of several properties between CB aggregate and ordinary aggregate

骨料特性	CB 骨料	常规骨料
密度/(g·cm ⁻³)	2.55~3.20(50#~88#) ^[7]	2.64~3.3(玄武岩、石英岩、花岗岩)
弹性模量/GPa	207(75#) ^[15]	70~90 ^[18] (花岗岩、玄武岩等)
莫氏硬度	8~9(80#) ^[19]	3~7(玄武岩、花岗岩) ^[20]
洛氏硬度	51.6(80#) ^[19]	21.1(玄武岩) ^[20]
磨光值/PSV	45.7(75#)、55.7(85#) ^[10]	43.7(玄武岩) ^[10]
洛杉矶磨耗损失率/(LAA, %)	20.6(75#) ^[10] 、9.5(80#) ^[21] 、10.6(88#) ^[10]	12.9(玄武岩) ^[10]
压碎值/%	22.6(75#) ^[10] 、8(80#) ^[19] 、7.74(88#) ^[10]	11.5(玄武岩) ^[10] 、32.7(花岗岩) ^[19]
抗滑值/PTV	79(80#) ^[22]	59(花岗岩)、73(砂岩) ^[22]

由此可见,CB 骨料比常规骨料具有更高的强度和弹性模量。为便于全文索引,将衡量 CB 骨料一些特殊性能的指标简称、英文缩写及解释汇总于表 3。LAA、PSV、PTV 等是衡量骨料耐磨性的指标,由表 2 可见,CB 骨料的耐磨性优于常规骨料。文献中通过压汞法(MIP)测得不同批次 CB 骨料孔隙率为 20.14%、16.6%、12.7%,CB 骨料 1 h 吸水率可为 4.32%、3.48%、3.58%^[6,13,14]。

Wu 等^[23]测试了 6 组不同品级 CB 骨料的化学成分、物理和力学性能,如图 3 所示,其中铝相含量中刚玉和莫来石所占比例不同,骨料吸水率在 3.5%~7.5%,且随着较硬刚玉含量的增加,骨料硬度更高,通过在骨料灰色部分或白色区域分别取 3 个纳米压痕点,测得的模量值如图 3(e)和 3(f)所示,均高于常规骨料的模量。

不同等级的铝矾土生料烧结温度要求不同,加热过程中发生的物理化学反应不同,若温度达

表 3 CB 骨料特殊性能指标及其他专有名词解释
Table 3 Special performance indicators of CB aggregate and other technical terms explained

名称	简称(英文全称)	解释
CB 骨	见表 1,如 60#、	标注 CB 骨料中的 Al ₂ O ₃ 含量,若文中未
料品级	80#	标注则表示原文没有提及 CB 骨料品级
压碎值	Crushing value	指骨料在逐渐增加的荷载下抵抗压碎的能力,数值越低,抗压碎能力越强
洛杉矶磨耗损	LAA(Los Angeles abrasion)	衡量标准级配骨料在磨损、冲击和研磨的综合作用下退化程度的指标。数值越低,骨料抵抗磨损能力越强
失率		
磨光值	PSV(Polished stone value)	反映骨料抵抗轮胎磨光作用能力的指标。数值越高,耐磨性越好
抗滑值	PTV(Pendulum test value)	用于测量路面抗滑性的摆锤试验值。数值越高,含有这种材料的路面抗滑性越强
微德瓦	MDL(Micro deval loss)	使用微型德瓦尔仪器测试得到细骨料耐磨性。数值越低,耐磨性能越强
尔损失		
摆值	BPN(British pendulum number)	摆式仪测试的滑溜块与被测不同物体表面之间的摩擦因数,扩大了 100 倍后的数值。反映路面抗滑性能,数值越高,抗滑能力越强
动稳定	DS(Dynamic stability)	用于表征沥青混合料的高温稳定性,数值越高,路面高温抗车辙性能越好
度		
内养护	IC(Internal curing)	在混凝土中引入储水介质,如多孔骨料、高吸水性树脂等,为水化过程提供水分
骨料/集料	Aggregate	在建筑工程领域称作骨料,在道路工程领域称作集料,本文统一用骨料一词

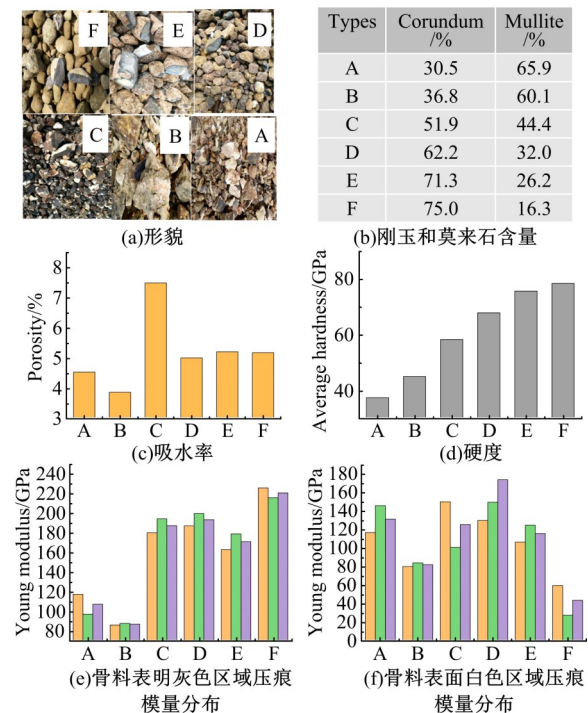


图 3 不同 CB 骨料性能

Fig. 3 Properties for CB aggregate of different grades

到或略高于所需烧结温度,熟料会充分烧结且致密,若温度偏低,则孔隙率高^[24]。不同煅烧工艺(如烧成设备是竖窑、回转窑等)、原铝矾土产地和质量、成分及 Al_2O_3 含量等均会影响烧结产物品相组成、微观结构、孔隙率、强度等^[25,26]。其中,影响最大的因素是原矿 Al_2O_3 含量。整体而言,等级越高的铝矾土熟料,密度越大,其结构越致密,孔隙率低,强度越高。例如, Al_2O_3 含量较低的铝矾土,在煅烧过程重刚玉-莫来石体系烧结不完全,烧结困难,烧结过程中容易产生体积膨胀,形成的矿物结构不致密,存在较多孔隙和裂纹; Al_2O_3 含量较高的铝矾土,其刚玉-莫来石结构发育较为成熟,结构致密,刚玉相生成比例高,整体上具有更高的强度、硬度^[27]。

各品级CB骨料的矿物组成如图4(a)所示。

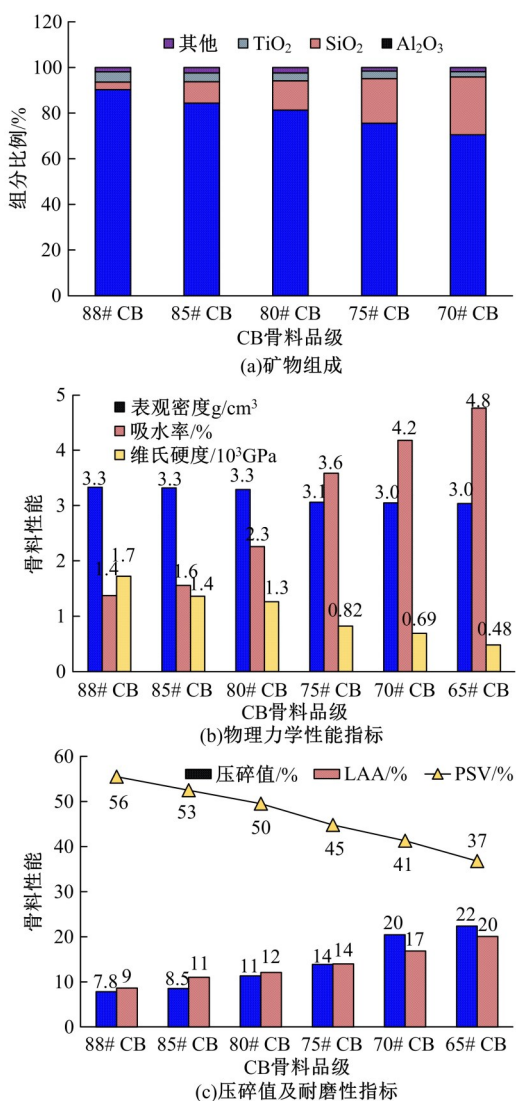


图4 不同品级CB骨料性能

Fig. 4 Properties for CB aggregate of different grades

Yang等^[20]基于《高铝矾土熟料》(YB/T 5179—2005)^[28]总结了不同品级CB骨料的物理、力学性能,其表观密度、吸水率和维氏硬度,刚玉和莫来石含量比例与不同品级CB骨料的关系如图4(b)和图4(c)所示,其压碎值、LAA、PSV的变化规律整理如图4(c)所示。由此可见,当 Al_2O_3 含量越高,其中硬度高的刚玉成分含量越多,其密度、硬度越大而吸水率越小,其压碎值和LAA越小且PSV越大,其综合物理、力学性能越优异。

2 CB骨料用于UHPC材料领域的研究与应用

2.1 CB骨料对UHPC力学性能的影响规律

超高性能混凝土的超高强度、超高韧性及超长耐久性等特点,使其在建筑、桥梁、防护、海洋等工程领域具有广阔应用前景,是近年来最具创新性和发展应用前景的水泥基复合材料^[29-31]。CB骨料作为一种高强、高硬度骨料,已被国内外一些学者用于制备UHPC,且在提升其力学性能方面显示出优势。丹麦的Bache^[2]最早使用CB骨料在实验室高温养护条件下获得了抗压强度达280 MPa的UHPC。Reda等^[32]采用不同配合比、养护条件配制了多种含CB骨料的UHPC,其抗压强度可达140~240 MPa。Spiesz和Hunger^[33]在常温养护下获得含CB骨料的UHPC,其抗压强度可达188 MPa。

多位学者将含CB骨料的UHPC与含常规骨料的UHPC进行对比研究。Buitelaar^[34]发现,相同条件下含CB骨料的UHPC强度为150 MPa,而含花岗岩骨料的UHPC仅为100 MPa。Aydm等^[35]研究了多种骨料对UHPC抗压强度的影响,其结果表明:含65#CB骨料的UHPC其强度在不同养护制度(普通、蒸汽、高温高压等)下均高于含其他骨料(花岗岩、玄武石、石灰岩等)UHPC,具体如图5(a)所示。Liu和Wei^[6]的试验结果表明:在7 d到1年的龄期内,含75#CB骨料的UHPC基体(无纤维)的强度始终显著高于含玄武岩的UHPC基体。在50#CB骨料粒径大小及初始干燥状态对自然养护的UHPC力学性能的影响规律研究中,Liu和Wei^[36]测得它们28 d的抗压强度 f_c 为142~158 MPa,劈裂抗拉强度 f_t 为16.2~18.4 MPa,弹性模量 E 为51.3~55.8 GPa,均高于对照组普通UHPC的数值($f_c=135$ MPa, $f_t=16.2$ MPa, $E=51.3$ GPa),如图5(b)所示。研究表明:使用大粒

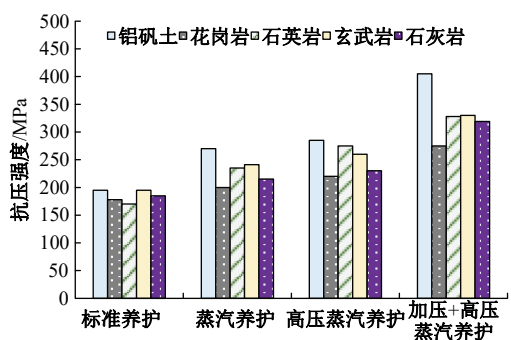
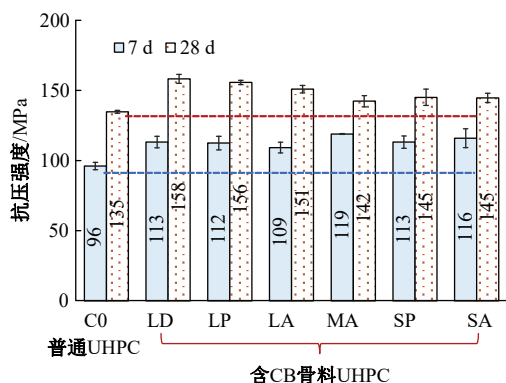
(a) 含不同骨料UHPC在不同养护条件下的抗压强度对比^[35](b) CB骨料粒径及初始含水状态对UHPC强度的影响(L-大,M-中,S-小,P-预湿,A-干燥+额外IC水,D-干燥)^[36]

图 5 CB 骨料对 UHPC 抗压强度的影响

Fig. 5 Effect of CB aggregates on compressive strength of UHPC

径(5~8 mm)CB 骨料对 UHPC 力学性能的提升效果优于使用中、小粒径(3~5 mm、1~3 mm)CB 骨料,且采用初始干燥状态 CB 骨料或预湿 CB 骨料均可有效提高 UHPC 的力学性能^[36]。综上所述,与使用如花岗岩、玄武岩等常规骨料制备的 UHPC 或普通 UHPC 相比,使用 CB 骨料制备的 UHPC 具有更加优异的力学性能。

2.2 CB 骨料对 UHPC 收缩性能的影响规律

由于 UHPC 水胶比极低,胶凝材料含量高,其自收缩可高达 500~900 $\mu\text{m}/\text{m}$ ^[37-39],且 UHPC 孔隙率极低,非常致密,干燥收缩很小,只占总收缩的 10%~20%^[39],自然养护下叠加干燥收缩及温度应变后,高约束状态下早期开裂风险高,易劣化混凝土结构力学性能和耐久性^[40]。使用内养护(Internal curing, IC)技术(解释见表 3)可有效降低混凝土收缩开裂风险^[41],但常规 IC 介质很难兼顾 UHPC 力学性能和减缩程度。例如,当利用超吸水性树脂(SAP)来降低 UHPC 的自收缩时,由于 SAP 本身产生空隙体积的增加和额外增加的 IC 水,高剂量的 SAP 会降低 UHPC 的强度^[42-44]。Meng 和 Khayat^[45]同样发现制备低收缩

UHPC 的轻质骨料(LWA)IC 介质,也存在降低 UHPC 强度或弹性模量的问题。

CB 骨料具有一定孔隙率也可作为 IC 介质,且根据 CB 骨料掺量不同对 UHPC 自收缩的降低率可达 50~90%,同时还可提升 UHPC 力学性能^[14,36]。如图 6(a)所示,Liu 和 Wei^[14]的试验结果表明:当使用 300 kg/m^3 的 75#CB 骨料制备 UHPC 时(A300-使用干燥 CB 骨料,或 A300(W)-预湿 CB 骨料),相比于普通对照组 UHPC(C00)的收缩值(540 $\mu\text{m}/\text{m}$),其自收缩可降低至 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ (28 d);使用 600 kg/m^3 CB 骨料的 UHPC (A600)在 28 d 龄期内一直保持微膨胀状态。Liu 和 Wei^[6]监测了长达 3 个月的 UHPC 总收缩(自收缩+干燥收缩),发现含 CB 骨料 UHPC 总收缩值仅为含玄武岩骨料 UHPC 总收缩的一半。Liu 和 Wei^[36]考虑了 50#CB 骨料初始水分条件(干燥-D、预湿-P、干燥+额外 IC 水-A)、CB 骨料粒径(大粒径为 5~8 mm、中粒径 3~5 mm、小粒径为 1~3 mm)等因素对 UHPC 自收缩的影响。由图 6(b)可见,无论是预湿还是干燥 CB 骨料都可以提供有效的 IC 效率(例如图中 SA 与 SP 的对比或 LP、LA、LD 三者的对比);在考虑到骨料粒径的影响时(SA、MA、LA 对比),Liu 和 Wei^[36]发现中粒径 50#CB 骨料(3~5 mm)在减少 UHPC 收缩方面表现最好,其次是细 CB 骨料(1~3 mm)、大粒径 CB 骨料(5~8 mm)。

为进一步验证该低收缩 UHPC 在结构上的应用效果,Liu 等^[46]开展了圆环约束收缩试验,发现使用 CB 骨料 UHPC 可减少裂缝宽度或阻止裂缝出现(见图 7(a))。在大尺寸 UHPC-混凝土组合板试验^[46]及该构件有限元模拟中^[47],普通 UHPC 层比含 CB 骨料的 UHPC 层发生了更严重的界面脱粘和板角翘曲现象(见图 7(b)),且普通 UHPC 层跨中侧面出现微裂纹,以上均表明 CB 骨料有助于减少 UHPC 收缩引起的开裂或组合板翘曲问题。Guo 等^[48]在研究中通过改善该 UHPC 工作性、加强混凝土基层表面施工前的饱水润湿、设置混凝土-UHPC 层间锚固筋等方式,有效解决了 UHPC 板角翘曲问题。

2.3 CB 骨料对 UHPC 力学、收缩性能的作用机理

CB 骨料对 UHPC 的减缩机理(内养护作用)与轻骨料对混凝土的减缩作用一致,具体如图 8

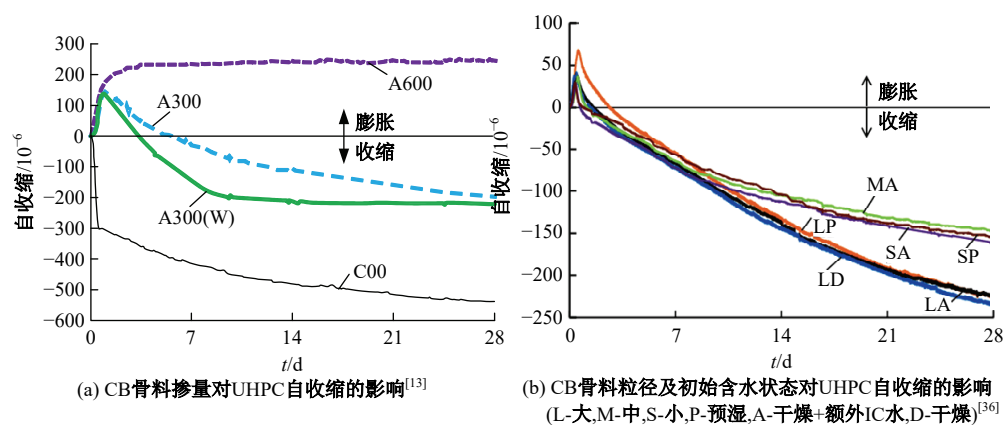


图 6 CB骨料对UHPC自收缩的影响

Fig. 6 Effect of CB aggregate on UHPC self-shrinkage

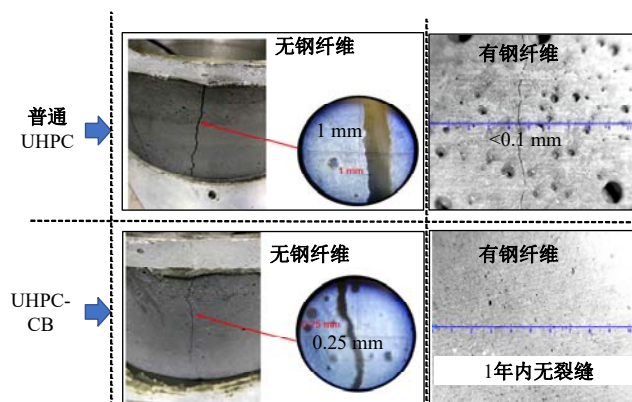
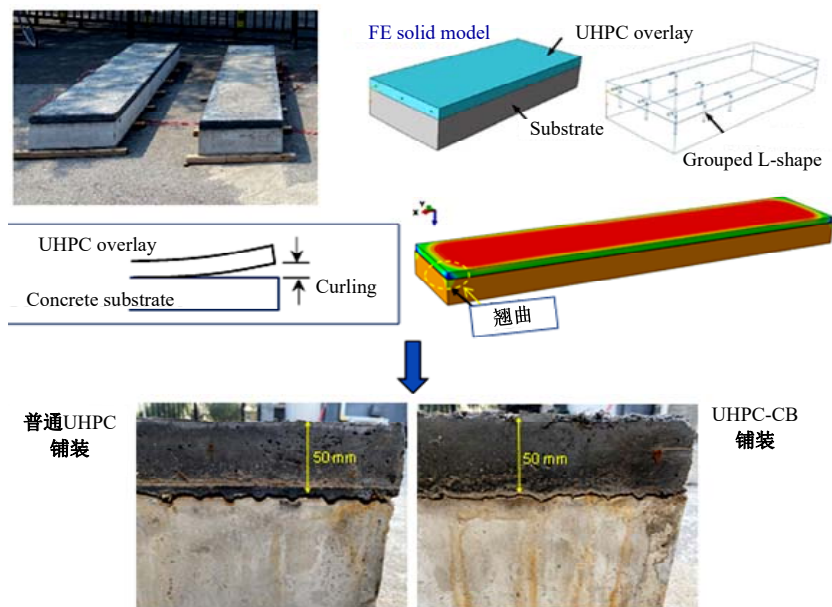
(a)含CB骨UHPC圆环约束收缩试验^[42](b)UHPC-NC组合板翘曲现象(图片组合^[47,48])

图 7 约束状态下UHPC收缩试验

Fig. 7 Restrained UHPC shrinkage experiment

所示。由于UHPC孔隙率极低且非常致密,外部养护水分不能抵达水泥浆体内部,而内养护可以起到很好的作用。含孔CB骨料作为储存水分的

载体,拌合完成后均匀地分布于水泥浆体中,起到内部“蓄水池”的作用,当水泥浆体中的自由水被消耗到一定程度时,内养护介质中储存的水分开

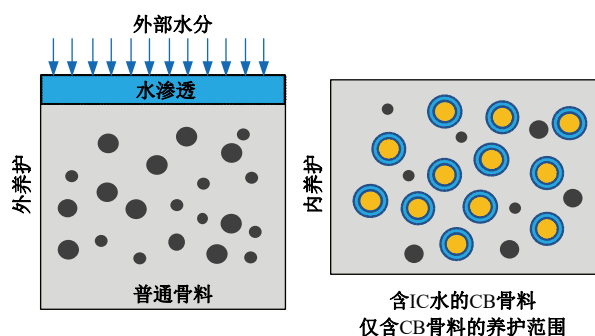


图 8 CB骨料内养护作用机理解释图

Fig. 8 Explanatory diagram of internal curing mechanism of CB aggregates

始向四周扩散,促进周围未水化胶凝材料水化反应继续进行,提高了水泥浆体的内部相对湿度和水化程度,从而减小了内部毛细孔负压与收缩应力,从源头减小自收缩产生的动力。

CB骨料对UHPC力学性能提升的作用机理(见图9)可概述为以下几点^[36]:①CB骨料较普通骨料强度、模量更高;②CB骨料的内养护作用提供额外水分促进了UHPC浆体水化程度,有助于提高力学性能;③骨料因粗糙形貌、孔隙在界面过渡区(ITZ)形成更好的机械联锁效果(水化产物生长到CB骨料孔洞中),从而提高ITZ黏结强度。

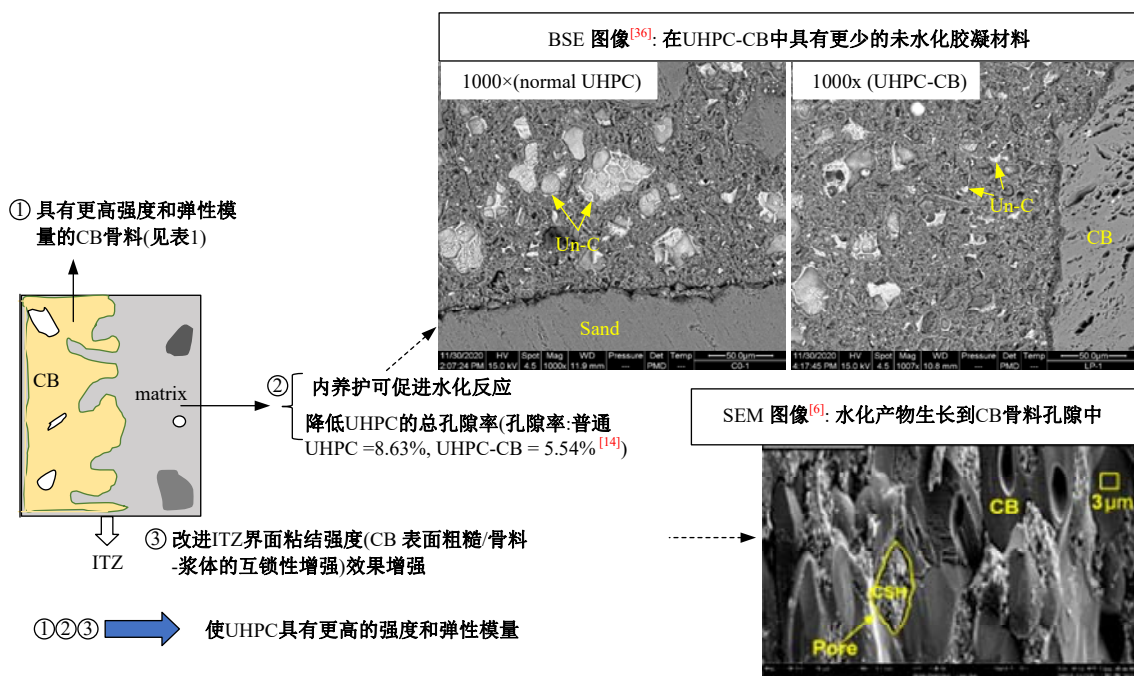


图 9 CB骨料对UHPC力学性能提升的机理解释图

Fig. 9 Explanation for improving mechanism of CB aggregate to UHPC's mechanical properties

2.4 含CB骨料的UHPC耐久性研究及工程应用

UHPC自身耐久性显著优于普通混凝土,专门针对含CB骨料的UHPC耐久性研究的文献较少,仅Spiesz和Hunger^[33]开展了相关试验研究,分析了含CB骨料的UHPC的孔隙率、抗碳化性能、抗氯离子渗透性以及抗冻性,结果如图10和表4所示,并与普通混凝土进行对比,由表中各项指标可见,含CB骨料的UHPC与普通UHPC一致,其耐久性仍远超普通混凝土。

2022年清<华大学和北京科技大学团队将该低收缩免蒸养UHPC专利产品^[49]应用于云南某新建混凝土箱梁桥桥面铺装层上(桥长60m),

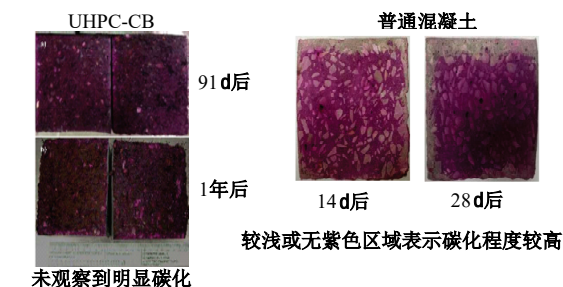


图 10 含CB骨料的UHPC与普通混凝土抗碳化性能对比

Fig. 10 Comparison of carbonation resistance between UHPC with CB aggregate and normal concrete

桥面铺装结构有限元模型如图11所示。该工程采用滑模摊铺机对UHPC进行摊铺,并覆膜自然养护,UHPC层硬化后对表面进行抛丸、刻槽处

表 4 含CB骨料的UHPC与普通混凝土耐久性试验结果对比
Table 4 Comparison of durability between UHPC with CB aggregate and normal concrete

混凝土类型	孔隙率(体积的百分比)	氯化物迁移系数 DRCM 值/($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	表面剥落值/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)
含CB骨料 ^[33]	2.4%~3.7%	$0.11\cdot 10^{-12}$	0.04
普通或高性能	12%~15%	$1\sim 10\cdot 10^{-12}$	1.5~6

注:表面剥落值 $<0.5\text{kg}/\text{m}^2$,说明抗冻性较好

理,直接作为抗滑耐磨行车路面层(施工过程如图 12 所示)。Wei 等^[50]对该混凝土桥面采用 UHPC 铺装层的材料设计、结构设计、施工要点及施工过程进行了阐述,此方案利用 CB 骨料制备低收缩、免蒸养 UHPC,同时进一步提高了桥面铺装层耐久性和耐磨性。

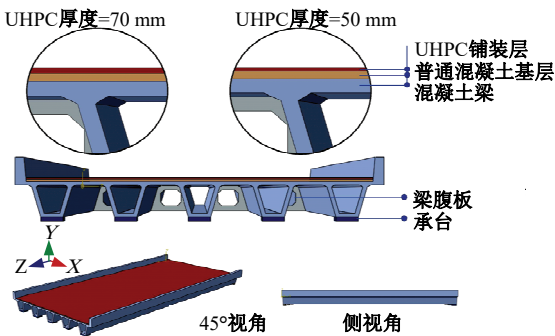


图 11 UHPC 桥面铺装层结构有限元模型
Fig. 11 Finite element model established for concrete bridge deck pavement



图 12 混凝土桥面含CB骨料的UHPC桥面铺装层施工过程
Fig. 12 Construction process of UHPC with CB aggregate as concrete bridge deck overlay

3 CB 骨料在高耐磨、高抗滑路面领域的研究与应用

随着高速公路建设的迅猛发展,交通荷载频次和载重的增加对路面耐磨、抗滑性能提出了重大挑战,尤其是弯道、长大纵坡等特殊路段,高频服役和车轮荷载加速了路面的磨光和磨耗,使路面抗滑能力迅速衰减,交通安全问题日益突出。国内外大量研究表明:引入具有优异耐磨性、抗滑性的CB骨料,可提供有效解决方案。国内外诸多学者对CB骨料制备高耐磨抗滑路面表层进行了相关研究和应用。

3.1 CB 骨料在高耐磨表面处理技术中的应用

针对路面抗滑性不足或衰减过快的问题,高耐磨表面处理(High friction surface treatments, HFST)作为一种特殊路面层处理技术可提供有效解决手段, HFST 由高耐磨骨料和环氧树脂黏结剂组成薄层,铺设在路面表层, HFST 的取芯样本及实物图如图 13 所示。1960 年代,英国进行了抗滑表面处理的应用试验^[51]。1960~1970 年代, HFST 的应用传播到法国、德国、意大利和斯堪的纳维亚半岛,到 1980 年代, HFST 较为普遍。1990 年代,新西兰开始应用 HFST^[51,52]。从 21 世纪初开始,美国几个率先采用 HFST 的州和产品供应商就开始了 HFST 的早期部署, HFST 供应商将其作为一种安全措施推销给美国交通部门^[53,54]。2004 年,美国开始正式使用 HFST 作为弯道安全措施^[52]。在过去的 15~20 年里,美国使用 HFST 作为道路安全对策的应用呈指数级增长,截至 2018 年,至少有 44 个州铺设了 HFST,且多州铺设了 100 多个 HFST^[55](见图 14)。在我国,长安大学的多位学者对 HFST 技术进行了较多研究,但整体工程应用较少。

HFST 可提高路面耐磨、抗滑性,有助于缩短汽车制动距离,大幅度降低交通事故率,提高道路行驶安全性^[55],表 5 列举了美国 3 个州铺设 HFST 后交通事故率降低情况,例如宾夕法尼亚州 47 处弯道铺设 HFST 后使得总交通事故减少 70%,湿滑天气下事故减少 87%。HFST 在世界各地得到了广泛应用,图 15 给出了新西兰、爱尔兰、美国等铺设 HFST 路段示例,以及中国对抗滑性要求较高且适宜铺设 HFST 的典型路段。目前国内仅对超薄磨耗层做出了相关技术要求,尚未形成 HFST 材料的规范^[56],美国 ASSHTO^[57]及 FH-

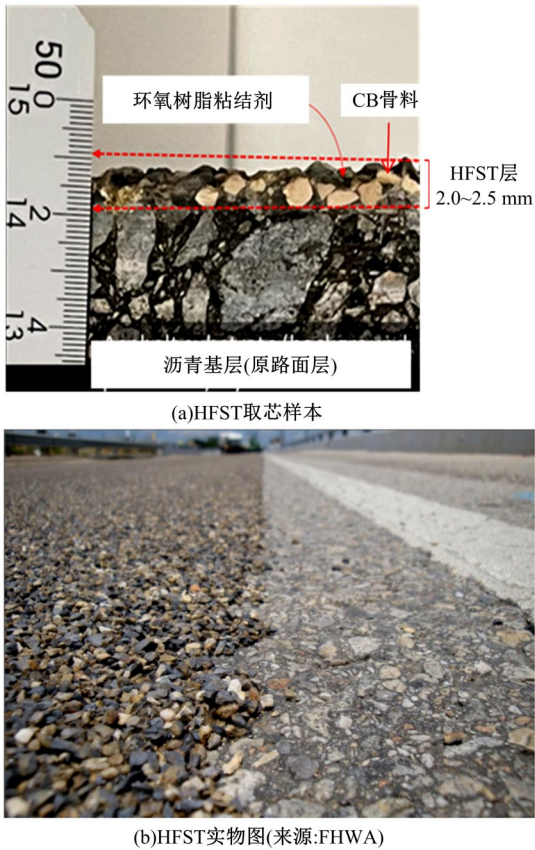


图 13 HFST 取芯样本及实物

Fig. 13 HFST sample and true example

WA(美国联邦公路局)发布的相关指南^[58]等对 HFST 选址、设计(骨料、黏结剂、厚度等)、施工方法及检测等技术给出了详细说明。长安大学学者关博文等^[56]对 HFST 的研究及应用进展进行了综述,包括 HFST 的黏结剂性能,集料种类、粒径、掺配方式等材料组成设计关键参数对其抗滑

表 5 美国铺设 HFST 后交通事故减少率举例
Table 5 Examples of crash reduction for HFST in US

地区(州)	数量	总交通事故减少率	湿滑天气交通事故减少率	备注
宾夕法尼亚州	47 处弯道	70%	87%	3~5 年的事故前后数据
肯塔基州	43 处弯道和斜坡	73%(弯道) 78%(斜坡)	86%(弯道) 85%(斜坡)	前 3 年数据及铺设 1~4 年后数据
佛罗里达州	急弯道	44%	84%	—

性能的影响规律,以及 HSFT 的经济效益。2022 年,美国国家公路及运输协会(AASHTO)发布了最新版关于使用 CB 骨料制备 HFST 的技术指南^[57],根据该指南及几乎所有美国各州规范,以及其他大量使用 HFST 的国家,如英国和新西兰^[59,60]等,CB 骨料是唯一被允许用于 HFST^[61]的骨料,其他骨料,如燧石、玄武岩和花岗岩,只能用于非关键安全的预防性维护^[58]。

3.2 CB 骨料在沥青混合料中的应用研究

由于骨料对沥青路面的长期耐磨、抗滑性能有重要影响,除了 HSFT 技术外,也有学者研究了含 CB 骨料沥青混合料的相关性能。早在 1962 年,英国在汉普郡某主干道试验段上比较了采用不同骨料的沥青混合料的耐磨和抗滑性能,研究发现 CB 骨料的耐磨、抗滑性显著优于各种天然骨料^[62]。Zong 等^[63]研究了骨料类型对沥青混合料长期抗滑性的影响,通过沥青混合料动态摩擦因数测试,发现含 88#CB 沥青混合料摩擦因数相



图 14 美国各州铺设 HFST 情况(来源: FHWA)

Fig. 14 HFST implementations in States of US(source: FHWA)



图 15 国内外 HFST 应用场景

Fig. 15 Domestic and international HFST application situations

比于 75#CB、玄武岩、石灰石始终保持最高(见图 16),不仅保证了沥青混合料耐磨层具有良好初始抗滑性能,也能使长期经历磨光作用的路段始终保持较强抗滑能力。沥青路面的抗滑性能主要与集料的级配组成和形态特征等有关^[64]。丛林等^[65]研究表明:骨料的 PSV 值是影响沥青混合料抗滑性初始值和最终稳定值的主要因素,压碎值是影响沥青混合料抗滑性能衰减速率的主要原因,而 CB 骨料的 PSV 值和压碎值显著高于常规骨料,也能使长期经历磨光作用的路段始终保持较强抗滑能力。吴喜荣^[66]对含 CB 骨料沥青混合料各项性能进行了系统研究,包括 CB 骨料空间布局与粒径组合对抗滑性的影响、CB 骨料沥青混合料路用性能, CB 骨料沥青混合料的低温性能、抗裂性能和水稳定性能弱于同类型混合料的石灰岩和玄武岩,而其高温性能反之;含 CB 骨料的沥青混合料的摩擦因数最优,其次是玄武岩,最差的是石灰岩。Li 和 Liu^[7]采用三轮抛光装置及动态摩擦因数测试仪研究了含不同骨料沥青混合料的抗滑性能,发现不同品级的 CB 骨料在物理和力学性能上比石灰岩骨料提高了 20%~200%,其中 88#CB 骨料提供最优的综合抗滑性能,石灰岩骨料综合抗滑性能最差。

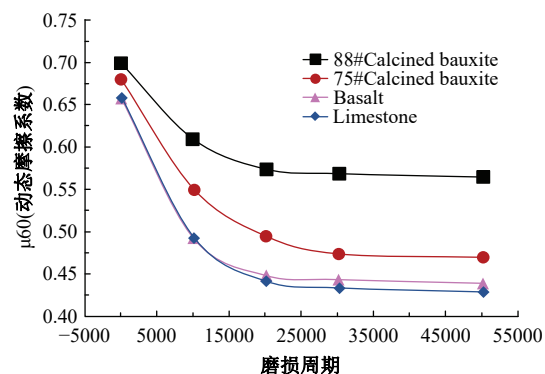


图 16 含不同骨料沥青混合料动态摩擦因数随磨损周期的变化(速度 60 km/h)

Fig. 16 Variation of dynamic friction coefficient with wear cycle for asphalt mixtures containing different aggregates

3.3 CB 骨料提升路面表层耐磨、抗滑性的作用机理

路面耐磨、抗滑耐久性不仅需要骨料具有较好的初始耐磨性,也需要骨料在经历长期磨光作用后仍具有优异的耐磨、抗滑保持力。对英国 50 年道路试验数据的调查回顾发现, CB 骨料是唯一在长时间内始终提供很好耐磨、抗滑性的骨料,可使用 20 年不发生抛光^[67],而具有很好初始耐磨性的天然骨料会被逐渐磨光,变得光滑^[68]。Dews 和 Bishop^[1]的研究也表明 CB 骨料的抗滑性及纹理深度保持力比天然碎石更为优异。

通过表 2 中 CB 骨料与常规骨料多项性能对比发现, CB 骨料力学性能、硬度和耐磨性显著优于常规骨料,这主要是因为 CB 骨料中含有耐磨性极高的 Al_2O_3 相(刚玉和莫来石),而石灰岩、玄武岩主要化学成分为 SiO_2 ,耐磨效果不如 CB 骨料。图 17(a)给出了不同骨料的 PSV(磨光值)随抛光次数的变化情况,可以看出 88#CB 骨料的初始和长期耐磨性始终最优。ASTM D8782 中采用微型德瓦尔仪器测试了较细骨料耐磨性(Micro deval loss, MDL),图 17(b)给出了 CB 骨料与其他骨料的 MDL 对比值,可见 CB 骨料磨损量远小于其他骨料,表现出更优异的耐磨性^[69]。Huan 等^[70]采用石灰岩骨料和 CB 骨料制备应用于 HFST 的试样进行抛光测试,并对骨料表面 SEM 图像进行了 3D 微观纹理重构(见图 18),发现石灰岩骨料磨损后表面光滑,而 CB 骨料磨损后仍保有粗糙纹理。

CB 骨料中既有坚硬的 Al_2O_3 相(刚玉和莫来石),也有软弱的二氧化硅相等,在磨损过程中,软

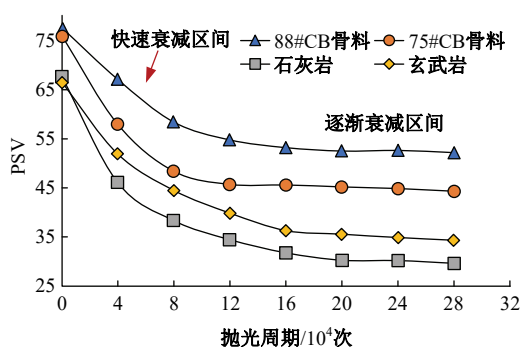
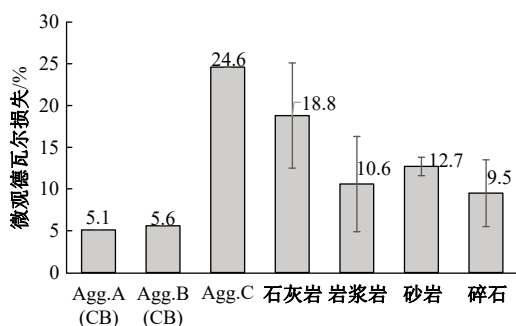
(a)不同粗骨料磨光值(PSV)变化^[62](b)不同骨料德瓦磨损失^[69]

图 17 CB 骨料耐磨性测试

Fig. 17 CB Aggregate abrasion resistance test

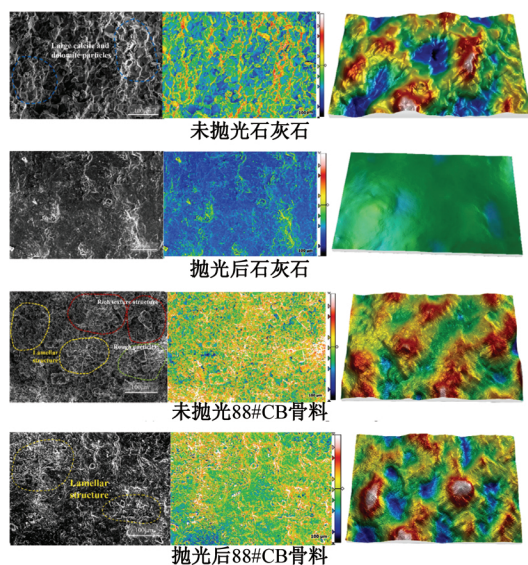


图 18 石灰岩及 CB 骨料抛光前后表面 SEM 图及微观纹理图

Fig. 18 SEM and 3D morphological surface texture of limestone or CB aggregate before and after polishing

弱相先被磨掉,然后在不断磨损过程中坚硬相也被逐渐破坏,当坚硬相被破坏到一定程度后,软弱相露出表面继而形成新的微观纹理,骨料磨光过程遵循这个破坏-恢复的往复过程^[20]。CB 中刚

玉和莫来石相交错形成的微观结构起到网状骨架作用,能够减轻磨耗作用所产生的应力破坏,这是 CB 骨料具有良好耐磨、抗滑性能的主要原因^[64,71,72]。Li 等^[73]研究发现,Al₂O₃有利于 CB 骨料硬度、强度和互锁结构,88#CB 骨料具有最优的硬度和耐磨性能,这是因为其 Al₂O₃ 含量最高,致使刚玉-莫来石结构相比 Al₂O₃ 含量较低的 75#CB 骨料更加致密。

3.4 CB 骨料与其他骨料混合使用研究

CB 骨料主要来源于中国和南美洲圭亚那,相比天然石材成本更高^[63]。在中国市场,常规骨料价格为 100~200 元/每吨,而 CB 骨料的价格为 700~3000 元/每吨(见表 1)。因此,为降低成本,很多学者探索 CB 骨料和其他骨料混合使用的效果。

Xiong 等^[74]研究了石灰岩骨料与(88#)CB 骨料混掺后沥青混合料的抗滑性能,发现两种骨料的 PSV 值差异越大,差异磨光产生的宏观纹理、微观纹理和结构深度就越大,路面抗滑性能的改善越显著。王志斌等^[75]发现当 CB 骨料掺量分别为 60% 和 40% 时(与石灰岩骨料混掺),沥青混合料的动稳定度(DS)和抗滑性能分别达到最佳值。Woodward 和 Friel^[67]探究将 CB 骨料与天然骨料混合对 HFST 耐磨性的影响:将 60%CB 骨料和 40% 天然骨料混合,测得 PSV(磨光值)为 69,可通过略微提高 CB 骨料占比以满足大于 70 的要求,从而显著降低成本。Yu 等^[27]发现,当钢渣骨料尺寸减小至 2.36~4.75 mm 时,它与 CB 骨料的 LAA 损失差异可减小 27%,故使用小尺寸的钢渣骨料代替 CB 骨料也具有可能性。奥本大学国家沥青技术中心(NCAT)^[28]通过对 HFST 模拟交通试验发现含 100%CB 骨料试样、含 CB 骨料与砂岩 B 或砂岩 A 混合试样的抗滑值(PTV)分别为 76、75 和 74(越高越好),这表明将砂岩与 CB 骨料混合使用可满足抗滑要求且降低成本。El-Ashwah 等^[76]研究了使用 CB 骨料或其他 5 种骨料的 HFST 耐磨性和抛光特性,对于同一种骨料,粒径越小, BPN(摆值,反映路面抗滑性能)衰减速率越低,根据 BPN 值,砾石和钢渣均具有良好的微结构特性,是 CB 骨料的适宜组合骨料^[66]。

宗有杰等^[77]在沥青混合料中将石灰岩骨料按比例与 88#CB 骨料掺配(CB 骨料占质量比 25%~50%),发现沥青混合料表层差异磨光效

应显著,抗滑性能更加优异。Huan等^[70]研究发现两种骨料耐磨性差异越大,混合使用形成的“差异磨光”面层长期抗滑性越好(解释见图19),

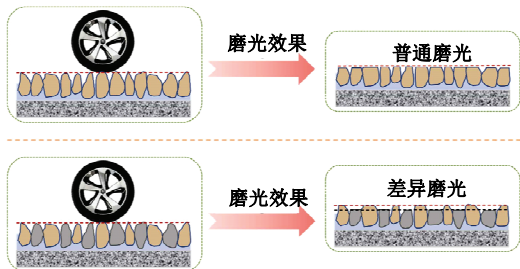


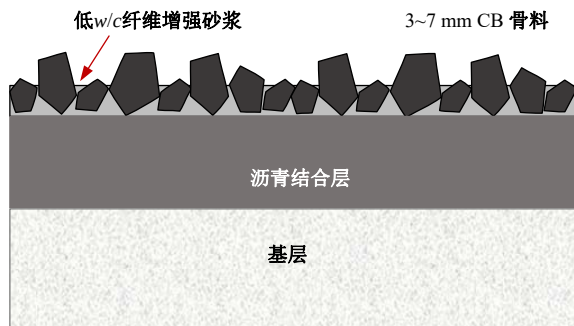
图19 骨料普通磨光及不同骨料差异磨光示意图

Fig. 19 General polishing of aggregates and differential polishing for different aggregates

可以通过不断构建新的纹理结构来减少磨损并保持优异的表面粗糙度,从而有效提高 HFST 的抗滑耐久性。虽然对 CB 骨料的替代骨料进行了大量的实验室和小规模现场评估,但研究结果仍表明:没有其他骨料能完全提供 CB 骨料的高水平长期摩擦性能^[58]。“差异磨光”理论尚需要大量实际工程的长期性能验证。然而,值得注意的是,这些替代骨料(包括燧石、钢渣、玄武岩、花岗岩、金刚砂和塔克石)仍然可以提供令人满意的耐磨性能,用于诸如耐磨需求较低的桥面铺装层等工程。

3.5 CB 骨料在水泥基路面材料中的研究与应用

在水泥基材料路面表层领域,法国采用 CB 骨料制作了长寿命高耐磨水泥路面层(High-performance cementitious material, HPCM)^[78],如图20所示。HPCM 包含3%体积分量的钢纤维,且在8 mm 水泥基层上黏结一层暴露出表面的CB骨料。通过耐磨性和抗滑性试验测试表明(见图20(d)、图20(e)),HPCM层的耐磨保持力非常优异,磨损量远远小于普通沥青路面材料;其抗滑性也至少是沥青路面层的3倍。2011年,法国铺设了75 m长的 HPCM 试验段,目前仍保持良好的使用状态^[79],试验路段示例见图20(b)。黄政宇和刘强^[80]利用CB骨料高强度和高耐磨等特点所配制的水泥混凝土耐磨耗值为 0.1 g/cm^3 ,低于含石英砂混凝土的耐磨耗值50%(0.2 g/cm^3)。孙培^[81]比较了多种骨料对水泥混凝土耐钻磨性的影响,发现含CB骨料的混凝土被钻磨的深度相比含石灰岩、玄武岩、石英石骨料的混凝土分别降低了

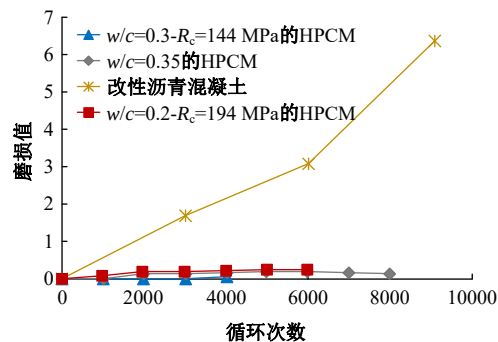


(a)HPCM设计

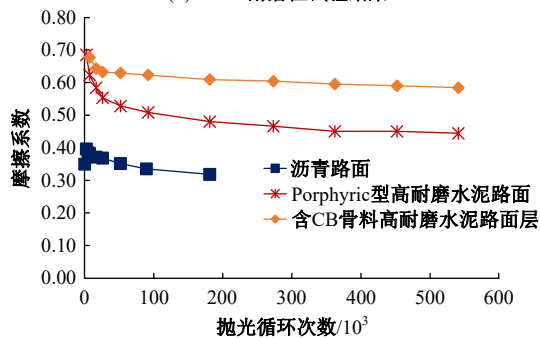


(b)HPCM试验段

(c)HPCM样品



(d)HPCM耐磨性试验结果



(e)HPCM抗滑性试验结果

图20 长寿命高耐磨水泥路面层(HPCM)

Fig. 20 High-performance cementitious material (HPCM) layer

50%、30%、40%。这进一步表明CB骨料可以提高水泥混凝土材料的耐磨性,在水泥基路面抗滑表层中具有重要应用价值。

4 CB 骨料在抗冲击水泥基材料领域的研究与应用

4.1 含CB骨料的水泥基材料抗冲击性能

建筑材料的抗冲击性能对建筑、桥梁、基础设施等民用建筑及国防工程结构抗极端荷载(抗冲

击与爆炸等)设计具有重要意义,需要探究合适的工程防护材料以满足或提高上述结构的抗冲击性能。研究表明:较大尺寸和高硬度的粗骨料有助于减轻混凝土的冲击局部损伤^[82,83]。钟锐等^[84~86]比较了UHPC、纤维增强高强混凝土以及高延性水泥基材料(ECC)的抗弹丸侵彻行为,发现强度超过一定阈值后抗压强度并未能有效转化为抗侵彻性能,而受骨料影响的有效硬度指标、弹性模量对水泥基材料抗冲击性能影响更大。与常规骨料相比,石灰岩、花岗岩和石英的莫氏硬度分别为3、6~7、7,而85#CB骨料的莫氏硬度极高(8~9)^[27],故使用更高硬度CB骨料制备抗冲击混凝土材料具有优势。Quek等^[4]研制了一种水泥基功能梯度面板(包含聚乙烯纤维网水泥、粗骨料和砂浆等)以抵抗高速弹丸冲击,研究发现在多种冲击速度下,使用CB骨料对降低穿透深度最为有效。Wu等^[19]研究发现含粗刚玉(CB主要成分)骨料的钢纤维混凝土其抗冲击性能远超含玄武岩骨料钢纤维混凝土。

Zhang等^[86]发现相同水胶比下含80#CB细骨料砂浆相比含硅质砂砂浆被不可变形弹丸侵切的深度分别减少了13.1%($w/b=0.6$),24.2%($w/b=0.28$),10.3%($w/b=0.17$)(试验示意图见图21),此外冲击含CB细骨料式样的弹丸端头磨损大于其他式样。Zhang等^[87]通过砂浆、混凝土及UHPC的抗冲击性试验发现,使用细80#CB骨料相比于硅质砂在可变形和不可变形弹丸冲击下均提供更好的抗冲击性能,且粗、细(80#)CB骨料组合使用相比于硅质砂和花岗岩组合可进一步减小侵切深度。Zhang和Zhong^[88]的试验得出了相同结论,具体为使用粗80#CB骨料比使用花岗岩骨料可降低侵切深度达32%,混合使用粗、细80#CB骨料相比于使用硅质砂和花岗岩骨料可降低侵切深度达52%。Zhang等^[19]对比不同工况下含80#CB骨料与含硅质砂或花岗岩骨料水泥基材料(强度从34.2 MPa到197.2 MPa),发现CB骨料在提高水泥基材料有效硬度及弹性模量中发挥了重要作用,从而有助于降低弹丸侵切深度;此外,高强、高硬度CB骨料使弹丸端头产生更严重的破坏也是其提高抗冲击性的原因。如图22所示,铜制可变形弹丸和钢制不可变形弹丸冲击不同水泥基材料后可见,所有冲击含有CB骨料的试块的弹丸端头较冲击含硅质砂或花岗岩骨

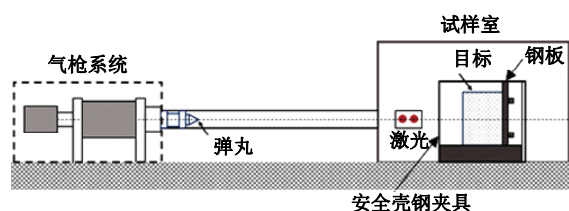


图 21 弹丸冲击试验示意图

Fig. 21 Schematic diagram of impact resistant test

料的试块破坏更严重,且粗细CB骨料组合达到最有效的破坏弹丸效果,从而最有利于提高材料抗冲击性能。Zhong和Zhang^[89]提出添加80#CB骨料,或掺入硅烷偶联剂或微纤维素以提高水泥基材料抗冲击性能的主动与被动策略,观察发现含CB骨料基体的开坑损伤面积及侵切深度均小于含硅质砂基体或无骨料基体(见图23),为结构抗冲击设计材料研发提供了有效措施。

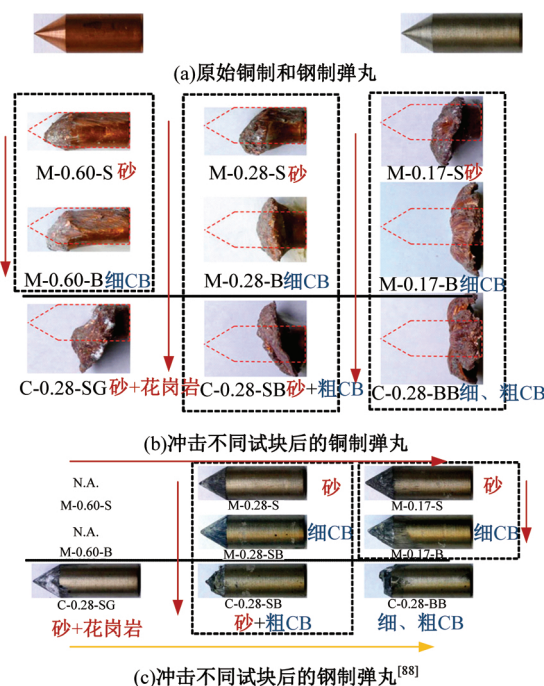


图 22 冲击不同试块后的弹丸

Fig. 22 Projectiles after impact with different test blocks

4.2 CB 骨料提升水泥基材料抗冲击性能的作用机理

CB 骨料提高水泥基材料抗冲击性能的机理可总结为以下几点:①80#CB 骨料相比于常规骨料具有更高的硬度和强度,在冲击过程中裂缝扩展会直接穿过骨料(而非仅在骨料-浆体界面过渡区),80#CB 骨料在破碎中需要吸收更高的能量,从而减小了侵切深度和裂缝的发展^[88];②高硬度、高强度80#CB 骨料可以加剧弹丸端头的质量磨损(见图21),从而进一步减少可用于穿透过程

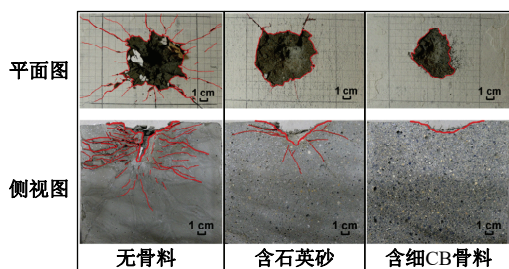


图 23 无骨料、含硅质砂或含细 CB 骨料水泥基材料冲击破坏对比图

Fig. 23 Damage of specimens without aggregate, with siliceous sand or fine CB aggregate

的能量,进而减小穿透深度、弹坑直径和弹坑体积^[86,89];③CB 骨料在提高水泥基材料有效硬度及弹性模量中发挥重要作用,从而有助于减小弹丸侵切深度等,从而提高基体抗冲击性能^[19]。

5 讨论与总结

近年来,CB 骨料在土木工程中已有一定应用,但设计者和研究者对 CB 骨料的材料性能及应用特点了解还不够深入和全面。不同品级的 CB 骨料价格差异较大,品级越高,价格越贵,在不同工程领域及工况下需要采用不同品级的 CB 骨料。例如,骨料品级越低(含铝量越少)其孔隙率越高,价格与普通骨料的差别缩小,适用于低收缩免蒸养 UHPC 制备,发挥其内养护介质功能,例如,50#CB 骨料仍可提高 UHPC 的力学性能^[36],相比使用 LWA 和 SAP 降低 UHPC 自收缩的措施具有提升力学性能的优势,也可满足经济性要求。在制备高耐磨路面表层时,则应选择品级较高、孔隙率低、强度硬度高的 CB 骨料(含铝量高),可提高耐磨等级及减少沥青胶浆被骨料吸收量;但满足道路领域要求的高品级 CB 骨料价格太高,还需考虑如何从原材料入手降低其价格,建议将 CB 骨料应用于某些特殊场合,如隧道出入口、小半径转弯处、长大纵坡等对抗滑性能要求较高的道路段,通过减少事故造成的经济损失进而获得经济效益。在抗冲击水泥基材料领域,为提高抗冲击性,可选择品级较高的 CB 骨料,若要同时考虑水泥基材料的收缩开裂性能及降低成本,可选择中等品级的 CB 骨料,兼顾内养护减缩效果与足够的强度硬度。

CB 骨料的应用多集中于材料研发,相关工程应用除道路耐磨领域外尚不普遍。在欧美等国家和地区已有较多高耐磨路面层工程应用,且美国

已制定相关设计规范,而我国尚未形成 HFST 的相关规程。在 UHPC 制备及抗冲击水泥基材料设计领域,均处于材料研发阶段,相关工程应用较少。在军工结构应用角度,可将 CB 骨料降低 UHPC 收缩开裂性与提高 UHPC 抗冲击性材料兼顾考虑,研发超高抗冲击性 UHPC 功能材料与结构。

6 结论与展望

本文结论如下:

(1)CB 骨料根据 Al_2O_3 含量分为不同品级,若含量越高,则密度、硬度越大而吸水率越低,压碎值和洛杉矶磨耗损失(LAA)越小且磨光值(PSV)越大,综合物理、力学性能越优异,但价格越高,实际应用建议结合功能需求和工程情况选择合适品级,从而以较低成本发挥针对性作用。

(2)使用 CB 骨料代替如花岗岩、玄武岩等其他常规骨料用于制备 UHPC 可以显著提高其力学性能;CB 骨料内部有孔隙,可作为内养护(IC)介质,有效减少 UHPC 自收缩(达 50% 以上),降低 UHPC 结构收缩开裂风险。

(3)相比于常规骨料,CB 骨料的耐磨性及耐磨、抗滑保持力十分优异,将 CB 骨料应用到路面表层、高耐磨表面处理(HFST)或超薄磨耗层等中可以显著提高道路初始及长期耐磨性、抗滑性,进而降低交通事故发生率;为降低成本,即使相关研究探索了 CB 骨料与其他代替骨料混合使用的可行性,CB 骨料目前仍是欧美等国家和地区规范指南中唯一允许用于高耐磨表面处理(HFST)技术中的骨料。

(4)相比于硅质砂、花岗岩等骨料,采用 CB 骨料制备的各种水泥基材料(砂浆、混凝土、UHPC、ECC 等)均表现出更优异的抗冲击性能,这是由于高强、高硬度骨料通过自身破碎、磨损弹丸端头等过程吸收更高的冲击能量,从而减轻冲击破坏程度。

本文总结过去历史并结合现状对未来进行展望如下:未来建议推动使用 CB 骨料的相关材料研究走向结构设计及工程应用研究,进一步熟悉 CB 骨料特性和选用依据,制定相关应用设计方法及指南规程。同时推动使用 CB 骨料的高耐磨表面处理(HFST)技术在我国路面养护中的应用与发展,提高道路安全性。

参考文献:

- [1] Dews S J, Bishop R J. Factors affecting the skid-resistance of calcined bauxite[J]. *Journal of Applied Chemistry and Biotechnology*, 1972, 22(10): 1117-1124.
- [2] Bache H H. Densified cement ultra-fine particle-based materials[C]//The Second International Conference on Superplasticizers in Concrete, Ottawa, Canada, 1981: 1-34.
- [3] Iskander R, Stevens A. The effectiveness of the application of high friction surfacing on crash reduction [C]//International surface friction conference, Christchurch, New Zealand, 2005: 1-17.
- [4] Quek S T, Lin V W J, Maalej M. Development of functionally-graded cementitious panel against high-velocity small projectile impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(8): 928-941.
- [5] 王诚训, 贺文贵, 宋希文, 等. 耐火浇注料及其技术发展[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
- [6] Liu Y, Wei Y. Internal curing by porous calcined bauxite aggregate in ultrahigh-performance concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, 33(3): No. 04020497.
- [7] 李红霞. 耐火材料手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- [8] Li S, Liu Z. Using bauxite as alternative for coarse aggregate in asphalt mixture: improving skid resistance [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 394: No. 131915.
- [9] 胡利, 吴治国. 铝矾土煅烧生产线控制系统现状分析[J]. *机电工程技术*, 2020, 49(9): 214-215.
Hu Li, Wu Zhi-guo. Research on status of control system of bauxite calcination production line[J]. *Mechanical and Electrical Engineering Technology*, 2020, 49(9): 214-215.
- [10] 关博文, 薛兴杰, 孟建党, 等. SMA-5煅烧铝矾土超薄磨耗层路用性能与抗滑性能评价[J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2022, 42(4): 10-19.
Guan Bo-wen, Xue Xing-jie, Meng Jian-dang, et al. Evaluation of road performance and sliding resistance of SMA-5 calcined alumina ultrathin wearing layer[J]. *Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)*, 2022, 42(4): 10-19.
- [11] Fang B Z, Li H, Cao J W, et al. Structure and performance of calcined bauxite[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 887: 305-308.
- [12] Zhu Z, Cao Y, Dong X, et al. Cost-effective porous ceramic tubes fabricated through a phase inversion/casting process using calcined bauxite[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2018, 15(6): 1567-1576.
- [13] Wahsh M M S, Sadek H E H, Abd El-Aleem S, et al. The effect of microsilica and aluminum metal powder on the densification parameters, mechanical properties and microstructure of alumina-mullite ceramic composites[J]. *Advanced Materials*, 2015, 4(4): 80-84.
- [14] Liu Y, Wei Y. Effect of calcined bauxite powder or aggregate on the shrinkage properties of UHPC[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 118: No. 103967.
- [15] Liu Y, Wei Y. Abrasion resistance of ultra-high performance concrete with coarse aggregate[J]. *Materials and Structures*, 2021, 54: 1-18.
- [16] Wu H, Fang Q, Gong J, et al. Projectile impact resistance of corundum aggregated UHP-SFRC[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 84: 38-53.
- [17] Nath S, Dey A, Mukhopadhyay A K, et al. Nanoin-dentation response of novel hydroxyapatite - mullite composites[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 513: 197-201.
- [18] Mehta P K, Monteiro P J M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials[M]. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- [19] Zhang F, Poh L H, Zhang M H. Effect of bauxite aggregate in cement composites on mechanical properties and resistance against high-velocity projectile impact[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 118: No. 103915.
- [20] Yang F, Guan B, Liu J, et al. An investigation of the polishing behavior of calcined bauxite aggregate [J]. *Coatings*, 2019, 9(11): 760-775.
- [21] Yu D, Xiong R, Li S, et al. Laboratory evaluation of critical properties and attributes of calcined bauxite and steel slag aggregates for pavement friction surfacing[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(8): No. 04019155.
- [22] Friel S, Woodward D. High friction surfacing systems using blends of natural aggregate and calcined bauxite[J]. *Coatings*, 2019, 9(3): No. 177.
- [23] Wu X, Zhen N, Kong F. Evaluation of the factors af-

- fecting the wear resistance of calcined bauxite aggregates[J]. *Coatings*, 2019, 9(11):No. 761.
- [24] 张艳利, 张小会, 程庆先, 等. 我国耐火原料的现状与发展[J]. *耐火与石灰*, 2023, 48(1): 12-18.
- Zhang Yan-li, Zhang Xiao-hui, Cheng Qing-xian, et al. Present situation and development trend of refractory raw materials in China[J]. *Refractory and Lime*, 2023, 48(1): 12-18.
- [25] 柏雪. 添加剂对以铝矾土为主要原料的支撑剂的烧结性能影响[D]. 武汉: 武汉科技大学材料与冶金学院, 2012.
- Bai Xue. The influence of additives on sintering properties of the main raw bauxite of proppant[D]. Wuhan: School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, 2012.
- [26] 姚瑶. 铝矾土煅烧过程的显微结构及其与高温力学性能相关性的研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学材料与冶金学院, 2014.
- Yao Yao. Studies on the microstructure of calcined bauxite and the relationship between microstructure and high temperature properties[D]. Anshan: School of Materials and Metallurgy, Liaoning University of Science and Technology, 2014.
- [27] 熊锐, 杨发, 关博文, 等. 路用高抗滑集料耐磨性能评价与机理分析[J]. *材料导报*, 2019, 33(20): 3436-3440.
- Xiong Rui, Yang Fa, Guan Bo-wen, et al. Wear resistance of highly anti-skid aggregate for pavement: evaluation and mechanism analysis[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(20): 3436-3440.
- [28] YB/T 5179—2005. 高铝矾土熟料[S].
- [29] 樊健生, 丁然. 超高性能混凝土在房屋建筑结构中的研究与应用进展[J]. *硅酸盐学报*, 2023, 51(5): 1246-1258.
- Fan Jian-sheng, Ding Ran. Development on ultra-high performance concrete in building structures[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 51(5): 1246-1258.
- [30] 邵旭东, 邱明红, 晏班夫, 等. 超高性能混凝土在国内外桥梁工程中的研究与应用进展[J]. *材料导报*, 2017, 31(23): 33-43.
- Shao Xu-dong, Qiu Ming-hong, Yan Ban-fu, et al. A review on the research and application of ultra-high performance concrete in bridge engineering around the world[J]. *Materials Reports*, 2017, 31(23): 33-43.
- [31] 王德辉, 史才军, 吴林妹. 超高性能混凝土在中国的研究和应用[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(1): 141-149.
- Wang De-hui, Shi Cai-jun, Wu Lin-mei. Research and applications of ultra-high performance concrete in China[J]. *Silicate Bulletin*, 2016, 35 (1): 141-149.
- [32] Reda M M, Shrive N G, Gillott J E. Microstructural investigation of innovative UHPC[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(3): 323-329.
- [33] Spiesz P R, Hunger M. Durability of ultra-high performance concrete - Experiences from a real-scale application[C]//The 14th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Ghent, Belgium, 2017: 1-12.
- [34] Buitelaar P. Ultra-thin heavy reinforced high performance concrete overlays[C]//The 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Leipzig, Germany, 2002: 1577-1590.
- [35] Aydin S, Yazici H, Yardimci M Y, et al. Effect of aggregate type on mechanical properties of reactive powder concrete[J]. *ACI Materials Journal*, 2010, 107(5):441-449.
- [36] Liu Y, Wei Y. Internal curing efficiency and key properties of UHPC influenced by dry or prewetted calcined bauxite aggregate with different particle size [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 312: No.125406.
- [37] Soliman A, Nehdi M. Early-age shrinkage of ultra-high-performance concrete under drying/wetting cycles and submerged conditions[J]. *ACI Materials Journal*, 2012, 109(2): No. 131.
- [38] Xie T, Fang C, Ali M S M, et al. Characterizations of autogenous and drying shrinkage of ultra-high-performance concrete(UHPC): an experimental study[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 91: 156-173.
- [39] 陈宝春, 李聪, 黄伟, 等. 超高性能混凝土收缩综述[J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18(1): 13-28.
- Chen Bao-chun, Li Cong, Huang Wei, et al. Review of ultra-high performance concrete shrinkage[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2018, 18(1): 13-28.
- [40] Yang L, Shi C, Wu Z. Mitigation techniques for autogenous shrinkage of ultra-high-performance concrete—a review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 178: No. 107456.

- [41] 王立成, 张磊. 混凝土内养护技术研究进展[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6): 1471-1478.
Wang Li-cheng, Zhang Lei. Research progress concrete internal curing technology[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6): 1471-1478.
- [42] Dudziak L, Mechtcherine V. Mitigation of volume changes of ultra-high performance concrete(UHPC) by using super absorbent polymers[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra-high Performance Concrete, Kassel, Germany, 2008: 425-432.
- [43] Soliman A M, Nehdi M L. Effect of natural wollastonite microfibers on early-age behavior of UHPC[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(7): 816-824.
- [44] Justs J, Wyrzykowski M, Bajare D, et al. Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high-performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 76: 82-90.
- [45] Meng W, Khayat K. Effects of saturated lightweight sand content on key characteristics of ultra-high-performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 101: 46-54.
- [46] Liu Y, Wei Y, Ma L, et al. Restrained shrinkage behavior of internally-cured UHPC using calcined bauxite aggregate in the ring test and UHPC-concrete composite slab[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 134: No. 104805.
- [47] Guo W, Wei Y, Ma L. Shrinkage-induced warping of UHPC overlay cast on hardened NSC substrate under various conditions[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 134: No. 104772.
- [48] Guo W, Wei Y, Ma L, et al. Effect of grouped L-shape rebar connectors on the shrinkage behavior of UHPC overlay cast on hardened NSC substrate[J]. Construction and Building Materials, 2023, 382: No. 131319.
- [49] 魏亚, 刘亚林. 一种低收缩、较低水泥用量的超高性能混凝土[P]. 中国专利: ZL2020112451220.8, 2022-06-03.
- [50] Wei Y, Guo W, Ma L, et al. Materials, structure, and construction of a low-shrinkage UHPC overlay on concrete bridge deck[J]. Construction and Building Materials, 2023, 406: No. 133353.
- [51] Waters J. High friction surfacing failure mechanisms [C]//International Surface Friction Conference, Gold Coast Queensland, Australia, 2011:1-10.
- [52] Julian F, Moler S. Gaining traction in roadway safety [J]. Public Roads, 2008, 72(1):38-44.
- [53] Atkinson J E, Clark J, Ercisli S. High friction surface treatment curve selection and installation guide [R]. Washington, D. C. : Federal Highway Administration Office of Safety, 2016.
- [54] Heitzman M, Turner P, Greer M. High friction surface treatment alternative aggregates study[R]. National Center for Asphalt Technology at Auburn University, 2015.
- [55] Merritt D K, Lyon C, Persaud B, et al. Developing crash-modification factors for high-friction surface treatments[R]. Washington, D. C. : Federal Highway Administration, 2020.
- [56] 关博文, 郭乐, 薛兴杰, 等. 新型高摩擦道路表面处治材料研究及应用进展[J]. 中国材料进展, 2022, 41(10): 836-848.
Guan Bo-wen, Guo Le, Xue Xing-jie, et al. Research and application review on high friction surface treatment materials of pavement[J]. Progress of Materials in China, 2022, 41(10): 836-848.
- [57] MP 41-22. Standard specification for high friction surface treatment for asphalt and concrete pavements using calcined bauxite[S].
- [58] Merritt D, Himes S, Porter R J. High friction surface treatment site selection and installation guide[R]. Washington, D. C. : Federal Highway Administration Office of Safety, 2021.
- [59] Highways Agency of Great Britain. 307207/310304: manual of contract documents for highway works volume 1: specification for highway works[S].
- [60] SP/SPP25—2011. Pilot Specification for Calcined Bauxite. Specification[S].
- [61] Pranav C, Do M T, Tsai Y C. Analysis of high-friction surface texture with respect to friction and wear [J]. Coatings, 2021, 11(7):No. 758.
- [62] James J G. Calcined bauxite and other artificial polish-resistant, roadstones[DB/OL]. [2024-04-05]. <https://trid.trb.org/view/1178992>.
- [63] Zong Y, Li S, Zhang J, et al. Effect of aggregate type and polishing level on the long-term skid resistance of thin friction course[J]. Construction and Building Materials, 2021, 282: No. 122730.
- [64] 熊锐, 杨发, 关博文, 等. 路用高抗滑集料耐磨性能评价与机理分析[J]. 材料导报, 2019, 33(20): 3436-

- 3440.
- Xiong Rui, Yang Fa, Guan Bo-wen, et al. Wear resistance of highly anti-skid aggregate for pavement: evaluation and mechanism analysis[J]. Materials Reports, 2019, 33(20): 3436-3440.
- [65] 丛林, 谭乐, 吴敏, 等. 基于集料特性的沥青混合料长期抗滑性能衰减模型[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2019, 47(5): 668-672.
- Cong Lin, Tan Le, Wu Min, et al. Long-term anti-sliding performance attenuation model of asphalt mixture based on aggregate characteristics[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2019, 47(5): 668-672.
- [66] 吴喜荣. 铝矾土熟料耐磨性及其沥青混合料抗滑性能研究[D]. 西安:长安大学公路学院, 2021.
- Wu Xi-rong. Study on anti-wear characteristics of bauxite clinkers and anti-skid performance's of asphalt mixture[D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2021.
- [67] Woodward D, Friel S. Predicting the wear of high friction surfacing aggregate[J]. Coatings, 2017, 7(5): No. 71.
- [68] Woodward W D H. Laboratory prediction of surfacing aggregate performance[D]. Coleraine: Faculty of Computing, Engineering and the Built Environment, University of Ulster, 1995.
- [69] Wilson B, Mukhopadhyay A. Alternative aggregates and materials for high friction surface treatments[DB/OL]. [2024-04-06]. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/30989>.
- [70] Huan X, Sheng Y, Wang L, et al. Evolution of texture and skid resistance change of high-friction surface due to differential-polishing undergoing simulated traffic wear[J]. Tribology International, 2023, 177: No. 107944.
- [71] Li S, Xiong R, Yu D, et al. Friction surface treatment selection: aggregate properties, surface characteristics, alternative treatments, and safety effects [DB/OL]. [2024-04-07]. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/35077>.
- [72] 杨发, 瞿春璞. 单粒级煅烧铝矾土集料高抗滑表层性能评价[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2024(1): 158-163.
- Yang Fa, Qu Chun-pu. Performance evaluation of high anti-slip surface layer of single particle size calcined bauxite aggregate[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2024(1):158-163.
- [73] Li S, Xiong R, Dong X, et al. Effect of chemical composition of calcined bauxite aggregates on mechanical and physical properties for high friction surface course[J]. Construction and Building Materials, 2021, 302: No. 124390.
- [74] Xiong R, Zong Y, Lv H, et al. Investigation on anti-skid performance of asphalt mixture composed of calcined bauxite and limestone aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2021, 306: No. 124932.
- [75] 王志斌, 邱文利, 张博, 等. 煅烧铝矾土路用超薄磨耗层配合比设计及性能评价[J]. 公路交通科技, 2022, 39(12): 45-52.
- Wang Zhi-bin, Qiu Wen-li, Zhang Bo, et al. Mix proportion design and performance evaluation of ultra-thin friction course with calcined bauxite for pavement[J]. Highway Transportation Technology, 2022, 39(12): 45-52.
- [76] El-Ashwah A S, Broaddus K, Abdelrahman M. Predicting the friction coefficient of high-friction surface treatment application aggregates using the aggregates' characteristics[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35(5): No. 04023089.
- [77] 宗有杰, 熊锐, 吕红莉, 等. 基于煅烧铝矾土集料的沥青混合料抗滑性能研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2022, 41(2): 116-123.
- Zong You-jie, Xiong Rui, Lyu Hong-li, et al. Investigation on the anti-skid property of asphalt mixture based on calcined bauxite aggregate[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science Edition), 2022, 41(2): 116-123.
- [78] De Larrard F, Sedran T, Petit J, et al. Grooved fiber-reinforced ultra-high performance concrete: a new material for pavement long lasting wearing course [C]//Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete UHPFRC, Marseille, France, 2013:1-9.
- [79] De Larrard F, Sedran T. High and ultra-high-performance concrete in pavement: tools for the road eternity [C]//The 9th International Symposium on High Performance Concrete: Design, Verification and Utilization, Rotorua, New Zealand, 2011: 1-18.
- [80] 黄政宇, 刘强. 超高强高耐磨混凝土材料研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2009, 31(1): 92-97.
- Huang Zheng-yu, Liu Qiang. Research of ultra-high

- strength and high wear-resistant concrete material [J]. Journal of Natural Science of Xiangtan University, 2009, 31(1): 92-97.
- [81] 孙培. 耐钻磨、抗高温爆裂、抗爆超高强混凝土的研究[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2016.
- Sun Pei. Research on ultra-high strength concrete with resistance of drill-grinding, spalling and blast [D]. Beijing: China National Academy of Building Materials Science, 2016.
- [82] Bludau C, Keuser M, Kustermann A. Perforation resistance of high-strength concrete panels[J]. ACI Materials Journal, 2006, 103(2): No. 188.
- [83] Dancygier A N, Yankelevsky D Z, Jaegermann C. Response of high-performance concrete plates to impact of non-deforming projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(11): 1768-1779.
- [84] 钟锐, 张峰领. 超高性能混凝土、纤维增强高强及高延性混凝土抗侵略性能比较[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(11): 2423-2434.
- Zhong Rui, Zhang Feng-ling. Resistance of ultra-high performance concrete, fiber reinforced high strength concrete and engineered cementitious composite against projectile penetration[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(11): 2423-2434.
- [85] Zhong R, Zhang F, Poh L H, et al. Assessing the effectiveness of UHPFRC, FRHSC and ECC against high velocity projectile impact[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 120: No. 104013.
- [86] Zhang F, Poh L H, Zhang M H. Critical parameters for the penetration depth in cement-based materials subjected to small caliber non-deformable projectile impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 137: No. 103471.
- [87] Zhang F, Poh L H, Zhang M H. Resistance of cement-based materials against high-velocity small caliber deformable projectile impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 144: No. 103629.
- [88] Zhang F, Zhong R. Influence of calcined bauxite aggregate on the resistance of cement composites subjected to small caliber deformable projectile impact [J]. Frontiers in Materials, 2021, 8: No. 543.
- [89] Zhong R, Zhang F. Engineering high-performance cementitious matrices for improved projectile impact resistance with silane, micro fibrillated cellulose and fine calcined bauxite aggregate[J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 135: No. 104835.