

文章编号:1007-9629(2021)03-0492-07

含废弃玻璃的绿色超高性能混凝土制备及性能

魏慧男, 刘铁军, 邹笃建, 周 傲

(哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055)

摘要: 利用废弃阴极射线管(CRT)玻璃取代河砂制备超高性能混凝土(UHPC),研究了废弃 CRT 玻璃对 UHPC 流动性、强度以及弯曲性能的影响,分析了 UHPC 的微观结构.结果表明:掺加废弃 CRT 玻璃显著提高了 UHPC 的流动性,降低了其强度和能量吸收能力;当废弃 CRT 玻璃替代率为 25%时,UHPC 力学性能指标的降幅均小于 5%;废弃 CRT 玻璃抑制了水泥水化;掺加废弃 CRT 玻璃后,UHPC 细骨料-水泥浆体界面过渡区黏结较差,力学性能下降.

关键词: 废弃玻璃;生态型;超高性能混凝土;力学性能;微观结构

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.007

Preparation and Properties of Green Ultra-high Performance Concrete Containing Waste Glass

WEI Huinan, LIU Tiejun, ZOU Dujian, ZHOU Ao

(School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The river sand was replaced by waste cathode ray tube(CRT)glass to prepare green ultra-high performance concrete(UHPC). The effect of waste CRT glass on the flowability, mechanical strength and bending performance of UHPC was investigated. The microstructure of UHPC was studied. The results show that the incorporation of waste CRT glass increases the flowability and reduces the mechanical strength and energy absorption capacity of UHPC. The reduction degree of properties indexes is less than 5 % when the replacement ratio of waste CRT glass is below 25 %. The CRT glass restrains cement hydration. The addition of CRT glass also reduces the performance of interfacial transition zone in UHPC, which leads to the decreased mechanical strength.

Key words: waste glass; sustainability; ultra-high performance concrete(UHPC); mechanical performance; microstructure

阴极射线管(CRT)玻璃是传统电视机和台式计算机显示器的主要组成部分^[1-2].随着科技的高速发展,CRT 显示器已经被逐步淘汰.据估算,中国平均每年产生 4 300 万 t 废弃 CRT 玻璃,其中仅有 25%左右的废弃 CRT 玻璃实现了回收利用,大量废弃 CRT 玻璃被随意堆放或者填埋^[3-4].废弃 CRT 玻璃中含有重金属铅,当铅离子溶出侵入环境时,会污染地下水及土壤,进而破坏生态环境,危害人类健

康^[5].由此可见,如何有效回收利用废弃 CRT 玻璃是一个迫切需要解决的难题.

超高性能混凝土(UHPC)是一种新型水泥基复合材料,具有超高强度、高韧性及优异耐久性等特点,抗压强度一般在 120 MPa 以上,是传统普通混凝土的 3 倍以上^[6-7].UHPC 内部结构致密,可有效抑制有害物质(氯盐、硫酸盐等)的侵入,大幅增加建筑物的使用寿命^[8].当前,UHPC 已经被初步应用

收稿日期:2020-09-11; 修订日期:2020-11-18

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFC0705400)

第一作者:魏慧男(1989—),男,河南周口人,哈尔滨工业大学(深圳)博士生. E-mail:huinanw@yeah.net

通讯作者:周 傲(1991—),男,江苏徐州人,哈尔滨工业大学(深圳)助理教授,硕士生导师,博士. E-mail:zhouao@hit.edu.cn

于大跨桥梁、建筑幕墙及防爆工程等领域^[9-10]。然而,UHPC在制备过程中需要消耗大量的河砂($800\sim 1\,200\text{ kg/m}^3$)^[11-12]。近年来,河砂资源日益紧缺,价格急剧增加,过度开采河砂也对生态环境造成了危害,导致UHPC存在高成本、可持续性发展受限的劣势,限制了其在工程中的广泛应用。寻找其他材料替代河砂来制备UHPC,提高UHPC可持续性发展就显得十分必要^[13]。考虑到废弃CRT玻璃的主要成分与河砂一致(均为 SiO_2),且UHPC渗透系数超低(普通混凝土的 $1/30$),有利于抑制铅的溶出,可以将废弃CRT玻璃作为细骨料替代河砂来制备UHPC。由此,既可以减少河砂用量,又可以大量回收利用废弃CRT玻璃,有助于促进UHPC的可持续发展,具有显著的经济效益和生态效益。针对含废弃CRT玻璃UHPC力学强度及微观结构的初步研究,证实了利用废弃CRT玻璃制备UHPC的可行性^[14]。目前,关于废弃CRT玻璃制备UHPC的弯曲性能研究相对匮乏,同时对于含废弃CRT玻璃UHPC微观结构的定量分析也未见相关报道。

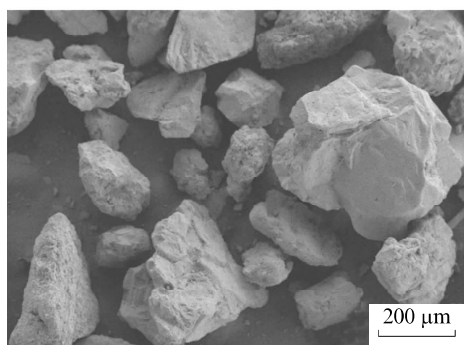
基于此,本文对含废弃CRT玻璃UHPC的工作性能和弯曲性能进行研究,并对UHPC抑制重金

属离子溶出能力及其对环境的影响进行评价。同时,为进一步揭示UHPC力学性能变化的机理,借助X射线衍射(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)对UHPC不同龄期的水化产物及界面过渡区进行分析,利用图像分析技术统计了界面过渡区内未水化水泥颗粒的体积分数。

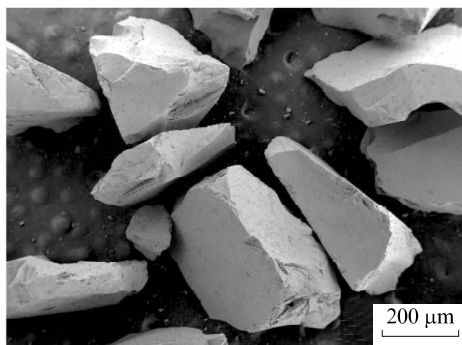
1 试验

1.1 原材料

水泥为P·O 42.5 R早强型普通硅酸盐水泥,密度为 3.15 g/cm^3 ,比表面积为 $359\text{ m}^2/\text{kg}$;硅灰(SF)为灰色粉末状,密度为 2.20 g/cm^3 ,比表面积为 $21\,000\text{ m}^2/\text{kg}$, SiO_2 含量(质量分数,文中涉及的含量、掺量、固含量等除特别说明外均为质量分数或质量比)为94.2%;细骨料为天然河砂和废弃CRT玻璃(见图1),最大粒径均为 1.18 mm ,表观密度分别为 $2\,574$ 、 $2\,916\text{ kg/m}^3$,废弃CRT玻璃压碎值为24.8%;减水剂(SP)为固含量24.0%的聚羧酸系高效减水剂;纤维采用镀铜圆直形微细钢纤维,长度为 13 mm ,直径为 0.22 mm ,拉伸强度为 $2\,850\text{ MPa}$,弹性模量为 200 GPa 。



(a) River sand



(b) CRT glass

图1 河砂和CRT玻璃砂的SEM形貌图

Fig. 1 SEM micrographs of river sand and CRT glass

1.2 配合比设计

根据颗粒紧密堆积理论,利用修正后的安德森模型(MAA模型)设计UHPC基准组配合比,具体步骤参考文献[15]。本研究拟制备UHPC的抗压强度为 $150\sim 200\text{ MPa}$,其配合比如表1所示。UHPC的水胶比 $m_w/m_b=0.18$,减水剂掺量为胶凝材料总质量的3%,钢纤维体积分数为3%,利用废弃CRT玻璃等质量替代河砂。试件编号U-0为不参加废弃CRT玻璃的基准组,U-25、U-50、U-75、U-100分别表示废弃CRT玻璃替代率为25%、50%、75%和100%。

表1 UHPC配合比

Sample code	Cement	SF	CRT glass	River sand	Water	SP	Steel fiber
U-0	854.0	213.0	0	1 067.0	168.0	32.0	234.0
U-25	854.0	213.0	267.0	800.0	168.0	32.0	234.0
U-50	854.0	213.0	533.5	533.5	168.0	32.0	234.0
U-75	854.0	213.0	800.0	267.0	168.0	32.0	234.0
U-100	854.0	213.0	1 067.0	0	168.0	32.0	234.0

1.3 试件制备与养护

废弃CRT玻璃制备UHPC的流程如下:(1)将

水泥、硅灰和细骨料一起低速(160 r/min)搅拌 4 min;(2)加入水和减水剂,继续低速搅拌 4 min;(3)将搅拌机转速调至 80 r/min,缓慢均匀洒入钢纤维(2 min 内完成);(4)将混合物高速(280 r/min)搅拌 6 min. UHPC 浆体浇筑完成后覆盖塑料薄膜,放置 24 h 后拆模,然后置于 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 水中养护至规定龄期进行测试.

1.4 试验方法

参照 GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测试方法》测试 UHPC 拌和物流动性能;依据 GB/T 1767—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》测试 UHPC 试件抗压强度和抗折强度,试件尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$,抗压强度测试的加载速率为 2.4 kN/s ,抗折强度测试的加载速率为 0.2 mm/min ^[16]. 在进行抗折试验时,利用线性位移传感器(LVDT)采集试件两侧的跨中挠度以绘制荷载-挠度曲线,并对其弯曲性能进行评价.

根据 HJ/T 300—2007《固体废物浸出毒性浸出方法 醋酸缓冲溶液法》进行毒性特征浸出试验,采用电感耦合等离子体发射光谱仪测定浸出液中铅离子的浓度.

相分析:采用德国 Bruker 公司生产的 D8 Advance 型 XRD,扫描范围为 $5^\circ \sim 65^\circ$,扫描速度为 $4^\circ/\text{min}$. 微观组织分析:采用德国 Zeiss 公司生产的 Gemini SEM 300 型场发射 SEM,样品直径为 20 mm,厚度为 2 mm. 微观观测样品均取自养护龄期为 28 d 的 UHPC 试件,测试前需将样品浸泡在异丙醇中终止水化. 图像分析:利用图像分析技术对骨料-UHPC 基体界面过渡区进行二值化处理,确定未水化水泥颗粒的灰度值范围,统计该区域内未水化水泥颗粒的含量.

2 结果与讨论

2.1 流动性能

废弃 CRT 玻璃替代率对 UHPC 流动性的影响如图 2 所示. 由图 2 可见:掺加废弃 CRT 玻璃后, UHPC 流动性显著提高;细骨料仅为河砂时, UHPC 流动性为 203 mm;废弃 CRT 玻璃替代率为 25%、50%、75% 时, UHPC 流动性分别提高了 7、10、12 mm. 这主要是因为废弃 CRT 玻璃表面比河砂表面光滑(见图 1),减少了细骨料与 UHPC 浆体的内摩擦力;另外,与河砂相比,废弃 CRT 玻璃的吸水率较低(0.18%),导致浆体中自由水量增加. 废弃 CRT 玻璃替代率越高, UHPC 浆体中自由水量越多. 本研究中废弃 CRT 玻璃平均粒径为 $800.37\text{ }\mu\text{m}$,而

河砂的平均粒径为 $394.40\text{ }\mu\text{m}$. 当两者混合时,其平均粒径变大,颗粒间空隙增加,需要一部分自由水填充颗粒间空隙. 当废弃 CRT 玻璃替代率为 25% 和 50% 时,2 种细骨料混合后平均粒径增加幅度有限,所需填充空隙的自由水量较少,而 UHPC 浆体中自由水含量快速增加,此时流动性呈增大趋势. 当废弃 CRT 玻璃替代率为 100% 时,细骨料的平均粒径明显增大,所需填充空隙的自由水量大幅增加,因此 UHPC 流动性出现小幅下降. 与普通混凝土相比, UHPC 水胶比很低且含有大量细颗粒,在高纤维掺量的条件下流动性有限. 掺加废弃 CRT 玻璃能改善 UHPC 的流动性,进一步促进 UHPC 在现浇工程中的应用.

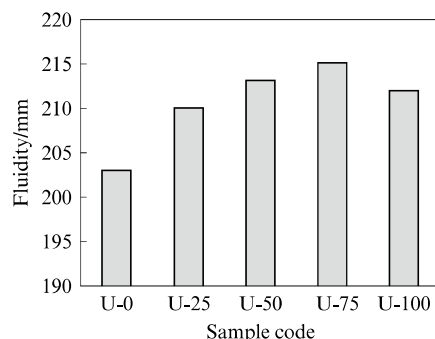


图2 废弃 CRT 玻璃掺量对 UHPC 流动性的影响
Fig. 2 Effect of waste CRT glass content on fluidity of UHPC

2.2 抗压强度和抗折强度

图 3 为 UHPC 抗压强度和抗折强度随废弃 CRT 玻璃替代率变化的情况. 由图 3 可见:随着养护龄期的延长, UHPC 力学强度逐渐提高,强度发展表现出了早期较快、后期缓慢的增长规律,这与已有的研究结果一致^[10-12];对于基准组试件 U-0,标准养护 7 d 的抗压强度和抗折强度可达 147.9、34.4 MPa,各个龄期的抗压强度和抗折强度均随着废弃 CRT 玻璃替代率的增加而下降;与基准组试件相比,试件 U-25、U-50、U-75、U-100 的 28 d 抗压强度分别下降了 2.9%、8.7%、14.5% 和 17.8%, 28 d 抗折强度分别下降了 4.5%、9.3%、17.1% 和 18.6%;当废弃 CRT 玻璃替代率不超过 50% 时, UHPC 的 28 d 抗压和抗折强度降幅均小于 10%. 由文献[17]可知,利用废弃 CRT 玻璃制备普通混凝土时,若废弃 CRT 玻璃替代率为 100%,则普通混凝土抗压强度、抗折强度将分别降低 30.7%、44.5%,其力学性能的降低幅度非常明显. 造成这种现象的主要原因在于: UHPC 强度主要来源于颗粒堆积密度,掺加废弃 CRT 玻璃对 UHPC 颗粒堆积

密度的影响有限,所以对其力学强度影响程度较小;普通混凝土的强度主要来源于黏结相及界面过渡区的性质,掺加废弃 CRT 玻璃会改变界面过渡区性质,对其力学强度产生明显的影响.采用废弃 CRT 玻璃全部替代河砂制备 UHPC 时,其 28 d 抗压强度、抗折强度仍可达到 147.1、31.9 MPa,符合 UHPC 定义的最低强度,满足绝大多数实际工程的要求.

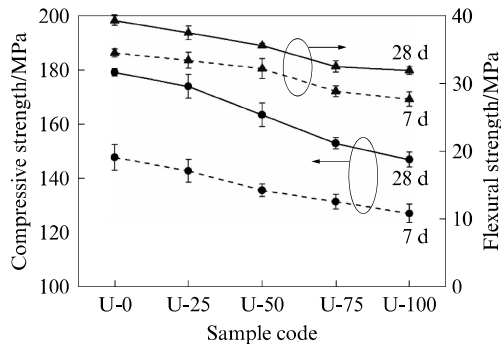


图3 废弃 CRT 玻璃替代率对 UHPC 抗压强度和抗折强度的影响

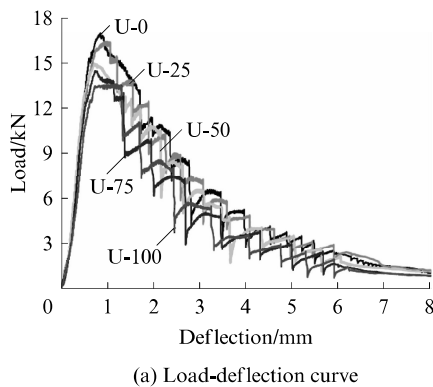
Fig. 3 Effect of waste CRT glass replacement ratios on compressive and flexural strength of UHPC

UHPC 中细骨料压碎值对其力学性能会产生影响,细骨料压碎值越小, UHPC 力学强度越大.本研究中废弃 CRT 玻璃的压碎值为 24.8%,而河砂

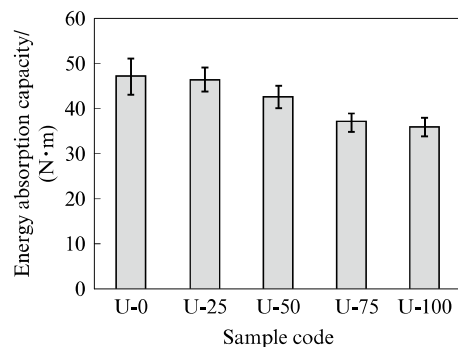
的压碎值为 6.0% 左右,这是导致掺加废弃 CRT 玻璃 UHPC 力学性能降低的一个因素.2.5 中将进一步对废弃 CRT 玻璃降低 UHPC 抗压强度、抗折强度的原因进行深入分析.

2.3 弯曲性能

图 4 为废弃 CRT 玻璃替代率对 UHPC 弯曲性能的影响.本研究采用能量吸收能力来评价 UHPC 的抗弯性能,能量吸收能力为荷载-挠度曲线与横坐标轴所围成的面积,直接反映了 UHPC 构件在弯曲破坏过程中抵抗脆性破坏的能力,能量吸收能力越强,构件在外部荷载作用下安全性越高^[18].由图 4 可见:(1)UHPC 在挠度为 8 mm 时,施加的荷载数值已经稳定,所以选取挠度为 0~8 mm 的区间计算能量吸收能力;基准组试件 U-0 的峰值荷载为 16.9 kN,试件 U-25、U-50、U-75、U-100 的峰值荷载分别降至 16.4、14.9、14.5、13.6 kN.(2)随着废弃 CRT 玻璃替代率的增加, UHPC 的能量吸收能力逐渐下降;试件 U-0 在弯曲破坏过程中的能量吸收能力为 47.1 N·m,与此相比,试件 U-25、U-50、U-75、U-100 的能量吸收能力降幅分别为 1.7%、9.9%、21.9%和 24.9%;废弃 CRT 玻璃对 UHPC 抗弯性能的影响规律与抗压强度、抗折强度一致,当替代率为 25%时, UHPC 能量吸收能力降幅为 1.7%;当替代率为 50%时, UHPC 能量吸收能力降幅未超过 10%.



(a) Load-deflection curve



(b) Energy absorption capacity

图4 废弃 CRT 玻璃替代率对 UHPC 弯曲性能的影响

Fig. 4 Effect of waste CRT glass replacement ratios on bending performance of UHPC

2.4 UHPC 对重金属溶出的抑制能力

图 5 为 UHPC 在 28 d 龄期时铅离子的浸出浓度.由图 5 可见:随着废弃 CRT 玻璃替代率的增加,铅离子浸出浓度逐渐升高;当废弃 CRT 玻璃替代率为 25%时,铅离子浸出浓度仅为 0.32 mg/L;当 UHPC 中河砂全部被废弃 CRT 玻璃替代时,铅离子浸出浓度为 3.56 mg/L,但仍满足国内环保标准监管限值(5 mg/L)要求.由此可见,利用 100%废弃

CRT 玻璃制备 UHPC 的安全性能仍满足规范要求.

已有文献表明,利用废弃 CRT 玻璃作为骨料制备水泥砂浆或者普通混凝土时,废弃 CRT 玻璃的替代率不能超过 40%,否则样品的铅离子浸出将超过监管限值^[19],对周围环境和人体健康产生严重危害.然而,在 UHPC 中这一问题得到了解决, UHPC 明显抑制了废弃 CRT 玻璃中铅离子的溶出,其抑制

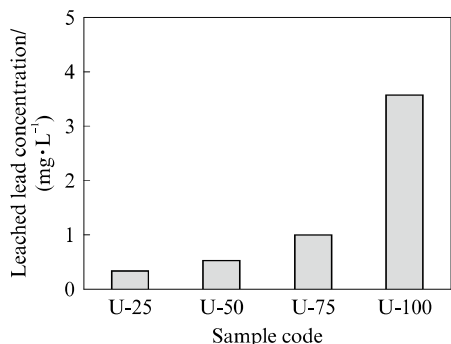


图5 废弃CRT玻璃 UHPC 铅离子浸出浓度

Fig. 5 Leached lead concentrations of UHPC incorporated with waste CRT glass at 28 d

机理分析如下:(1)在水泥水化反应方面,普通混凝土 28 d 龄期时水泥水化反应程度为 70%~80%,而 UHPC 28 d 龄期时水泥水化反应程度仅为 30%~50%^[20].普通混凝土中水泥水化程度较高,但 UHPC 中铅离子浸出量远低于普通混凝土.因此,水化反应程度与铅离子浸出量没有必然的联系.(2)在材料体系密实度方面,普通混凝土孔隙率可达到 20%~25%,渗透系数为 0.001 5 mm²/s,其内部结构比较疏松,存在很多与外界连通的通道.相比之下,UHPC 内部结构密实,孔隙率仅为 2%~6%,含有大量的不连通孔,渗透系数为 0.000 5 mm²/s.由此可见,UHPC 致密的内部结构阻断了铅离子渗出

通道,大大减少了铅离子的渗出.上述结果表明,废弃 CRT 玻璃可以安全地用于 UHPC 中,为回收利用废弃 CRT 玻璃提供了新的有效途径.

2.5 微观结构

图 6 为 UHPC 养护 1、3、7、28 d 后水化产物的 XRD 图谱.由图 6 可见:(1)结晶态 C-S-H 的峰值角度为 29.6°,C₂S/C₃S 的峰值角度为 32.3°、32.8°.在进行早期(1、3、7 d)XRD 图谱分析时,由于不同样品组呈现出的变化规律一致,这里以废弃 CRT 玻璃替代率为 100%的样品 U-100 为例进行分析.U-100 中结晶态 C-S-H 的特征峰强度随龄期的增加而增大,C₂S/C₃S 的特征峰强度随龄期的增加而减弱,说明结晶态 C-S-H 的相对含量增加,而 C₂S/C₃S 的相对含量减少.原因在于水泥早期水化反应中,C-S-H 是主要的水化产物,而 C₂S/C₃S 是未水化水泥颗粒的主要成分.(2)与 U-0 相比,U-50 和 U-100 的结晶态 C-S-H 衍射峰强度明显下降,说明其水化产物中结晶态 C-S-H 含量减少,而 C-S-H 是水泥基材料力学强度的主要来源,这是导致 UHPC 力学强度下降的一个原因.同时,C₂S 和 C₃S 的衍射峰强度明显增加,说明 UHPC 中未水化水泥颗粒数量增加.废弃 CRT 玻璃中渗出的铅离子包裹在水泥颗粒表面,阻止水泥颗粒与水接触,进而延缓了水化进程并限制了 C-S-H 凝胶的形成.

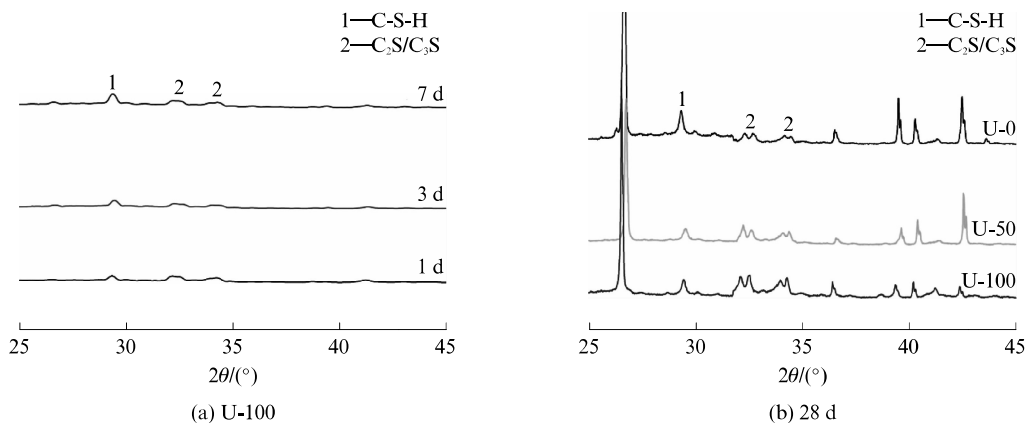


图6 不同废弃CRT玻璃替代率的 UHPC 水化产物 XRD 图谱

Fig. 6 XRD patterns of UHPC with different replacement ratios of waste CRT glass

图 7 为养护 28 d 后 UHPC 细骨料-水泥浆体界面过渡区的微观形貌.由图 7 可见:在以河砂为细骨料制备的 UHPC 样品中,河砂与水泥浆体界面连接紧密,两者黏结状态较好,整个界面过渡区十分密实;在以废弃 CRT 玻璃为细骨料制备的 UHPC 样品中,废弃 CRT 玻璃与水泥浆体界面连接部存在较宽的裂缝,说明两者黏结能力较弱,UHPC 承受荷载时产生

的微裂缝会优先在薄弱的界面过渡区发展,这也是导致 UHPC 力学强度下降的另一个原因.

为了定量分析废弃 CRT 玻璃替代河砂前后未水化水泥颗粒含量的变化,利用图像分析技术对 SEM 图像进行了处理(见图 8).在 UHPC 材料体系中,细骨料与 UHPC 基体间的界面过渡区厚度一般为 20 μm 左右^[21].因此,本研究选取河砂、废弃 CRT

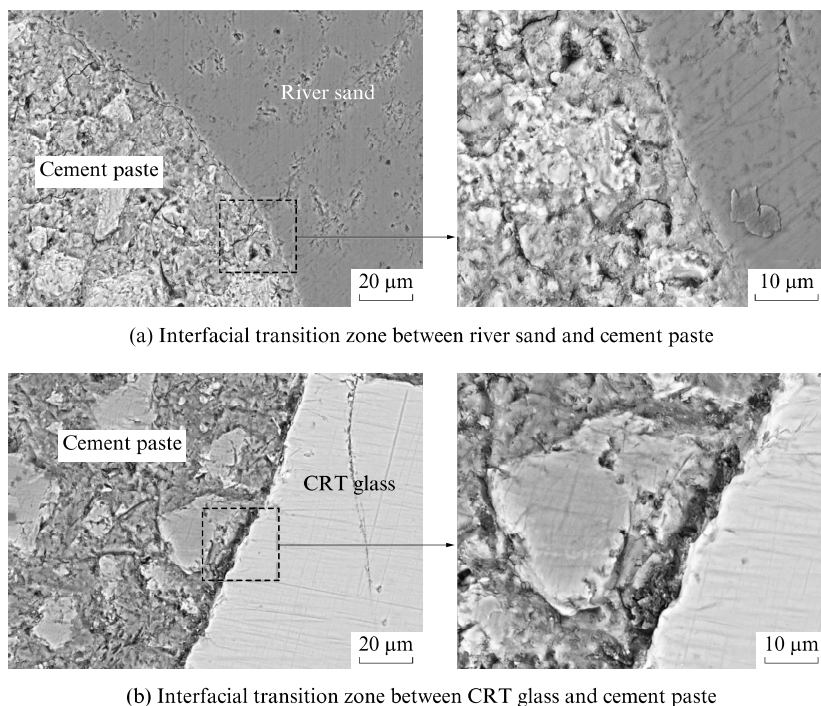


图7 UHPC样品中细骨料-水泥界面过渡区微观形貌

Fig. 7 Morphology of interfacial transition zone between fine aggregate and cement paste in UHPC at 28 d

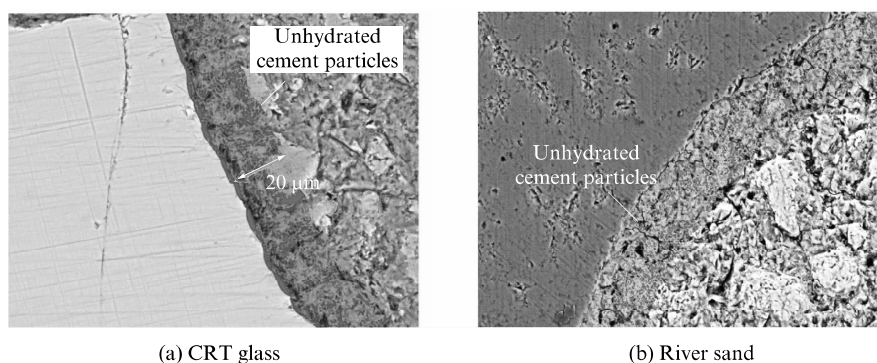


图8 28 d龄期时 UHPC 中未水化水泥颗粒的二值化图像

Fig. 8 Binary image of unhydrated cement particles of UHPC at 28 d

玻璃骨料边缘至外侧 $20\ \mu\text{m}$ 范围的区域进行分析. 根据灰度分布图中未水化水泥颗粒的峰位显示, 同时结合原始图像确定代表未水化水泥颗粒的灰度值范围, 其中以河砂为细骨料的样品灰度值为 $200\sim 255$, 以废弃 CRT 玻璃为细骨料的样品灰度值为 $170\sim 255$. 然后统计并计算未水化水泥颗粒的面积百分比, 以河砂为细骨料的样品中未水化水泥颗粒面积百分比为 11.4% , 以废弃 CRT 玻璃为细骨料的样品中未水化水泥颗粒面积百分比为 23.5% . 根据统计学与体视学原理, 水化水泥颗粒的面积百分比近似于其体积百分比. 与以河砂为细骨料制备的 UHPC 样品相比, 以废弃 CRT 玻璃为细骨料制备的 UHPC 样品中未水化水泥颗粒的体积百分比比较

高. 由此可见, 掺加废弃 CRT 玻璃阻碍了水泥的水化进程, 这与 XRD 图谱分析得到的结论一致.

3 结论

(1) 掺加废弃 CRT 玻璃会显著提高 UHPC 的流动性, 降低其抗压强度和抗折强度. 当废弃 CRT 玻璃替代率为 100% 时, UHPC 的抗压强度、抗折强度仍能达到 147.1 、 $31.9\ \text{MPa}$, 满足绝大多数实际工程的强度要求.

(2) 随着废弃 CRT 玻璃替代率的增加, UHPC 的能量吸收能力逐渐减小. 当废弃 CRT 玻璃替代率为 25% 时, UHPC 的能量吸收能力仅降低 1.7% . UHPC 可以有效抑制废弃 CRT 玻璃中铅离子的渗

出,当废弃 CRT 玻璃替代率为 100% 时,UHPC 中的铅离子浸出浓度仍在安全范围内。

(3) 掺加废弃 CRT 玻璃阻碍了水泥的水化进程,造成其中的结晶态 C-S-H 含量减少。同时,废弃 CRT 玻璃与水泥浆体黏结能力较差,使 UHPC 力学性能下降。

参考文献:

- [1] LIU T J, SONG W, ZOU D J, et al. Dynamic mechanical analysis of cement mortar prepared with recycled cathode ray tube (CRT) glass as fine aggregate[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 174: 1436-1443.
- [2] 石建军, 丁德馨, 栗建新, 等. 废弃阴极射线管玻璃对重晶石混凝土性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2): 369-372, 384.
SHI Jianjun, DING Dexin, LI Jianxin, et al. Effect of utilizing recycled cathode ray tube glass as aggregate in barite concrete[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2): 369-372, 384. (in Chinese)
- [3] LIU T J, QIN S S, ZOU D J, et al. Experimental investigation on the durability performances of concrete using cathode ray tube glass as fine aggregate under chloride ion penetration or sulfate attack[J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 634-642.
- [4] 刘数华, 王磊, 谢国帅. 废弃玻璃粉粉磨动力学行为特征研究[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(4): 663-668.
LIU Shuhua, WANG Lei, XIE Guoshuai. Study on grinding dynamic characteristics of waste glass powder[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(4): 663-668. (in Chinese)
- [5] WEI H N, ZHOU A, LIU T J, et al. Dynamic and environmental performance of eco-friendly ultra-high performance concrete containing waste cathode ray tube glass as a substitution of river sand[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 162: 105021.
- [6] 陈庆, 马瑞, 蒋正武, 等. 基于 GA-BP 神经网络的 UHPC 抗压强度预测与配合比设计[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1): 176-183.
CHEN Qing, MA Rui, JIANG Zhengwu, et al. Compressive strength prediction and mix proportion design of UHPC based on GA-BP neural network[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1): 176-183. (in Chinese)
- [7] 朋改非, 牛旭婧, 赵怡琳. 异形钢纤维对超高性能混凝土增强增韧的影响[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(6): 1013-1018.
PENG Gaifei, NIU Xujing, ZHAO Yilin. Effects of deformed steel fiber on strengthening and toughening of ultra-high performance concrete[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6): 1013-1018. (in Chinese)
- [8] LIU T J, WEI H N, ZHOU A, et al. Multiscale investigation on tensile properties of ultra-high performance concrete with silane coupling agent modified steel fibers[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 111: 103638.
- [9] 水亮亮. 超高性能混凝土抗压强度尺寸效应及收缩特性[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(4): 623-637.
- SHUI Liangliang. Size effect of compressive strength and shrinkage characteristics of ultra high performance concrete[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(4): 623-637. (in Chinese)
- [10] WU Z M, KHAYAT K H, SHI C J. Effect of nano-SiO₂ particles and curing time on development of fiber-matrix bond properties and microstructure of ultra-high strength concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 95: 247-256.
- [11] VIGNESHWARI M, ARUNACHALAM K, ANGAY-ARKANNI A. Replacement of silica fume with thermally treated rice husk ash inactive powder concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188: 264-277.
- [12] WU Z M, SHI C J, HE W, et al. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 103: 8-14.
- [13] 葛晓丽, 褚洪岩. 再生砂超高性能混凝土力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4): 810-815.
GE Xiaoli, ZHU Hongyan. Mechanical properties of ultra-high performance concrete with recycled sand[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4): 810-815. (in Chinese)
- [14] LIU T J, WEI H N, ZOU D J, et al. Utilization of waste cathode ray tube funnel glass for ultra-high performance concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 249: 119333.
- [15] WANG X P, YU R, SHUI Z H, et al. Mix design and characteristics evaluation of an eco-friendly ultra-high performance concrete incorporating recycled coral based materials[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 165: 70-80.
- [16] WU Z M, SHI C J, KHAYAT K H, et al. Effect of SCM and nano-particles on static and dynamic mechanical properties of UHPC[J]. Construction and Building Materials, 2018, 182: 118-125.
- [17] LING T C, POON C S. Use of recycled CRT funnel glass as fine aggregate in dry-mixed concrete paving blocks[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 68: 209-215.
- [18] YOO D Y, BANTHIA N, LEE J Y, et al. Effect of fiber geometric property on rate dependent flexural behavior of ultra-high-performance cementitious composite[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 86: 57-71.
- [19] LING T C, POON C S. A comparative study on the feasible use of recycled beverage and CRT funnel glass as fine aggregate in cement mortar[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 29/30: 46-52.
- [20] HUANG W, KAZEMI-KANYAB H, SUN W, et al. Effect of cement substitution by limestone on the hydration and microstructural development of ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 77: 86-101.
- [21] ZHOU Z, XIE R, QIAO P Z, et al. On the modeling of tensile behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concrete with freezing-thawing actions[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 174: 106983.