

## 橡胶对超高性能混凝土性能的影响及机理研究

甄智聪<sup>1</sup>, 郑强<sup>1</sup>, 于娇<sup>1</sup>, 侯东帅<sup>1,2,\*</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 山东省高等学校蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 青岛 266525)

**摘要:**为解决橡胶垃圾的环保处理问题,采用橡胶颗粒为填充骨料,制备生态型超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC)。研究结果表明橡胶的掺量和粒径显著影响了 UHPC 的界面过渡区结构宽度和孔隙率,从而对 UHPC 产生不同的劣化效应。以工作性能和强度为因变量,确定了橡胶颗粒的最优掺量(10%)和粒径(0.850 mm),制备出抗压强度大于 120 MPa 的生态型 UHPC,为橡胶的回收利用提供了思路。

**关键词:**超高性能混凝土;橡胶颗粒;界面过渡区;生态化

**中图分类号:**TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2024)04-0008-08

## Study on the influence and mechanism of rubber on the properties of ultra-high performance concrete

ZHEN Zhicong<sup>1</sup>, ZHENG Qiang<sup>1</sup>, YU Jiao<sup>1</sup>, HOU Dongshuai<sup>1,2,\*</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** In order to address the issue of protecting the environment from rubber waste, this study uses rubber particles as filler aggregate to create ecotypic ultra-high performance concrete (UHPC). The results indicate that the rubber content and particle size have a substantial impact on the structural breadth and porosity of the interfacial transition zone (ITZ) of UHPC, resulting in varying UHPC degradation effects. Using working performance and strength as the dependent variables, the ideal dose (10%) and particle size (0.850 mm) of rubber particles are found, and an ecotypic UHPC with a compressive strength of more than 120 MPa is created. This research provides suggestions for the recycling of rubber.

**Key words:** ultra-high performance concrete (UHPC); rubber particles; interfacial transition zone(ITZ); ecologicalization

由于我国汽车工业的高速发展,产生的废旧橡胶轮胎日益激增,其中约 60%以上被废弃,产生的环境污染问题日趋严重<sup>[1]</sup>。目前橡胶的回收方式仍以埋填、焚烧、热解等高污染处理方式为主<sup>[2-3]</sup>,引发了土地资源占用、环境污染等问题。因此,亟需寻求一种环保的废弃橡胶回收方法。

收稿日期:2022-10-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2006224)

作者简介:甄智聪(1995—),男,山东淄博人。硕士,研究方向为超高性能混凝土。E-mail:448486308@qq.com。

\* 通信作者:侯东帅(1986—),男,山东东营人。博士,教授,主要从事超高性能混凝土、轻骨料混凝土以及分子动力学模拟等方面的研究。E-mail:dshou@outlook.com。

经过简单预处理,将废弃橡胶产品制备成橡胶颗粒取代骨料制备混凝土是一种高效、环保的利用途径。然而,大量研究表明,橡胶骨料的引入会显著劣化混凝土的力学性能<sup>[4-7]</sup>,造成橡胶基水泥基材料强度偏低(一般 $<40$  MPa)。金明等<sup>[8]</sup>认为这主要是因为橡胶的疏水特性<sup>[9]</sup>劣化了浆体和橡胶间的界面过渡区<sup>[10]</sup>(Interfacial Transition Zone, ITZ)。在制备超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)时,为了保证 UHPC 优异的力学性能,使用硅灰、粉煤灰等小粒径矿物作为掺合料,其完全水化后与骨料之间的界面过渡区更为致密,这为小粒径橡胶的引入提供了条件<sup>[11]</sup>。丁庆军等<sup>[12]</sup>开展了利用橡胶制备 UHPC 的研究,但未对影响界面过渡区的关键参数,即橡胶的粒径开展研究。

基于此,本文系统研究了橡胶粒径对 UHPC 界面过渡区以及宏观性能的影响机制,综合评价橡胶的粒径和掺量对 UHPC 工作性能和力学性能的影响,设计性能优异的橡胶基 UHPC,为橡胶的高赋值回收利用提供思路。

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 原材料

水泥:青岛市山铝混凝土有限公司出产的 P·O 52.5 普通硅酸盐水泥,平均粒径为  $10\ \mu\text{m}$ ;硅灰:成都东南星有限公司出产的硅灰( $\text{SiO}_2$  含量约为 94.7%),平均粒径为  $300\ \text{nm}$ ;砂:使用粒径范围为  $0.075\sim 0.6\ \text{mm}$  的石英砂,平均表观密度为  $2.56\ \text{g}/\text{cm}^3$ ;橡胶颗粒:废旧轮胎破碎获得,平均粒径为 2.000、0.850、0.425 和  $0.250\ \text{mm}$ ;减水剂:聚羧酸高效减水剂,固含量为 20%;钢纤维:镀铜微丝钢纤维,长度为  $13\ \text{mm}$ ,长径比为 65,抗拉强度为 2200 MPa;水:采用符合混凝土用水标准的自来水。胶凝材料与骨料的化学组成见表 1。

表 1 原材料的化学组成

组成	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	%
水泥	64.93	19.20	4.18	3.32	0.78	0.09	3.35	1.61	0.09	2.49	
硅灰	0.36	94.65	0.25	0.15	0.84	0.13	0.69	0.47	0.17	2.29	
石英砂	0.03	91.12	6.41	0.36	1.70	0.08	0.15	0.25	0.02	0.35	

注:LOI 为烧失量。

### 1.2 配合比设计

由于基于紧密堆积理论的模型更符合 UHPC 的理论基础,因此 MAA 模型被用于开发 UHPC 矩阵<sup>[13]</sup>。

#### 1.2.1 目标曲线计算

MAA 模型被视为目标函数,可通过式(1)计算。

$$P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \quad (1)$$

式中: $D$  为粒径, $\mu\text{m}$ ; $P(D)$  为小于  $D$  的固体颗粒比例,为目标曲线; $D_{\max}$  和  $D_{\min}$  分别为粒径的最大值和最小值, $\mu\text{m}$ ; $q$  为分布模量,混合物中细颗粒和粗颗粒的比例由  $q$  值决定,根据 YU 等<sup>[14]</sup>的研究,本研究中取  $q=0.23$ 。

#### 1.2.2 目标曲线近似

计算每种材料的比例,以接近目标函数。该过程通过基于 MATLAB 平台开发的软件建立。

#### 1.2.3 确定因素

将水胶比设置得尽可能低,以生成超高强度的基体(抗压强度超过 120 MPa 的普通基体,以及超过 150 MPa 的纤维增强基体),纤维用量确定为 2.5%。最终得到的试验配合比如表 2 所示。

表2 橡胶 UHPC 试验配合比

组别	水泥	硅灰	石英砂	水	减水剂	钢纤维	橡胶
JZ	880	188	900	175	30	0	0
B5	880	188	900	175	30	0	20.6*
B10	880	188	900	175	30	0	41.2*
B15	880	188	900	175	30	0	61.8*
B20	880	188	900	175	30	0	82.4*
B25	880	188	900	175	30	0	103.0*
JZ <sup>+</sup>	880	188	900	175	30	195	0
B5 <sup>+</sup>	880	188	900	175	30	195	20.6*
B10 <sup>+</sup>	880	188	900	175	30	195	41.2*
B15 <sup>+</sup>	880	188	900	175	30	195	61.8*
B20 <sup>+</sup>	880	188	900	175	30	195	82.4*
B25 <sup>+</sup>	880	188	900	175	30	195	103.0*

注:JZ为基准组;组别 B<sub>m</sub> 中 m 代表橡胶颗粒体积掺量,+代表掺入钢纤维,例如,B25<sup>+</sup>代表该组掺入钢纤维,且橡胶颗粒体积掺量为25%;\*表示有4组同掺量的橡胶颗粒,平均粒径分别为2.000、0.850、0.425、0.250 mm。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 工作性能

按照《混凝土胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005)中的相关要求进行了流动度测试。

#### 1.3.2 力学性能

根据《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—1999)进行了抗压、抗折测试。试件尺寸为40 mm×40 mm×160 mm。

#### 1.3.3 扫描电镜分析

在试件养护28 d后从中截取出10 mm×10 mm×10 mm的试样,用S-3400N型扫描电镜进行橡胶颗粒表面形貌以及橡胶颗粒-胶凝材料基体界面形貌分析;用EMAX X-act型能谱仪进行橡胶颗粒-胶凝材料基体界面过渡区的能谱成分分析,通过主要元素C、O、Si、Al和Ca对界面过渡区进行表征。

## 2 结果与讨论

### 2.1 橡胶颗粒对UHPC工作性能的影响

不同粒径、掺量的橡胶颗粒对UHPC流动度的影响如图1所示。由图1可知,UHPC流动度随橡胶颗粒掺量的增加先增加后减小。以橡胶颗粒最大体积掺量25%为例,掺入平均粒径为2.000、0.850、0.425、0.250 mm的橡胶颗粒制备的UHPC流动度分别为239、233、215、208 mm。橡胶颗粒粒径越小、掺量越大,橡胶UHPC的表观密度降低越多,工作性能下降越明显。此外,橡胶颗粒掺量也显著影响UHPC的工作性能。以平均颗粒粒径0.425 mm为例,掺量为5%、10%、15%、20%和25%时,流动度分别为266、247、239、230、208 mm;掺量为5%时,流动度增加1.9%,其余组分别下降了5.3%、8.4%、11.9%和20.3%。掺量较低

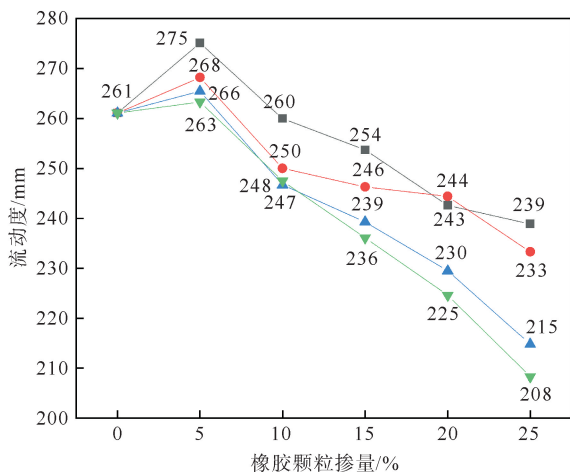


图1 橡胶颗粒对UHPC流动度的影响

—■— 2.000 mm; —●— 0.850 mm; —▲— 0.425 mm; —▼— 0.250 mm

时,由于橡胶表面疏水,导致体系自由水增加,流动性增加。随着橡胶颗粒掺量增加,降低了混凝土的表现密度,进而降低了体系的重力势能,从而降低了UHPC的工作性能<sup>[15]</sup>。

## 2.2 橡胶颗粒对UHPC力学性能的影响

为研究橡胶颗粒不同尺寸、掺量对UHPC的力学性能作用原理,以基准配合比为基础,采用2.000、0.850、0.425、0.250 mm 4种平均粒径的橡胶颗粒,外掺体积占比分别为5%、10%、15%、20%和25%制备UHPC。以抗折强度和抗压强度作为主要指标评价混凝土力学性能。橡胶颗粒对UHPC力学性能影响的试验结果如图2所示。

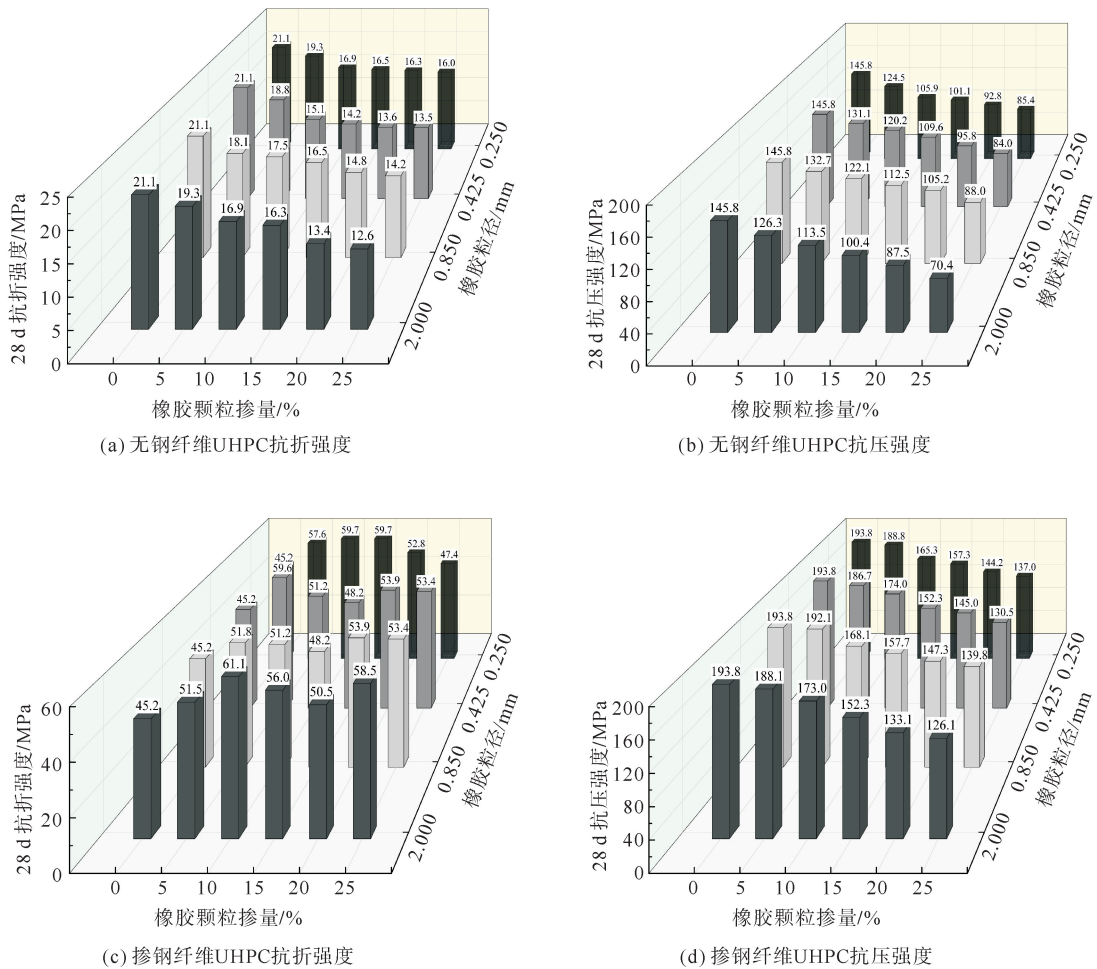


图2 不同橡胶粒径及掺量对UHPC力学性能的影响

由图2(a)(b)可以看出,掺入橡胶颗粒制备的UHPC的28 d抗折、抗压强度均低于未掺橡胶颗粒的基准组。由此可见橡胶颗粒可以显著降低UHPC力学性能。这是因为掺入橡胶后橡胶颗粒与UHPC基体的界面过渡区存在孔隙,必然造成UHPC强度大幅度降低。随着平均粒径的减小(2.000 mm到0.250 mm),抗压强度总体呈先增加后降低的趋势,用粒径为0.850 mm的橡胶颗粒制备的UHPC总体抗压强度最高(最高为132.7 MPa)。这是因为由大粒径替换为较小粒径时,界面过渡区宽度减小,UHPC强度增加。当继续替换为更小粒径时,界面过渡区数量增加,并且相互联接形成更大的界面过渡区区域,造成UHPC强度下降。因此制备UHPC宜选用0.850 mm粒径的橡胶颗粒。从图2(b)可以看出,橡胶颗粒掺量为5%时,UHPC的28 d抗压强度分别降低13.4%、9.0%、10.1%、14.6%;当掺量增至25%时,UHPC的28 d抗压强度分别降低51.7%、39.6%、42.4%、41.4%;当4种橡胶颗粒掺量大于10%时,UHPC的力学性能呈显著降低的趋势,其28 d抗压强度小于120 MPa。原因如下:①因为橡胶颗粒本身

密度较低,随着颗粒掺量的增加,橡胶基 UHPC 的表观密度降低,强度降低;②由于橡胶颗粒在 UHPC 中引入了更多的气孔,对橡胶基 UHPC 表观密度的影响也较大,造成强度降低;③随着橡胶颗粒掺量增加薄弱的界面过渡区增加,破坏时裂缝更容易沿界面薄弱区迅速发展。

为了弥补随着橡胶颗粒掺量增加 UHPC 力学性能的缺失,掺入适量的钢纤维,结果如图 2(c)(d)所示。由图 2(c)(d)可以看出,掺入钢纤维后 4 种粒径橡胶颗粒制备的 UHPC 的 28 d 强度均高于未掺加钢纤维的 UHPC;虽然抗压强度均随橡胶颗粒掺量的增加而降低,但在掺量达到 15% 时抗压强度均超过 150 MPa,在掺量达到 25% 时抗压强度也均超过 120 MPa。从图 2(d)可以看出,当橡胶颗粒掺量为 5% 时,0.850 mm 粒径的橡胶颗粒试样抗压强度最高,为 192.1 MPa,较同掺量其他粒径试样抗压强度分别高出 2.1%(2.000 mm)、2.9%(0.425 mm)、1.7%(0.250 mm)。综合考虑废旧轮胎橡胶颗粒的充分利用和 UHPC 力学性能保证,使用 0.850 mm 粒径橡胶颗粒更佳。

### 2.3 橡胶颗粒-胶凝材料界面过渡区的研究

利用 S-3400N 型场发射环境扫描电镜对不同粒径橡胶颗粒的 UHPC 表面形貌进行观察,扫描电镜(SEM)如图 3 所示。橡胶颗粒和水泥浆体存在明显界面过渡区;界面过渡区随橡胶颗粒粒径增加明显劣化,使用最大粒径的 UHPC 中,界面过渡区存在  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。这是由于大量的疏水性物质硬脂酸锌和其他杂质物相存在于橡胶颗粒表面,由此降低了基体与橡胶颗粒二者的界面黏结强度,因此,出现了明显的界面过渡区。

利用 EMAX X-act 型能谱仪对橡胶颗粒-水泥基体界面处的元素分布进行分析。图 4—7 为平均粒径为 2.000、0.850、0.425、0.250 mm 橡胶颗粒的线扫描 EDS 图和 C、O、Si、Al 和 Ca 5 种元

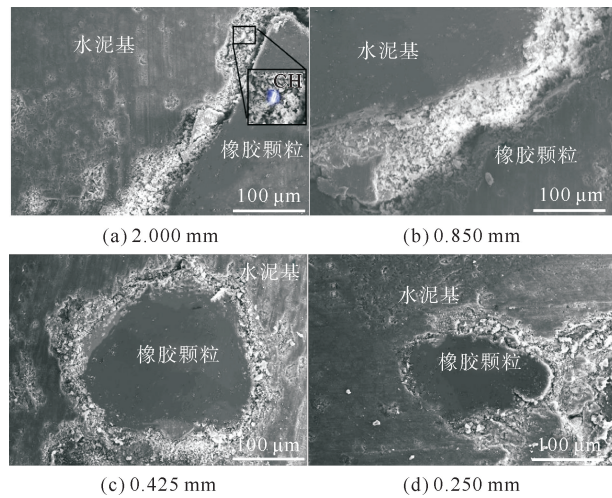


图 3 橡胶颗粒-水泥基体的SEM

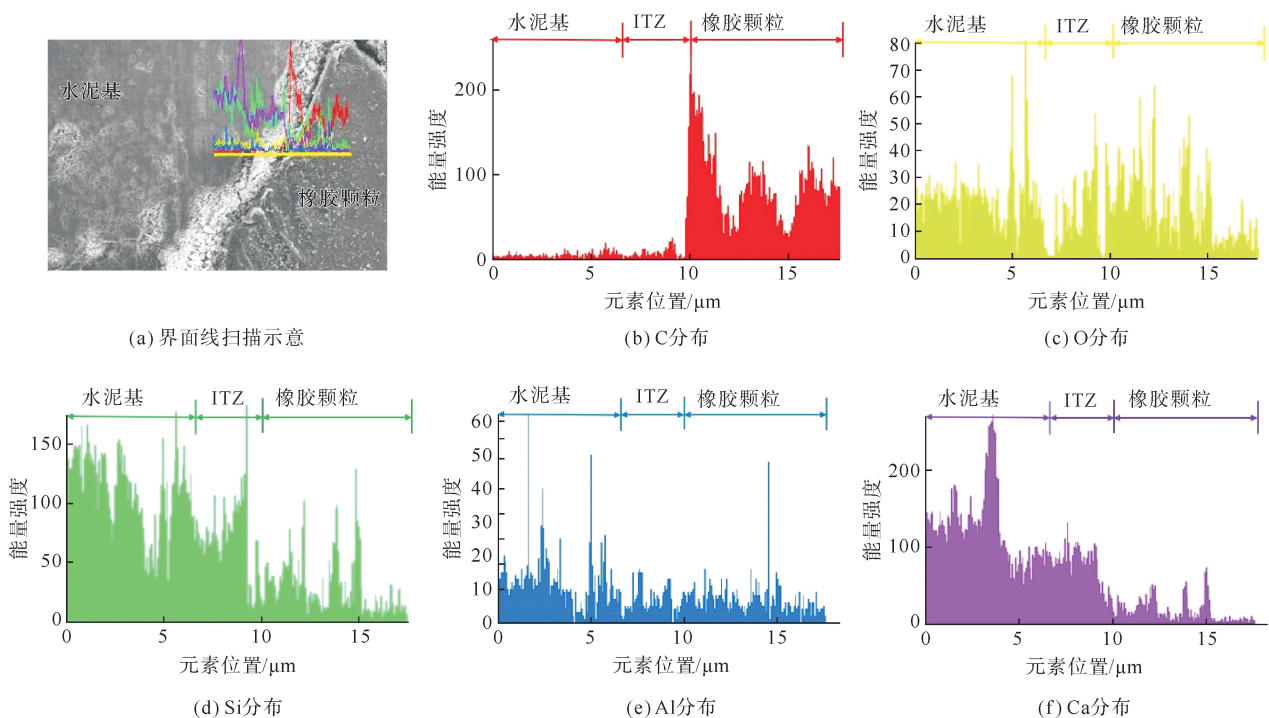


图 4 2.000 mm 橡胶颗粒-胶凝材料基体界面过渡区的能谱成分分析

素的分布图。从各元素分布图中可以发现橡胶颗粒-水泥基体界面过渡区处 O、Si 和 Ca 3 种元素含量较高, 且界面过渡区的宽度随着橡胶颗粒粒径减小逐渐变小; 相比图 4、图 6 和图 7, 图 5(粒径为 0.850 mm) 的界面过渡区处呈现出最高的水化产物元素含量, 这意味着诱导产生更多致密的水化产物, 界面过渡区得到优化, 强度得到明显提升。微结构表征结果证明橡胶颗粒粒径为 0.850 mm 时生态型 UHPC 具有最佳的微结构。

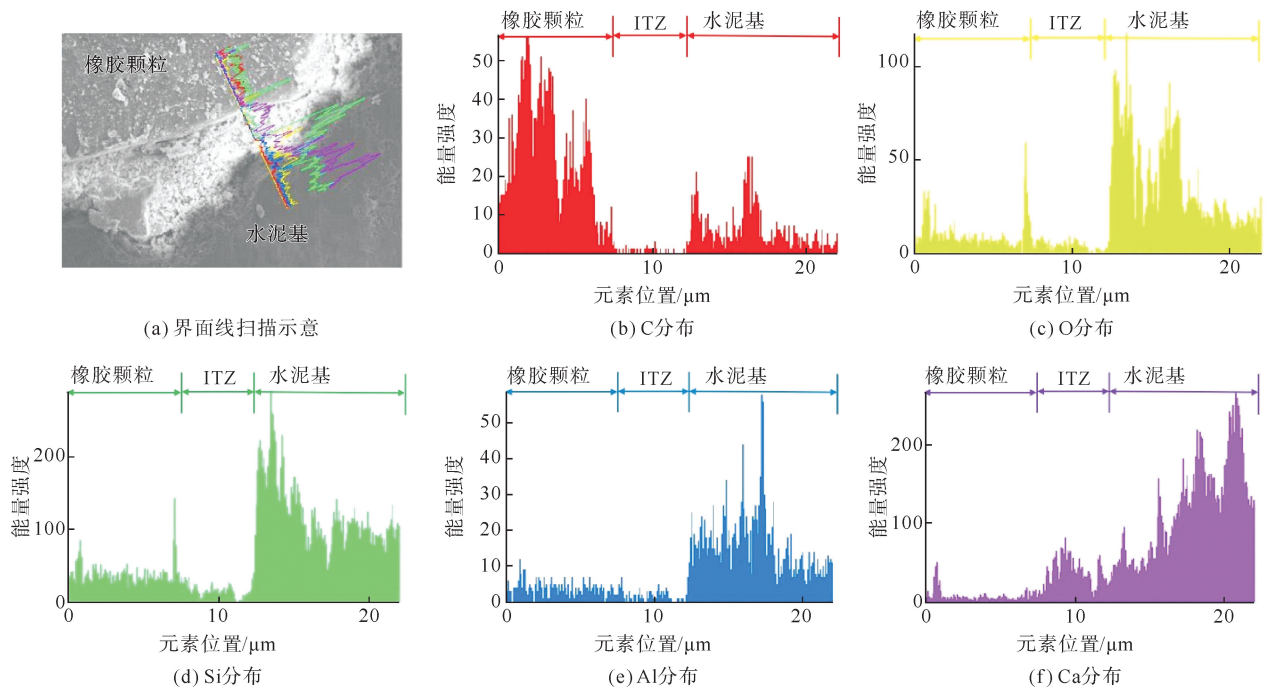


图 5 0.850 mm 橡胶颗粒-胶凝材料基体界面过渡区的能谱成分分析

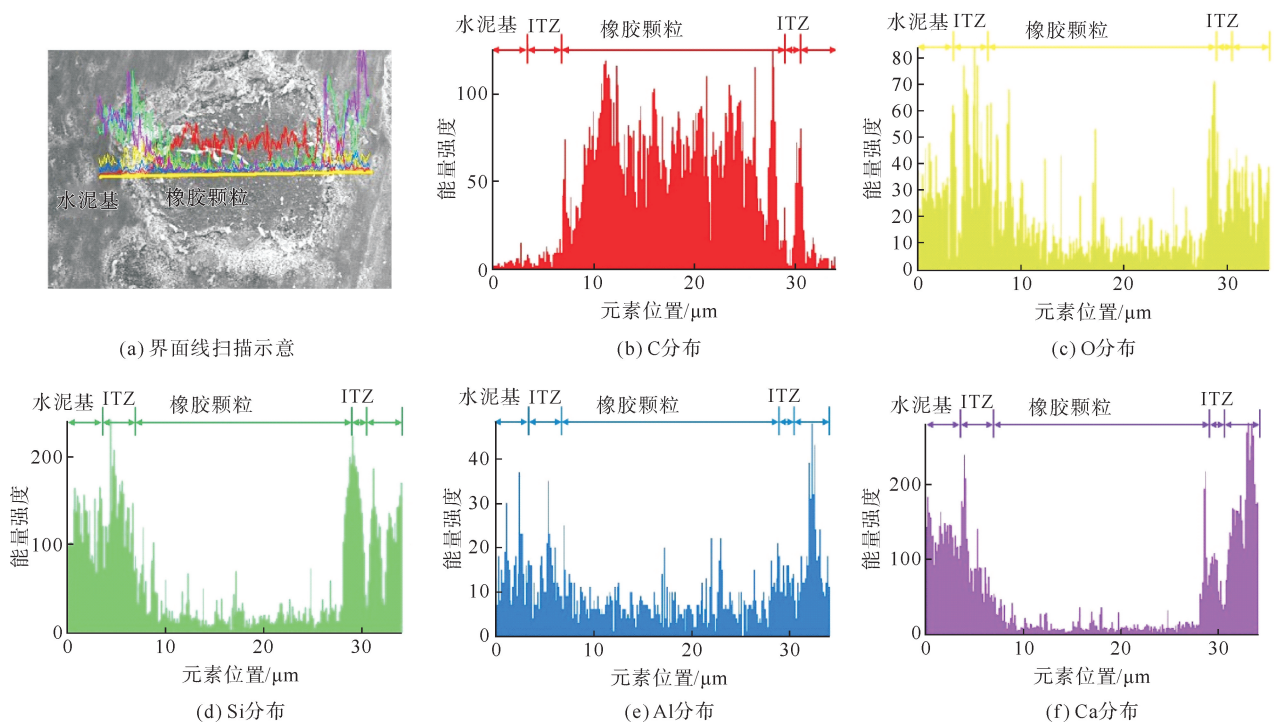


图 6 0.425 mm 橡胶颗粒-胶凝材料基体界面过渡区的能谱成分分析

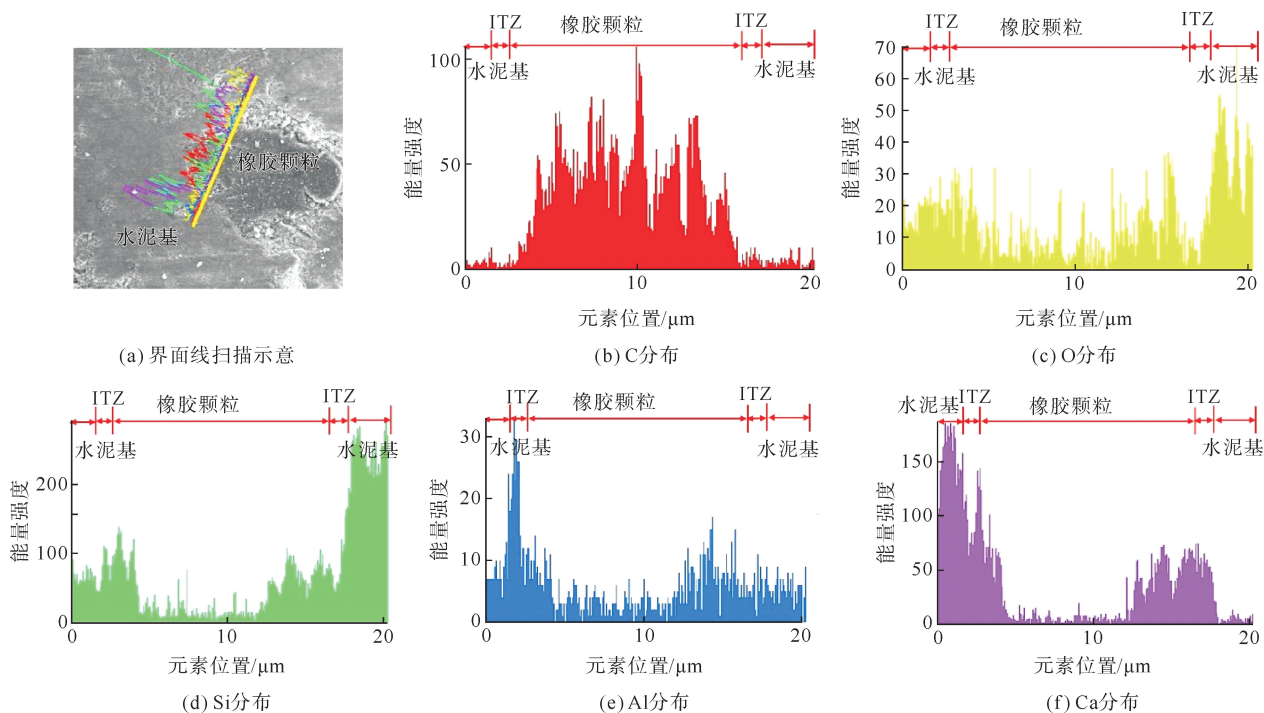


图7 0.25 mm 橡胶颗粒-胶凝材料基体界面过渡区的能谱成分分析

### 3 结论

1) 橡胶骨料过多掺入会显著劣化 UHPC 的工作性能,当掺入量为 5%及以上时随橡胶颗粒掺量增加和粒径降低,工作性能呈现出降低趋势,主要原因是橡胶颗粒的掺入会降低 UHPC 的表观密度,同时降低体系的重力势能,从而降低了 UHPC 的工作性能。

2) UHPC 的力学性能随橡胶颗粒掺量增加逐步降低。同掺量下,橡胶粒径为 0.850 mm 时,橡胶基 UHPC 力学性能最优异,这是因为颗粒粒径较大时界面过渡区劣化,强度降低;颗粒粒径过小时界面过渡区数量增加,且彼此联接,导致 UHPC 强度明显减低。然而,在橡胶颗粒掺量 $<10\%$ 时,制备的 UHPC 仍表现出超高的力学性能( $>120$  MPa)。

3) 微结构表征结果证明粒径为 0.850 mm 橡胶颗粒制备的生态型 UHPC 在界面过渡区水化产物增加,优化了微结构。

#### 参考文献(References):

- [1] SEDA J H, LEE J C, CARRARO J. Beneficial use of waste tire rubber for swelling potential mitigation in expansive soils[C]//American Society of Civil Engineers (ASCE)- Geotechnical Special Publication 172, Denver: Geo, 2007: 1-9.
- [2] XU Jie, YAO Ziyi, YANG Guang, et al. Research on crumb rubber concrete: From a multi-scale review[J]. Construction and Building Materials, 2020, 232: 117-282.
- [3] FU Chuanqing, YE Hailong, WANG Kejin, et al. Evolution of mechanical properties of steel fiber-reinforced rubberized concrete (FR-RC)[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 160: 158-166.
- [4] 郑邦容, 唐延丰, 李佳骏, 等. 橡胶混凝土力学性能与耐久性能研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2022(9): 88-91. ZHENG Bangrong, TANG Yanfeng, LI Jiajun, et al. Research progress on mechanical properties and durability of rubber concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2022(9): 88-91.
- [5] ELDIN N N, SENOUCI A B. Rubbertire particles as concrete aggregate[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1993, 5(4): 478-496.
- [6] KHATIB Z K, BAYOMY F M. Rubberized Portland cement concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(3): 206-213.
- [7] WONG S F, TING S K. Use of recycled rubber tires in normal- and high-strength concretes[J]. ACI Materials Journal, 2009, 106(4): 325-332.

- [8] 金明,曹春生,万里,等.表面改性对橡胶颗粒超高性能混凝土性能的影响[J].武汉理工大学学报,2019,41(12):18-24.  
JIN Ming,CAO Chunsheng,WAN Li,et al. Effect of surface modification on properties of rubber particle ultra-high performance concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2019,41(12):18-24.
- [9] FENG W H,LIU F,YANG F,et al. Compressive behaviour and fragment size distribution model for failure mode prediction of rubber concrete under impact loads[J]. Construction and Building Materials,2021,273:121767.
- [10] SHI C J,WU Z M,XIAO J F,et al. A review on ultra high performance concrete:Part I Raw materials and mixture design[J]. Construction and Building Materials,2015,101:741-751.
- [11] 薛刚,董亚杰,衣笑,等.橡胶粒径及掺量对混凝土断裂韧性的影响[J].混凝土,2022(2):99-101.  
XUE Gang,DONG Yajie,YI Xiao,et al. Influence of rubber particle size and content on fracture toughness of concrete[J]. Concrete,2022(2):99-101.
- [12] 丁庆军,李进辉,耿雪飞,等.橡胶颗粒掺杂提高超高性能混凝土的抗冲磨性能及其机理[J].硅酸盐学报,2020,48(10):1636-1643.  
DING Qingjun,LI Jinhui,GENG Xuefei,et al. Mechanism of enhancing anti-abrasion performance of ultrahigh-performance concrete via rubber particles[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2020,48(10):1636-1643.
- [13] WANG X P,WU D,HOU D S,et al. The unification of light weight and ultra-high strength in LWC:A new homogeneity enhancement approach[J]. Construction and Building Materials,2022,315:0950-0618.
- [14] YU R,SPIESZ H P,BROUWERS J H. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPRC)[J]. Cement and Concrete Research,2014,56:29-39.
- [15] 李健男.橡胶颗粒预处理对橡胶混凝土性能影响研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2020:26-27.  
LI Jiannan. Study on the influence of rubber particle pretreatment on the performance of rubber concrete[D]. Shenyang:Shenyang Jianzhu University,2020:26-27.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)

---

### (上接第7页)

- [9] 刘松辉,管学茂,冯春花,等.赤泥安全堆存和综合利用研究进展[J].硅酸盐通报,2015,34(8):2194-2200.  
LIU Songhui,GUAN Xuemao,FENG Chunhua,et al. Progress on red mud stockpiling and utilization[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2015,34(8):2194-2200.
- [10] WANG Yanxiu,ZHANG Tingan,LYU Guozhi,et al. Recovery of alkali and alumina from bauxite residue (red mud) and complete reuse of the treated residue[J]. Journal of Cleaner Production,2018,188:456-465.
- [11] HOU Dongshuai,WU Di,WANG Xinpeng,et al. Sustainable use of red mud in ultra-high performance concrete (UHPC):Design and performance evaluation[J]. Cement and Concrete Composites,2021,115:103862.
- [12] ZHANG Jizhe,SUN Changjun,LI Peizhao,et al. Experimental study on rheological properties and moisture susceptibility of asphalt mastic containing red mud waste as a filler substitute[J]. Construction and Building Materials,2019,211:159-166.
- [13] 刘日鑫,熊煦,周慧,等.拜耳法赤泥对自密实砂浆工作性能及自收缩特性影响分析[J].硅酸盐通报,2016,35(6):1964-1969.  
LIU Rixin,XIONG Xu,ZHOU Hui,et al. Effect of Bayer red mud on workability and shrinkage of self-compacting mortar[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2016,35(6):1964-1969.
- [14] LIU Rixin,POON C S. Effects of red mud on properties of self-compacting mortar[J]. Journal of Cleaner Production,2016,135:1170-1178.
- [15] KOSHY N,DONDROB K,HU L,et al. Synthesis and characterization of geopolymers derived from coal gangue,fly ash and red mud[J]. Construction and Building Materials,2019,206:287-296.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)