第 48 卷第 10 期
2020 年 10 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 10
October，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200247

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

丁庆军[1]，李进辉[1]，耿雪飞[1]，赵明宇[2]

(1. 武汉理工大学材料科学与工程学院，武汉 430070；2. 沈阳建筑大学材料科学与工程学院，沈阳 110168)

摘　要：针对我国西部洪水泥石流多发山区桥梁墩柱冲磨破坏问题，研制了一种具有高强、低收缩、高耐磨、抗冲击及耐久性能佳的橡胶颗粒抗冲磨超高性能混凝土(UHPC)，并利用扫描电子显微镜、能谱仪和接触角仪探究了橡胶颗粒表面改性对 UHPC 性能的提升机理。结果表明：基准 UHPC 中掺入 10% (体积分数)经 NaOH+KH570 硅烷偶联剂复合改性的粒径为 1~3 mm 的橡胶颗粒后，其抗冲磨强度和终裂冲击功分别提升了 26%和 72%；掺入 15% (体积分数)饱水预湿高钛重矿渣砂和 6% (质量分数)CaO 型膨胀剂后，其收缩较基准 UHPC 降低了约 50%。改性橡胶颗粒主要通过改变橡胶颗粒表面形貌、提升表面亲水性和改善橡胶颗粒–胶凝材料基体界面黏结性能提升 UHPC 各项性能。

关键词：橡胶颗粒；超高性能混凝土；抗冲磨；收缩；机理
中图分类号：TU528.59　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)10–1636–08
网络出版时间：2020–07–28



Mechanism of Enhancing Anti-Abrasion Performance of Ultrahigh-performance Concrete *via* Rubber Particles

DING Qingjun[1], *LI Jinhui*[1], *GENG Xuefei*[1], *ZHAO Mingyu*[2]
(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: A rubber particle anti-abrasive ultrahigh-performance concrete (UHPC) with a high strength, a low shrinkage, a high abrasion resistance, a high impact toughness and a high durability was developed to solve the problems of erosion damage of bridge pier in western mountainous areas with frequent floods. The mechanism of the surface modification of rubber particles to improve the properties of UHPC materials was investigated by scanning electron microscopy, energy spectroscopy and contact angle measurement. The results show that the anti-wearing strength and final crack impact energy are increased by 26% and 72%, respectively, after adding 10% (in volume fraction) NaOH + KH570 modified rubber particles with the sizes of 1–3 mm into UHPC. Also, the shrinkage is reduced by approximately 50% after adding 15% (in volume fraction) saturated pre-wet high-titanium heavy slag sand and 6% (in mass fraction) CaO type expansion agent into UHPC, compared to the reference UHPC. In addition, the modified rubber particles mainly improve the properties of UHPC material due to the improvements of the surface morphology of rubber particles, the surface hydrophilicity, and the interface properties of rubber particle-cementitious materials matrix.

Keywords: rubber particles; ultrahigh-performance concrete; anti-abrasion performance; shrinkage; mechanism

我国西部山区地势复杂，多深沟峡谷，桥梁数量巨大，但该区域又多发泥石流、洪水等自然灾害。泥沙和石块等固体碎屑物流速快、流量大，破坏力强，桥梁墩柱等水工结构在山洪、泥石流冲磨和动荷载耦合作用及空蚀作用下，普遍出现钢筋保护层混凝土冲磨脱落和裂缝，造成巨大安全隐患和较高的维修成本。并且我国西部山区地下水及河流中含有大量硫酸根离子、氯离子等有

收稿日期：2020–04–07。　修订日期：2020–05–07。
基金项目："十三·五"国家重点研发计划(2018YFC0705404)；国家自然科学基金(51778513，51908378)；硅酸盐建筑材料国家重点实验室开放基金项目(SYSJJ2020-07)。
第一作者：丁庆军(1962—)，男，博士，教授。

Received date: 2020–04–07.　**Revised date:** 2020–05–07.
First author: DING Qingjun (1962–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: dingqj@whut.edu.cn

害离子，常规桥梁墩柱混凝土材料和桥墩修补材料强度低，抗冲击韧性和耐磨蚀性能差、耐久性差，在硫酸盐与氯离子及固体碎屑物冲击共同作用下会造成混凝土层破坏和钢筋锈蚀，进而对桥墩内部造成结构性破坏，现有的桥墩和水工建筑物修补加固材料及加固方式难以满足西部山区严酷环境下工程实际的需要[1–4]。因此，需要开发一种高强度、高耐磨蚀、抗冲击、耐久性好的超高性能混凝土结构防护层材料，以服役于我国西部山区新建桥梁及旧桥修复加固工程[5–8]。

与此同时，我国汽车工业的迅猛发展，产生了大量的废旧轮胎，约 60%以上处于废弃堆积状态，容易产生环境污染问题[9]。将低弹性模量的废旧轮胎橡胶破碎为橡胶颗粒作为集料制备超高性能混凝土，一方面可以解决大量废旧轮胎废弃堆积、污染环境的问题，另一方面也可利用橡胶颗粒的弹性和韧性改善超高性能混凝土(UHPC)相关性能,但有关橡胶颗粒对 UHPC 性能的影响的研究较少，尤其是其抗冲磨性能、体积稳定性和耐久性亟待研究。此外缺乏橡胶颗粒改性对 UHPC 性能提升的机理研究[9–12]。

针对上述问题，通过实验研究了橡胶颗粒粒径、掺量和表面改性方式以及内养护集料和膨胀剂对 UHPC 工作性能、力学性能、抗冲磨/冲击性能、体积稳定性及耐久性能的影响和机理，探究了橡胶颗粒表面改性对 UHPC 性能改善的机理，开发了具有高强、低收缩、高耐磨蚀、抗冲击和高耐久性的 UHPC，为解决西部山区桥梁墩柱冲磨破坏提供技术支持。

1　实验

1.1　原材料

水泥选用 P·O 52.5，主要性能指标见表 1。硅灰比表面积 19 500 m^2/kg。粉煤灰微珠比表面积≥1 200 m^2/kg，28 d 活性指数＞90%，非晶态。细集料为河卵石破碎机制砂，细度模数 3.0，石粉含量 5%。亚甲基蓝(MB)值 1.0，针片状含量≤20%，表观密度 2 650 kg/m^3。水泥、粉煤灰微珠的主要化学组成见表 2。内养护集料为快冷高钛重矿渣砂，TiO_2 含量 15% (质量分数)，细度模数 3.1，石粉含量 5% (质量分数)，表观密度 2 970 kg/m^3，孔隙率 20%，饱和面干吸水率 10%。外加剂选用聚羧酸高效减水剂，固含量 35%，减水率 30%。选用微细镀铜短钢纤维，弹性模量 210 GPa，表观密度 7 980 kg/m^3，公称长度 13 mm，当量直径 0.25 mm。

选用 3 种粒径的废旧轮胎破碎橡胶颗粒，粒径分别为 0~0.18、1.00~3.00、3.00~6.00 mm，表观密度 1 120 kg/m^3。选用 γ-(甲基丙烯酰氧)丙基三甲氧基硅烷，分子式为 $CH_3CCH_2COO(CH_2)_3Si(OCH_3)_3$。

表 1　水泥主要技术指标

Table 1　Main technical indicators of cement

Specific surface area/($m^2 \cdot kg^{-1}$)	Water requirement of normal consistency/%	Compressive strength/MPa		Flexural strength/MPa		Setting time/min	
		3 d	28 d	3 d	28 d	Initial setting	Final setting
370	27	31.7	56.9	6.1	9.4	131	190

表 2　原材料主要化学组成

Table 2　Main chemical composition of raw materials

Material	Mass fraction/%								
	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	SO_3	K_2O	MgO	Na_2O	Loss
Cement	20.97	3.65	4.67	64.39	2.55	0.65	2.14	0.11	0.77
Silica fume	96.25	0.18	0.59	0.63	0.11	0.20	0.25	0.08	1.68
Fly ash microsphere	59.50	3.01	31.42	1.51	0.33	1.72	0.53	0.42	1.22

1.2　测试方法

按照《水工混凝土试验规程》SL352–2006 中水下钢球法中相关要求对样品进行抗冲磨强度测试，测试仪器为河北沧州中科北工试验仪器有限公司的 SJA-1 型混凝土抗冲磨(水下钢球法)测试仪。参照美国 ACI544 推荐的落锤冲击法进行抗冲击性能试验，测试仪器为北京中科路达试验仪器有限公司的 CSK-Ⅵ型多功能电动击实仪。抗冲击试验仪器如图 1 所示。采用上海梭伦信息科技有限公司产 SL 200KB 型动态/静态接触角仪进行橡胶颗粒–水接触角测试。采用美国 EDAX 公司的 OCTANE PRO-QUANTA FEG 450 型场发射环境扫描电子显微镜与 EDAX/Team EDS 型能谱仪对样品表面进行形貌和成分分析。

1.3 橡胶颗粒表面改性工艺

结合文献[13–16]，选择工艺流程简单、成本适宜的 NaOH 水溶液表面改性和有机–无机界面黏结效果提升显著的 KH570 硅烷偶联剂-C_2H_5OH 溶液表面改性以及 NaOH 水溶液+KH570-C_2H_5OH 溶液复合表面改性(以下简称 NaOH 改性、KH570 改性和 NaOH+KH570 复合改性)3 种表面改性方式。NaOH+KH570 复合改性工艺流程如图 2 所示。

1.4 基准配合比

试验基准配合比如表 3 所示，后续实验研究采用标准养护条件。



图 1 抗冲击实验仪

Fig. 1 Impact test instrument

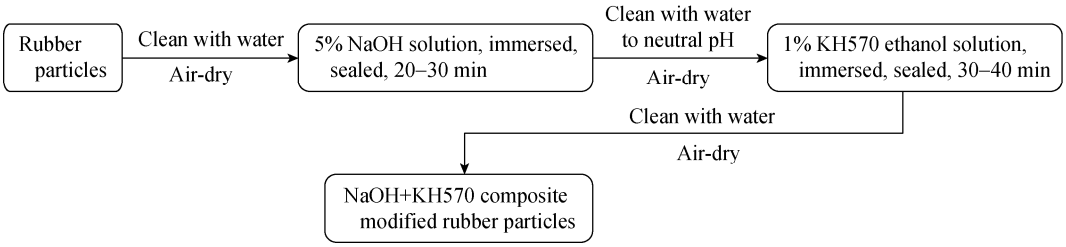


图 2 NaOH+KH570 复合改性工艺流程

Fig. 2 NaOH + KH570 composite modification process

表 3 试验基准配合比

Table 3 Test reference mix ratio

Material dosage/(kg·m^{-3})				W/B	φ(super-plasticizer) /%	φ(steel fiber)/%
Cement	Silica fume	Fly ash microsphere	Manufactured sand			
780	200	150	1 005	0.18	3.1	2.5

W/B is water/binder ratio; φ is volume fraction.

2 结果与讨论

2.1 橡胶颗粒对 UHPC 工作性能的影响

以基准配合比为基础，采用 0~0.18、1.00~3.00 和 3.00~6.00 mm 3 种粒径的橡胶颗粒进行不同方式的改性处理，等体积取代 5%、10%、15%和 20%的机制砂集料制备 UHPC，以扩展度和坍落度评价新拌混凝土的工作性能。

2.1.1 橡胶颗粒粒径和掺量 橡胶颗粒粒径和掺量对 UHPC 工作性能影响的实验结果见图 3。由图 3 可见，在适宜掺量(15%及以下)，掺加 0~0.18、1.00~3.00 mm 的橡胶颗粒可提升 UHPC 工

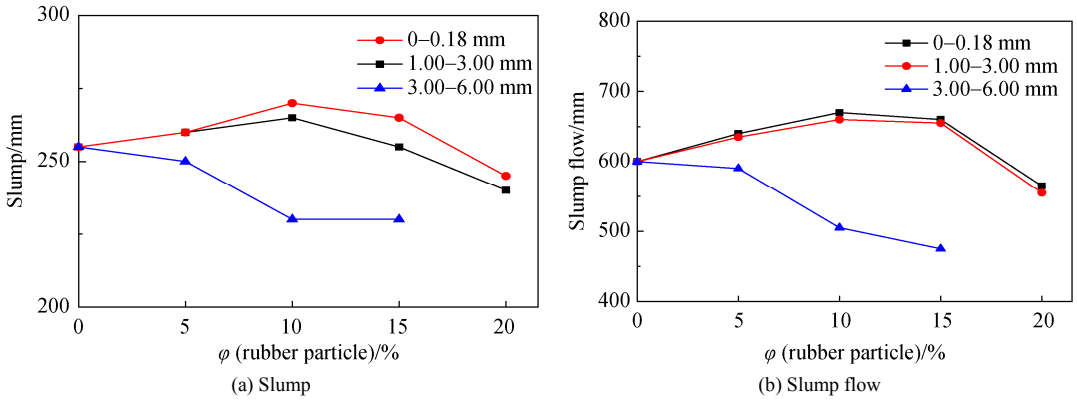
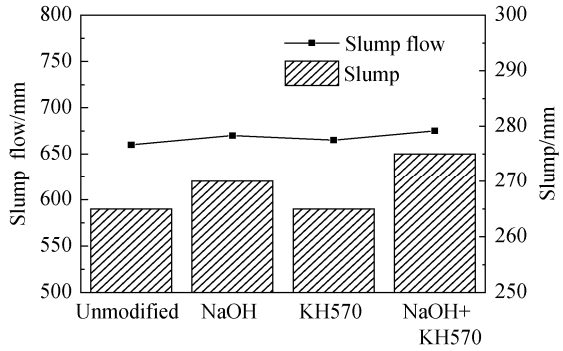


图 3 橡胶颗粒粒径和掺量对 UHPC 工作性能的影响

Fig. 3 Effect of rubber particle size and dosage on ultrahigh-performance concrete (UHPC) workability

作性能，而在试验掺量范围内 3.00~6.00mm 粒径的橡胶颗粒显著降低 UHPC 的工作性能。为保证 UHPC 工作性能，制备橡胶颗粒抗冲磨 UHPC 时，适宜粒径为 0~0.18、1.00~3.00 mm，掺量宜在 15%以下，较优掺量为 10%。

2.1.2　表面改性方式　　橡胶颗粒不同表面改性方式对 UHPC 工作性能的影响规律如图 4 所示。由图 4 可见，与未改性橡胶颗粒相比，经不同方式表面改性后的 1.00~3.00 mm 橡胶颗粒(掺量 10%)掺杂 UHPC 的工作性能均有提升，其中经 NaOH+KH570 复合改性橡胶颗粒掺杂 UHPC 的工作性能最优。



Rubber particle size is in the range of 1–3 mm and its volume fraction is 10%.

图 4　橡胶表面改性方式对 UHPC 工作性能的影响

Fig. 4　Effect of rubber surface modification on UHPC workability

2.2　橡胶颗粒对 UHPC 力学性能的影响

2.2.1　橡胶颗粒粒径和掺量　　橡胶颗粒不同粒径、掺量对 UHPC 主要力学性能的影响规律如图 5 所示。由图 5 可见，掺加 0~0.18 mm 和 1.00~3.00 mm 两种粒径制备的 UHPC 的 28 d 抗压、抗弯拉强度均低于未掺橡胶颗粒组，且均随橡胶颗粒掺量的增加而降低。掺加橡胶颗粒显著降低 UHPC 的力学性能，1.00~3.00 mm 橡胶颗粒制备的 UHPC 力学性能降低幅度较小。橡胶颗粒的掺量对 UHPC 力学性能有显著影响，随其掺量的增加，混凝土内部薄弱界面增多，进而降低混凝土力学性能[17]。综合考虑充分利用废旧轮胎橡胶颗粒和保证 UHPC 力学性能，制备橡胶颗粒抗冲磨 UHPC 时，宜选用粒径为 1.00~3.00 mm 的橡胶颗粒，掺量宜在 10%以下，较优掺量为 10%。

2.2.2　表面改性方式　　橡胶颗粒不同表面改性方式对 UHPC 力学性能的影响规律如图 6 所示。由图 6 可见，与未改性橡胶颗粒相比，掺加经不同方式表面改性后的橡胶颗粒制备的 UHPC 的 28 d 抗压/抗弯拉强度均有提升，3 种表面改性方式中，掺加 NaOH+KH570 复合改性橡胶颗粒制备的 UHPC 力学性能最优。

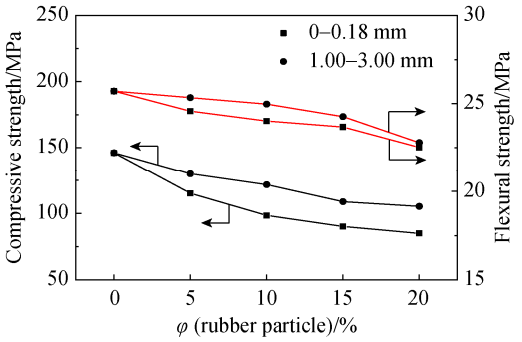


图 5　橡胶颗粒粒径和掺量对 UHPC 力学性能的影响

Fig. 5　Effect of rubber particle size and dosage on UHPC mechanical properties

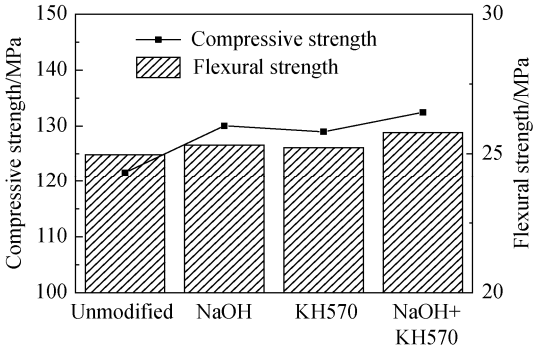


图 6　橡胶表面改性方式对 UHPC 力学性能的影响

Fig. 6　Effect of rubber surface modification on UHPC mechanical properties

2.3　橡胶颗粒对 UHPC 抗冲磨/抗冲击性能的影响

2.3.1　橡胶颗粒粒径和掺量　　橡胶颗粒粒径、掺量对 UHPC 抗冲磨/抗冲击性能的影响如图 7 所示。由图 7 可见，粒径为 0~0.18 mm 的橡胶颗粒降低 UHPC 的 28 d 抗冲磨强度和终裂冲击功，显著降低 UHPC 的抗冲磨/抗冲击性能。与未掺橡胶颗粒组相比，掺加 1.00~3.00 mm 粒径橡胶颗粒制备的 UHPC 的 28 d 抗冲磨强度和终裂冲击功的提升幅度分别可达 12%和 48%，其适宜掺量为 10%~15%。在相同掺量情况下 1.00~3.00 mm 粒径橡胶颗粒制备的 UHPC 材料内部的橡胶颗粒–胶凝浆体薄弱界面较少，对 UHPC 材料整体强度的降低幅度较小，且大粒径橡胶颗粒吸能效应显著，进而提升了 UHPC 材料抗冲磨/冲击性能。橡胶颗粒的掺量对 UHPC 抗冲磨/抗冲击性能有显著影响，掺量适中时，橡胶颗粒在混凝土内部间距适中、分散均匀，可有效吸收冲磨/冲击应力，减少应力损伤破坏[18]。

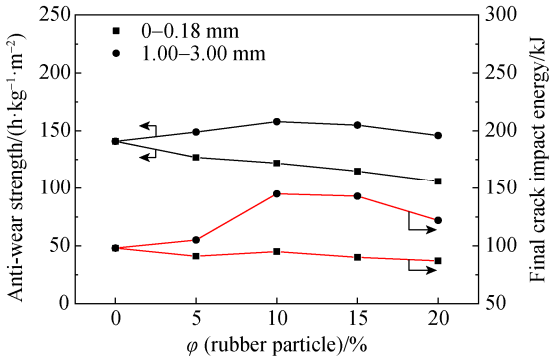


图 7 橡胶颗粒粒径和掺量对 UHPC 抗冲磨/抗冲击性能的影响

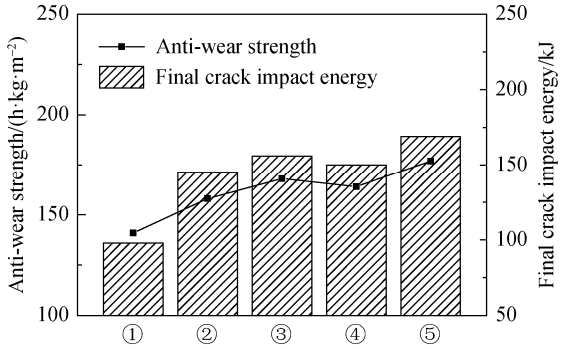
Fig. 7 Effect of rubber particle size and dosage on UHPC anti-abrasive properties

2.3.2 表面改性方式 橡胶颗粒不同表面改性方式对 UHPC 抗冲磨/抗冲击性能的影响如图 8 所示。由图 8 可见，NaOH 改性、KH570 改性和 NaOH+KH570 复合改性 3 种改性方式均可提升 UHPC 材料的抗冲磨/冲击性能，其中 NaOH+KH570 复合改性方式效果最佳，与未掺橡胶颗粒制备的 UHPC 材料相比，其 28 d 抗冲磨强度和终裂冲击功的提升幅度分别可达 26%和 72%，显著提高了 UHPC 的抗冲磨/抗冲击性能。

2.4 膨胀剂与内养护集料协同提升橡胶颗粒 UHPC 体积稳定性

利用饱水预湿高钛重矿渣砂内养护作用和膨胀剂补偿收缩协同提升 UHPC 体积稳定性,其中，复合改性橡胶颗粒和高钛重矿渣砂均为等体积取代机制砂集料，CaO 型膨胀剂掺入方式为等质量比例取代胶凝材料各组分，外加剂和钢纤维均为外掺，饱水预湿高钛重矿渣砂中的预湿吸水不计入水胶比。实验配合比如表 4 所示，实验结果见表 5 和图 9。

由表 5 和图 9 可见，饱水预湿高钛重矿渣砂和膨胀剂的掺入均小幅降低了橡胶颗粒 UHPC 材料的抗压/抗弯拉强度以及抗冲磨/冲击性能(降低幅度不超过 8%)，而大幅降低了橡胶颗粒 UHPC 的收缩、提升了橡胶颗粒 UHPC 的体积稳定性能。同时掺入 15%饱水预湿高钛重矿渣砂和 6% CaO 型膨胀剂制备的橡胶颗粒 UHPC 的 56 d 收缩相较于未掺入高钛重矿渣砂和膨胀剂的橡胶颗粒 UHPC 降低了 417 μm/m，收缩降低率大于 50%。在 UHPC 材料极低水胶比环境下，膨胀剂无法完全水化生成膨胀产物而充分发挥补偿混凝土收缩的作用，而饱水预湿高钛重矿渣砂在混凝土硬化过程中持续释水，促进了膨胀剂水化产生膨胀产物而发挥补偿收缩作用，因此利用饱水预湿多孔高钛重矿渣砂集料内养护作用和膨胀剂补偿收缩协同作用可显著降低 UHPC 材料的收缩。



1—No rubber; 2—Unmodified rubber; 3—NaOH modified rubber; 4—KH570 modified rubber; 5—NaOH+KH570 composite modified rubber; Rubber particle size is in the range of 1–3 mm and its volume fraction is 10%.

图 8 橡胶表面改性方式对 UHPC 抗冲磨/抗冲击性能的影响

Fig. 8 Effect of rubber surface modification on UHPC anti-abrasive properties

与未掺加橡胶颗粒、膨胀剂和重钛矿渣砂的基准 UHPC 相比，掺入 15%饱水预湿高钛重矿渣砂和 6% CaO 型膨胀剂制备的橡胶颗粒 UHPC 抗冲磨强度和终裂冲击功提升率分别大于 15%和 60%，收缩降低率大于 50%，抗压强度降低约 14%、抗弯拉强度降低约 3% (但其抗压强度不低于 120 MPa、抗弯拉强度不低于 25.0 MPa)，能满足西部山区桥梁墩柱冲磨破坏修补材料力学性能要求。

表 4 膨胀剂与内养护集料对 UHPC 性能影响的实验配合比

Table 4 Mix ratio for investigating effect of expansion agent and internal curing aggregate on UHPC performance

Sample No.	W/B	Material dosage/(kg·m^{-3})				φ(super-plasticizer)/%	φ(steel fiber)/%	φ(rubber particles)/%	φ(high-titanium heavy slag sand)/%	w(expansive agent)/%
		Cement	Silica fume	Fly ash microsphere	Manufactured sand					
A	0.18	780	200	150	1 005	3.1	2.5	10		
B	0.18	780	200	150	1 005	3.1	2.5	10	15	
C	0.18	780	200	150	1 005	3.1	2.5	10		6
D	0.18	780	200	150	1 005	3.1	2.5	10	15	6
E	0.18	780	200	150	1 005	3.1	2.5			

E—Reference UHPC, which the mix ratio is the same as shown in Table 3; *w*—mass fraction.

表 5　膨胀剂与内养护集料对 UHPC 性能的影响试验结果

Table 5　Effect of expansion agent and internal curing aggregate on UHPC performance

Sample No.	Slump/mm	Slump flow/mm	Compressive strength/MPa	Flexural tensile strength/MPa	Anti-wear strength/(h·kg·m^{-2})	Final crack impact energy/kJ
A	275	675	132.4	25.7	177	169
B	280	690	129.9	25.1	169	161
C	280	680	129.1	25.1	166	163
D	280	685	125.7	25.0	163	158
E	255	600	145.9	25.9	141	98

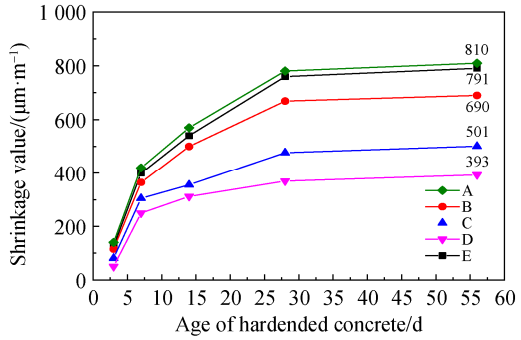


图 9　膨胀剂与高钛重矿渣砂对 UHPC 收缩的影响

Fig. 9　Effect of expansion agent and high titanium heavy slag on UHPC shrinkage

2.5　橡胶颗粒抗冲磨 UHPC 耐久性研究

在前述试验基础上，橡胶颗粒抗冲磨 UHPC 耐久性实验的材料配合比如表 6 所示，橡胶颗粒抗冲磨 UHPC 耐久性能如表 7 所示。

2.6　橡胶颗粒表面改性对 UHPC 性能提升的机理

2.6.1　橡胶颗粒表面形貌分析　　由图 10 可见，未改性橡胶颗粒表面呈粗糙、凹凸不平状，且表面微孔零星分布，其表层凸起呈多棱尖锐状，且杂质相较多。复合改性的橡胶颗粒表面在 KH570 硅烷偶联剂良好附着的同时，具有高的表面粗糙度，改性后的胶粒表面普遍出现图 10c 中圆圈标注的表面形貌变化，即出现大量的表面腐蚀痕迹及表面粗糙度增加。

2.6.2　橡胶颗粒表面亲水性能　　橡胶颗粒–水接触角照片如图 11 所示。由图 11 可见，未改性橡胶颗粒表面的水接触角为 93°，而经过 NaOH+KH570 复合表面改性后的水接触角为 64°，表明橡胶颗粒表面亲水性能提升，这是由于经过改性后橡胶颗粒表面疏水性杂质相的减少和亲水性基团的引入所致。橡胶颗粒表面亲水性能的提升增强了橡胶颗粒与胶凝材料浆体在新拌混凝土状态下的裹附性和硬化混凝土中二者的界面黏结性能，进而提升了新拌 UHPC 材料的工作性能和硬化 UHPC 材料的力学性能及抗冲磨/抗冲击性能。

2.6.3　橡胶颗粒–胶凝材料基体界面形貌分析　　由图 12 和表 8 可见，未改性橡胶颗粒与胶凝材料基体之间有较大间隙，最大间隙宽度达 100 μm，这是由于未改性的橡胶颗粒表面含有大量的疏水性物质硬脂酸锌和其它杂质物相，其降低了二者的界面黏结强度。与未改性橡胶颗粒相比，经 NaOH+KH570 复合改性处理的橡胶颗粒与胶凝材料基体之间界面密实、过渡连续，其原因为 NaOH 改性可使胶粒表面出现羟基(—OH)，胶粒表面亲水性更好[19]；同时由表 8 可见，NaOH+KH570 复合改性降低了胶粒表面包括疏水硬脂酸锌在内的杂质物相、增加了硅烷偶联剂的附着，其可促进 KH570 与胶粒间键合效果。KH570 改性处理可使胶粒出现羰基(C=O)和不饱和双键(C=C)，胶粒表面活性提高[19]，其分子中甲氧基团为可水解基团，在 UHPC 内部水化干燥过程中与羟基脱水缩合，形成 Si—O—Si 键，在胶材与 KH570 间形成单分子层；有机官能团甲基丙烯酰氧基团可与橡胶颗粒表面形成化学键合，形成有机基体–硅烷偶联剂–无机基体结合层，进而提升橡胶颗粒–胶凝材料基体间的界面黏结强度[20]。

表 6　橡胶颗粒抗冲磨 UHPC 的配合比

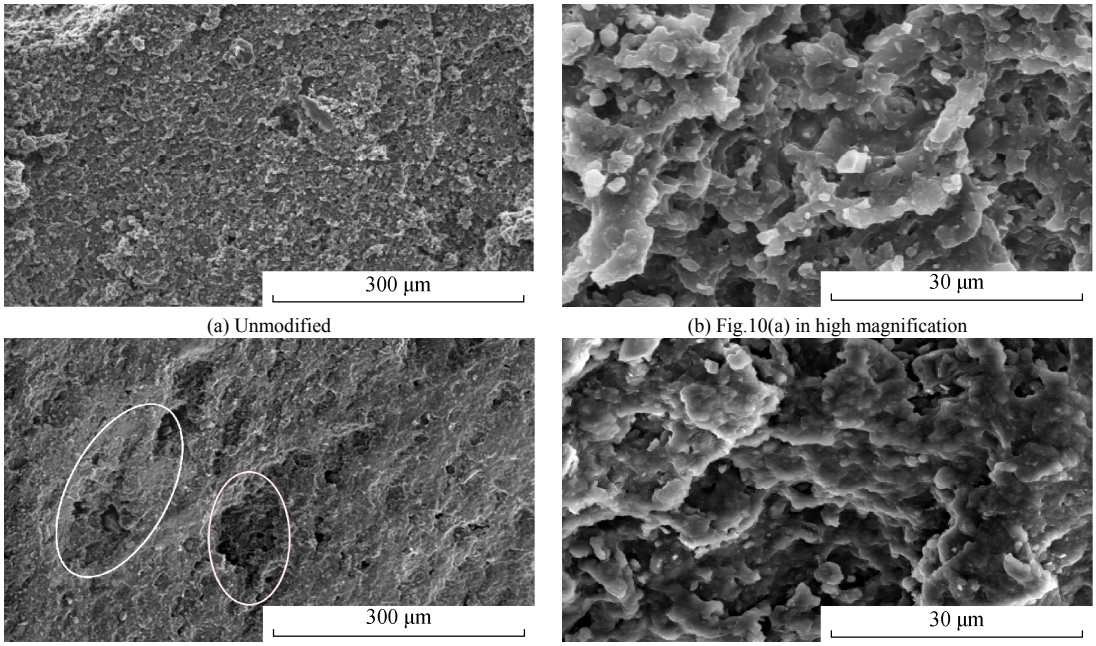
Table 6　Mix ratio of rubber particle doped anti-abrasive UHPC

W/B	Material dosage /(kg·m^{-3})				φ(super-plasticizer)/%	φ(steel fiber)/%	w(expansive agent)/%	φ(1–3 mm rubber)/%	φ(high-titanium heavy slag sand)/%
	Cement	Silica fume	Fly ash microsphere	Manufactured sand					
0.18	780	200	150	1 005	3.1	2.5	6	10	15

表 7　橡胶颗粒抗冲磨 UHPC 的耐久性能

Table 7　Durability of rubber particle doped anti-abrasive UHPC

Chloride diffusion coefficient/(m^2·s^{-1})	Sulphate resistance grade	Mass loss at 200 frost-thaw cycle times/%	28 d carbonation depth/mm
0.05×10^{-12}	KS120	0.08	0

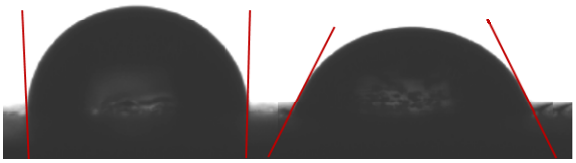


(a) Unmodified (b) Fig.10(a) in high magnification

(c) NaOH + KH570 composite modified (d) Fig.10(c) in high high magnification

图 10 改性橡胶颗粒表面的 SEM 照片

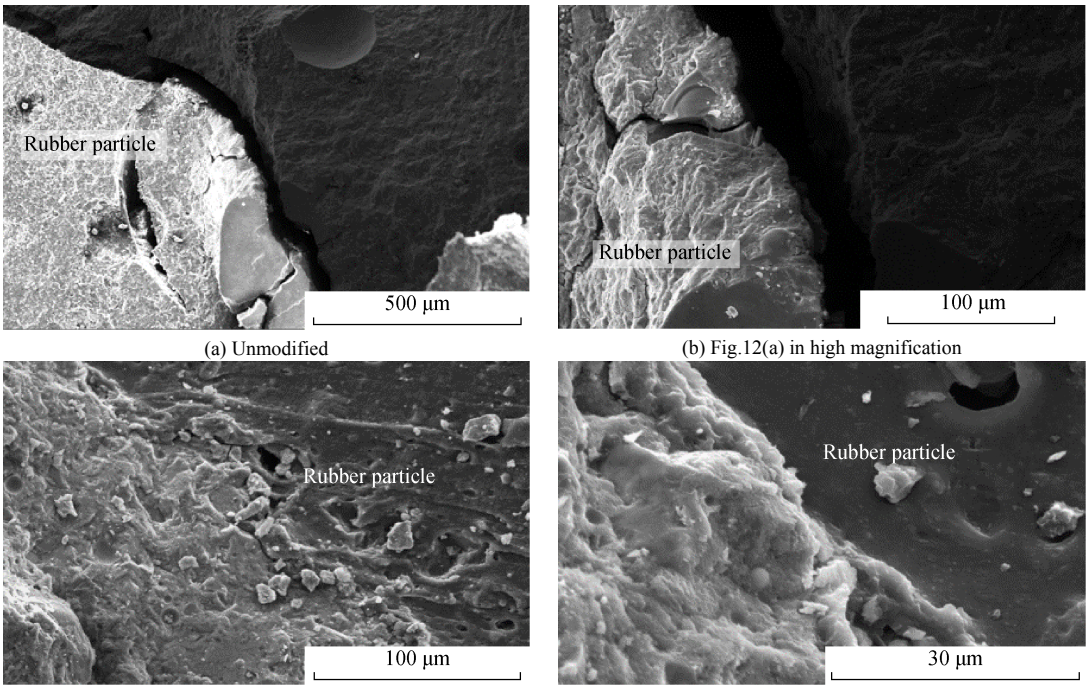
Fig. 10 SEM images of modified rubber particle surface



(a) Unmodified (b) NaOH + KH570 modified

图 11 橡胶颗粒–水接触角照片

Fig. 11 Photos of rubber particle–water contact angle



(a) Unmodified (b) Fig.12(a) in high magnification

(c) NaOH + KH570 composite modified (d) Fig.12(c) in high magnification

图 12 不同改性方式后橡胶颗粒–胶凝材料基体的界面 SEM 照片

Fig. 12 SEM images of interfaces between rubber particles and cementitious material matrix with different modification methods

表 8　橡胶颗粒成分表

Table 8　Chemical composition of rubber particles

Element	Unmodified		NaOH modified		NaOH+KH570 composite modified	
	w/%	*x*/%	*w*/%	*x*/%	*w*/%	*x*/%
C	59.72	80.09	63.91	81.60	60.76	73.86
O	11.48	11.56	10.27	9.84	22.57	20.61
Al	0.36	0.21	0.74	0.42		
Si					1.48	0.76
Zr	3.34	0.59	4.40	0.74	2.67	0.42
S	2.92	1.47	3.37	1.62	2.49	1.13
Cl	0.57	0.26	0.40	0.17		
K	0.36	0.15				
Ca	2.82	1.13	11.06	4.24	7.01	2.55
Zn	18.43	4.54	5.85	1.37	3.02	0.67

x is mole fraction.

3　结论

采用 NaOH+KH570 复合改性后的 1.00~3.00 mm 粒径的橡胶颗粒掺杂的 UHPC 力学性能降低幅度较小，抗冲磨/抗冲击性能显著提升，其主要通过改变橡胶颗粒表面形貌、提升表面亲水性而改善橡胶颗粒–胶凝材料基体界面黏结性能，进而提升 UHPC 材料各项性能。利用饱水预湿的高强耐磨多孔高钛重矿渣砂内养护作用和 CaO 型膨胀剂协同补偿收缩，可进一步提升橡胶颗粒 UHPC 体积稳定性。相较于未掺杂的 UHPC，橡胶颗粒抗冲磨 UHPC 抗压/抗弯拉强度略有下降，抗冲磨强度和终裂冲击功提升率分别大于 15%和 60%，收缩降低率大于 50%，抗冲磨性能和体积稳定性更优。

参考文献:

[1] WANG X,LUO S Z, LIU G S, et al. Abrasion test of flexible protective materials on hydraulic structures[J]. Water Sci Eng, 2014, 7(1): 106–116.

[2] TIAN L, TIAN X, WANG Y, et al. Anti-wear properties of the molluscan shell Scapharca subcrenata: Influence of surface morphology, structure and organic material on the elementary wear process[J]. Mater Sci Eng: C, 2014, 42: 7–14.

[3] SONG P S, HWANG S. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete[J]. Constr Build Mater, 2004, 18(9): 669–673.

[4] 孙志恒, 孙祥等.泄水建筑物推移质冲磨破坏修复技术[J]. 水力发电, 2017, 43(7): 58–61.
SUN Zhiheng, SUN Xing, WU Yue, et al. Water Power(in Chinese), 2017, 43(7): 58–61.

[5] SHEN D J, KANG J C, YI X J, et al. Effect of double hooked-end steel fiber on early-age cracking potential of high strength concrete in restrained ring specimens[J]. Constr Build Mater, 2019, 223: 1095–1105.

[6] XIAO Q, HUANG Z X, ZU X, et al. Shaped charge penetration into high- and ultrahigh-strength steel-fiber reactive powder concrete targets[J]. Def Technol, 2020, 16(1): 217–224.

[7] TAVAKOLI H R, PEDRAM J, MAHMOUDI S. Experimental evaluation of the effects of adding steel fiber on the post-cyclic behavior of reinforced self-compacting concrete beams[J]. J Build Eng, 2019, 25: 100771.

[8] 丁庆军, 彭程康琰, 胡俊, 等. 细集料对超高性能混凝土的性能影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(2): 488–494.
DING Qingjun, PENGCHENG Kangyan, HU Jun, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2019, 38(2): 488–494.

[9] 中华人民共和国商务部流通业发展司. 中国再生资源回收行业发展报告2018[R]. 北京:中国财富出版社, 2018.

[10] SIDDIQUE R, NAIK T R. Properties of concrete containing scrap-tire rubber——An overview[J]. Waste Manage, 2004, 24(6): 563–569.

[11] COVENTRY K, RICHARDSON A, DIAZ E. Impact resistance of concrete——Using slit rubber from tyres[J]. J Harbin Inst Technol, 2015, 21(4): 43–46.

[12] THOMAS B S, GUPTA R C. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete[J]. Renew Sustain Energy Rev, 2016, 54: 1323–1333.

[13] ELCHALAKANI M, ALY T, ABUAISHEH E. Mechanical properties of rubberised concrete for road side barriers[J]. Aust J Civil Eng, 2016, 14(1): 1–12.

[14] MILLER N M, TEHRANI F M. Mechanical properties of rubberized lightweight aggregate concrete[J]. Constr Build Mater, 2017, 147: 263–271.

[15] 马一平, 刘晓勇, 谈至明, 等. 改性橡胶混凝土的物理力学性能[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(4): 379–383.
MA Yiping, LIU Xiaoyong, TAN Zhiming, et al. J Build Mat (in Chinese), 2009, 12(4): 379–383.

[16] GUO S, DAI Q, SI R, et al. Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire[J]. J Cleaner Prod, 2017, 148: 681–689.

[17] GANJIAN E, KHORAMI M, MAGHSOUDI A. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete[J]. Constr Build Mater, 2009, 23: 1828–1836.

[18] 涂天驰. 超高性能混凝土的抗冲磨性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
TU Tianchi. Research on the abrasion resistance of ultra high performance concrete (in Chinese, dissertation). Guangzhou: South China University of Technology, 2018.

[19] 于利刚. 废橡胶粉的杂化改性及其对水泥基材料结构与性能的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
YU Ligang. Hybrid modified waste rubber powder and its influence on the structure and properties of cement-based materials (in Chinese, dissertation). Guangzhou: South China Univiersity of Technology, 2010.

[20] 徐宏殷. 改性橡胶混凝土的配制与物理力学性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2015.
XU Hongyin. Research on the compound method and physical-mechanical properties of modified rubberized concrete (in Chinese, dissertation). Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015.