第 49 卷第 11 期
2021 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 11
November，2021

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

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210314

低收缩防辐射超高性能混凝土的制备及其性能形成机理

张高展[1,2]，吴明明[1]，杨 军[1,2]，丁庆军[3]，侯东帅[4]，邓 超[3]

(1. 安徽建筑大学材料与化学工程学院，合肥 230601；2. 安徽省先进建筑材料重点实验室，合肥 230022；
3. 武汉理工大学材料科学与工程学院，武汉 430070；4. 青岛理工大学土木工程学院，山东 青岛 266033)

摘 要：针对现有防辐射混凝土力学强度、抗冲击性能和防辐射性能难以兼顾的问题，研制了一种具有超高强度、低收缩、高防辐射和高抗冲击性能的超高性能混凝土(UHPC)，并分析了其主要性能的形成机理。结果表明：制备的低收缩防辐射超高性能混凝土 28 d 抗压/抗折强度可达 120/20 MPa，180 d 收缩率可低至 385×10^{-6}，辐射屏蔽效率可达 85%，动态冲击终裂总能耗可达 5 600 kJ/m^3；其性能主要源于 UHPC 密实设计原理，高钛重矿渣砂界面增强和“销钉结构”作用，高钛重矿渣砂内养护与膨胀剂交互作用，重晶石粉/砂、高钛重矿渣砂和钢纤维中 Ba、Fe 等主要组成元素的射线屏蔽作用，以及钢纤维和聚合物纤维的复合增韧作用。

关键词：高钛重矿渣砂；超高性能混凝土；体积稳定性能；防辐射性能；抗冲击性能
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)11–2405–11
网络出版时间：2021–10–11



Preparation of Low-Shrinkage and Radiation-Shielding Ultra-High Performance Concrete and Its Performance Formation Mechanism

ZHANG Gaozhan[1,2], *WU Mingming*[1], *YANG Jun*[1,2], *DING Qingjun*[3], *HOU Dongshuai*[4], *DENG Chao*[3]
(1. School of Materials and Chemical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
2. Anhui Province Key Laboratory of Advanced Building Materials, Hefei 230022, China;
3. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
4. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, China)

Abstract: An ultra-high performance concrete (UHPC) with high strength, low shrinkage, strong radiation shielding and impact resistance was prepared, and its performance formation mechanism was analyzed. The results show that the as-prepared low shrinkage radiation shielding UHPC has 28-d compressive strength of > 120 MPa, 28-d flexural strength of > 20 MPa, 180-d shrinkage rate of < 385×10^{-6}, radiation shielding efficiency of 85% and energy consumption for dynamic impact cracking of 5 600 kJ/m^3. The high performance of this UHPC is mainly due to the dense-packing design, interfacial strengthening effect of titanium-rich heavyweight slag sand and “pin structure”, the combination of internal curing of titanium-rich heavyweight slag sand and shrinkage compensation of expansive agent, the radiation shielding effect of Ba and Fe elements in barite powder/sand, titanium-rich heavyweight slag sand and steel fiber, and the combining toughening effect of steel fiber and polymer fiber.

Keywords: titanium-rich heavyweight slag sand; ultra-high performance concrete; volume stability; radiation shielding properties; impact resistance

防辐射混凝土作为核工程建设的主体结构材料，既要屏蔽有害射线，又要保障结构安全。因此，要求其必须同时具备优异的防辐射性能和力学性能。然而，当前防辐射混凝土的设计强度普遍不高，

收稿日期：2021–04–26。　修订日期：2021–07–04。
基金项目：国家自然科学基金项目(51878003，52008002，U2006224)；
安徽省高校优秀青年人才支持计划项目(gxyqZD2019055)。
第一作者：张高展(1981—)，男，博士，副教授。
通信作者：丁庆军(1962—)，男，博士，教授。

Received date: 2021–04–26.　**Revised date:** 2021–07–04.
First author: ZHANG Gaozhan (1981–), male, Ph. D, Associate Professor.
E-mail: gaozhanzhang@126.com
Correspondent author: DING Qingjun (1962–), male, Ph. D, Professor.
E-mail: dingqj@whut.edu.cn

强度等级一般不超过 C60[1–6]，难以抵抗爆炸冲击荷载或重大地质灾害引发的高强度动载，为核设施的结构安全留有隐患。超高性能混凝土(UHPC)具有高密实度、超高强度、超高耐久性和高抗冲击性的特点，是核工程建设的理想结构材料。但是，由于 UHPC 中一般不含重集料，其射线屏蔽能力不佳，必须通过增加 UHPC 结构厚度提升其防辐射性能[7]，进而导致工程建设成本增加和结构有效使用空间减小。此外，由于 UHPC 胶凝材料用量过高且水胶比过低，其早期收缩较大(可达 800×10^{-6} 以上)，必须采用蒸养措施改善其体积稳定性和抗裂性能[8]，进而限制其在现浇混凝土工程中的应用，不能充分发挥混凝土施工便捷的优点。因此，降低 UHPC 的早期收缩开裂和增强其射线屏蔽能力，制备低收缩防辐射 UHPC，是解决当前混凝土力学强度、抗冲击性能和防辐射性能难以兼顾的关键。

目前，张高展等[9]、Justs 等[10]、黄政宇等[11]和 Liu 等[12]通过在 UHPC 中掺加内养护材料、减缩剂、膨胀剂等手段解决了 UHPC 早期收缩开裂的难题，但关于如何提升 UHPC 防辐射性能方面的研究较少。将普通防辐射混凝土的射线屏蔽措施直接应用于 UHPC 也存在一定问题，如：常用防辐射集料重晶石砂，质地较脆、易粉化，难以用来制备超高强防辐射混凝土[13–14]；铅纤维强度低，取代钢纤维会降低超高强防辐射混凝土的力学性能[15]。

针对上述问题，综合考虑 UHPC 力学性能(抗压强度不低于 100 MPa)、体积稳定性(收缩率不大于 400×10^{-6})和防辐射性能(辐射屏蔽效率不低于 70%)，在基于 UHPC 设计原理的前提下，利用重晶石粉部分取代胶凝材料提升 UHPC 容重和降低水化热，利用多孔高强高钛重矿渣砂复合重晶石砂提高 UHPC 的体积稳定性和防辐射性能，以此制备低收缩防辐射 UHPC，并研究其工作性能、力学性能、体积稳定性能、抗冲击性能和防辐射性能的主要影响因素，探究其性能形成机理。

1 实验

1.1 原材料

所用粉料为水泥、硅灰、粉煤灰微珠和重晶石粉。水泥为 P·O 52.5，比表面积为 385 m^2/kg，初凝时间 142 min，终凝时间 249 min，28 d 抗压强度 58.2 MPa；硅灰 SiO_2 含量为 95%，比表面积为 19 500 m^2/kg；粉煤灰微珠需水量比 90%，比表面积为 1 200 m^2/kg。上述 3 中原材料的化学组成见表 1。重晶石粉中 $BaSO_4$ 含量大于 95%，粒径为 500 目。集料为高钛重矿渣砂和重晶石砂。高钛重矿渣砂表观密度为 3 100 kg/m^3，饱和吸水率为 8.1%，压碎指标值为 5.3%，细度模数为 3.0，级配区间为 II 区。高钛重矿渣砂是在急冷作用下采用机械抛洒法制备的一种釉化玻璃质多微孔集料。为了充分发挥其内养护效应，预湿时采用真空饱水仪进行饱水。重晶石砂表观密度为 4 300 kg/m^3，饱和吸水率为 1.6%，压碎指标值为 17.5%，细度模数为 2.7，级配区间为 II 区。纤维为镀铜钢纤维和聚合物纤维。镀铜短直(CPS)钢纤维公称长度为 13 mm，直径为 0.25 mm，镀铜超短直(CPUS)钢纤维公称长度为 5 mm，直径为 0.20 mm，弹性模量为 220 GPa；聚丙烯(PP)纤维公称长度为 12 mm，弹性模量为 6.5 GPa；聚乙烯醇(PVA)纤维公称长度为 13 mm，弹性模量为 4.0 GPa。膨胀剂为 HME 型膨胀剂，其主要成分为轻烧 MgO，水中 7 d 限制膨胀率为 0.062%，具有满足安定性的前提下，能够分阶段、全过程补偿混凝土自收缩和温度收缩的特点。试验用减水剂为聚羧酸高效减水剂，减水率 30%。水为自来水。

表 1 原材料的化学组成

Table 1 Chemical composition of raw materials *w*/%

Material	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Loss
Cement	20.87	4.87	3.59	64.47	2.13	2.52	0.65	0.11	0.77
Silica fume	96.00	1.03	0.72	0.51	0.73	0.15	0.21	0.08	2.38
Fly ash microsphere	52.50	32.40	4.01	1.50	0.53	0.33	1.32	0.42	1.22

w is mass fraction.

1.2 方法

1.2.1 拌合物性能和力学性能 分别依据 GB/T50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》和 GB/T50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》的规定测试低收缩防辐射 UHPC 工作性能和物理力学性能；依据 ASTM C1609 法测试和计算低收缩防辐射 UHPC 弯曲韧性指数 I_p，该指数代表 UHPC 极限弯曲强度处的弯曲韧性。

1.2.2 体积稳定性能 采用 GB/T 50082—2009

《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中非接触式法测试低收缩防辐射 UHPC 收缩率。

1.2.3　防辐射性能　　放射源采用单色 ^{137}Cs 放射源(0.662 MeV)，测试仪器采用 HPGe γ 能谱仪。辐射屏蔽效率计算公式如式(1)[16]。

$$\eta_h = \ln 2/\mu$$
$$R_f = (1-e^{-\mu t})\times 100\% \quad (1)$$

式中：μ 为待测样品线性吸收系数；η_h 为待测样品半值层；t 为待测样品厚度(厚度为 10 cm)；R_f 为待测样品辐射屏蔽效率。

1.2.4　抗冲击性能　　采用 Hopkinson 杆法进行测试。试验装置为分离式 Hopkinson 杆，通过调节高压氮气气压控制子弹速度。

1.2.5　微观表征　　采用 JSM 4800f 型扫描电镜表征 UHPC 28 d 龄期时断面形貌。

1.3　UHPC 基准配合比、制备及性能

基于颗粒最紧密堆积原理，同时参考现有的 UHPC 配合比基础数据[9,17]，对防辐射 UHPC 配合比进行设计，基准配合比见表 2。

UHPC 拌合物制备工艺和布料顺序为：1）拌合物制备前通过真空饱水仪对高钛重矿渣砂进行饱和预湿，预湿后放至室内晾至面干备用；2）将预湿高钛重矿渣砂与粉料混合均匀；3）加入 3/4 水和减水剂拌和至浆体具有一定流动度(需掺加重晶石砂时，与该步 3/4 水和减水剂同时加入)；4）撒入纤维，并加入剩余水和减水剂，拌和均匀得 UHPC 拌合物；5）测试 UHPC 拌合物性能；6）依据混凝土不同性能测试标准装模后，移至标准养护室养护至规定龄期进行性能测试。表 2 中基本配合比 UHPC 拌合物性能、力学性能和体积稳定性能测试结果见表 3。

表 2　基准配合比
Table 2　Reference mix ratio

Sample No.	Material dosage/(kg·m^{-3})						*w*(Super-Plasticizer)/%	Water/binder ratio
	Cement	Fly ash microsphere	Silica fume	Expanding agent	Titanium-rich heavy slag sand	Steel fiber		
U0	705	141	141	63	1 200	200	2.5	0.18

表 3　基准配合比 UHPC 性能
Table 3　Performance parameters of UHPC with reference mix ratio

Sample No.	Slump/mm	Slump flow/mm	Apparent density/(kg·m^{-3})	Compressive strength/MPa	Flexural strength/MPa	Shrinkage rate of 56 d
U0	265	635	2 630	139.5	26.9	253×10^{-6}

2　结果与讨论

2.1　低收缩防辐射 UHPC 的性能影响因素

2.1.1　重晶石粉对 UHPC 性能的影响　　以表 2 配合比为基准，分别利用重晶石粉等体积取代 0、10%、20%、30%和 40%的粉煤灰微珠，制备的 UHPC 表观密度分别为 2 630、2 650、2 660、2 670 kg/m^3 和 2 680 kg/m^3。由于重晶石粉在 UHPC 中的质量比仍然较低，其容重虽然随重晶石粉掺量增加而增大，但增幅并不显著。研究了重晶石粉等体积取代粉煤灰微珠对 UHPC 工作性能和力学性能的影响，结果见图 1 和图 2。

1) 工作性能　　图 1 为重晶石粉掺量对 UHPC 拌合物坍落度和扩展度的影响。由图 1 可知，随重晶石粉取代粉煤灰微珠比例增加，UHPC 拌合物坍落度和扩展度均不断降低，但降低幅度不大。所用重晶石粉粒径 500 目，其比表面积明显小于粉煤灰微珠，为致密柱状或板状、粒状集合体，需水量较低。粉煤灰微珠为致密球状集合体，在 UHPC 拌合物中具有显著的“滚珠”效应[9]，降低拌合物黏度和改善工作性能的效果优于重晶石粉。因此，重晶石粉取代粉煤灰微珠会导致 UHPC 工作性能降低，但降低幅度不明显。王敏等[18]研究了重晶石粉掺量对普通硅酸盐水泥标准稠度用水量的影响，发现重晶石粉 30%以下掺量时对水泥标准稠度用水量影响不大，这也说明低掺量重晶石粉不会对水泥浆体的工作性能带来明显的负面影响。

2) 力学性能　　图 2 为重晶石粉掺量对 UHPC 标准养护 28 d 抗压强度和抗弯强度的影响。由图 2 可知，随重晶石粉取代粉煤灰微珠比例增加，UHPC 抗压强度和抗弯强度均不断降低，尤其取代量超过 20%后，二者降低幅度更加明显。粉煤灰微珠除在 UHPC 拌合物中呈现良好的“滚珠”效应外，还具有优异的“火山灰”活性，尤其在水化后期火山灰效应更为显著。重晶石粉主要成分为 $BaSO_4$，无活性，在 UHPC 中仅能充当填料，不具备水硬性[18]。

因此，随重晶石粉取代粉煤灰微珠量的增加，低收缩防辐射 UHPC 力学性能降低。然而，一般 UHPC 的水胶比低、胶凝材料用量大，胶凝材料总体水化程度不高，很多胶凝材料在其中主要发挥填料作用[19–20]。重晶石粉表观密度大且不参与水化反应，用以部分取代 UHPC 中的胶凝材料，不仅可增加 UHPC 容重，充分发挥其填料作用，而且可降低 UHPC 水化热，减少 UHPC 早期开裂风险。Emna 等[21]研究了重晶石粉替代胶凝材料对混凝土水化进程和力学性能的影响，发现随重晶石粉掺量增多，混凝土水化热降低、水化周期延长和抗压强度降低，认为重晶石粉的使用明显降低了混凝土胶凝浆体的水化速度，高密度的重晶石粉对胶凝浆体水化的影响从胶凝颗粒的溶解开始，直至凝结、硬化的全过程。抗压强度的降低是由于重晶石粉替代胶凝材料后，胶凝浆体中 CaO 和 SiO_2 总含量降低导致的。

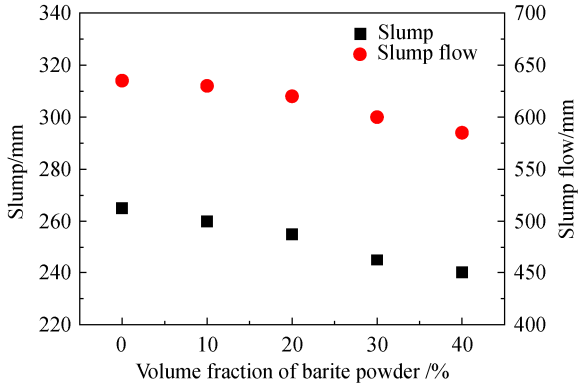


图 1 重晶石粉掺量对 UHPC 拌合物工作性能的影响

Fig. 1 Effect of volume fraction of barite power on the workability of UHPC mixture

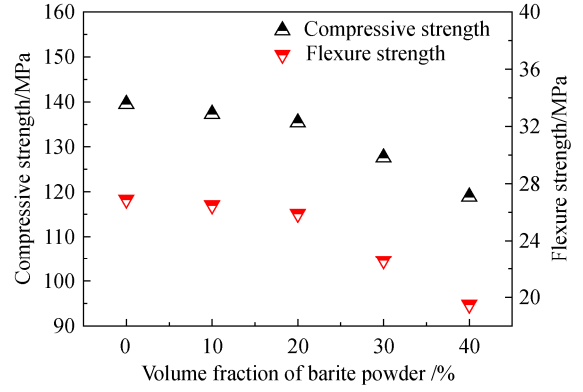


图 2 重晶石粉掺量对 UHPC 力学性能的影响

Fig. 2 Effect of volume fraction of barite power on mechanical properties of UHPC

2.1.2 重晶石砂对 UHPC 性能的影响 以表 2 配合比为基准，在利用重晶石粉等体积取代 20%粉煤灰微珠的基础上，分别利用重晶石砂等体积取代 0、30%、50%、70%和 100%的高钛重矿渣砂，制备的 UHPC 表观密度分别为 2 660、2 800、2 890、2 990 kg/m^3 和 3 130 kg/m^3，其容重随重晶石砂取代高钛重矿渣砂比例提高而增大明显。研究了重晶石砂等体积取代高钛重矿渣砂对 UHPC 工作性能、力学性能、体积稳定性能、防辐射性能和抗冲击性能的影响，结果分别见图 3～图 6。

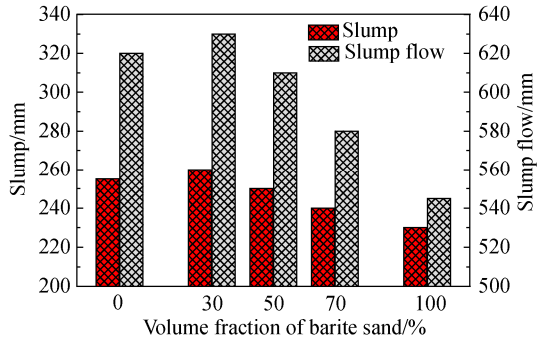
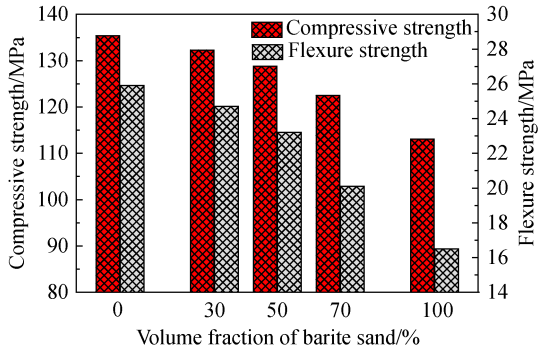
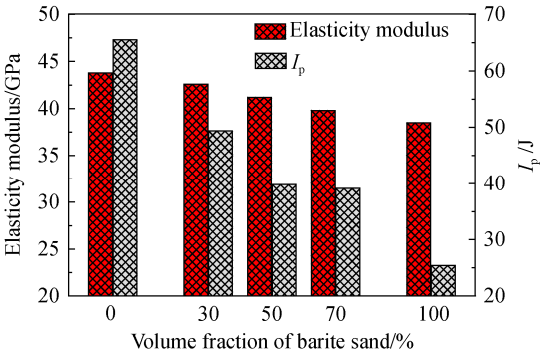


图 3 重晶石砂掺量对 UHPC 拌合物工作性能的影响

Fig. 3 Effect of volume fraction of barite sand on the workability of UHPC mixture



(a) Compressive strength and flexure strength



(b) Elasticity modulus and I_p (index of flexural toughness)

图 4 重晶石砂掺量对 UHPC 力学性能的影响

Fig. 4 Effect of volume fraction of barite sand on mechanical properties of UHPC

1) 工作性能 图 3 为重晶石砂掺量对 UHPC 拌合物坍落度和扩展度的影响。由图 3 可知，随重

晶石砂取代高钛重矿渣砂比例增加，UHPC 拌合物坍落度和扩展度均呈现先增加后降低的趋势，在重晶石砂取代高钛重矿渣砂体积率为 30%时工作性能相对最佳。重晶石砂脆性大、易破碎，在搅拌过程中易部分破碎形成重晶石粉颗粒。当重晶石砂掺量较少时，形成的少量重晶石颗粒可发挥填充作用，改善工作性能。当重晶石砂取代高钛重矿渣砂比例进一步增加时，由于重晶石砂自身容重远大于 UHPC 其他组分，易在搅拌过程中发生沉降，进而导致拌合物匀质性变差，工作性能降低。

2) 力学性能　　图 4 为重晶石砂掺量对 UHPC 抗压强度、抗弯强度、弹性模量和弯曲韧性的影响。由图 4 可知，随重晶石砂取代高钛重矿渣砂比例增加，UHPC 标准养护 28 d 的抗压强度、抗弯强度、弹性模量和韧性指(I_p)数均降低。重晶石砂相对高钛重矿渣砂而言，强度低且易碎，随其掺量增加对 UHPC 力学性能更加不利。但当重晶石砂取代率为 50%时，UHPC 抗压强度、抗弯强度、弹性模量和韧性指数分别为 128.8 MPa、23.2 MPa、41.2 GPa 和 39.8 J，依然可满足 UHPC 的性能要求。Akkurt 等[22]、Yüksel 等[23]和 Akkurt 等[24]研究了重晶石集料掺量对混凝土力学性能的影响，认为由于重晶石集料对磨损比普通集料更敏感，随重晶石集料掺量增加，混凝土力学性能明显降低。Binici 等[25]和 Gonzalez 等 [26]认为，采用重晶石集料替代普通集料导致的抗压和抗拉强度等力学显著降低是由于集料地质特性的改变和重晶石脆性大两方面导致的。

3) 体积稳定性能　　图 5 为重晶石砂掺量对 UHPC 收缩率的影响。由图 5 可知，随重晶石砂取代高钛重矿渣砂比例增加，低收缩防辐射 UHPC 的 56 d 收缩率增大明显。当取代率为 50%时，UHPC 收缩率为 359×10^{-6}，体积稳定性尚且良好，而当取代率为 100%时，UHPC 收缩率达到了 722×10^{-6}，收缩开裂风险加剧。现有研究认为，混凝土在相同条件下的收缩取决于其集料的性质[27]。试验用高钛重矿渣砂饱和吸水率可达 8.1%，在 UHPC 内具有“缓释水”效应，可对混凝土起到“内养护”作用[28]。重晶石砂取代率增加时，高钛重矿渣砂的内养护作用降低，UHPC 收缩率增大。Khaled 等[29]研究了重晶石粉取代砂对混凝土收缩的影响，其试验结果表明重晶石取代砂可降低混凝土总收缩，认为重晶石粉与胶凝材料细度相近，二者可形成均匀的混合物，重晶石粉在这种情况下可降低混凝土的干燥收缩。

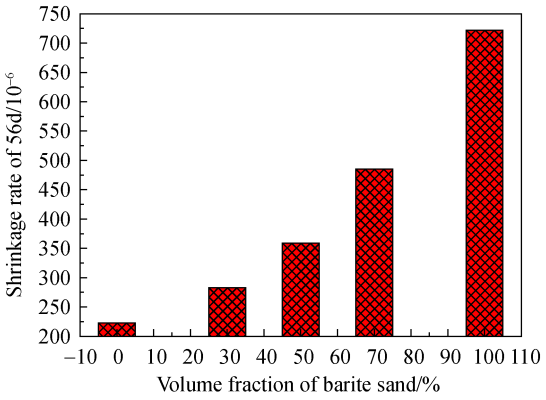
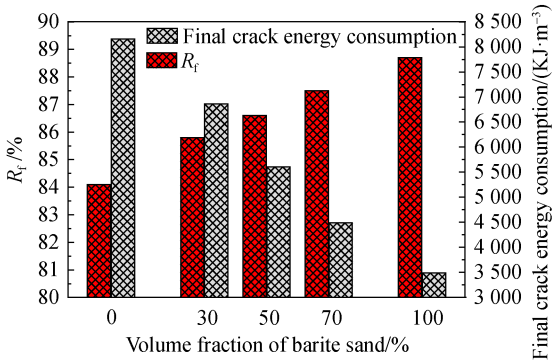


图 5　重晶石砂掺量对 UHPC 体积稳定性的影响

Fig. 5　Effect of volume fraction of barite sand on volume stability of UHPC

4) 防辐射性能和抗冲击性能　　图 6 为重晶石砂掺量对 UHPC 防辐射性能和抗冲击性能的影响。由图 6 可知，随重晶石砂取代高钛重矿渣砂比例增加，UHPC 的辐射屏蔽效率增大，而终裂总能耗降低，说明重晶石砂掺量增加可提升 UHPC 的防辐射性能，但也导致 UHPC 的抗冲击性能下降。重晶石砂富含重金属元素 Ba，其内核质量大，可吸收射线能量，阻挡射线传播，提升 UHPC 的防辐射性能，但重晶石砂强度低、易破碎，进而显著降低 UHPC 的抗冲击性能。文献[16]中普通防辐射混凝土的辐射屏蔽效率为 68.7%，远低于本实验所制备的 UHPC 的辐射屏蔽效率。Akkurt 等[30]比较了多组普通集料混凝土与重晶石集料混凝土的辐射屏蔽性能，发现重晶石集料混凝土的线性吸收系数 μ 明显高于普通集料混凝土，认为重晶石集料是制备辐射屏蔽混凝土的重要原料。文献[31]中抗压强度为 150 MPa 的 UHPC 动态冲击终裂总能耗为 2 230 kJ/m^3，也远低于本实验所制备的 UHPC 的终裂总能耗。



R_f is radiation protection efficiency of the studied materials.

图 6　重晶石砂掺量对 UHPC 防辐射性能 R_f 和抗冲击性能的影响

Fig. 6　Effect of volume fraction of barite sand on radiation shielding properties R_f and impact resistance of UHPC

2.1.3 纤维对 UHPC 性能的影响 以表 2 配合比为基准，在利用重晶石粉等体积取代 20%粉煤灰微珠和重晶石砂等体积取代 50%高钛重矿渣砂的基础上，分别利用镀铜超短直(CPUS)钢纤维、聚丙烯(PP)纤维和聚乙烯醇(PVA)纤维等体积取代 1%的镀铜短直(CPS)钢纤维制备低收缩防辐射 UHPC，其配合比和具体性能见表 4 和表 5。

由表 5 可知，当低收缩防辐射 UHPC 中的镀铜短直(CPS)钢纤维被镀铜超短直(CPUS)钢纤维等体积取代时，拌合物工作性能略有提升，而表观密度、抗压强度、抗弯强度和辐射屏蔽效率变化不大，但弯曲韧性指数和动态冲击终裂总能耗降低明显，说明增加钢纤维长度有利于提升 UHPC 的弯曲韧性和抗冲击性能。当镀铜短直(CPS)钢纤维被聚丙烯(PP)纤维和聚乙烯醇(PVA)纤维分别等体积取代时，工作性能、表观密度、抗压强度、抗弯强度和辐射屏蔽系数均略有降低，但弯曲韧性指数和动态冲击终裂总能耗均显著提升，说明聚合物纤维取代钢纤维可有效提升 UHPC 的弯曲韧性和抗冲击性能。史才军等[32]认为 UHPC 的抗压强度、抗拉强度、弯曲韧性、抗冲性能等力学性能受纤维掺量、种类和形状的影响显著，且纤维混掺是发挥纤维特性的最有效方法，混杂纤维 UHPC 的力学性能一般优于单一纤维 UHPC。Kim 等[33]研究了不同长度纤维混杂对 UHPC 弯曲性能的影响，发现保持长纤维掺量不变而增加短纤维掺量可显著提高弯曲韧性，这是因为短纤维掺量提高增大了 UHPC 单位体积内桥接裂缝的短纤维数量。Tai 等[34]研究了不同钢纤维掺量 UHPC 的抗冲击性能，发现素 UHPC 呈脆性，掺入 2%～5%钢纤维后劈裂抗拉强度相对普通混凝土提升 10～15 倍，可抵抗高速冲击产生的拉伸波，从而提升其抗冲击性能。黄政宇等[35]采用 Hopkinson 杆法研究了不同类型纤维对 RPC 抗冲击性能的影响，发现钢纤维的增韧效果明显优于聚丙烯纤维，这是因为钢纤维在阻滞 RPC 裂缝扩展的过程中能大量吸收冲击荷载，从而提升 RPC 的抗冲击性能。

表 4 不同种类纤维低收缩防辐射 UHPC 配合比

Table 4 Mixture ratio of low-shrinkage and radiation-shielding UHPC with different types of fibers

Sample No.	Material dosage/(kg·m^{-3})											w(Super-Plasticizer)/%	Water/binder ratio
	Cement	Silica fume	Fly ash microsphere	Barite powder	Expanding agent	Titanium-rich heavy slag sand	Barite sand	CPS	CPUS	PP	PVA		
UX0	705	141	113	52	63	600	832	200	0	0	0	2.5	0.18
UX1	705	141	113	52	63	600	832	120	80	0	0	2.5	0.18
UX2	705	141	113	52	63	600	832	120	0	9.3	0	2.5	0.18
UX3	705	141	113	52	63	600	832	120	0	0	11	2.5	0.18

CPS: Copper plated short straight steel fiber. CUPS: Copper plated supper short straight steel fiber. PP: Polypropylene fiber. PVA: Polyvinyl alcohol fiber.

表 5 不同类型纤维低收缩防辐射 UHPC 的性能

Table 5 Performance parameters of low-shrinkage and radiation-shielding UHPC with different types of fibers

Sample No.	Slump /mm	Slump flow /mm	Apparent density /(kg·m^{-3})	Compressive strength/MPa	Flexural strength /MPa	I_5/J	R_5/%	Final crack energy consumption/(kJ·m^{-3})
UX0	250	610	2 890	128.8	23.2	39.80	86.6	5 607
UX1	265	625	2 890	123.6	21.1	27.96	86.2	3 972
UX2	235	585	2 840	121.9	20.4	53.75	85.6	5 699
UX3	230	580	2 840	122.5	20.6	84.15	85.5	5 991

2.2 低收缩防辐射 UHPC 的性能形成机理

基于上述研究，利用硅酸盐水泥、硅灰、粉煤灰微珠、重晶石粉、高钛重矿渣砂、重晶石砂和钢纤维复合聚合物纤维等原料制备的 UHPC 具有优异工作性能、力学性能、体积稳定性、防辐射性能和抗冲击性能。粉煤灰微珠的“滚珠”效应可降低 UHPC 拌合物黏度，赋予其优异的工作性能。其他主要性能的形成机理分析如下：

2.2.1 力学性能和体积稳定性能 试验采用的高胶凝材料用量和低水胶比设计原理首先可保证低收缩防辐射 UHPC 具有优异的力学性能。此外，高钛重矿渣砂多孔高强，饱和吸水率为 8.1%，压碎值为 5.3%，可在低收缩防辐射 UHPC 中呈现良好的界面增强和内养护作用。图 7 为低收缩防辐射 UHPC 断面中高钛重矿渣砂–水泥石界面过渡区形貌结构。

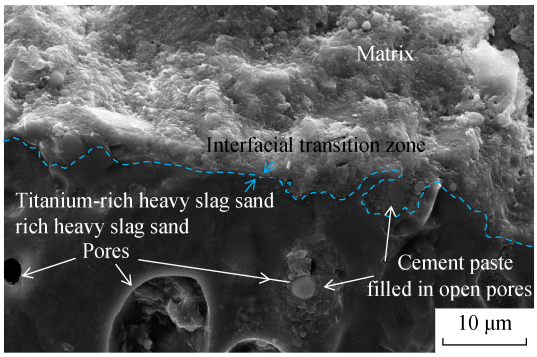


图 7　低收缩防辐射 UHPC 界面过渡区 SEM 照片

Fig. 7　SEM image of interfacial transition zone of low-shrinkage and radiation-shielding UHPC

由图 7 可以看出，高钛重矿渣砂与水泥石相结合紧密，界面过渡区结构密实，无明显晶体富集和微裂纹。文献[36–39]表明，具有高吸水率的集料可在混凝土中充分发挥内养护作用，在混凝土凝结硬化过程中释水，提升集料–水泥石界面过渡区的水化程度，改善界面过渡区的结构和性能，尤其在低水胶比的高强混凝土中效果更为显著。此外，高钛重矿渣砂表面多孔且凸凹不平，胶凝浆体包裹集料并填塞开口孔，水化后形成水泥石镶嵌入集料，形成牢固的“销钉结构”，机械连锁集料和水泥石，有效提升集料相和水泥石相的连接度[28]。基于以上分析，预湿高钛重矿渣砂在低收缩防辐射 UHPC 中具有显著的界面增强作用，可在高胶凝材料用量和低水胶比设计原理保障 UHPC 力学性能的基础上，进一步改善其力学性能。

图 8 为不同高钛重矿渣砂掺量低收缩防辐射 UHPC 收缩率曲线。由图 8 可知：低收缩防辐射 UHPC 早龄期收缩大，后期收缩率增长缓慢，56 d 龄期后基本趋于稳定。随高钛重矿渣砂占集料总比例由 0 增加至 100%，UHPC 收缩率明显降低，180 d 收缩率由 765×10^{-6} 降至 245×10^{-6}；当高钛重矿渣砂所占集料比例为 50%时，180 d 收缩率也仅为 385×10^{-6}。预湿高钛重矿渣砂储水性好，在低收缩防辐射 UHPC 中可充分发挥内养护作用。在水化阶段，高钛重矿渣砂受渗透压和湿度差的耦合作用持续缓慢释水，可有效减缓 UHPC 内部湿度的降低，进而改善 UHPC 自收缩和干燥收缩。低收缩防辐射 UHPC 中还掺加有膨胀剂，高钛重矿渣砂在水化阶段的释水作用可有效补偿膨胀剂反应所需水分，提高膨胀效率，降低 UHPC 自收缩。丁庆军等[40]在制备橡胶颗粒抗冲磨 UHPC 时，研究了高钛重矿渣砂(表观密度 2 970 kg/m^3，饱和吸水率 10%)内养护和 CaO 型膨胀剂补偿收缩协同提升 UHPC 体积稳定性的作用，发现同时掺加 15%饱水高钛重矿渣砂和 6%CaO 型膨胀剂的橡胶颗粒 UHPC 56 d 收缩率仅为 393×10^{-6}，相对普通 UHPC 收缩率降低超过了 50%，这是因为饱水高钛重矿渣砂在 UHPC 硬化过程中的持续释水促进了 CaO 型膨胀剂水化生成更多的膨胀产物。

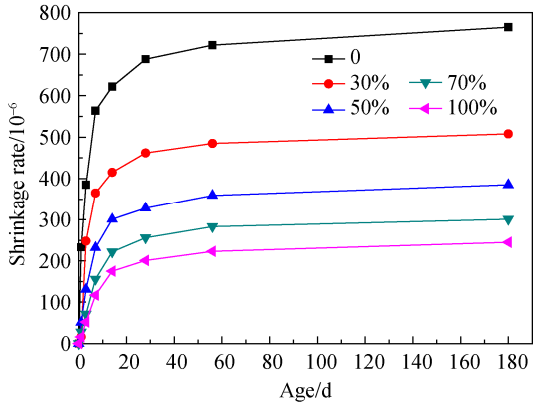


图 8　高钛重矿渣砂掺量对低收缩防辐射 UHPC 体积稳定性的影响

Fig. 8　Effect of volume fraction of titanium-rich heavyweight slag sand on volume stability of low-shrinkage and radiation-shielding UHPC

2.2.2　防辐射性能　　表 6 为不同低收缩防辐射 UHPC 的配合比，其辐射屏蔽参数见表 7。由表 7 可知，不同配比低收缩防辐射 UHPC 的辐射屏蔽参数均显著优于文献[16]中的普通防辐射混凝

表 6　低收缩防辐射 UHPC 配合比

Table 6　Mixture ratio of low-shrinkage and radiation-shielding UHPC

Sample No.	Material dosage/(kg·m^{-3})							Volume fraction φ/%		w(Super-plasticizer)/%	Water/binder ratio
	Cement	Silica fume	Fly ash microsphere	Barite powder	Expanding agent	Titanium-rich heavy slag sand	Barite sand	CPS	PP		
U0	705	141	141	0	63	1 200	0	2.5		2.5	0.18
UF0	705	141	113	52	63	1 200	0	2.5		2.5	0.18
UX0	705	141	113	52	63	600	832	2.5		2.5	0.18
UF1	705	141	113	52	63	0	1 665	2.5		2.5	0.18
UX2	705	141	113	52	63	600	832	1.5	1	2.5	0.18

土。其中，基准组 U0 相比其他各组 UHPC 防辐射性能最差，但其辐射屏蔽效率 R_f 相比于普通防辐射混凝土仍提升了 22%，说明未掺加重晶石粉和重晶石砂时 UHPC 的防辐射性能依然优异，其原因为：基准组 U0 的密实设计原理使其结构密实、表观密度大；高钛重矿渣砂集料虽然孔隙率较高，但其表观密度大且富含 Ti、Fe 等元素，辐射屏蔽性能良好；U0 组中掺加有大量钢纤维，也有效提升了其射线屏蔽能力。

表 7 低收缩防辐射 UHPC 及普通防辐射混凝土的辐射屏蔽参数

Table 7 Radiation shielding parameters of low-shrinkage and radiation-shielding UHPC and general radiation-shielding concrete

Sample No.	μ/cm^{-1}	η_h/cm	R_f/%
U0	0.182	3.808	83.8
UF0	0.184	3.766	84.1
UX0	0.201	3.448	86.6
UF1	0.218	3.179	88.7
UX2	0.194	3.572	85.6
General radiation-shielding[15]	0.116	5.974	68.7

η_h is radiation-shielding efficiency of half layer.

相比于基准组 U0，仅利用重晶石粉等体积取代 20%粉煤灰微珠的 UF0 组线性吸收系数 μ 和辐射屏蔽效率 R_f 仅略有增大，半值层 η_h 略有降低，说明利用重晶石粉部分取代粉煤灰微珠可提升 UHPC 防辐射性能，但效果不佳。随重晶石砂等体积取代高钛重矿渣砂比例提高，UHPC 的线性吸收系数 μ 和辐射屏蔽效率 R_f 提高，半值层 η_h 降低，说明重晶石砂的射线屏蔽效果优于等体积的高钛重矿渣砂，这是因为重晶石砂的表观密度远高于高钛重矿渣砂，而物质密度越大，发生光电效应的概率越高，防辐射能力越强[41]，且其富含的重金属 Ba 元素相对原子质量远大于 Ti、Fe 元素。当利用聚丙烯纤维等体积取代 1%钢纤维后，UHPC 的线性吸收系数 μ 和辐射屏蔽效率 R_f 降低，半值层 η_h 增大。虽然同体积掺量下，聚合物纤维相对钢纤维使得混凝土更加密实，但聚合物纤维中不具备钢纤维中的 Fe 元素，导致 UHPC 防辐射性能降低。综述分析，低收缩防辐射 UHPC 的屏蔽辐射性能主要源于 UHPC 的密实设计原理，以及高钛重矿渣砂、重晶石砂和钢纤维中富含的辐射屏蔽元素。

2.2.3 抗冲击性能 图 9 为低收缩防辐射 UHPC 在相同氮气气压下的动态冲击破坏状态。图 10 为其动态冲击应力–应变曲线。表 8 为低收缩防辐射 UHPC、C50 普通混凝土和普通 UHPC 动态冲击韧性参数。

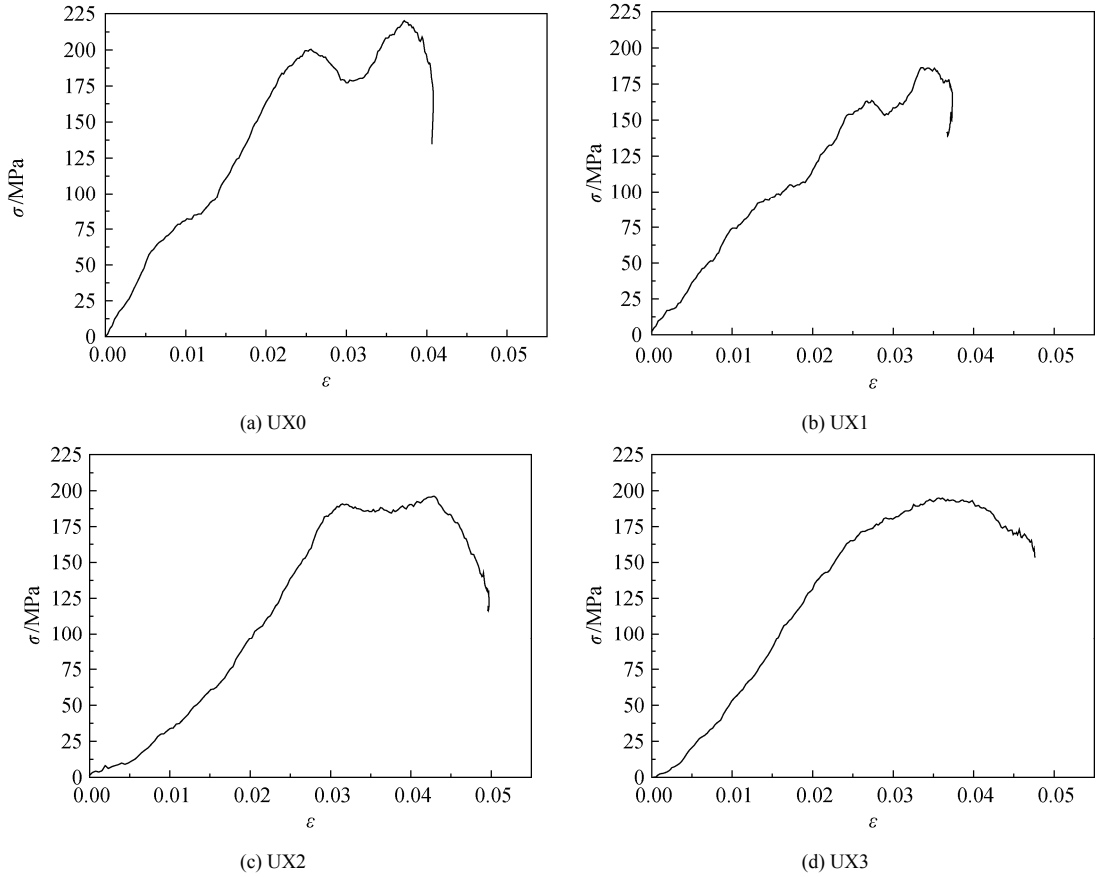
由图 9 可看出，低收缩防辐射 UHPC 在遭受动态冲击破坏时均呈现出“裂而不散”的状态，表现出优异的抗冲击性能。低收缩防辐射 UHPC 的这种破坏状态既吸收了冲击荷载，又防止产生冲击碎片，可对人员和设备产生有效防护。由表 8 可知，不同配比低收缩防辐射 UHPC 的冲击破坏总能耗均远高于文献[42]中普通混凝土和文献[31]中普通 UHPC。混凝土在高速动态冲击作用下的破坏形式不同于静载作用，由沿界面过渡区破坏转变为贯穿集料破坏。因此，在冲击荷载达到峰值应力前，混凝土中的骨料和界面过渡区为影响冲击破坏的主要因素；而冲击荷载达到峰值应力后，混凝土中的增强增韧纤维为影响冲击破坏的主要因素。由前文分析可知，低收缩防辐射 UHPC 中的高钛重矿渣砂集料即可增强界面过渡区，又易形成“销钉结构”，增强集料和水泥石的连接，均可有效抵抗冲击荷载破坏。而高钛重矿渣砂自身高强多孔，亦能吸收冲击破坏能量，提升 UHPC 的抗冲击性能。此外，低收缩防辐射 UHPC 中的钢纤维具有较高弹性模量，可有效吸收冲击能量[35]，亦可在冲击荷载达到峰值应力后链接水泥石基体，防止其发生飞散破坏。当有聚合物纤维掺加时，虽然其弹性模量明显低于钢纤维，但相同体积掺量下，聚合物纤维数量更多、分布密度更大、延性更好，可在 UHPC 初裂后更好的桥接微细裂缝和阻碍裂缝扩展，表现出更为优异的抗冲击性能。



(a) UX0 (b) UX1 (c) UX2 (d) UX3

图 9 低收缩防辐射 UHPC 动态冲击破坏形态

Fig. 9 Failure mode of low-shrinkage and radiation-shielding UHPC with dynamic impact



(a) UX0　(b) UX1

(c) UX2　(d) UX3

图 10　低收缩防辐射 UHPC 动态应力–应变曲线

Fig. 10　Dynamic stress σ-strain ε curves of low-shrinkage and radiation-shielding UHPC

表 8　低收缩防辐射 UHPC、C50 普通混凝土和普通 UHPC 的动态冲击韧性参数

Table 8　Dynamic impact toughness parameters of low-shrinkage and radiation-shielding UHPC, general concrete and general UHPC

Sample No.	Peak strain	Peak stress/MPa	Pre-peak areak	Post-peak area	Total area	Final crack energy consumption/(kJ·m^{-3})
UX0	0.037	218.15	4.904	0.703	5.607	5 607
UX1	0.033	186.32	3.379	0.593	3.972	3 972
UX2	0.043	196.10	4.487	1.212	5.699	5 699
UX3	0.036	194.84	4.363	1.628	5.991	5 991
C50[39,42]						1 132
150 MPa UHPC[28]						2 230

3　结论

1) 基于 UHPC 设计原理，通过引入粉煤灰微珠、重晶石粉、高钛重矿渣砂、重晶石砂和钢纤维等可制备出性能优异的低收缩防辐射 UHPC，并综合考虑其经济性和施工性，确定其最佳配合比为：硅酸盐水泥 705 kg/m^3、硅灰 141 kg/m^3、粉煤灰微珠 113 kg/m^3、重晶石粉 52 kg/m^3、膨胀剂 63 kg/m^3、重晶石砂 600 kg/m^3、高钛重矿渣砂 832 kg/m^3、钢纤维 200 kg/m^3，水胶比 0.18，减水剂掺量 2.5%。其对应性能为：坍落/扩展度 250/610 mm、28 d 抗压/抗折强度 128.8/23.3 MPa、180 d 收缩率 385×10^{-6}、弯曲韧性指数 39.8 J、辐射屏蔽效率 86.6%、动态冲击终裂总能耗 5 607 kJ/m^3。

2) 利用重晶石粉取代粉煤灰微珠会导致 UHPC 工作和力学性能降低；随重晶石砂取代高钛重矿渣砂的比例增大，UHPC 的工作性能、力学性能、体积稳定性能和抗冲击性能均降低明显，但 UHPC 的防辐射性能显著提升，重晶石砂等体积取代高钛矿渣砂砂的比例不宜超过 50%；在低收缩防辐射 UHPC 中掺入部分聚合物纤维可提升其弯曲韧性和抗冲击性能。

3) 低收缩防辐射 UHPC 的优异工作性能主要源于粉煤灰微珠的“滚珠”效应；力学性能主要源于 UHPC 的高胶凝材料用量和低水胶比设计原理，以及高钛重矿渣砂的界面增强和“销钉结构”作用；体积稳定性主要源于高钛重矿渣砂内养护和膨胀剂膨胀的交互叠加作用；防辐射性能主要源于 UHPC 的密实设计原理，以及高钛重矿渣砂、重晶石砂和钢纤维中富含的辐射屏蔽元素；抗冲击性能主要源于高钛重矿渣砂自身的高强多孔、界面增强和“销钉结构”作用，以及钢纤维和聚合物纤维的复合增韧作用。

参考文献:

[1] 潘智生, 赵晖, 寇世聪. 防辐射混凝土研究现状、存在问题及发展趋势[J]. 武汉理工大学学报, 2011(1): 51–57.
PAN Zhisheng, ZHAO Hui, KOU Shicong. J Wuhan Univ Technol(in Chinese), 2011(1): 51–57.

[2] 邹秋林, 李军, 卢忠远, 等. 防辐射混凝土高性能化研究进展[J]. 混凝土, 2012(1): 6–9.
ZHOU Qiulin, LI Jun, LU Zhongyuan, et al. Concrete(in Chinese), 2012(1): 6–9.

[3] 丁庆军, 张立华, 胡曙光, 等. 防辐射混凝土及核固化材料研究现状与发展[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(2): 16–19.
DING Qingjun, ZHANG Lihua, HU Shuguang, et al. J Wuhan Univ Technol(in Chinese), 2002, 24(2): 16–19.

[4] MOSTOFINEJAD D, REISI M, SHIRANI A. Mix design effective parameters on γ-ray attenuation coefficient and strength of normal and heavyweight concrete[J]. Constr Build Mater, 2012, 28(1): 224–229.

[5] SAIDANI K, AIAM L, QUEZDOU M B. Barite powder as sand substitution in concrete: Effect on some mechanical properties[J]. Constr Build Mater, 2015, 95: 287–295.

[6] TOPCU İ B. Properties of heavyweight concrete produced with barite[J]. Cem Concr Res, 2003, 33(6): 815–822.

[7] 何林, 蔡永军, 李强. 中子和伽马射线综合屏蔽材料研究进展[J]. 材料导报, 2018(7): 1107–1113.
HE Lin, CAI Yongjun, LI Qiang. Mater Rev(in Chinese), 2018(7): 1107–1113.

[8] YAZICI H, YARDIMCI M Y, AYDIN S, et al. Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes[J]. Constr Build Mater, 2009, 23(3):1223–1231.

[9] 张高展, 葛竞成, 丁庆军, 等. 轻质超高性能混凝土的制备及性能形成机理[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(2): 381–390.
ZHANG Gaozhan, GE Jingcheng, DING Qingjun, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(2): 381–390.

[10] JUSTS J, WYRZYKOWSKI M, BAJARE D, et al. Internal curing by superabsorbent polymers in ultra–high performance concrete[J]. Cem Concr Res, 2015, 76: 82–90.

[11] 黄政宇, 王嘉. 高吸水性树脂对超高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(3): 539–544.
HUANG Zhengyu, WANG Jia. Bull Chin Ceram Soc(in Chinese), 2012, 31(3): 539–544.

[12] LIU J, SHI C, MA X, et al. An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement-based materials[J]. Constr Build Mater, 2017, 146: 702–712.

[13] GONZALEZ-ORTEGA M A, CAVALARO S, AGUADO A. Influence of barite aggregate friability on mixing process and mechanical properties of concrete[J]. Constr Build Mater, 2015, 74: 169–175.

[14] AKKURT I, EL-KHAYATT A M. The effect of barite proportion on neutron and gamma-ray shielding[J]. Annals Nuclear Energy, 2013, 51: 5–9.

[15] SHARMA A, REDDY G R, VARSHNEY L, et al. Experimental investigations on mechanical and radiation shielding properties of hybrid lead-steel fiber reinforced concrete[J]. Nucl Eng Design, 2009, 239(7): 1180–1185.

[16] MAHMOUD K A, TASHLYKOV O L, WAKIL A E, et al. Aggregates grain size and press rate dependence of the shielding parameters for some concretes[J]. Prog Nucl Energy, 2020, 118: 1–6.

[17] 张高展, 王宇谨, 葛竞成, 等. 轻集料对超高性能混凝土工作和力学性能的影响机理[J].建筑材料学报, 2021, 24(3): 499–507.
ZHANG Gaozhan, WANG Yuxuan, GE Jingcheng, et al. J Build Mater (in Chinese), 2021, 24(3): 499–507.

[18] 王 敏, 汪智勇, 隋同波. 重晶石粉掺合料对普通硅酸盐水泥性能的影响[J]. 水泥, 2008(5): 9–11.
WANG Min, WANG Zhiyong, SUI Tongbo. Cement (in Chinese), 2008(5): 9–11.

[19] 张高展, 魏琦, 丁庆军, 等. 超高性能混凝土配合比设计模型、水化硬化机理及微观结构的研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2020, 285(1):10–14+19.
ZHANG Gaozhan, WEI Qi, DING Qingjun, et al. Chin Concr Cem Prod (in Chinese), 2020, 285(1): 10–14+19.

[20] SHI C, WU Z, XIAO J, et al. A review on ultra high performance concrete: part I. raw materials and mixture design[J]. Constr Build Mater, 2015, 101: 741–751.

[21] EMNA B, ABDELHAK A, EL-HADJ K, et al. Rheological and mechanical properties of heavy density concrete including barite powder[J]. Arab J Sci Eng, 2020, 45: 3999–4011.

[22] KILINCARSLAN S, AKKURT I, BASYIGIT C. The effect of barite rate on some physical and mechanical properties of concrete[J]. Mater Sci Eng A, 2006, 424 (1–2): 83–86.

[23] YÜKSEL E, BERIVAN Y. Investigation of some physical and mechanical properties of concrete produced with barite aggregate[J]. Sci Res Essays, 2010, 5: 3826–3833.

[24] AKKURT I, ALTINDAG R, BASYIGIT C, et al. The effect of barite rate on the physical and mechanical properties of concretes under F–T cycle[J]. Mater Des, 2008, 29: 1793–1795.

[25] BINICI H, AKSOGAN O, SEVINC A H, et al. Mechanical and radioactivity shielding performances of mortars made with colemanite, barite, ground basaltic pumice and ground blast furnace slag[J]. Constr Build Mater, 2014, 50: 177–183.

[26] GONZÁLEZ-ORTEGA M A, CAVALARO S H P, AGUADO A. Influence of barite aggregate friability on mixing process and mechanical properties of concrete[J]. Constr Build Mater, 2015, 74: 169–175.

[27] NEVILLE A M. Properties of Concrete[M]. Sth Ed., ELBS, 2011.

[28] 丁庆军, 刘小清, 管理, 等. 高钛重矿渣砂对混凝土自收缩与徐变影响及其机理研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(1): 29–33.
DING Qingjun, LIU Xiaoqing, GUAN Li, et al. J Wuhan Univ Technol(in Chinese), 2014, 36(1): 29–33.

[29] KHALED S, LASAAD A, MONGI B O. Barite powder as sand substitution in concrete: Effect on some mechanical properties[J]. Constr Build Mater, 2015, 95: 287–295.

[30] AKKURT I, BASYIGIT C, KILINCARSLAN S, et al. The shielding of γ-rays by concretes produced with barite[J]. Prog Nuclear Energy, 2005, 46(1): 1–11.

[31] 张文华, 张云升. 超高性能水泥基复合材料动态冲击性能及数值模拟[J]. 混凝土, 2015(10): 60–63.
ZHANG Wenhuan, ZHANG Yunsheng. Concrete(in Chinese), 2015(10): 60–63.

[32] 史才军, 何稳, 吴泽媚, 等. 纤维对UHPC力学性能的影响研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2015(8): 2227–2236.
SHI Caijun, HE Wei, WU Zemei, et al. Bull Chin Ceram Soc(in Chinese), 2015(8): 2227–2236.

[33] KIM D J, PARK S H, RYU G S, et al. Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers[J]. Constr Build Mater, 2011, 25(11): 4144–4155.

[34] TAI Y S. Flat ended projectile penetrating ultra-high strength concrete plate target[J]. Theoret Appl Fracture Mech, 2009, 51(2): 117–128

[35] 黄政宇, 王艳, 肖岩, 等. 应用SHPB试验对活性粉末混凝土动力性能的研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2006, 28(2): 113–117.
HUANG Zhengyu, WANG Yan, XIAO Yan, et al. Nat Sci J Xiangtan Univ(in Chinese), 2006, 28(2): 113–117.

[36] 韩宇栋, 张君, 王振波. 预吸水轻骨料对高强混凝土早期收缩的影响[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(8): 1070–1078.
HAN Yudong, ZHANG Jun, WANG Zhenbo. J Chin Ceram Soc, 2013, 41(8): 1070–1078.

[37] 张高展, 魏琦, 丁庆军, 等. 轻集料吸水率对轻集料-水泥石界面区特性的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(5): 24–28.
ZHANG Gaozhan, WEI Qi, DING Qingjun, et al. J Build Mater (in Chinese), 2018, 21(5): 24–28.

[38] SEMION Z, KONSTANTIN K, ARNON B. Effect of hybrid curing on cracking potential of high-performance concrete[J]. Cem Concr Res, 2013, 54: 36–42.

[39] PIETRO L, MATEUSZ W, CLARENCE T, et al. Internal curing with lightweight aggregate produced from biomass-derived waste[J]. Cem Concr Res, 2014, 59: 24–33.

[40] 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. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(10): 1636–1643.

[41] 何宇豪, 任子杰, 黄向阳, 等. 重晶石防辐射原理与应用[J]. 矿产保护与利用, 2020, 6: 41–46.
HE Yuhao, REN Zijie, HUANG Xiangyang, et al. Conserv Util Mineral Resour (in Chinese), 2020, 6: 41–46.

[42] 闻洋, 刘培培. 橡胶混凝土抗冲击性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(3): 792–799.
WEN Yang, LIU Peipei. Bull Chin Ceram Soc(in Chinese), 2018, 37(3): 792–799.