

DOI: 10.12164/j.issn.1003-8965.2023.02.006

不同钢渣掺量对UHPC性能的影响研究

Influence of different content of steel slag on the properties of UHPC

张金成¹, 李广音², 白井付³, 何建能⁴, 张江涛^{5*}, 王鹏¹, 谢丽杰¹, 唐旭¹

(1. 中国国检测试控股集团股份有限公司, 北京 100024; 2. 天津城建大学 材料科学与工程学院, 天津 300192; 3. 北京路星顺达建设工程质量检测有限公司, 北京 101309; 4. 甘肃省白银市会宁县交通运输局, 甘肃 白银 730799; 5. 中建材中岩科技有限公司, 北京 100024)

ZHANG Jincheng¹, LI Guangyin², Bai Jingfu³, HE Jianneng⁴, ZHANG Jiangtao^{5*}, WANG Peng¹, XIE Lijie¹, TANG Xu¹

(1. China Testing & Certification International Group Co., Ltd., Beijing 100024; 2. School of Materials Science and Engineering, Tianjin Urban Construction University, Tianjin 300192; 3. Beijing Luxing Shunda Construction Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Beijing 101309; 4. Huining County Transportation Bureau, Baiyin 730799; 5. CBMA Zhongyan Technology Co., Ltd., Beijing 100024)

摘要: 钢渣作为大宗固体废弃物在建筑材料领域的应用是节能减排的重要途径之一。本文研究了不同钢渣掺量对UHPC工作性、力学性能及收缩性能的影响规律, 并通过TG/DTG及SEM分析其水化机理。结果表明, 随着钢渣掺量的增加, UHPC的流动度呈不同程度增加, 早期抗压强度和抗折强度降低幅度较大, 但后期力学性能差距逐渐减小。UHPC的自收缩性能随着钢渣掺量的增加呈降低趋势。钢渣粉掺量占总胶凝材料的18%时, 制备的UHPC的工作性能和自收缩性能仍较为优异, 水化28d后力学性能增长较快。

关键词: 钢渣; UHPC; 力学性能; 水化产物

Abstract: The application of steel slag as a bulk solid waste in the field of building materials is an important way to save energy and reduce emissions. In this paper, the effects of different content of steel slag on the workability, mechanical properties and shrinkage of UHPC are studied, and the hydration mechanism is analyzed by TG/DTG and SEM. The results show that with the increase of steel slag content, the fluidity of UHPC increases in some degrees, the early compressive strength and flexural strength decreases significantly, but the gap in mechanical properties gradually decreases in the later stage. The self-shrinkage performance of UHPC shows a decreasing trend with the increase of steel slag content. When steel slag powder content accounts for 18% of the total cementitious materials, the UHPC still has good working and self-shrinking performance, and the mechanical properties increases rapidly after 28-days of hydration.

Key words: steel slag; UHPC; mechanical properties; hydration products

中图分类号: TQ172 文献标志码: A 文章编号: 1003-8965(2023)02-0018-04

0 引言

钢铁生产过程中会产生大量的工业副产品, 如钢渣^[1]。当前我国的钢渣利用率较低, 其存放不仅占用土地资源, 还污染环境, 因此, 如何有效利用钢渣等工业副产品成为了研究焦点。从大宗资源利用角度, 将钢渣用于制备绿色建筑材料具有重要的理论和现实意义^[2]。钢渣中含具有胶凝活性的矿物(硅酸三钙和硅酸二钙及铁相等), 可作为掺合料来制备混凝土^[3]。与普通混凝土相比, 超高性能混凝土(UHPC)具有较高的力学性能和优异的韧性及耐久性, 在道路、桥梁等特殊工程与极端环境混凝土结构等领域有广泛的应用前景^[4]。本研究将钢渣粉和矿粉配制二元复合微粉, 通过增加钢渣掺量, 减少矿粉用量, 研究钢渣对UHPC性能的影响, 为钢渣资源化利用提供参考。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

胶凝材料包括P·II52.5水泥、S95级别矿粉、宝武集团生产的滚筒钢渣。原材料化学组成见表1。钢渣比表面积510m²/kg, 28d活性指数72.7%, 矿物组成见表2, XRD见图1。矿粉取自河北某钢铁公司, 比表面积460m²/kg。石英砂的粒径范围在0.5~1.5mm。减水剂为粉体聚羧酸减水剂,

表1 原材料化学组成/wt. %

Tab.1 Chemical composition of materials /wt. %

材料	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Loss
水泥	60.54	22.35	5.50	3.12	0.98	0.62	0.63	2.58
矿粉	35.88	30.25	17.32	0.55	10.23	0.32	0.26	2.33
钢渣粉	42.5	14.7	1.9	26.7	9.0	-	0.24	0.90

第一作者: 张金成(1980-), 高级工程师, 从事建筑节能、保温等领域的检测工作。13381289697

通讯作者: 张江涛(1989-), 博士, 从事水泥基特种砂浆及固废胶凝材料研究。010-51167635

减水率为40%。水为自来水。

表2 钢渣的矿物组成及定量分析/wt.%
Tab.2 Mineral composition of steel slag
(Rietveld method) /wt.%

C ₃ S	β-C ₂ S	γ-C ₂ S	C ₂ F	RO	f-MgO	f-CaO	Σ
7.6	35.6	3.4	17.0	26.7	3.5	1.7	95.4

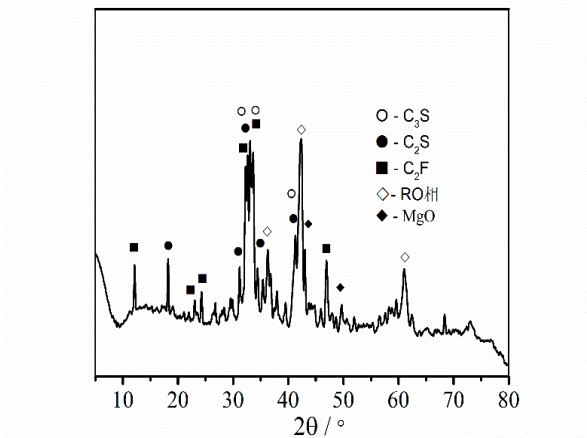


图1 钢渣的XRD图

Fig.1 XRD pattern of steel slag

1.2 配合比及制备方法

本试验设计了如表3所示UHPC配合比。将胶凝材料和骨料按比例称量后放入搅拌锅中慢搅3min混合均匀,再共同加入减水剂和水搅拌2min后停机,之后均匀加入全部钢纤维搅拌3min,分别装入40mm×40mm×160mm试模中振捣密实。

表3 UHPC试验配合比/kg/m³

Tab.3 Mix proportion of UHPC //kg/m³

序号	水泥	矿粉	钢渣	硅灰	粗砂	细砂	钢纤维	减水剂	水
U1 (空白)	800	250	0	50	420	630	120	6.6	232
U2	800	200	50	50	420	630	120	6.6	232
U3	800	150	100	50	420	630	120	6.6	232
U4	800	100	150	50	420	630	120	6.6	232
U5	800	50	200	50	420	630	120	6.6	232

1.3 试验方法

按照GB/T 2419-2005《水泥胶砂流动度测定方法》测试UHPC拌合物的流动性。按照GB/T 17671-1999《水泥胶砂强度检测方法》分别测试养护1d、7d和28d试件的抗压及抗折强度。采用JGJ/T 70-2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》测试UHPC拌合物的收缩性能。为了分析钢渣对UHPC力学性能的影响机理,采用TG和SEM分别测试硬化体中的水化产物的组成及形貌。

钢渣的组成采用D8 ADVANCE型X射线衍射仪测试,扫面范围5~80°(2θ),步长0.01°。采用NETZSCH STA 449C型同步热分析仪对水化样品进行热重分析,采用10℃/min的升温速率,升温范围30~1000℃。采用Quanta 250 FEG型扫描电镜测试水化产物形貌。

2 结果与讨论

2.1 不同钢渣掺量对UHPC流动度的影响

不同钢渣掺量对UHPC流动度的影响如图2所示。由图2可知,当钢渣和矿渣复合微粉占胶凝材料总量比例保持不变时,随着钢渣掺量的增加,拌合的UHPC的流动度呈不同程度增加趋势。矿渣磨细后,颗粒多为棱角状,表面棱角突出,而磨细钢渣颗粒更圆润,能减小颗粒摩擦阻力,起到一定的润滑作用,因此更能提高砂浆的流动度^[5-7]。钢渣的自身活性较低,因此需水量较少,这在相同用水量条件下提高了UHPC拌合物的流动度。钢渣占总胶凝材料掺量从0到10%时,制备的UHPC的流动度增长幅度较小,流动度从320mm增长到327mm。当钢渣微粉掺量增加到14%和18%时,流动度从327mm增长到335mm和345mm,增长幅度变大。尽管随着钢渣粉掺量的增加,制备的UHPC的流动度增加,但状态均匀,均无沉降泌水现象。

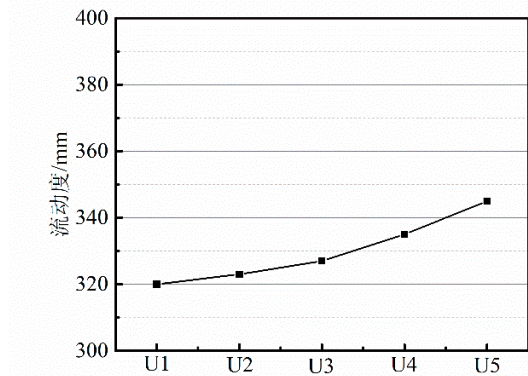


图2 不同钢渣掺量对UHPC流动度的影响

Fig.2 The influence of steel slag content on fluidity of UHPC

2.2 不同钢渣掺量对UHPC自收缩的影响

图3为不同掺量钢渣对UHPC自干燥收缩的影响。制备UHPC胶凝材料中水泥用量较大,因此混凝土的收缩变化整体较大。如图3所示,由于制备UHPC的水胶比较低,

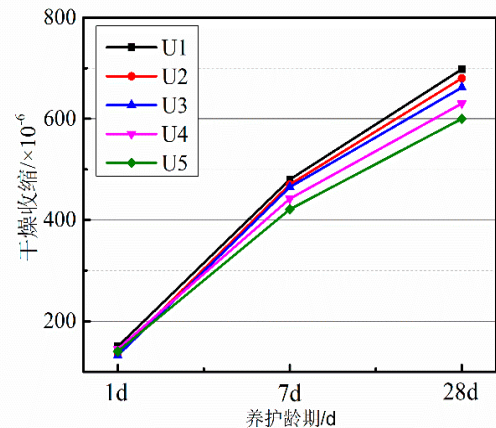


图3 不同钢渣掺量对UHPC自收缩的影响

Fig.3 The influence of steel slag content on shrinkage of UHPC

胶凝材料在水化过程中会消耗产物内部孔隙中的水,使毛细孔中的水分不饱和而发生自收缩。水化早期,随着钢渣掺量的增加,UHPC的自收缩稍有降低,而水化28d后,差距加大。这是由于钢渣自身水化速率较慢,掺入钢渣后延缓了水泥的水化,水化产物生成量减少,例如C-S-H凝胶,使混凝土中细孔减少,从而降低收缩^[8]。当钢渣和矿渣复合微粉占胶凝材料总量比例保持不变时,随着钢渣掺量的增加,拌合的UHPC的自收缩呈不同程度降低趋势,且随着钢渣掺量的增加,UHPC的自收缩下降幅度明显增加。

2.3 不同钢渣掺量对UHPC力学性能的影响

图4为不同钢渣掺量对UHPC力学性能的影响。随着钢渣粉掺量的增加,样品水化1d、7d、28d后的抗折和抗压强度呈不同程度降低。尽管钢渣具有一定的火山灰活性,但难以避免因掺量过大带来的负面影响,因此本试验中复掺钢渣粉和矿粉试样的抗压强度低于对照组样品。随着钢渣掺量的增加,早期力学性能降低明显,后期强度降低幅度较小。这是由于钢渣早期活性较低,因此随着钢渣粉掺量的增加,早期强度降低幅度较大,而随着水化龄期的增加,钢渣的活性被激发,尤其是在矿粉存在条件下,钢渣粉与矿粉和水泥三者相互促进^[9-10]。当钢渣粉掺量占总胶凝材料的18%时,UHPC的28d抗折和抗压强度分别达到18.5MPa和113.3MPa。

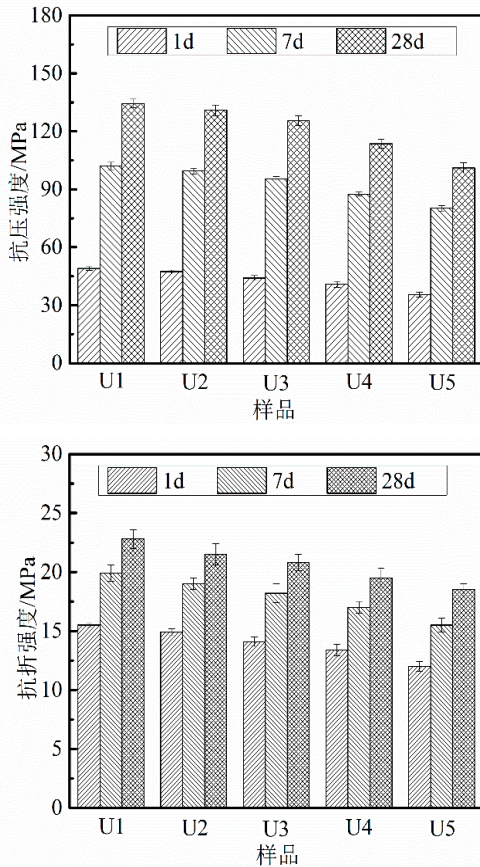


图4 不同钢渣掺量对UHPC力学性能的影响

Fig.4 The influence of steel slag content on mechanical properties of UHPC

2.4 不同钢渣掺量对UHPC力学性能影响机理分析

2.4.1 TG/DTG

图5为不同钢渣掺量制备的UHPC水化1d和28d产物的热分析曲线。从图5可以看到,在120℃、150℃、400℃左右及600~700℃范围内分别出现C-S-H凝胶、钙矾石(Aft)、Ca(OH)₂及CaCO₃的热失重峰。随着钢渣掺量的增加,水化1d和28d产物质量损失呈不同程度降低。水化1d,当钢渣掺量较低时,C-S-H凝胶和Ca(OH)₂的质量损失较明显,当掺量提高时(样品U4和U5),水化产物质量损失变化差距较小。而水化28d后,水化产物质量损失变化规律相反,但是随着钢渣掺量的增加,样品U4和U5中水化产物的失重量差距减小。C-S-H凝胶和Ca(OH)₂的质量损失在一定程度上反映了胶凝材料的水化程度^[11],热失重量越大,则水化程度越高,因此生成的水化产物越多,水化硬化浆体的强度也就越高。这与上述抗压强度结果一致。

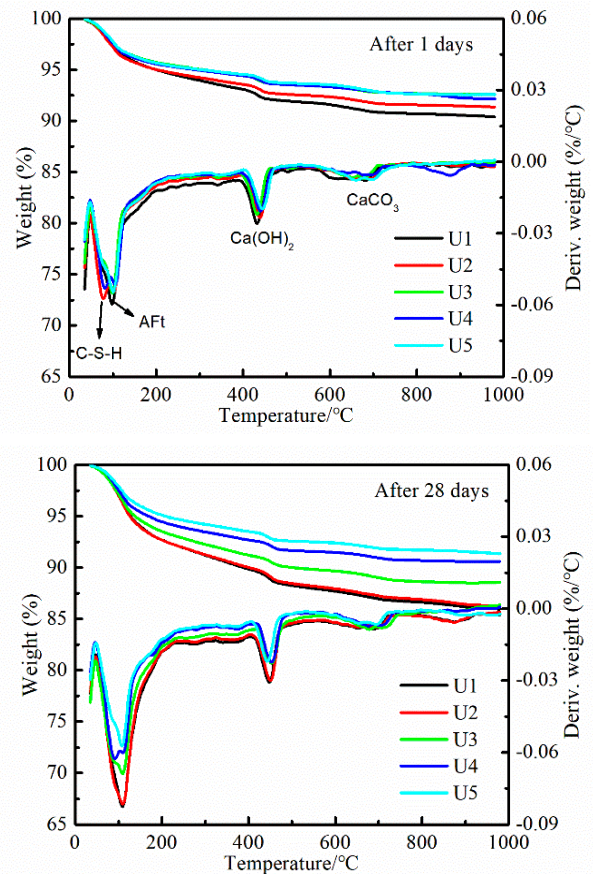


图5 不同钢渣掺量制备UHPC水化产物的热分析曲线
Fig.5 TG-DTG curves of UHPC samples with different content of steel slag

2.4.2 SEM

图6为不同钢渣掺量制备的UHPC水化28d产物的SEM图片。从图6可以看出,在未掺加钢渣样品U1的水化产物中观察到针状钙矾石,尺寸较长。掺加钢渣样品U2~U5中水化生成的钙矾石尺寸较短,样品U2中生成的钙矾石为短粗状,呈簇状分布,而样品U3~U5中生成的针状钙矾石较细小,分散在水化浆体中。钢渣粉掺量占总胶凝材料18%(样品U5)时,样品中依然生成一定量的针状钙矾石,均匀

分布在硬化浆体表面,但从整体微观形貌上看,硬化浆体较密实。由于样品U1中胶凝材料无钢渣,只有水泥、矿粉和硅灰,因此胶凝材料水化相对充分,钙矾石形成较快,且尺寸较大。水化早期主要为水泥的水化反应,到中后期钢渣粉开始发挥作用,促进整个水化体系的进一步反应进程。随着钢渣掺量的增加,水化体系早期水化反应有所降低,使整个水化胶凝体系的水化速率减慢,产物形成速率降低,晶体生长不充分,从而导致硬化浆体的力学性能发展缓慢。

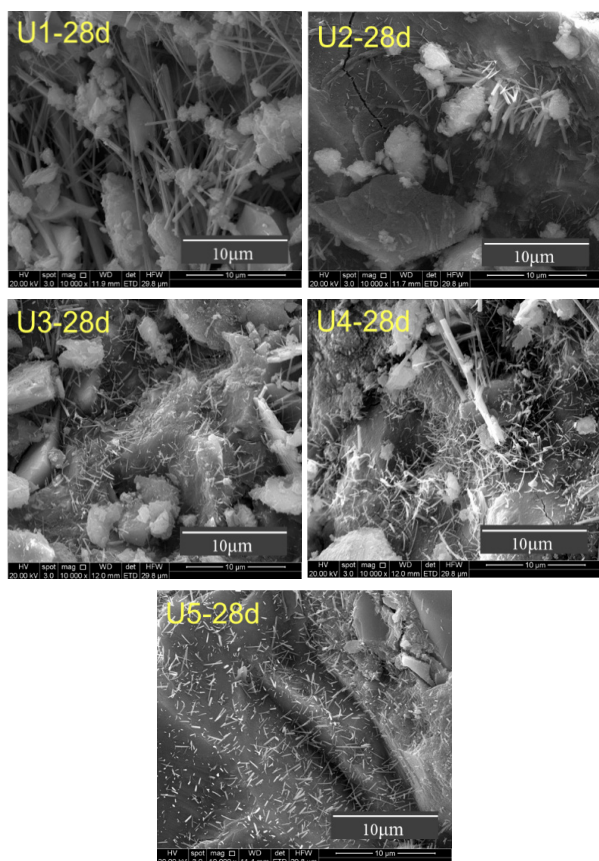


图6 不同钢渣掺量制备UHPC水化产物的微观形貌
Fig.6 SEM images of UHPC samples with different content of steel slag

3 结论

1)钢渣对UHPC的工作性能有明显改善作用,随着钢渣微粉掺量的增加,UHPC的流动度不同程度增加,但状态均匀,均无沉降泌水现象。

2)钢渣能有效缓解UHPC的自收缩。随着钢渣微粉掺量的增加,UHPC的自收缩呈不同程度降低,掺量越高,降低程度越大。

3)钢渣对UHPC早期力学性能影响较大,随着掺量的增加,UHPC早期抗折和抗压强度降低幅度较大,但28d后力学性能降低程度较小。

4)钢渣影响了UHPC水化产物的含量与形貌,掺量越高,水化产物生成量越低,同时,生成钙矾石的形貌和尺寸发生明显变化,影响了水化硬化浆体的密实度,从而使强度降低。

参考文献

- [1]何智海,张晓翔,詹培敏,等. 钢渣粉及其对水泥基材料性能的影响研究进展[J]. 混凝土,2020(2):83-93.
- [2]陆天龙,刘栋,杨光照,等. 钢渣综合利用及尾渣中铁的回收研究进展[J]. 热加工工艺,2017(17):14-18.
- [3]任谦,詹树林,徐强,等. 钢渣粉掺量对三元复掺混凝土性能的影响[J]. 混凝土,2019(3):153-156.
- [4]李世华,郑倩,梁丽敏,等. 超高性能混凝土工作性和力学性能的影响因素研究[J]. 混凝土与水泥制品,2022(12):53-57.
- [5]赵世冉,张凯峰,焦国峰,等. 钢渣-矿渣复合胶凝材料对砂浆性能影响的试验研究[J]. 硅酸盐通报,2015(34):308-313.
- [6]庄梓豪,周春英,余其俊,等. 矿物掺合料对干粉砂浆物理性能及孔结构的影响[J]. 新型建筑材料,2007(08):9-14.
- [7]LING T C, POON C S. Feasible use of large volumes of GGBS in 100% recycled glass architectural mortar[J]. Cement and concrete composites, 2014(53):350-356.
- [8]MADANI H, BAGHERI A, PARHIZKAR T. The pozzolanic reactivity of monodispersed nanmica hydrosols and their influence on the hydration characteristics of Portland cement[J]. Cement and concrete research, 2012,42(12):1563-1570.
- [9]赵乃志,陆桂凤. 钢渣-矿渣复合对装配式建筑用灌浆料性能的影响研究[J]. 混凝土,2018(12):119-121.
- [10]王梦琪,王路明,蔡树元,等. 无机激发剂对碱矿渣-钢渣胶凝材料抗压强度的影响[J]. 混凝土,2020(7):84-87.
- [11]刘淑贤,苏严,杨敏,等. 钢渣-矿渣复合胶凝材料的制备及胶凝活性激发试验研究[J]. 金属矿山,2022(11):252-258.