

[文章编号] 1003—4684(2021)04-0064-05

掺钢渣粉超高韧性水泥基材料拉伸性能研究

苏 骏, 肖 沐

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 从固废利用和材料高性能化出发,通过掺加钢渣粉来制备超高韧性水泥基复合材料。考虑了水胶比(0.25、0.35)、钢渣粉(0、20%、40%、60%、80%)两个因素,采用立方体抗压试验和直接拉伸试验探究掺钢渣粉的 PVA 纤维增强水泥基复合材料基本力学性能。结果表明:利用钢渣制备超高韧性水泥基复合材料是可行,钢渣粉掺量不超过 60%时,掺钢渣 PVA 纤维增强水泥基复合材料能满足一般工程对抗压强度的需求;钢渣粉的掺入使水泥基复合材料表现出明显的应变硬化特点,拉伸极限应变得到了极大的提升。

[关键词] 钢渣粉; 聚乙烯醇纤维; 水泥基复合材料; 拉伸性能

[中图分类号] TU528 [文献标识码] A

中国钢铁工业经过多年的快速发展,产能急剧扩张。据统计,2016 年我国粗钢产量约 8 亿 t,钢渣排放量接近 1 亿 t^[1]。与此同时,产生的大量钢渣既是一个重要的资源利用问题,又是一个严重的环境污染问题。由于钢渣自身性能、钢渣处理技术和国内外市场观念等因素影响,钢渣资源化利用的推广效果不理想,目前综合利用率约为 30%^[2]。钢渣的堆存对周边环境会产生严重污染甚至造成安全问题,钢渣中含有锌、铬、镉等重金属元素,在雨水作用下很容易进入土壤、破坏植被结构、污染地下水源^[3]。如何有效处理钢渣的废弃问题,一直是我国钢铁企业急需解决的难题之一。

超高韧性水泥基复合材料(Ultra high toughness cementitious composites, UHTCC)是利用微观力学和断裂力学原理进行调控、设计而得到的新型水泥基复合材料^[4,5],在荷载作用下,具有明显的应变硬化特点,极限拉应变能达到 3%以上,并且能有效控制裂缝宽度在 100 μm 以内,克服了普通混凝土韧性差、脆性特征明显、裂缝宽度难以控制的缺点^[6-8]。国外也有不少学者将其称为应变硬化水泥基复合材料(Strain-hardening Cement-based Composite, SHCC)^[9,10]。超高韧性水泥基复合材料通常采用粉煤灰、砂、水泥、硅灰等为基体材料,以纤维作为增强材料,并辅以外添加剂,实现其超高韧性。近年来,有大量研究者采用偏高岭土、矿料等作为超高韧性水泥基复合材料的辅助胶凝材料,同样设计出

各项性能优良的复合材料^[11-14]。研究者发现水泥与钢渣粉具有相似的化学组成,具有潜在的水化活性,可以作为掺入料掺入水泥中。将钢渣粉掺入水泥基体中,不仅可以切实提高钢渣利用率,还可以大幅度减少环境污染。本文从环境友好的角度出发,选用钢渣粉作为辅助胶凝材料设计制备超高韧性水泥基复合材料,以实现钢渣的高效性利用。

1 试验概况

本试验采用控制变量的方法,采用经典 UHTCC 试件配合比,制备不同掺量钢渣粉的超高韧性水泥基复合材料试件,水胶比选用 0.25 和 0.35,钢渣粉掺量为 0、20%、40%、60%、80%,试验具体配比见表 1。通过立方体抗压试验和直接拉伸试验探究掺钢渣粉聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料基本力学性能和裂缝控制能力,并以此给出掺钢渣粉 PVA 纤维增强水泥基复合材料各项性能较优的配合比。

1.1 原材料及试件设计

试验原材料采用华新普通硅酸盐水泥(P·O42.5)、精细石英砂(80 目~120 目)、钢渣粉、挪威埃肯硅粉、自来水、聚羧酸高效减水剂和 PVA 纤维。试验采用的纤维各项性能指标如表 2 所示。水泥和钢渣粉主要化学组分如表 3 所示,从表中看出钢渣粉和水泥主要化学组成相似,但 CaO 含量较低且 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 含量较高,因此钢渣早期反应活性

[收稿日期] 2020—12—09

[第一作者] 苏 骏(1971—),男,湖北武汉人,湖北工业大学教授,研究方向为混凝土结构计算理论,纤维混凝土结构,工程结构抗震与加固技术

[通信作者] 肖 沐(1994—),男,湖北黄冈人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为超高韧性纤维水泥基复合材料

较低,通常将其当作辅助胶凝材料使用。

表 1 掺钢渣粉 PVA 纤维增强水泥基复合材料配合比

水胶比	组别	水泥	硅粉	钢渣粉	水	砂	减水剂/%	PVA 掺量/%
0.25	M25SS0	0.98	0.02	0	0.25	0.2	1	2
	M25SS20	0.78	0.02	0.2	0.25	0.2	1	2
	M25SS40	0.58	0.02	0.4	0.25	0.2	1	2
	M25SS60	0.38	0.02	0.6	0.25	0.2	1	2
	M25SS80	0.18	0.02	0.8	0.25	0.2	1	2
0.35	M35SS0	0.98	0.02	0	0.35	0.2	1	2
	M35SS20	0.78	0.02	0.2	0.35	0.2	1	2
	M35SS40	0.59	0.02	0.4	0.35	0.2	1	2
	M35SS60	0.38	0.02	0.6	0.35	0.2	1	2
	M35SS80	0.18	0.02	0.8	0.35	0.2	1	2

M25 表示水胶比为 0.25,SS0 表示钢渣粉掺量为 0;除 PAV 掺量为体积比以外,其他均为质量比

表 2 PVA 纤维物理性能指标

长度/mm	12
直径/ μm	40
长径比	300
抗拉强度/MPa	1600
延伸率/%	7
抗拉弹性模量/GPa	42
密度/(g/cm^3)	1.3

表 3 主要化学组分

水泥		钢渣粉	
SiO ₂	17.63	Fe ₂ O ₃	34.64
CaO	65.39	CaO	8.229
Fe ₂ O ₃	4.106	Al ₂ O ₃	8.16
Al ₂ O ₃	5.352	SiO ₂	31.26
K ₂ O	0.703	MgO	4
Na ₂ O	0.203	SO ₃	2.39
MgO	1.43	P ₂ O ₅	0.254
P ₂ O ₅	0.161	Na ₂ O	2.98
TiO ₂	0.326		
SO ₃	3.51		

试件制作时采用行星式水泥搅拌机,先将钢渣粉、水泥、石英砂倒入搅拌锅中低速干拌 1 min,使材料充分混合均匀,再将称量好的水和减水剂在桶中预先混合均匀,然后沿着搅拌锅缓慢加入(1 min 内完成),最后均匀加入纤维(1 min 内完成)。纤维全部加入后,先低速搅拌 2 min,再高速搅拌 3 min,待混合物流动性达到要求后,将搅拌成功的混合物倒入模具成型,在温度为 20±5℃ 的环境中静置 24 h 后拆模。拆模后的试件放入标准养护室(温度为 20±2℃,相对湿度在 95% 以上)中养护 28 d 后,再进行相应试验。

立方体抗压试验,试件尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm,每组制作试样 3 个;拉伸试验采用哑铃型试件如图 1 所示,每组配合比成型 6 个试件。

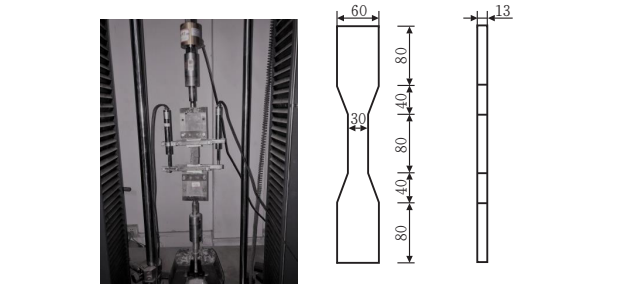


图 1 拉伸试验加载装置

1.2 试验方法

本文采用的试验方法主要有直接拉伸试验和立方体抗压强度试验,试件养护龄期均为 28 d。采用 WAY-2000 电液压式压力试验机测试立方体抗压强度。直接拉伸试验在 MTS30KN 电子万能试验机上进行,如图 1 所示,采用匀速位移加载控制,位移率为 0.2 mm/min,用两个 LVDT 测量拉伸长度变化,测量范围为 80 mm。

2 试验结果与分析

2.1 立方体抗压强度试验分析

从表 4 和图 2 可以看出,相同钢渣粉掺量下,水胶比为 0.25 的组别比水胶比 0.35 的组别抗压强度分别增加了 36.89%、54.70%、61.06%、92.05%、69.53%,说明水胶比是影响纤维增强水泥基复合材料抗压强度的重要因素。

表 4 掺钢渣粉纤维增强水泥基复合材料抗压强度

组别	抗压强度/MPa	组别	抗压强度/MPa
M25SS0	84.9±3.2	M35SS0	57.5±6.3
M25SS20	87.3±0.7	M35SS20	56.4±0.7
M25SS40	72.5±3.4	M35SS40	45.0±6.0
M25SS60	54.4±2.6	M35SS60	28.3±2.3
M25SS80	12.5±0.3	M35SS80	7.4±0.8

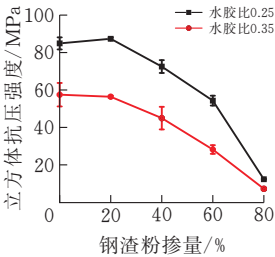


图 2 立方体抗压强度与钢渣粉掺量关系曲线

由图 2 可以发现,在相同的水胶比下,随着钢渣粉掺量的增加纤维增强水泥基复合材料抗压强度呈现下降趋势。虽然低掺量的钢渣粉的掺入会改善复合材料的密实程度,在一定程度上可以使复合材料抗压强度得到提升,但由于其本身水化活性较低,当钢渣粉含量过高时,水化反应会被减慢,最终导致水泥基复合材料早期(28 d)强度降低。在钢渣粉掺量

达到 80% 时, 两组水胶比的试件抗压强度均低于 20 MPa, 对比于基准组, 水胶比为 0.25 的体系, 立方体抗压强度从 78.72 MPa 降低到 12.46 MPa, 降幅达到 84.17%; 水胶比为 0.35 的体系, 立方体抗压强度从 57.51 MP, 降低到 7.35 MPa, 降幅达到 87.21%, 这说明大掺量钢渣粉的引入会使得水泥基复合材料的早期抗压强度降低, 从试验结果看, 水胶比为 0.25、钢渣粉掺量为 20% 时, 纤维增强水泥基复合材料立方体抗压强度达到最高为 87.30 MPa, 当钢渣粉掺量不高于 60% 时, 两组水胶比体系下的水泥基复合材料强度仍能满足一般工程对抗压强度为 30 MPa 的需求, 因此应用于工程实际时, 建议钢渣粉掺量不宜超过胶凝材料总质量的 60%。

2.2 直接拉伸试验分析

图 3 为各组试件典型的拉伸应力应变曲线, 可简化为三个阶段描述(图 4)。

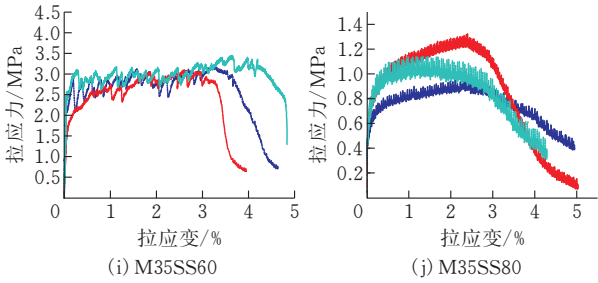
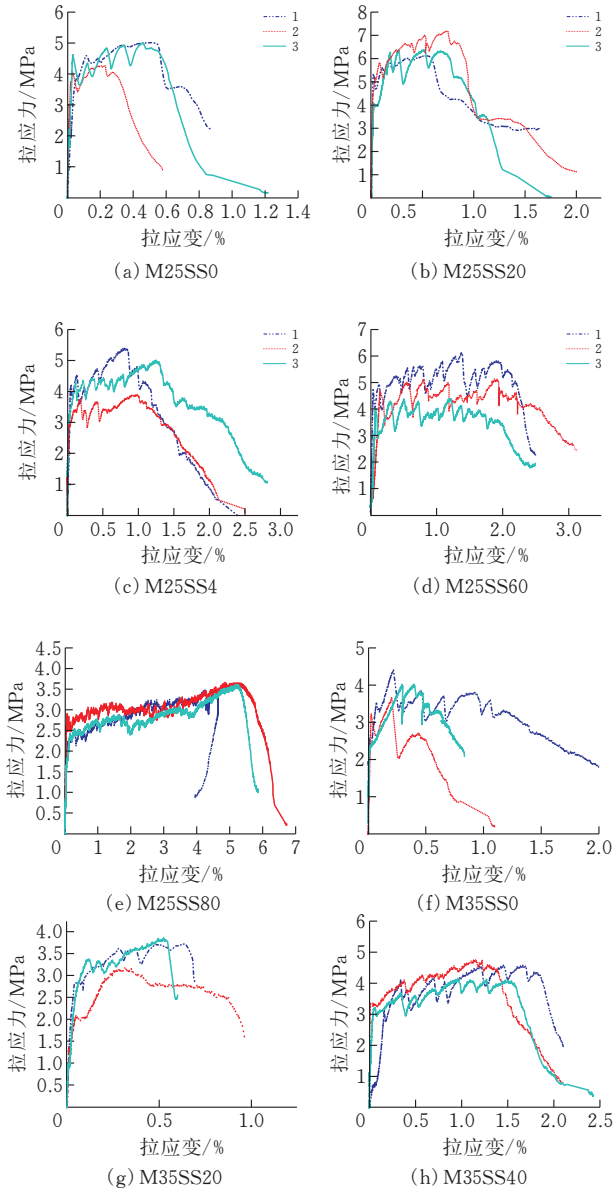


图 3 各组试件的典型拉伸应力应变曲线

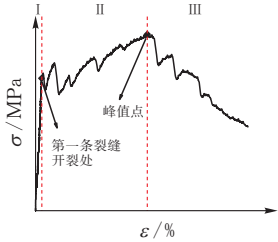


图 4 应力应变关系三阶段示意图

第一阶段: 弹性阶段, 从试件开始加载到试件出现第一条裂缝的直线段(约为极限应力点的 65%~85%), 此阶段试件的变形主要是弹性变形, 应力应变曲线在此阶段近似为直线, 试件所受荷载主要有水泥基体承载, 纤维不参与工作。

第二阶段: 多裂缝发展阶段, 此阶段为从第一条裂缝产生到峰值点的曲线段。由于 PVA 纤维的作用, 随着应力的增加试件表面会不断产生多条细微裂缝, 直到峰值时, 裂缝条数达到最多, 试件表现出明显的应变硬化特征。此时应变的增加主要得力于纤维的阻裂作用, 试件所受荷载主要用来拔断或者拔出纤维, 试验过程中会听到纤维被拔出或拔断的“霹雳霹雳”的声音。

第三阶段: 软化阶段, 此阶段为峰值点之后的曲线下降段。这一阶段随着荷载的增加裂缝会逐渐扩大, 在试件测距内会逐渐形成一条主裂缝, 直至贯穿整个试件, 此时试件破坏。试件破坏过程中应力逐渐下降, 部分细微裂缝会慢慢闭合, 表现出延性破坏的特点。

表 5 为各组试件平均开裂应力、极限拉应力、开裂应变和极限拉应变的试验结果。从表中可以看出, 同样水胶比条件下, 随着钢渣粉掺量的增加, 试件初始开裂应力逐渐下降, 这主要是因为基体开裂之前, 纤维是不参与工作的, 即试件的初始开裂应力只与基体强度有关, 而相较于水泥, 钢渣粉的活性较低, 对早期的水化反应有一定的延缓作用, 随着胶凝材料中钢渣粉含量的提高, 水泥的水化反应会减慢或反应不充分, 使得水泥基体强度降低。

同时可以看出无论是水胶比为 0.25, 还是水胶比为 0.35 的体系, 掺钢渣粉 PVA 纤维增强水泥基

材料的极限拉伸应变随着钢渣粉掺量的增加逐渐变大。其中水胶比为 0.25、钢渣粉掺量为 80%的试件极限拉伸应变能达到 5%，相对于基准组(M25SS0)的极限拉伸应变增加了 8 倍左右；水胶比为 0.35、钢

渣粉掺量为 60%的试件极限拉伸应变能达到3.6%，相对于基准组(M35SS0)的极限拉伸应变增加近 16 倍，均表现出极佳的拉伸性能。

表 5 掺钢渣粉 PVA 纤维增强水泥基复合材料的抗拉强度

组别	开裂应力/MPa	极限应力/MPa	开裂应变/%	极限应变 %
M25SS0	3.943±0.008	4.691±0.631	0.011±0.002	0.552±0.094
M25SS20	5.240±0.11	6.312±0.889	0.032±0.007	0.655±0.089
M25SS40	3.706±0.442	5.365±0.061	0.068±0.002	0.854±0.047
M25SS60	3.141±0.252	4.71±0.418	0.128±0.033	1.913±0.005
M25SS80	2.381±0.236	3.574±0.034	0.044±0.012	5±0.381
M35SS0	3.275±0.103	3.908±0.504	0.011±0.003	0.206±0.012
M35SS20	3.218±0.273	4.012±0.143	0.116±0.008	0.549±0.05
M35SS40	3.138±0.082	4.712±0.097	0.04±0.007	1.545±0.117
M35SS60	2.502±0.059	3.283±0.29	0.067±0.013	3.6±0.669
M35SS80	0.616±0.143	1.141±0.181	0.142±0.008	2.405±0.008

掺入钢渣粉后，水泥基复合材料的抗拉性能得到了明显的提升，随着钢渣粉含量的提高，试件逐渐呈现多裂缝开裂模式，并且裂缝较为细密。从图中可以看出，60%和 80%钢渣粉掺量的试件应力应变曲线表现出更加明显的应变硬化现象，钢渣粉掺量的增加，可以减少胶凝材料水化后的孔隙率，使基体材料更加均匀，提高了水泥基复合材料的密实度，避免了由于基体内部材料的不均匀导致试件破坏。同时大量密实的钢渣粉改善了纤维与基体之间的接触面，增加了纤维与基体之间的摩擦力，使得乱向分布于基体内部的纤维承担更大的荷载比例，从而给材料提供了更高的韧性。因此大量掺入钢渣粉有利于提高 PVA 纤维水泥基复合材料的韧性。

3 主要结论

- 1)利用钢渣粉制备超高韧性水泥基复合材料是合理可行的，水胶比为 0.25 的组别比水胶比 0.35 的组别抗压强度分别增加了 36.89%、54.70%、61.06%、92.05%、69.53%，水胶比和钢渣粉掺量是影响掺钢渣粉 PVA 纤维增强水泥基复合材料强度的重要因素。
- 2)大掺量钢渣粉的引入在早期会明显降低超高韧性水泥基复合材料的抗压强度，但两组水胶比体系下，当钢渣粉掺量不超过 60%时，掺钢渣粉 PVA 纤维增强水泥基复合材料能够满足实际工程对抗压强度的要求。
- (3)大掺量钢渣粉的超高韧性水泥基复合材料拉伸性能得到较大提高，其中水胶比为 0.25 的体系极限应变分别为 0.552%、0.655 %、0.854%、1.913%、5%，钢渣粉掺量为 80%时，极限拉伸应变

较基准组增加了 805.80%；水胶比为 0.35 的体系极限应变分别为 0.206、0.549%、1.545%、3.6%、2.405%，钢渣粉掺量为 60%时，极限拉伸应变较基准组增加了 1647.57%。

[参 考 文 献]

[1] 高本恒,郝以党,张淑苓,等.钢渣综合利用现状及发展趋势[J].环境工程,2016,34(S1):776-779.

[2] 刘国平. 钢渣综合利用技术[A].京津冀钢铁业环保技术论坛大会报告集,2016,14:91-104.

[3] 朝晖,廖杰龙,巨建涛,等.钢渣处理工艺与国内外钢渣利用技术[J].钢铁研究学报,2013,25(7):1-4.

[4] LI V C.On engineered cementitious composites (ECC) a review of the material and its applications[J].Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, 2164:1-8.

[5] LI V C , LEUNG C . Steady-state and multiple crack-ing of short random fiber composites[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(11):2246-2264.

[6] 高淑玲,徐世焱.PVA 纤维增强水泥基复合材料拉伸特性试验研究[J].大连理工大学学报,2007(2):233-239.

[7] 王义超,侯梦君,余江滔,徐世焱,俞可权,张志刚.聚乙烯纤维制备超高延性水泥基复合材料的试验研究[J].材料导报,2018,32(20):3535-3540.

[8] 徐世焱,李贺东.超高韧性水泥基复合材料直接拉伸试验研究[J].土木工程学报,2009,42(9):32-41.

[9] PAUL S C , BABAFEMI A J . A review of the me-chanical and durability properties of strain hardening cement-based composite (SHCC)[J]. Journal of Sus-tainable Cement-Based Materials, 2018,7(1):1-22.

[10] VAN, ZIJL, GIDEON, et al. Comparative testing of crack formation in strain-hardening cement-based com-

posites (SHCC)[J]. Materials and structures, 2016, 49(4):1175-1189.

[11] HE Z H , QIAN C X , DU S G , et al. Effect of lime-stone powder and metakaolin on nanostructure of ultra-high performance cement based composite[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2015, 12(12):5593-5599.

[12] HUANG X , RANADE R , QIAN Z , et al. Mechanical and thermal properties of green lightweight engineered cementitious composites [J]. Construction & Building Materials, 2013, 48(11):954-960.

[13] KIM J-K, KIM J-S, HA G, et al. Tensile and fiber dispersion performance of ECC (engineered cementitious composites) produced with ground granulated blast furnace slag[J]. Cement and Concrete Research - CEM CONCR RES, 2007, 37:1096-1105.

[14] YANG E H , YANG Y , LI V C . Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness [J]. ACI Materials Journal, 2007, 104(6):620-628.

Study on Tensile Properties of PVA Fiber Reinforced Cementitious Composites Containing Steel Slag Powder

SU Jun, XIAO Shu

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068,China)

Abstract: In order to improve the utilization rate of waste and improve the performance of materials, steel slag powder was used to the preparation of ultra high toughness cementitious composites. On the basis of the typical mix ratio of ultra high toughness cementitious composites, the water-binder ratio (0.25, 0.35) commonly used in two groups of projects was selected, and steel slag powder (0、20%、40%、60%、80%) with different content was added by gradient. The basic mechanical properties and crack control ability of high toughness cementitious composites with steel slag powder were studied by compressive strength test and direct tensile test. The results show that it is feasible to use steel slag to prepare ultra high toughness cementitious composites. When the content of steel slag powder is less than 60%, PVA fiber reinforced cementitious composites with steel slag can meet the requirements of general engineering compressive strength. With the addition of steel slag powder, the cementitious composites showed obvious strain-hardening characteristics, and the ultimate tensile strain was greatly improved.

Keywords: steel slag powder; polyvinyl alcohol fiber; cementitious composites; tensile property

[责任编辑：裴 琴]