

doi: 10.12052/gdutxb.170161

# 基于水膜厚度假设分析磨细高炉矿渣对水泥浆性能影响

温梦丹, 陈嘉健, 高御审, 马岸民

(佛山科学技术学院 土木工程系, 广东 佛山 528000)

**摘要:** 为探索磨细高炉矿渣对水泥浆性能及其水膜厚度的影响, 研究测量了30组不同水胶比、不同磨细高炉矿渣掺量的水泥-矿渣复合浆体的流动性能、黏聚性和抗压强度. 为探索浆体的流变性能控制机理, 进一步测量了5组不同磨细高炉矿渣掺量水泥-矿渣复合浆体的填充密度, 并基于填充密度测量结果计算出各浆体试样配比的水膜厚度, 探索水膜厚度对水泥-矿渣复合浆体流变性能的影响. 实验结果表明, 适量磨细高炉矿渣的掺入能提高浆体的流动性能和抗压强度, 黏聚性些许减弱, 最优配比磨细高炉矿渣掺量为5%, 此时水泥-矿渣复合浆体综合性能最好. 磨细高炉矿渣掺入能提高胶凝材料的填充密度, 水膜厚度为流动性主要控制因素, 水泥浆的流动性能随水膜厚度增大而增大.

**关键词:** 流动性能; 磨细高炉矿渣; 强度; 水膜厚度

中图分类号: TU528.52

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2018)04-0119-08

## Effect of Ground Granulated Blast Furnace Slag on Properties Based on Analysis of Water Film Thickness Hypothesis

Wen Meng-dan, Chen Jia-jian, Gao Yu-shen, Ma An-min

(Department of Civil Engineering, Foshan University, Foshan 528000, China)

**Abstract:** To study the effect of ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the flowability, cohesiveness and strength of cement paste, 30 mixes of cement paste samples with different water/cementitious material ratios and different GGBS contents were measured. To reveal the flowability mechanism of GGBS cement paste, the packing density of 5 different cementitious mixes with various GGBS content was measured. The water film thickness of each cement paste mix was calculated based on the packing density test, and the effect of water film thickness on the flowability of GGBS cement paste was discussed. Results demonstrated that addition of moderate GGBS could increase the flowability and compressive strength, but impair the cohesiveness. The best overall performance of cement paste occurs when 5% GGBS is added. The addition of GGBS had positive effect on packing density of cementitious materials. The water film thickness is the major governing factor of flowability of GGBS cement paste, and the flowability of cement paste increases with the increase of water film thickness.

**Key words:** flowing property; ground granulated blast furnace slag (GGBS); strength; water film thickness

混凝土用途广、用量大, 制作混凝土所用主要材料水泥也因此消耗巨大. 然而水泥具有生产成本低、耗能大及环境污染大等缺点, 为弥补这一缺点, 越来越多的矿物掺和料被用来替代部分水泥投入工程应用. 磨细高炉矿渣的化学成分与普通硅酸盐水泥非常相近, 是一种活性比较高的矿物掺合料, 是制备绿

色高性能混凝土的优质混合材. 国内外众多学者在磨细高炉矿渣对于混凝土的性能影响方面做了大量研究. PAL等<sup>[1]</sup>认为矿渣在Ca(OH)<sub>2</sub>的激发作用下能够发生火山灰反应, 生成低钙硅比的凝胶, 对硬化浆体的孔结构有改善的效果; HAWILEH等<sup>[2]</sup>发现使用率高达70%的矿渣取代水泥是可行的; 王强等<sup>[3]</sup>则证

收稿日期: 2017-12-05

基金项目: 佛山市科技计划项目(2016AB000031); 佛山科学技术学院2018年度学生学术基金资助项目(重点项目)

作者简介: 温梦丹(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为新型建筑材料与结构.

通信作者: 陈嘉健(1985-), 男, 副教授, 主要研究方向为新型建筑材料与结构, E-mail: chenjiajian@fosu.edu.cn

明了矿渣的水化产物对微结构的改善和强度的发展有比较明显的作用效果;李胜男<sup>[4]</sup>通过研究得出无掺合料的普通混凝土其早期性能较好,但后期有掺和料的混凝土其性能将超过普通混凝土;杨文武等<sup>[5-6]</sup>表示矿渣能提高混凝土的抗氯离子渗透性能;李建勇等<sup>[7]</sup>通过研究得出混凝土抗压强度基本上是随着所用矿渣细度的增加而增大,并且矿渣细度增加时可以加大矿渣的掺量而混凝土强度不降低;朱江<sup>[8]</sup>发现掺入适量的聚丙烯纤维能有效地提高混凝土的耐久性;罗金等<sup>[9]</sup>认为矿渣微粉的掺入对砂浆的流动度有很大的改善作用,但其细度对流动度影响不大;刘仍光等<sup>[10-11]</sup>发现水泥-矿渣复合胶凝材料在常温养护下,矿渣早期反应速率慢,后期反应程度提高较多。

文献检索表明,磨细高炉矿渣对于混凝土性能影响已得到较多研究,但对于探索影响其流动性能的根本控制因素却涉及甚少。由于混凝土流动性主要取决于水泥浆部分的性质<sup>[12-13]</sup>,混凝土强度亦主要取决于硬化水泥浆的强度,本研究选取水泥浆为研究对象探索磨细高炉矿渣对混凝土性能的影响。作者认为磨细高炉矿渣对水泥浆的流动性能、强度、水膜厚度均有影响,对水膜厚度影响具体体现在填充密度和总表面积的变化,一方面磨细高炉矿渣颗粒

填充了水泥颗粒间的空隙,使其在相同用水量下,填充胶凝材料颗粒间空隙的用水量减少,可用于提高水泥浆流动性的剩余水量增多;另一方面磨细高炉矿渣颗粒改变了胶凝材料的总表面积,在相同水量情况下,改变了覆盖单位面积固体颗粒的水量。为进一步探索水泥-矿渣复合浆体流动性的影响机理,本研究通过试验得到磨细高炉矿渣对胶凝材料填充密度的影响,从而进一步计算出综合了填充密度和总表面积影响的参数水膜厚度,对水膜厚度对水泥-矿渣复合浆体流动性的定量影响规律进行了叙述。

## 1 实验材料

本实验中使用的胶凝材料有水泥和磨细高炉矿渣(以下简称矿渣)两种,其化学组成与物理性能见表1。材料详细情况如下:

- (1) 水泥为海螺牌P·C32.5R复合硅酸盐水泥,产自广东省佛山市,符合国家标准GB175-2007;
- (2) 磨细高炉矿渣产自北京,满足国家标准GB/T18046-2008;
- (3) 减水剂为粉状聚羧酸类高效减水剂,产自山东省莱阳市,掺量统一为胶凝材料质量的0.3%。

表1 水泥、磨细高炉矿渣化学组成与物理性能

Tab.1 Chemical composition and physical properties of cement and GGBS

名称	化学组成/%							物理性能		
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O <sup>1)</sup>	烧失量/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	比表面积/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )
水泥	62.50	23.51	6.30	4.21	3.02	1.45	0.80	9.63	3.10	510
矿渣	42.49	38.61	6.72	0.40	6.71	0.80	0.70	2.53	2.86	598

1) R<sub>2</sub>O<sup>\*</sup>=N<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O

## 2 实验方案

本研究的实验分2个阶段。第1阶段测量了共30组不同水胶比下不同矿渣掺量水泥-矿渣复合浆体的流动性(包括作半动态流动性的扩展度测量和作动态流动性的流速测量)、0.63 mm方孔筛的过筛率和28 d抗压强度。其中,浆体的水胶比分别为0.35至0.60,以0.05为级差;矿渣掺量分别为0%至20%,以5%为级差。第2阶段测量上阶段试样的胶凝材料的填充密度,为其各试样水膜厚度计算提供依据。各试样以“G-矿渣掺量-水胶比”为编号,其中G代表矿渣,其详细配比及其流动性等测量数据见表2,流动性等测量均在浆体完成搅拌后5 min内进行,整个实验过程中实验室温度控制在(20±2)℃。

## 3 流动性测量

### 3.1 测量方法

试样半动态流动性的测量采用小型坍落度筒作扩展度测试,动态流动性的测量采用V型漏斗(见图1)作流速测试<sup>[14-16]</sup>,扩展度为提起坍落度筒后水泥浆在水平面上的2个垂直方向的直径平均值减去坍落度筒底面直径之差;流速为V型漏斗体积与充满V型漏斗的水泥浆全部流出所需时间之比。

### 3.2 测量结果

流动性结果见表2及图2。由结果可见,水胶比一定时,水胶比较大,扩展度、流速随矿渣掺量的增加而增加;水胶比较小,扩展度增加效果并不明显,流

表2 各试样配比和流动性、过筛率、强度测试结果

Tab.2 Mix design and flowability, sieve segregation index and strength test results

配比编号 (G-矿渣掺量-水胶比)	质量配合比/(kg·m <sup>-3</sup> )				流动性		0.63 mm过筛率/%	28 d强度/MPa
	水泥	矿渣	减水剂	水	扩展度/mm	流速/(mL·s <sup>-1</sup> )		
G-0-0.60	1 083.9	0.0	3.3	650.3	197.0	72.8	67.28	11.9
G-0-0.55	1 146.0	0.0	3.4	630.3	167.0	51.8	42.81	12.0
G-0-0.50	1 215.7	0.0	3.6	607.8	137.5	25.1	17.13	15.5
G-0-0.45	1 294.4	0.0	3.9	582.5	79.0	3.2	0.37	18.2
G-0-0.40	1 383.9	0.0	4.2	553.6	18.0	0.0	0.00	20.3
G-0-0.35	1 486.8	0.0	4.5	520.4	5.5	0.0	0.00	25.0
G-5-0.60	1 028.2	54.1	3.2	649.4	222.4	75.7	77.15	13.3
G-5-0.55	1 087.0	57.2	3.4	629.3	176.4	58.3	47.24	16.3
G-5-0.50	1 153.0	60.7	3.6	606.8	143.1	28.4	25.65	18.7
G-5-0.45	1 227.5	64.6	3.9	581.4	92.7	5.8	1.02	20.7
G-5-0.40	1 312.3	69.1	4.1	552.5	4.4	0.0	0.00	25.3
G-5-0.35	1 409.6	74.2	4.5	519.3	3.5	0.0	0.00	26.2
G-10-0.60	972.7	108.1	3.2	648.4	225.2	78.3	85.34	12.7
G-10-0.55	1 028.2	114.2	3.4	628.4	189.3	69.3	65.47	16.0
G-10-0.50	1 090.5	121.2	3.6	605.8	149.5	28.9	35.98	17.8
G-10-0.45	1 160.9	129.0	3.9	580.4	96.1	5.9	5.26	19.2
G-10-0.40	1 240.9	137.9	4.1	551.5	7.3	0.0	0.00	24.4
G-10-0.35	1 332.8	148.1	4.4	518.3	7.5	0.0	0.00	26.0
G-15-0.60	917.3	161.9	3.2	647.5	220.3	86.1	76.96	12.7
G-15-0.55	969.6	171.1	3.4	627.4	206.8	65.3	65.18	16.1
G-15-0.50	1 028.3	181.5	3.6	604.9	152.3	32.6	34.71	17.0
G-15-0.45	1 094.5	193.1	3.9	579.4	93.6	6.1	3.06	19.3
G-15-0.40	1 169.8	206.4	4.1	550.5	13.0	0.0	0.00	23.9
G-15-0.35	1 256.2	221.7	4.4	517.3	6.5	0.0	0.00	25.8
G-20-0.60	862.1	215.5	3.2	646.6	239.2	90.2	78.07	12.2
G-20-0.55	911.2	227.8	3.4	626.4	212.6	75.7	62.36	15.0
G-20-0.50	966.2	241.5	3.6	603.9	164.0	37.7	26.01	16.5
G-20-0.45	1 028.3	257.1	3.9	578.4	100.7	6.0	2.79	18.8
G-20-0.40	1 098.9	274.7	4.1	549.5	9.3	0.0	0.00	21.3
G-20-0.35	1 180.0	295.0	4.4	516.2	13.5	0.0	0.00	23.6

速几乎为零. G-20-0.40配比扩展度偏小,估计为实验误差所致.

在低水胶比时,矿渣掺入对水泥-矿渣复合浆体流动性的影响较不明显.这是因为低水胶比时,浆体内部水量极少,水量只能够填充胶凝材料间空隙,而无法在填充空隙后再提供剩余水以带动胶凝材料颗粒流动.因此,浆体扩展度与流速均很小,流动性测试结果难以体现矿渣掺入对流动性的影响;高水胶比时,矿渣掺入能有效地改善浆体的流动性,这是因为矿渣颗粒体积小于水泥颗粒体积,其掺入填充了水泥颗粒间的空隙,胶凝材料的颗粒级配优化,单位体积所需水量减小.因此,相同水胶比下,矿渣掺入

提高了水泥-矿渣复合浆体流动性.

## 4 黏聚性测试

### 4.1 测量方法

本文由过筛率大小表征试样的黏聚性大小,其过筛率测量方法是把搅拌完成后的约250 g水泥-矿渣复合浆体从孔筛正上方300 mm高处倾倒,让其通过0.63 mm方孔孔筛,静置2 min让浆体通过滤筛落至下方托盘,称得托盘收集的浆体质量与所倾倒的浆体总质量的比值作为该试样的过筛率.若水泥-矿渣复合浆体黏聚性较高,则只有较少试样能够通过孔筛,过筛率较低;若浆体黏聚性较低,则有较多试

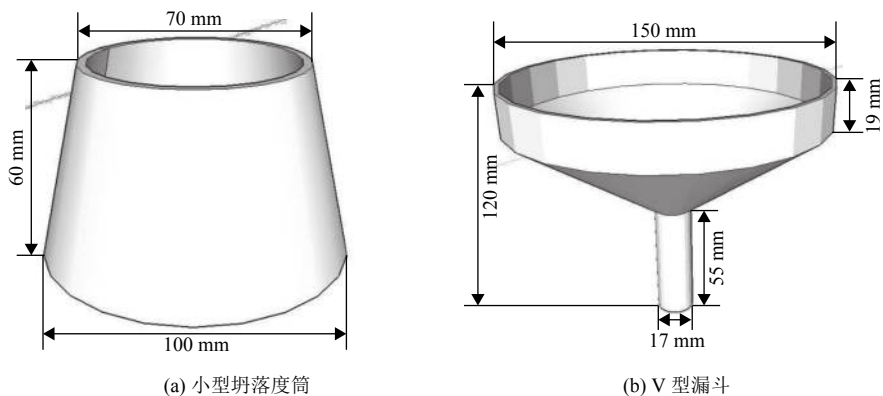


图1 小型坍落度筒和V型漏斗

Fig.1 Mini-slump cone and V funnel

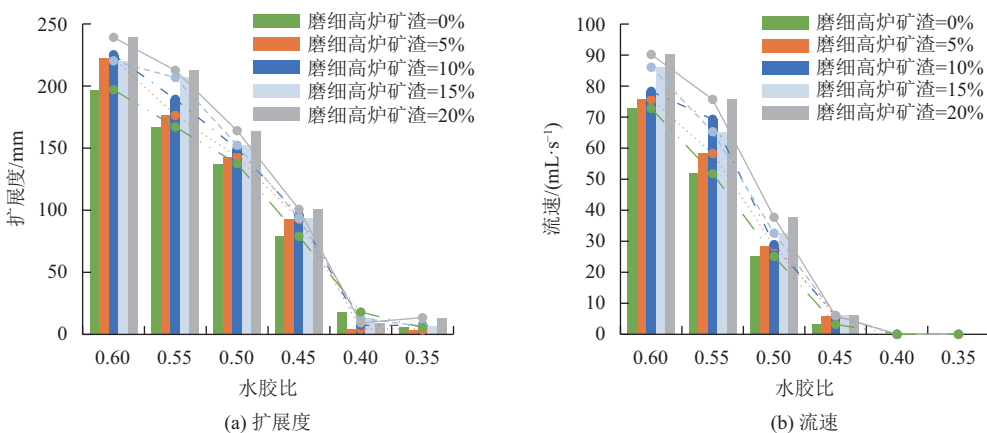


图2 扩展度和流速随磨细高炉矿渣掺量变化情况

Fig.2 Variation of flow spread and flow rate with GGBS content

样能够通过孔筛,过筛率较高。

#### 4.2 测量结果

过筛率结果见表2和图3。结果表明,水胶比一定时,过筛率随矿渣掺量的增加先增大后减小,在掺量为10%时达到最大值,与未掺矿渣的空白试样相比,掺矿渣试样的过筛率均有所提高,表明矿渣的掺入

会使黏聚性有所降低。这主要是因为矿渣的掺入提高了水泥-矿渣复合浆体的流动性能,使试样更容易通过筛孔。但矿渣的进一步掺入又可导致水泥-矿渣复合浆体颗粒间黏结性增强,当掺量较大时对于浆体黏聚性的降低有一定弥补作用。

## 5 强度测量

### 5.1 测量方法

水泥-矿渣复合浆体强度测量为将完成搅拌后的浆体倒入模具,经过振捣、抹平、成型及拆模,形成底面边长为70.7 mm立方体试块,将试块放置在温度为 $(20\pm 3)^\circ\text{C}$ 、湿度在90%以上的混凝土养护箱中,经龄期为28 d的养护。最终强度取两个相同配比试件同步测试其抗压强度的平均值。

### 5.2 测量结果

强度测量结果见表2和图4。结果表明,适量矿渣等量替代水泥会提高浆体的抗压强度,水胶比一定时,水泥-矿渣复合浆体的强度随着矿渣掺量的增加

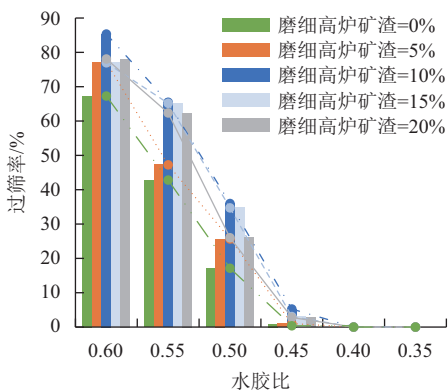


图3 0.63 mm过筛率随磨细高炉矿渣掺量变化情况

Fig.3 Variation of 0.63 mm sieve segregation index with GGBS content

先增大后减小.这主要是由于颗粒较小矿渣的掺入减小了浆体的孔隙率,增大了浆体的密实度,且矿渣能够与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次水化生成更致密的水化硅酸钙凝胶,导致浆体强度的提高.

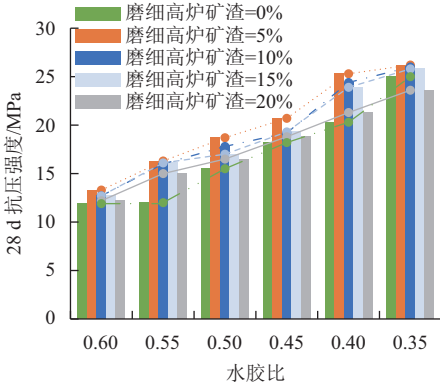


图4 28 d抗压强度随磨细高炉矿渣掺量变化情况

Fig.4 Variation of 28 d strength with GGBS content

## 6 填充密度测量

### 6.1 测量方法

胶凝材料填充密度的测量采用水测紧密值法.水测紧密值法是指在不同水量下固体颗粒组合能达到的填充率(即固体颗粒在浆体中所占体积的百分比)最大值为固体颗粒的填充密度.胶凝材料的填充率最大值出现在固体颗粒刚好能被水包裹形成湿润水泥浆的时候,此时颗粒间距最小,黏结最为紧密.当水胶比较大时,胶凝材料的固体颗粒会随充分的水量呈散布而非紧密状态,密实度降低,此时降低水胶比能提高密实度;当水胶比较小时,没有足够水把固体颗粒包裹成水泥浆,此时提高水胶比能提高胶凝材料的密实度.

本研究中采用270 mL不锈钢杯作填充密度测试仪器.测试时先称量空杯质量,把掺待测试比例矿渣的胶凝材料与逐步调高的不同水量搅拌,每次水量搅拌下形成的浆体用不锈钢勺逐层填入不锈钢杯直至完全填满,用不锈钢刮刀刮平浆体表面.称量盛满浆体的杯子质量,按比例计算胶凝材料体积,从而求得胶凝材料填充率.在无实验经验的情况下,可以先投入胶凝材料再逐渐加水充分搅拌,直到试验品出现浆体而不再呈粉状时,以此水胶比为起点,开始测量胶凝材料在浆体中的填充率 $P$ ,则有

$$V_c = PVR_c, V_g = PVR_g, \quad (1)$$

$$M = M_c + M_g + M_w, \quad (2)$$

$$M_c = V_c \rho_c, M_g = V_g \rho_g, M_w = PV v_w \rho_w. \quad (3)$$

其中 $M$ 为水泥-矿渣复合浆体的质量(g), $V$ 为容器的体积( $\text{cm}^3$ ), $V_c$ 、 $V_g$ 分别为水泥、矿渣的体积( $\text{cm}^3$ ), $M_c$ 、 $M_g$ 、 $M_w$ 分别为水泥、矿渣、水的质量(g), $R_c$ 、 $R_g$ 为水泥和矿渣占总胶凝材料的体积分数, $v_w$ 为体积水胶比, $\rho_c$ 、 $\rho_g$ 、 $\rho_w$ 为水泥、矿渣和水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).由式(1)~(3)可推出

$$P = \frac{V_s}{V} = \frac{M/V}{R_c \rho_c + R_g \rho_g + v_w \rho_w}, \quad (4)$$

其中 $V_s$ 为胶凝材料的总体积( $\text{cm}^3$ ).逐步调大水胶比,重复测量胶凝材料填充率,直至出现填充率随着水胶比的增大而逐渐减小.在整个过程中测得的最大填充率 $P_{\max}$ 即为该胶凝材料的填充密度.该水测紧密值法能模拟出固体颗粒在浆体中的紧密或分散状态,考虑到了空气、水、减水剂的影响,比以往填充密度的干测量法更为准确.

### 6.2 测量结果

胶凝材料填充密度测量结果见表3.结果表明,矿渣的掺入会显著提高胶凝材料的填充密度,随着掺量的不断增大,提高速率趋于平缓.

表3 各试样填充密度测试结果

Tab.3 Packing density test results

矿渣掺量/%	填充密度
0	0.506
5	0.529
10	0.533
15	0.533
20	0.534

## 7 水膜厚度的计算方法

在取得胶凝材料的填充密度后,水膜厚度可通过式(5)~(9)计算<sup>[17]</sup>:

$$T = \frac{W_e}{A}, \quad (5)$$

$$W_e = V_w - V_p, \quad (6)$$

$$V_p = \frac{M_c/\rho_c + M_g/\rho_g}{P_{\max}} - (M_c/\rho_c + M_g/\rho_g), \quad (7)$$

$$A = \frac{M_c A_c}{\rho_c} + \frac{M_g A_g}{\rho_g}, \quad (8)$$

$$A_c = \rho_c S_c, A_g = \rho_g S_g. \quad (9)$$

其中 $T$ 为水膜厚度( $\mu\text{m}$ ), $W_e$ 为剩余水体积(mL), $A$ 为胶凝材料的总表面积( $\text{m}^2$ ), $V_w$ 为试样的实际用水体积(mL), $V_p$ 为颗粒间空隙体积(mL), $M_c$ 、 $M_g$ 分别为试样中所用水泥和矿渣的实际质量(g),

$\rho_c$ 、 $\rho_g$ 为水泥和矿渣的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $P_{\max}$ 为胶凝材料的填充密度,  $A_c$ 、 $A_g$ 为水泥和矿渣的单位体积的表面积 ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ).  $S_c$ 、 $S_g$ 为水泥和矿渣的比表面积 ( $\text{m}^2/\text{kg}$ ). 本水膜厚度计算方法考虑了重要的水量、胶凝材料填充密度、胶凝材料总表面积3个因素的影响, 未考虑胶凝材料吸收水分的微小影响.

水膜厚度随填充密度、胶凝材料总表面积的变化

情况见表4和图5. 结果表明, 相同水胶比下, 水膜厚度随填充密度的增大而增大, 相同矿渣掺量下, 水膜厚度随胶凝材料总表面积的增大而减小, 揭示了水膜厚度变化是受填充密度和胶凝材料总表面积相互制约的结果. 水膜厚度随矿渣掺量的增大而增大, 因此矿渣的掺入对填充密度增大的影响大于对总表面积增大的影响.

表4 水泥浆试样总表面积、空隙体积、剩余水体积、水膜厚度

Tab.4 Total surface area, pore volume, excess water volume and water film thickness of cement paste samples

配比编号 (G-矿渣量-水胶比)	填充密度	水泥和矿渣总表面积/ $\text{m}^2$	水泥和矿渣的空隙体积/ $\text{mL}$	剩余水体积/ $\text{mL}$	水膜厚度/ $\mu\text{m}$
G-0-0.60	0.506	469.47	290.15	262.64	0.559
G-0-0.55		496.37	306.78	228.99	0.461
G-0-0.50		526.54	325.43	191.24	0.363
G-0-0.45		560.62	346.49	148.60	0.265
G-0-0.40		599.41	370.47	100.07	0.167
G-0-0.35		643.97	398.01	44.32	0.069
G-5-0.60	0.529	472.85	265.34	286.65	0.606
G-5-0.55		499.90	280.52	254.42	0.509
G-5-0.50		530.24	297.54	218.28	0.412
G-5-0.45		564.49	316.76	177.46	0.314
G-5-0.40		603.48	338.64	131.01	0.217
G-5-0.35		648.25	363.77	77.67	0.120
G-10-0.60	0.533	476.22	261.82	289.36	0.608
G-10-0.55		503.42	276.77	257.34	0.511
G-10-0.50		533.92	293.54	221.43	0.415
G-10-0.45		568.36	312.47	180.89	0.318
G-10-0.40		607.54	334.01	134.76	0.222
G-10-0.35		652.52	358.75	81.81	0.125
G-15-0.60	0.533	479.58	262.52	287.85	0.600
G-15-0.55		506.93	277.50	255.79	0.505
G-15-0.50		537.60	294.28	219.85	0.409
G-15-0.45		572.21	313.23	179.28	0.313
G-15-0.40		611.58	334.78	133.13	0.218
G-15-0.35		656.77	359.52	80.15	0.122
G-20-0.60	0.534	482.93	262.17	287.40	0.595
G-20-0.55		510.43	277.10	255.36	0.500
G-20-0.50		541.26	293.83	219.45	0.405
G-20-0.45		576.04	312.72	178.93	0.311
G-20-0.40		615.60	334.20	132.84	0.216
G-20-0.35		661.00	358.84	79.95	0.121

## 8 水膜厚度对水泥浆流动性的影响

水膜厚度对扩展度的影响示于图6. 回归分析结果表明, 水膜厚度单一参量与流速、扩展度的相关系数平方 $R^2$ 分别已经达到0.954、0.948. 由此可见, 水泥-矿渣复合浆体的半动态流动性能扩展度、动态流动

性能流速的大小主要控制因素均是水膜厚度的大小. 水膜厚度提高时流动性增大, 水膜厚度下降则流动性减小, 此现象与图2、图5相吻合.

从水膜厚度的计算方法及其对水泥浆流动性的影响可得知, 矿渣对水泥-矿渣复合浆体流动性的影响体现在对其填充密度和比表面积的改变, 综合体

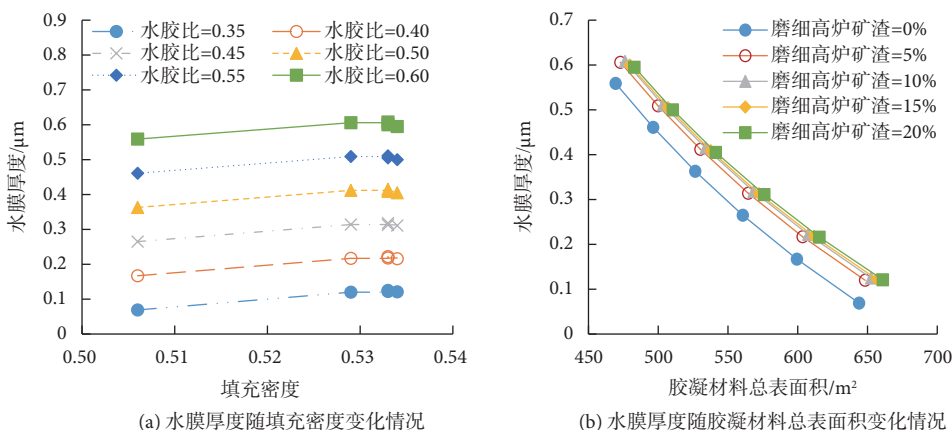


图5 水膜厚度随填充密度、胶凝材料总表面积变化的情况

Fig.5 Variation of water film thickness with packing density, specific surface area

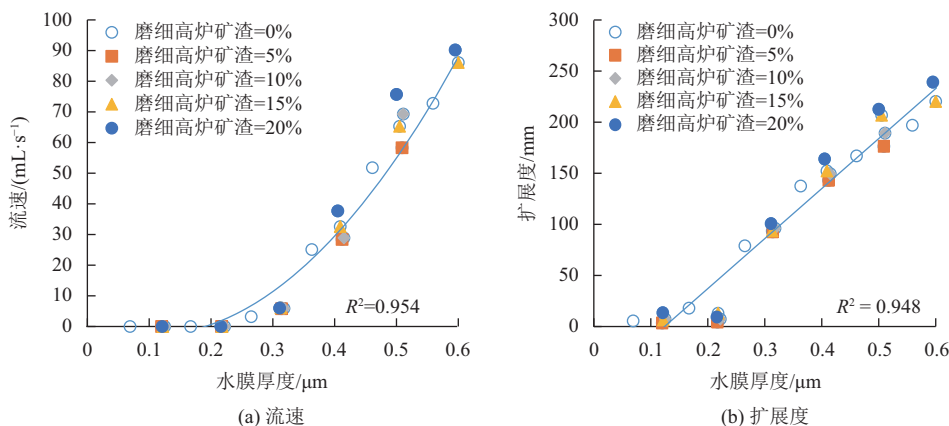


图6 扩展度、流速随水膜厚度变化情况

Fig.6 Variation of flow spread and flow rate with water film thickness

现在对水膜厚度的改变。

## 9 结论

本研究通过对30组不同矿渣掺量水泥-矿渣复合浆体流动性、0.63 mm过筛率、28 d强度和5组胶凝材料填充密度的测量和水膜厚度的计算,得到的主要结论如下:

(1) 水胶比一定时,水泥-矿渣复合浆体的流动性随矿渣掺量的增加而增大,对流速增强效果大于对扩展度增强效果,扩展度最大增加幅度为27.3%,流速增加幅度最大为46.1%。

(2) 水泥-矿渣复合浆体的0.63 mm过筛率随矿渣掺量的增加先增大后减小,在掺量为10%时达到最大值。掺入矿渣的试样与空白样相比,黏聚性均有所降低。

(3) 矿渣对水泥-矿渣复合浆体的强度呈正向影响,影响程度随矿渣掺量先增大后减小,在掺量5%时达到最大值,最大增加幅度为34.17%。

(4) 胶凝材料的填充密度随着矿渣掺量的增加而增大。浆的水膜厚度可在测得胶凝材料的填充密度后,通过式(5)量化。

(5) 矿渣的掺入对水泥-矿渣复合浆体流动性的影响主要体现在对其胶凝材料总表面积和填充密度的改变。水膜厚度可以量化填充密度和总表面积的综合影响,水膜厚度每增大0.1 μm,试样扩展度增大48.9 mm,流速增大21.1 mL/s。

实验结果表明用矿渣等量置换水泥能在有效减少水泥用量下显著提高水泥浆的流动性和抗压强度,但同时会降低其黏聚性。最优矿渣掺量在5%左右,此时强度最大,流动性综合性能也有所提高。基于本研究得到的结果,矿渣的应用可使混凝土流动性增加以便于施工的进行,可使强度提高以减少混凝土用量,可通过减少水泥用量降低单位混凝土量生产成本、减小环境污染。矿渣为配制高流动性绿色混凝土的良好掺和料。

## 参考文献:

- [1] PAL S C, MUKHERJEE A, PATHAK S R. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(9): 1481-1486.
- [2] HAWILEH R, ABDALLA J, FARDMANESH F, *et al.* Performance of reinforced concrete beams cast with different percentages of GGBS replacement to cement [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2017, 17(3): 511-519.
- [3] 王强, 黎梦圆, 石梦晓. 水泥-钢渣-矿渣复合胶凝材料的水化特性[J]. *硅酸盐学报*, 2014, 42(5): 629-634.
- WANG Q, LI M Y, SHI M X. Hydration properties of cement-steel slag-ground granulated blast furnace slag complex binder [J]. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 2014, 42(5): 629-634.
- [4] 李胜男. 掺矿渣粉混凝土的架构理论研究[D]. 大连: 大连理工大学建筑与土木工程学院, 2013.
- [5] 杨文武, 钱觉时, 范英儒. 磨细高炉矿渣对海工混凝土抗冻性和氯离子扩散性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2009, 37(1): 29-34.
- YANG W W, QIAN J S, FAN Y R. Effect of ground granulated blast furnace slag on both frost-resistance and chloride ions diffusion properties of marine concrete [J]. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 2009, 37(1): 29-34.
- [6] 张武满, 巴恒静. 磨细高炉矿渣和硅灰对重复荷载作用下混凝土氯离子透过性的影响[J]. *中国科学: 技术科学*, 2012, 42(12): 1449-1455.
- ZHANG W M, BA H J. Effect of ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) and silica fume (SF) on chloride migration through concrete subjected to repeated loading [J]. *Science China Technology Science*, 2012, 42(12): 1449-1455.
- [7] 李建勇, 姚燕, 田培. 利用超细矿渣和硅灰配制高性能混凝土的研究[J]. *混凝土*, 1997(4): 12-22.
- [8] 朱江. 聚丙烯纤维在高性能混凝土中的应用[J]. *广东工业大学学报*, 2000, 17(3): 15-18.
- ZHU J. The application of polypropylene fiber in high performance concrete[J]. The application of polypropylene fiber in high performance concrete [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2000, 17(3): 15-18.
- [9] 罗金, 余本胜, 查进. 磨细矿渣配制大体积混凝土和高强混凝土的试验研究[J]. *煤炭工程*, 2006(1): 78-81.
- LUO J, YU B S, ZHA J. Research on test of large volume concrete and high concrete with fine ground slag [J]. *Coal Engineering*, 2006(1): 78-81.
- [10] 刘仍光. 水泥-矿渣复合胶凝材料的水化机理与长期性能[D]. 北京: 清华大学土木工程学院, 2013.
- [11] 刘仍光, 阎培渝. 水泥-矿渣复合胶凝材料中矿渣的水化特性[J]. *硅酸盐学报*, 2012, 40(8): 1112-1118.
- LIU R G, YAN P Y. Hydration characteristics of slag in cement-slag complex binder [J]. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 2012, 40(8): 1112-1118.
- [12] 姚立红, 李瑞林, 刘生超, 等. 水泥净浆流动度与混凝土流动性能相关性研究[J]. *水泥工程*, 2016(6): 20-21.
- [13] 武斌. 水泥净浆和砂浆流动度与混凝土流变性能相关性试验[J]. *广东建材*, 2016, 32(9): 63-65.
- [14] AITCIN P C. *High-performance Concrete*[M]. London (UK): E & FN Spon, 1998.
- [15] OKAMURA H, OUNCJI M. Self-compacting concrete [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, 1(1): 5-15.
- [16] British Standards Institution. BS EN 445: Grout for Prestressing Tendons-Test Methods[M]. London (UK): BSI, 1997.
- [17] 陈嘉健, 雷元新, 徐畏婷, 等. 水泥浆水膜厚度的计算及在流动性中的影响[J]. *佛山科学技术学院学报(自然科学版)*, 2014, 32(3): 49-56.
- CHEN J J, LEI Y X, XU W T, *et al.* Calculation of water film thickness and the effects on rheology [J]. *Journal of Foshan University (Natural Science Edition)*, 2014, 32(3): 49-56.