

# 矿粉对水泥和混凝土性能的影响

张 芳<sup>1</sup>,温超凯<sup>1</sup>,张 林<sup>2</sup>,王 军<sup>3\*</sup>

(1. 武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430074;

2. 广东生之源数码电子股份有限公司,广东 佛山 528000;

3. 中建商品混凝土有限公司,湖北 武汉 430074)

**摘 要:**为了探寻矿粉细度及掺入量对水泥和混凝土性能的影响,通过试验测试方法,分析了矿粉和水泥的基本性质,研究了超细矿粉和普通矿粉的掺量对水泥基材料标准稠度、凝结时间、流动度和力学性能的影响。结果表明:普通矿粉使水泥净浆标准稠度需水量下降,而超细矿粉则增加标准稠度需水量,两种矿粉都使水泥净浆凝结时间略微延长。普通矿粉可以改善水泥净浆的流动度,超细矿粉的加入则降低了水泥净浆的流动度。普通矿粉和超细矿粉降低水泥净浆早期(7 d)抗压强度,提高后期(28 d)抗压强度,掺 10%~50% 的普通矿粉的水泥净浆 28 d 抗压强度提高 2.9%~9.7%,掺入超细矿粉 28 d 抗压强度提高 3.9%~20.1%,普通矿粉和超细矿粉的最佳掺量为 10%~30%;两种矿粉替代 10%~50% 水泥所配制的混凝土的强度得到了明显的提高。

**关键词:**超细矿粉;普通矿粉;流动度;力学性能

**中图分类号:**TU 528

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2013.11.010

## 0 引 言

随着建筑物高层、大跨度、轻量化,使高性能混凝土的开发和应用得到快速发展,对混凝土的性能也提出了越来越高的要求。吴中伟院士认为,高性能混凝土是一种新型高技术混凝土,是在大幅提高普通混凝土性能的基础上采用现代混凝土技术配制而成。其以耐久性作为设计的主要指标,同时还要保证工作性、适用性、强度、体积稳定性和经济性<sup>[1]</sup>。在配制混凝土时,加入一定量矿物掺合料不仅可以节约水泥,节约成本,而且由于掺合料的形态效应、微集料效应和火山灰效应,对改善混凝土的工作性能,改善混凝土的内部结构和提高混凝土的力学性能有着显著的作用<sup>[2-6]</sup>。通常使用的掺合料多为活性矿物掺合料,由于它能够改善混凝土拌合物的和易性,或能够提高混凝土硬化后的密实性、抗渗性和强度等,因此目前较多的土木工程中都或多或少地应用活性矿物掺合料<sup>[7]</sup>。特别是随着预拌混凝土、泵送混凝土技术的发展应用,以及环境保护的要求,在混凝土中使用矿物掺合料将愈加广泛。如粒化高炉矿渣、火山灰

质材料、粉煤灰和硅灰等。

本文研究最常用的矿物掺合料—矿粉对水泥净浆稠度、凝结时间、流动度和力学性能的影响。矿粉选用超细矿粉和普通矿粉,对比研究超细矿粉和普通矿粉对水泥净浆及混凝土性能的影响。

## 1 实 验

### 1.1 原料

水泥:水泥为华新水泥厂产 P. O42.5 普通硅酸盐水泥,密度 3.14 g/cm<sup>3</sup>,勃氏比表面积 3 320 cm<sup>2</sup>/g,化学成分见表 1,主要技术指标见表 2。

表 1 42.5 普通硅酸盐水泥的化学成分

Table 1 Chemical components of ordinary portland cement					
成分	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
w/%	67.3	2.1	22.3	0.01	3.3

表 2 42.5 硅酸盐水泥的性能

Table 2 The performances of ordinary portland cement						
项目	抗压强度/ MPa		抗折强度/ MPa		标准稠度 用水量/%	凝结时间/ min
	3 d	28 d	3 d	28 d		初凝 终凝
指标	26.5	50.2	6.1	9.3	25.3	192 294

矿粉:中建商品混凝土公司生产 S95 级矿粉,

收稿日期:2013-09-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51374155)

作者简介:张 芳(1973-),女,吉林通化人,副教授,博士。研究方向:无机非金属材料方面的应用与研究。

\* 通信作者:王 军,男,教授级高工,博士。研究方向:无机非金属材料方面的应用与研究。

其烧失量 0.71%, $\text{Cl}^-$  质量分数 0.032%, $\text{SO}_3$  质量分数 0.18%,流动度比 101%,密度  $2.8\text{ g/cm}^3$ ,7 d 活性指数 71,28 d 活性指数 96,勃氏比表面积  $4\,600\text{ cm}^2/\text{g}$ .

超细矿粉:天津市渔阳超细矿粉加工有限公司,其烧失量 0.81%, $\text{Cl}^-$  质量分数 0.003%,密度  $2.9\text{ g/cm}^3$ ,勃氏比表面积  $9\,200\text{ cm}^2/\text{g}$ ,细度范围  $0.13\sim14.01\text{ }\mu\text{m}$ .

表 3 粒度特征参数

Table 3 Grain-size parameters

项目	D10	D25	D50	D75	D90
粒径/ $\mu\text{m}$	1.03	1.95	4.03	5.50	8.00

砂:细度模数 2.58,含泥质量分数 1.0%,泥块质量分数 0%,表观密度  $2\,700\text{ kg/m}^3$ .

石:颗粒粒级 5~25 mm,含泥质量分数 1.0%,泥块质量分数 0.1%,压碎指标 4.1%.

减水剂:中建商品混凝土有限公司生产聚羧酸减水剂.

## 1.2 试验配合比

试验用超细矿粉和普通矿粉对水泥净浆标准稠度、凝结时间影响的配比见表 4;超细矿粉和普通矿粉对水泥净浆和混凝土抗压强度影响的配比分别见表 5 和表 6.

表 4 水泥净浆标准稠度、凝结时间各原材料配比

Table 4 The raw materials ratio of cement paste's normal consistency and setting time

编号	水泥/g	超细矿粉/g	普通矿粉/g
A0	500	0	0
A1	450	0	50
A2	350	0	150
A3	250	0	250
A4	450	50	0
A5	350	150	0
A6	250	250	0

表 5 水泥净浆抗压强度各原材料配比

Table 5 The raw materials ratio of cement paste compressive strength test

编号	水泥/g	普通矿粉/g	超细矿粉/g	水/g	减水剂/g
S0	800	0	0	240	8
S1	720	80	0	240	8
S2	560	240	0	240	8
S3	400	400	0	240	8
S4	720	0	80	240	8
S5	560	0	240	240	8
S6	400	0	400	240	8

表 6 混凝土抗压强度各原材料配比

Table 6 The raw materials ratio of concrete compressive strength test

编号	水泥/kg	普通矿粉/kg	超细矿粉/kg	砂/kg	粉煤灰/kg	石/kg	减水剂/kg	水/kg
H0	400	0	0	625	100	1 160	4	120
H1	360	40	0	625	100	1 160	4	120
H2	280	120	0	625	100	1 160	4	120
H3	200	200	0	625	100	1 160	4	120
H4	360	0	40	625	100	1 160	4	120
H5	280	0	120	625	100	1 160	4	120
H6	200	0	200	625	100	1 160	4	120

## 2 结果与讨论

### 2.1 超细矿粉和普通矿粉对水泥标准稠度和凝结时间的影响

普通矿粉和超细矿粉的掺入对水泥净浆标准稠度的影响如图 1(a)所示,从图 1(a)可以看出:  
**a.** 普通矿粉等量取代水泥,随着普通矿粉取代量的增大,水泥浆体标准稠度需水量减小,当普通矿粉的取代量达到 30%时,继续增大普通矿粉的取代量到 50%,水泥浆体标准稠度需水量不再改变,

普通矿粉的掺入,虽然可以在一定程度上减小水泥浆体标准稠度需水量,但效果并不明显;  
**b.** 超细矿粉等量取代水泥后,增大水泥浆体的标准稠度需水量,且随超细矿粉取代量的增大,水泥浆体标准稠度需水量越大.

普通矿粉等量取代水泥后,由于普通矿粉的细度比水泥颗粒细,普通矿粉的填充作用和微集料效应使普通矿粉填充在水泥颗粒的空隙中,置换出中间的水分,因而使拌合物的表面水量相应增加,增加了水泥颗粒的润滑作用,促进了浆体流

动性的改善,所以普通矿粉取代等量水泥,减小标准稠度需水量。超细矿粉的比表面积比较大,在取代等量的水泥后,超细矿粉之间的摩擦比较大,细度过小增大对水的需要量,达到标准稠度需水量比较大,从而增大标准稠度的需水量。

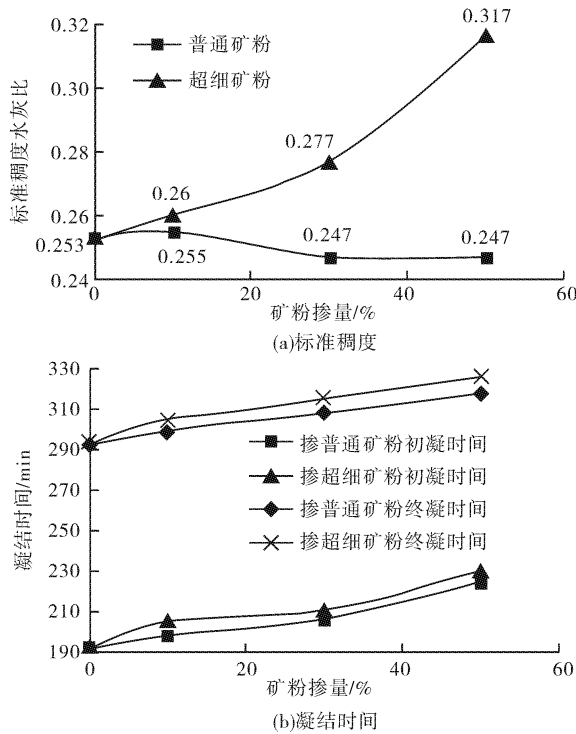


图 1 矿粉对水泥净浆标准稠度和凝结时间的影响

Fig. 1 Effect of slag on the normal consistency and setting time of cement paste

表 7 矿粉对水泥净浆流动度的影响

Table 7 Effect of slag on the fluidity of cement paste

编号	水泥/g	普通矿粉/g	超细矿粉/g	水/g	减水剂/g	流动度/mm		
						0 min	30 min	60 min
L0	500	0	0	250	2	225	220	212
L1	450	50	0	250	2	243	200	205
L2	350	150	0	250	2	260	220	235
L3	250	250	0	250	2	270	235	240
L4	450	0	50	250	2	218	200	207
L5	350	0	150	250	2	181	155	155
L6	250	0	250	250	2	144	132	122

较大,对水泥浆体的流动度起主要作用,随超细矿粉掺量的增加,超细矿粉之间的摩擦力逐渐增大,水泥浆体的流动度逐渐减小。所以普通矿粉可以改善水泥浆体的流动度,超细矿粉减小水泥浆体的流动度。

### 2.3 超细矿粉和普通矿粉对水泥净浆力学性能的影响

矿粉等量取代水泥后,会造成水泥体系发生

图 1(b)为两种矿粉对水泥浆体凝结时间的影响,从图 1(b)可以看出:a.两种矿粉的掺入都增大水泥浆体的初凝时间和终凝时间,随着两种矿粉掺量的增加,水泥浆体的凝结时间逐渐增加;b.超细矿粉比普通矿粉对水泥浆体凝结时间的影响略大,但两种矿粉对水泥浆体的初凝和终凝时间的影响都较小。

### 2.2 超细矿粉和普通矿粉对水泥净浆流动度的影响

从表 7 可以看出,随着普通矿粉掺量的增大,水泥浆体的流动度逐渐增大。在 30 min 时,掺入普通矿粉水泥浆体的流动度出现下降,在 60 min 时,水泥浆体的流动度略有回升。由于普通矿粉的比表面积大,颗粒较小,在水泥胶凝体系中,水泥颗粒之间存在一定的空隙,这部分空隙需要一定量的水来填充,用矿粉取代一定量的水泥后,矿粉将填充在水泥颗粒之间的空隙中,释放出水泥颗粒之间包裹的自由水,从而增大水泥浆体中的自由水,对水泥颗粒之间起到一定的润滑作用,从而增大水泥浆体的流动度。

超细矿粉的掺入使水泥浆体的流动度大幅减小,掺量越大,水泥浆体的流动度越低。随着时间的延长水泥浆体的流动度逐渐降低。超细矿粉的比表面积大,颗粒相对水泥颗粒小很多,对水具有比水泥颗粒较大的吸附能力,超细矿粉掺入后,由于超细矿粉吸附较多的水和减水剂。另外超细矿粉是具有胶凝性的无定性颗粒,颗粒间的滑动阻力

一些变化,从而导致强度发生变化。图 2 为矿粉对水泥浆体强度的影响。

图 2 可以看出,掺入两种矿粉水泥净浆的 7 d 抗压强度均低于纯水泥体系。水泥的凝结硬化主要取决于水泥熟料的主要矿物成分及其含量,普通矿粉取代等量的水泥后,造成水泥净浆中  $C_3S$  的含量相对降低,因为  $C_3S$  的水化速率快,对水泥的早期强度起到主要作用。随着水化的进行,矿粉

的火山灰活性和微填充效应逐渐发挥,普通矿粉的掺入可以改善水泥净浆的微观结构,使水泥浆体更加密实,促进水泥浆体后期抗压强度的提高<sup>[8]</sup>.图 2(a)为普通矿粉对水泥净浆强度的影响.普通矿粉的 28 d 抗压强度普遍高于纯水泥体系.

图 2(b)为超细矿粉对水泥浆体强度的影响.超细矿粉掺入后,水泥净浆早期抗压强度比普通矿粉掺入的早期抗压强度有所提高,但其 7 d 抗压强度低于纯水泥体系.28 d 抗压强度普遍大于纯水泥体系.超细矿粉取代 30% 的水泥时,28 d 抗压强度最好.由于超细矿粉的潜在水硬性对水泥的水化起到微晶核作用,使超细矿粉的活性被激发,减少氢氧化钙的含量,加速水泥的水化,使结构更加密实.

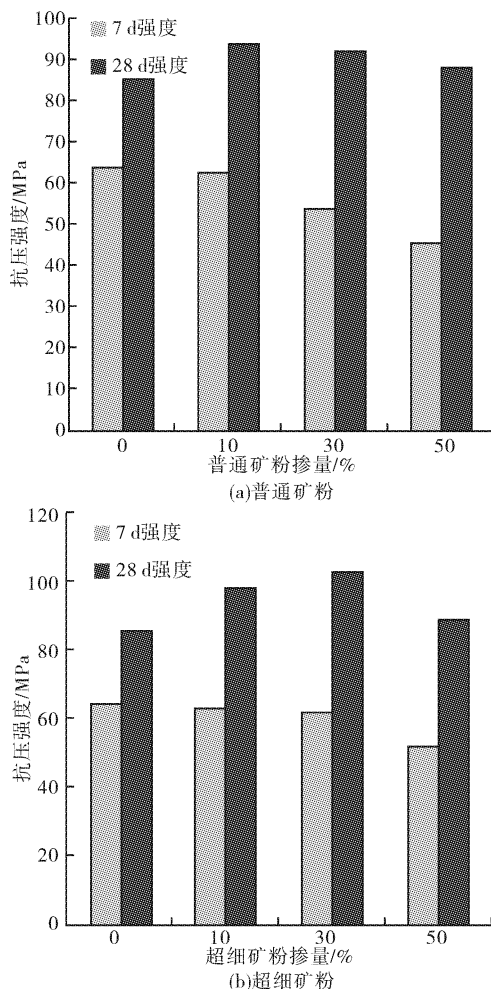


图 2 矿粉对水泥净浆力学性能的影响

Fig. 2 Effect of slag on the mechanical properties of cement paste

#### 2.4 超细矿粉和普通矿粉对混凝土早期力学性能的影响

图 3 为矿粉对混凝土强度的影响.由图 3(b)看出,掺入普通矿粉,混凝土的 7 d 抗压强度在掺量为 10% 时最大,养护 14 d 时混凝土的抗压强度

在掺量为 30% 时最大.由图 3(a)看出,掺入超细矿粉,掺量 30% 时 7 d 抗压强度最大,而掺量为 10% 的 14 d 抗压强度最大.两种矿粉都可增大混凝土的早期抗压强度,7 d 抗压强度增长较快,14 d 抗压强度相对 7 d 抗压强度则增长较慢.混凝土的早期抗压强度增长快,后期抗压强度增长缓慢.

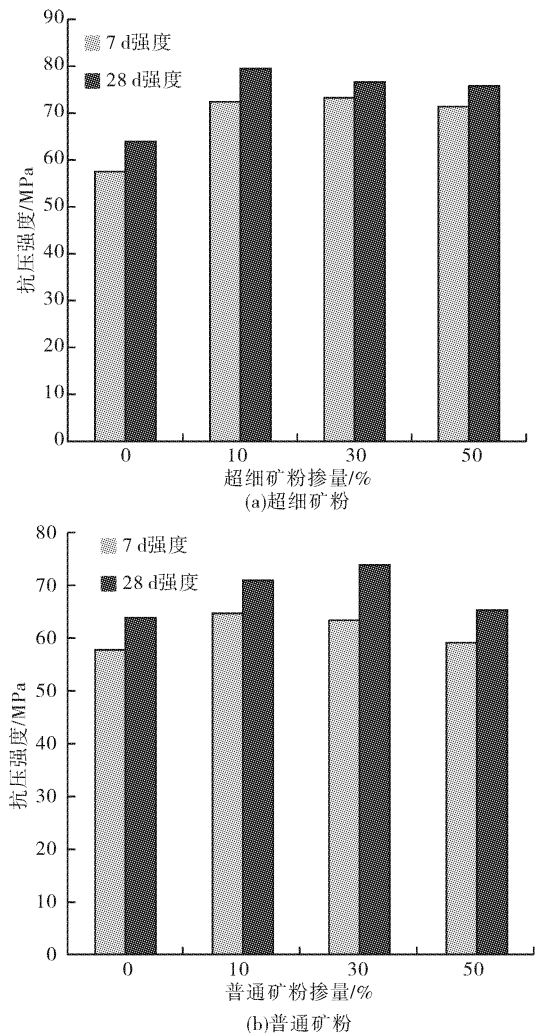


图 3 矿粉对混凝土力学性能的影响

Fig. 3 Effect of slag on the mechanical properties of concrete

矿粉对混凝土强度的影响和对净浆、砂浆强度的影响有一定的区别.矿粉作为掺合料在混凝土中,具有潜在水硬性、火山灰效应和微集料效应<sup>[2]</sup>,与水泥组成二元复合胶凝材料,能提高水泥石与骨料界面粘结强度及改善水泥浆体的孔结构,在同时掺入高效减水剂后,在较低水胶比条件下,能制得密实性和强度较高的混凝土.

矿粉的加入可以改善水泥石和石子界面过渡层结构.由于石子和水泥石界面被认为是最薄弱的环节;因此,界面结构的改善能提高混凝土的力学性能.界面过渡层中,靠近集料一边的是  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,而  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  在界面附近的存在对混凝土

土的强度是有害的. 加入矿粉能够使过渡层厚度减弱,并能以网状结构的水化物代替片状结构的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,这对提高界面之间的强度是有利的<sup>[1,9]</sup>. 因此矿粉的存在可以提高混凝土的强度.

### 3 结 语

综上所述,得到结论如下:

a. 普通矿粉可以降低水泥浆体标准稠度需水量,未掺入矿粉时,标准稠度水灰比为 0.253,普通矿粉掺量达到 30% 时,标准稠度水灰比为 0.247,继续增大普通矿粉掺量,水泥标准稠度不变;超细矿粉增大水泥标准稠度需水量,当掺量达到 50% 时,标准稠度需水量达到 0.317;超细矿粉和普通矿粉掺入都能增大水泥浆体的初凝和终凝时间,但影响不大;

b. 在 0.5 水灰比下,普通矿粉可以改善水泥浆体的流动度,矿粉掺量增大到 50%,流动度增大到 270 mm;超细矿粉掺入使水泥浆体流动度降低,掺量越大,流动度越小,掺量到 50% 时,流动度降低到 144 mm;

c. 未掺加矿粉的水泥净浆 7 d 抗压强度为 64 MPa,28 d 抗压强度为 85.6 MPa,掺入两种矿粉,7 d 抗压强度普遍低于纯水泥体系,28 d 抗压强度普遍高于纯水泥体系,普通矿粉和超细矿粉掺量在 10%~30% 效果最好,掺入超细矿粉 28 d 抗压强度达到 102.8 MPa,掺入普通矿粉 28 d 抗压强度也达到 93.8 MPa;

d. 基准混凝土的 7 d 抗压强度为 57.8 MPa,14 d 抗压强度为 63.9 MPa. 掺入两种矿粉混凝土的 7 d 和 14 d 抗压强度普遍提高,对超细矿粉,掺量在 10%~30% 时效果最好,7d 最高抗压强度达到 73.4 MPa,14 d 抗压强度达到 79.4 MPa,继续增大掺量,混凝土强度降低;普通矿粉掺量 10%~30% 时效果最好,7 d 最高抗压强度达到 64.9 MPa,14 d 抗压强度达到 73.8 MPa;在最佳掺量范围内,掺入超细矿粉混凝土抗压强度大于掺入普通矿粉,普通矿粉和超细矿粉都能增大混凝土的抗压强度.

### 致 谢:

感谢国家自然科学基金委员会的资金资助.

### 参考文献:

[1] 吴中伟,廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京:中国铁道

出版社,1999,73-95.

WU Zhong-wei, LIAN Hun-zhen. High performance concrete[M]. Bei Jing: China Railway Publishing House, 1999, 73-95. (in Chinese)

[2] 潘钢华,孙伟,张亚梅. 活性混合材微集料效应的理论和试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 1997(6): 23-25.

PAN Gang-hua, SUN Wei, ZHANG Ya-mei. Theoretical and experimental research on the Micro-aggregate effect of active admixture [J]. China Concrete and Cement Products. 1997(6):23-25. (in Chinese)

[3] 沈旦申,张荫剂. 粉煤灰效应的探究[J]. 硅酸盐学报, 1981,9(1):57-63.

SEN Dan-shen, ZHANG Yin-ji. A study of the effect of fly ash[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 1981,9(1):57-63. (in Chinese)

[4] WANG Ai-qin, ZHANG Cheng-zhi, SUN Wei. Fly ash effects I. The morphological effect of fly ash [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(12): 2023-2027.

[5] WANG Ai-qin, ZHANG Cheng-zhi, SUN Wei. Fly ash effects II: The Active Effect of Fly Ash [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(12): 2057-2060.

[6] WANG Ai-qin, ZHANG Cheng-zhi, SUN Wei. Fly ash effects III: The Microaggregate Effect of Fly Ash [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(11): 2061-2066.

[7] 张秀芝,孙伟. 活性矿物掺合料对超高性能水泥基材料的影响[J]. 深圳大学学报:理工版, 2008(10): 338-340.

ZHANG Xiu-zhi, SUN Wei. Influence of reactive mineral admixtures on microstructure of ultra-high performance cementitious composites[J]. Journal of Shenzhen University: Science and Engineering, 2008(10):338-340. (in Chinese)

[8] 夏传亮. 矿粉在混凝土中的应用研究[J]. 福建建材, 2005(2):6-7.

XIA Chuan-liang. Study on application of slag to concrete[J]. Fujian Building Materials, 2005(2): 6-7. (in Chinese)

[9] 杨雷,马保国,管学茂. 超细矿粉对高强混凝土抗渗性能的影响[J]. 商品混凝土, 2007(2):52-54.

YANG Lei, MA Bao-guo, GUAN Xue-mao. Effect of ultrafine slag on impermeability of high concrete [J]. Ready-Mixed Concrete, 2007(2): 52-54. (in Chinese)

## Effect of slag powder on properties of concrete and cement

*ZHANG Fang*<sup>1</sup>, *WEN Chao-kai*<sup>1</sup>, *ZHANG Lin*<sup>2</sup>, *WANG Jun*<sup>3</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Guangdong SZY Digital Electronics Co., Ltd., Foshan 528000, China;

3. China Construction Ready Mixed Concrete Co., Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To explore the influence of fineness and dosage of slag on cement and concrete, the basic properties of slag and cement were analyzed, such as the normal consistency, setting time, fluidity and mechanical properties of cement and concrete by adding ultrafine slag and ordinary slag. The results show that the water requirement for normal consistency of cement paste decreases by using ordinary slag, increasing by using ordinary slag; both of them slightly postpone the setting time of cement paste; ordinary slag improves the fluidity of cement paste, while the ultrafine slag reduces the fluidity of cement paste; the early (7 d) compressive strength of cement paste decreases and the later (28 d) compressive strength of cement paste increases when ordinary slag and ultrafine slag are added; the 28 d compressive strength of cement paste added 10%-50% ordinary slag is improved by 2.9%-9.7%, while it is improved by 3.9%-20.1% after adding ultrafine slag; the optimal replaceable content of ordinary slag and ultrafine slag is 10%-30%, and the compressive strength of concrete is enhanced greatly when the two kinds of slag are added to 10%-50%, respectively.

**Key words:** ultrafine slag; ordinary slag; fluidity; mechanical property

本文编辑: 龚晓宁