

文章编号:1671-6833(2009)02-0048-05

## 磨细锱渣、磨细矿渣及粉煤灰活性效应对比

田文玉, 王国安, 唐伯明

(重庆交通大学土木建筑学院, 重庆 400074)

**摘 要:** 采用火山灰活性量化分析方法, 运用胶砂强度、活性效应比强度系数、活性指数等指标对比分析了磨细锱渣、磨细矿渣和粉煤灰三者之间的活性效应。分析表明, 胶砂强度可以评价胶砂试件的砂浆强度, 但不能量化其中掺合料的强度贡献; 而比强度指标可对各个龄期水泥胶砂试件中掺合料的活性效应, 及其在胶砂试件总强度中所占的强度百分率进行量化评价, 弥补了胶砂强度分析的缺陷。所研究的掺合料中, 磨细矿渣及煅烧磨细锱渣的活性效应最好, 且前者的后期活性较好, 而后者更有利于早期的活性发展。

**关键词:** 粉煤灰; 矿渣; 锱渣; 煅烧; 胶砂强度; 活性效应; 比强度

**中图分类号:** TU 528.041

**文献标识码:** A

### 0 引言

我国水泥行业属于天然矿物资源和能源消耗高的行业, 将粉煤灰、矿渣等工业废渣应用于建筑领域的研究早已开展并取得显著成效, 也有大量关于将碱渣、磷渣、钢渣、锰渣、锂盐渣及煤矸石等应用于水泥中的研究报告<sup>[1-8]</sup>, 而锱渣的有关应用研究报道还不多见。笔者主要采用比强度指标, 将锱渣和研究较成熟的矿渣、粉煤灰进行对比分析, 评价它们作为水泥掺合料强度性能差异, 为工程应用提供参考。

锱渣主要含  $\beta$ - $C_2S$ 、 $C_3S$ 、 $C_4AF$ 、 $Ca(OH)_2$ 、 $CaSO_4$  等矿物成分<sup>[9]</sup>, 磨细后可作为水泥的活性掺合料应用。比强度指标是基于活性矿物掺合料火山灰效应量化分析而提出来的<sup>[10]</sup>, 其实质即对水泥胶砂试件或混凝土试件的强度进行火山灰材料活性贡献率的分析。鉴于锱渣是否属于火山灰活性材料尚未定论, 笔者在借鉴该法分析时, 不区别“火山灰活性”或“非火山灰活性”, 统一称“活性”。

### 1 实验部分

#### 1.1 材料

##### 1.1.1 水泥

采用重庆拉法基 PO 42.5R 水泥, 密度  $3.1 \text{ g/cm}^3$ , 水泥各龄期强度值见表 1。

#### 1.1.2 掺合料

①粉煤灰: 重庆电厂 II 级粉煤灰, 密度  $2.79 \text{ g/cm}^3$ ; ②磨细矿渣: 重庆环亚建材有限公司 S 95 磨细矿渣, 密度  $2.5 \text{ g/cm}^3$ ; ③磨细锱渣: 重庆大足红蝶锱盐公司的磨细锱渣, 密度  $2.75 \text{ g/cm}^3$ 。笔者研究发现<sup>[9]</sup>, 经过  $800^\circ\text{C}$  煅烧处理后, 磨细锱渣的矿物组成发生了改变, 从而影响其强度性能, 因此试验采用未经煅烧磨细锱渣和经过  $800^\circ\text{C}$  煅烧 30 min 的煅烧磨细锱渣两种。

#### 1.2 实验方法与结果

按照 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》制备标准胶砂试件, 各种掺合料分别按 30% 质量分数掺入水泥中, 胶凝材料与标准砂的比为 1:3, 水胶比为 0.5, 各组试件分别编号为 S1、S2、S3 和 S4, 同时制备一组基准试件(S0)用于对比。各组试件在标准养护室带模养护 24 h 后, 拆模, 然后在温度  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$  的水中继续养护至规定龄期, 测试其强度值。3 d、7 d、28 d 的胶砂强度及强度比值见表 1。

### 2 活性效应分析

#### 2.1 数值化计算

胶砂试件各龄期的强度由水泥和活性掺合料两部分即总的胶凝材料产生, 其中水泥的强度贡献用水泥比强度  $f_{\text{比(水泥)}}$  表示, 其值等于各龄期强

收稿日期: 2008-10-01; 修订日期: 2009-01-16

基金项目: 交通部西部建设资助项目(200631881431)

作者简介: 田文玉(1964-), 女, 江苏吴县人, 重庆交通大学副教授, 研究方向为建筑材料性能研究。

表1 胶砂强度及强度比

Tab.1 Strength of cement glue - sand mortar and strength ratio

编号	矿物掺合料		水泥 /%	抗折强度/MPa			抗压强度/MPa		
	种类	掺量/%		3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
S0	—	0	100	6.0/100	7.7/100	9.7/100	27.0/100	34.7/100	43.7/100
S1	粉煤灰	30	70	5.1/85	6.4/83	7.7/79	20.0/74	23.0/66	29.2/67
S2	磨细矿渣	30	70	5.3/88	7.2/94	10.2/105	21.0/78	24.7/71	35.2/81
S3	未煅烧磨细锶渣	30	70	5.0/83	6.5/84	8.1/84	18.0/67	21.2/61	26.5/61
S4	煅烧磨细锶渣	30	70	5.7/95	7.3/95	8.0/82	21.2/78	23.0/66	32.3/74

注:斜线右方为与基准试件的强度比, %。

度除以水泥的质量百分率, MPa; 当水泥用量为100%时即为基准比强度  $f_{比(基准)}$ , MPa; 掺合料活性效应比强度为水泥比强度与基准比强度的差值, 即  $f_{比(掺合料)} = f_{比(水泥)} - f_{比(基准)}$ , MPa; 水泥比强度  $K = f_{比(水泥)} / f_{比(基准)}$ ; 掺合料的活性效应强度贡献率  $P_{掺合料活性率} = f_{比(掺合料)} / f_{比(水泥)} \times 100, \%$ ; 水泥水化反应强度贡献率  $P_{水泥强度率} = f_{比(基准)} / f_{比(水泥)} \times 100, \%$ ; 掺合料的活性效应强度贡献率除以胶凝材料中掺合料的质量百分率为掺合料的活性指数<sup>[10]</sup>。

## 2.2 结果分析

### 2.2.1 胶砂强度

试件在3 d、7 d、28 d各龄期胶砂强度见图1。从图1(a)可见,在水化早期(3 d),以掺磨细矿渣和煅烧磨细锶渣的抗压强度最好,而掺未经煅烧磨细锶渣的最低;随着水化龄期的延长(直至28 d),胶砂抗压强度不断增大,不同掺合料胶砂的抗压强度大小顺序为:  $f_{压,磨细矿渣} > f_{压,煅烧磨细锶渣} > f_{压,粉煤灰} > f_{压,未煅烧磨细锶渣}$ 。从掺入各种掺合料的水泥胶砂28 d抗压强度与同龄期基准水泥胶砂抗压强度的百分比来看,除了未煅烧磨细锶渣为61%,略低于水泥活性掺和料的要求以

外,其它几种掺合料均可作为水泥活性掺和料。

图1(b)显示,在水化3 d时,各种掺合料的胶砂抗折强度以煅烧磨细锶渣最高,磨细矿渣其次,第三是粉煤灰,未经煅烧磨细锶渣最低。水化7 d时,抗折强度值呈现两极分化,抗折强度值较高的是掺煅烧磨细锶渣和磨细矿渣,两者抗折强度值也比较接近,但此时煅烧磨细锶渣仍保持领先;而掺未煅烧磨细锶渣和粉煤灰处于低端,未煅烧磨细锶渣的抗折强度略高于粉煤灰的。随着水化继续进行,掺磨细矿渣的抗折强度不断增大,不到28 d,已超过了水泥的抗折强度值;而煅烧磨细锶渣的抗折强度增长率明显降低,28 d时其抗折强度值与未煅烧磨细锶渣相当,掺粉煤灰的胶砂抗折强度仍然处于最低。

从图1可看出,不同掺合料对水泥水化的影响也不同。同一种掺合料,对于不同的强度类型,如抗压或抗折强度,其影响也不一样。并且在不同的水化龄期,各掺合料的影响也不同。但是胶砂强度无法量化掺合料在水泥胶砂中的强度贡献,它只能得到胶砂的总体强度数值,为此,笔者采用水泥胶砂比强度指标进行进一步分析。

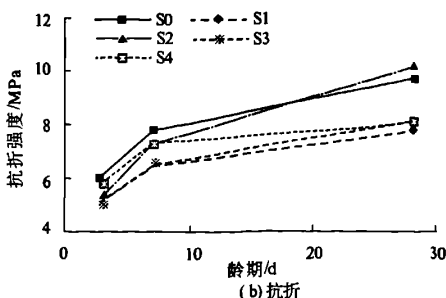
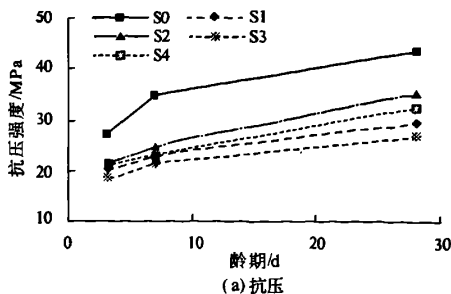


图1 掺粉煤灰、磨细矿渣和磨细锶渣

Fig.1 Strength of cement glue - sand mortar with admixture of fly ash, pulverized slag and pulverized strontium slag

### 2.2.2 掺合料抗压抗折活性效应对比

掺合料的活性效应可由活性效应比强度系数  $K$  体现,  $K$  值越大,掺合料对水泥的活性效应越好。当  $K \geq 1$ ,说明加入掺合料的水泥胶砂中水泥

的强度发展高于纯水泥胶砂中水泥的强度发展,掺合料促进了水泥的水化,具有活性效应。粉煤灰、磨细矿渣和磨细锶渣的活性效应比强度系数  $K$  随龄期变化情况见图2。

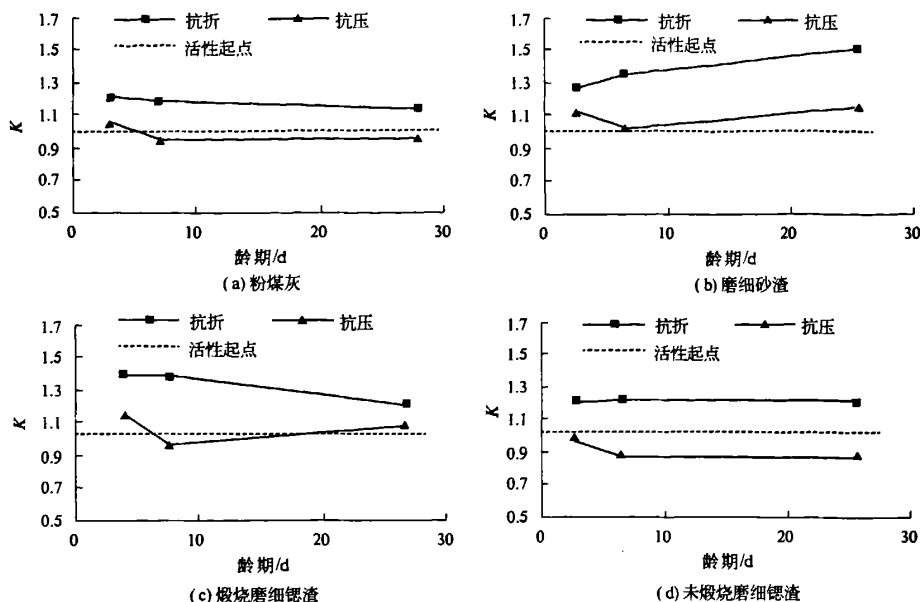


图2 粉煤灰、磨细矿渣和磨细矿渣的活性效应比强度系数

Fig.2 Specific strength coefficient of activity effect of fly ash, pulverized slag and pulverized strontium slag

由图2可见,4种掺合料的抗折活性效应比强度系数 $K$ 均大于1,说明它们对水泥抗折强度的提高均有促进作用.粉煤灰的抗折 $K$ 值在水化早期最高,随着龄期增加而不断降低(图2(a));而磨细矿渣的抗折 $K$ 值则随着水化龄期的增长而不断增大,28 d时达到1.50(图2(b)).可见,磨细矿渣更有利于激发水泥后期的抗折强度.从图2(c)、(d)可见,煅烧磨细矿渣也较适合作为水泥早期抗折强度的激发剂,在水化7 d前其抗折 $K$ 值保持在1.35以上,但到28 d时抗折 $K$ 值降到几乎与未煅烧磨细矿渣相同(1.18),而后者在整个28 d水化阶段,其抗折 $K$ 值变化不大,基本维持一个稳定值.

从图2还可看出,在整个28 d水化阶段,磨细矿渣的抗压 $K$ 值均大于1(图2(b)),而未煅烧磨细矿渣的抗压 $K$ 值均小于1(图2(d)).粉煤灰的 $K$ 值走势(图2(a))与未煅烧磨细矿渣(图2(d))相似,在早期均表现好一点,但随后即低于活性起点线;煅烧磨细矿渣的 $K$ 值走势(图2(c))则与磨细矿渣(图2(b))相似,7 d时稍有降低,但在早期和后期均表现出良好的活化水泥抗压强度的作用.

综合比较抗折抗压活性效应比强度系数,磨细矿渣和煅烧磨细矿渣具有激发水泥强度的作用.掺入磨细矿渣,水泥28 d的抗折强度可提高50%,抗压强度提高15%;而掺入煅烧磨细矿渣,

则可使水泥3 d的抗折强度提高36%,抗压强度提高12%.

### 2.2.3 掺合料的活性指数

当掺合料活性指数为负值时,表示掺合料活性作用很弱,由于掺合料的活性作用而产生的强度不足以弥补因为掺合料的添加致使水泥用量减少而引起的强度降低,此时掺合料在水泥中主要发挥微集料填充作用.当掺合料活性指数为正值时并且数值越大,表示该掺合料在此龄期下的活性效应越好,对胶砂的强度贡献越大.不同龄期粉煤灰、磨细矿渣和磨细矿渣的抗压和抗折活性指数如图3.

从图3(a)可以清楚看出,未煅烧磨细矿渣(S3)的抗压活性指数在实验的各个龄期均为负数,说明它的抗压活性较低,且龄期越长,抗压活性越差;粉煤灰(S1)除了在水化3 d时的抗压活性指数为正数,其余各龄期均为负数;磨细矿渣(S2)的抗压活性指数在各龄期均为正值,而煅烧磨细矿渣(S4)除了在水化7 d时指数为负值以外,其它龄期均为正值,说明这两种掺合料对水泥抗压强度有激发作用.比较而言,磨细矿渣的活性效果优于煅烧磨细矿渣,尤其在水化后期.

图3(b)显示,4种掺合料均具有较好的抗折活性.其中,粉煤灰和煅烧磨细矿渣在水化早期抗折活性较强;磨细矿渣后期的抗折活性最好,且龄期越长活性越大;而未煅烧磨细矿渣的抗折活性

在整个水化龄期始终较稳定,没有明显起伏.从活性指数值来看,磨细矿渣和煅烧磨细钡渣的抗折

活性最好.

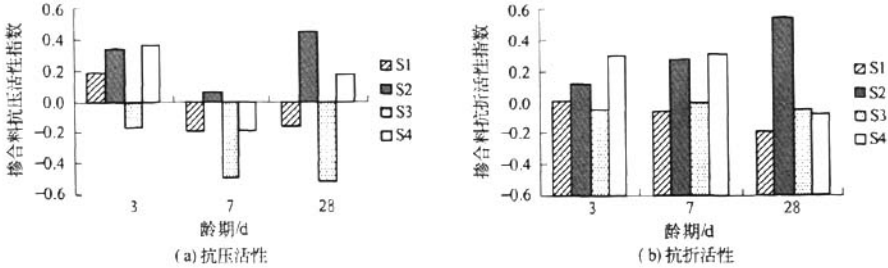


图 3 粉煤灰、磨细矿渣和磨细钡渣活性指数

Fig.3 Activity index of fly ash, pulverized slag and pulverized strontium slag

#### 2.2.4 胶砂中掺合料的强度贡献

胶砂试件各龄期的强度由水泥和掺合料两部分共同产生,各组胶砂试件由于水泥的用量相同(均为 70%),在相同龄期由水泥所产生的强度值相等.因此,掺合料的强度活性效应越强,胶砂的强度值就越高.由于掺合料品种不同,活性不同,所以,掺合料有活性掺合料和惰性掺合料之分,而活性掺合料的活性也有强弱之分.所以不同的掺合料在水泥胶砂中产生的强度也不同,有的是正值,而有的则是负值,从而造成整个胶砂强度的差异.图 4 为各龄期胶砂试件中水泥及掺合料对抗压抗折强度贡献分解图.

从图 4 可看出,①粉煤灰只在水化早期(3 d)时对胶砂抗压强度有贡献,随着龄期的延长其抗压强度贡献表现为负作用(图 4(a)),但对胶砂的抗折强度则各个龄期均有贡献(图 4(b)),并且各个龄期由粉煤灰产生的抗折强度值变化不大,说明粉煤灰的抗折强度主要在早期产生,后期

抗折强度增长不明显;②磨细矿渣对胶砂抗压抗折强度均有贡献,并且随着龄期延长,产生的强度越大,在后期抗压抗折强度均非常突出;③未煅烧磨细钡渣对胶砂各龄期抗压强度均呈负贡献,说明掺加未煅烧磨细钡渣会削弱胶砂的抗压强度,但有利于抗折强度发展,并且随着时间的延长而增大;④煅烧磨细钡渣对胶砂的抗压抗折强度有较好的贡献(7d 抗压除外),其对胶砂的抗折强度贡献在早期有较好的表现,但后期(28 d),煅烧磨细钡渣的抗折强度比未煅烧磨细钡渣的略低.

综上所述,粉煤灰、磨细矿渣、未煅烧磨细钡渣和煅烧磨细钡渣对胶砂抗折强度均有增强作用,但只有磨细矿渣和煅烧磨细钡渣同时对胶砂抗压强度也具有增强作用.在这 4 种水泥掺合料中,磨细矿渣和煅烧磨细钡渣是较好的活性掺合料.磨细矿渣对胶砂的后期抗折强度作用较大,而煅烧磨细钡渣则有利于胶砂的早期抗折强度发展.

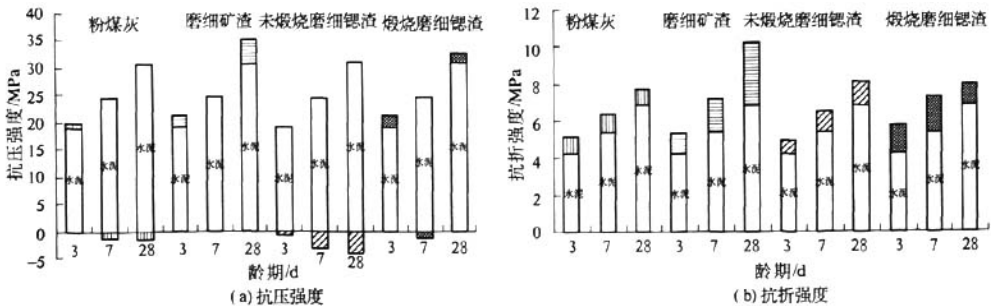


图 4 粉煤灰、磨细矿渣和磨细钡渣对水泥胶砂各龄期的强度贡献

Fig.4 Strength contribution of fly ash, pulverized slag and pulverized strontium slag to cement glue-sand mortar at different ages

### 3 结论

(1)各掺合料的水泥胶砂抗压强度大小顺序

为:水化早期(3 d):煅烧磨细钡渣 > 磨细矿渣 > 粉煤灰 > 未煅烧磨细钡渣;水化后期(28 d):磨细矿渣 > 煅烧磨细钡渣 > 粉煤灰 > 未煅烧磨细钡渣

渣. 根据 28 d 抗压强度比不低于 62% 的要求,除了未煅烧磨细锶渣为 61%,其它几种掺合料均可作为水泥活性掺和料.

(2)各掺合料的水泥胶砂抗折强度,水化 7 d 以前,掺磨细矿渣与煅烧磨细锶渣的较高,掺未煅烧磨细锶渣与粉煤灰的较低.水化 7 d 以后,掺磨细矿渣的抗折强度最高,28 d 时甚至超过了基准水泥.

(3)综合抗折和抗压活性效应比强度系数,磨细矿渣和煅烧磨细锶渣均具有激发水泥强度的作用.磨细矿渣有助于增强水泥胶砂的后期强度,而煅烧磨细锶渣则对水泥胶砂的早期强度有利.

(4)根据抗压活性指数,未煅烧磨细锶渣和粉煤灰均表现为弱的抗压活性;而磨细矿渣和煅烧磨细锶渣水泥抗压强度均有激发作用,且前者的活性效果优于后者,尤其在水化后期.

(5)4 种掺合料均具有较好的抗折活性.根据活性指数值,粉煤灰和煅烧磨细锶渣在水化早期抗折活性较强;磨细矿渣后期的抗折活性最好,且龄期越长活性越大.

(6)从强度构成看,4 种掺合料对胶砂各龄期抗折强度均有增强作用,但只有磨细矿渣和煅烧磨细锶渣同时对胶砂的抗压强度具有增强作用.磨细矿渣对胶砂的后期抗折强度作用较大,而煅

烧磨细锶渣则有利于胶砂的早期抗折强度发展.

## 参考文献:

- [1] 杜庆椿,谭洪光,唐祥正.磨细矿渣粉在混凝土中的应用试验研究[J].混凝土,2006,(6):63-65.
- [2] 易俊新,陈霞,曾力.磷渣粉、粉煤灰对水泥胶砂抗裂性能的影响[J].粉煤灰综合利用,2006,(2):13-15.
- [3] 杨长辉,刘先锋,刘建.碱矿渣水泥及混凝土化学外加剂的研究进展[J].混凝土,2006,(4):17-18,28.
- [4] 杨代六,徐迅.磷渣对硅酸盐水泥水化硬化的影响研究[J].混凝土,2006,(12):46-48.
- [5] 施惠生,郭蕾.钢渣对硅酸盐水泥水化硬化的影响研究[J].水泥技术,2004,(2):21-24.
- [6] 韩静云,邵志海,董书波.锰铁合金渣在混凝土中的应用[J].铁合金,2006,(4):45-48.
- [7] 何锋.用锂盐渣作水泥掺合材的探讨[J].四川水泥,2004,(6):16-18.
- [8] 赵鸿胜,张雄.煤矸石作水泥混合材的活化方法[J].新世纪水泥导报,2004,(4):23-27.
- [9] 田文玉,唐伯明,俞志龙.煅烧温度对磨细锶渣强度活性影响研究[J].硅酸盐学报,2009,(1):16-20.
- [10] 蒲心诚.应用比强度指标研究活性矿物掺合料在水泥与混凝土中的火山灰效应[J].混凝土与水泥制品,1997,(3):6-14.

## Comparison of Activity Effect of Pulverized Strontium Slag, Pulverized Slag and Fly Ash

TIAN Wen-yu, WANG Guo-an, TANG Bo-ming

(School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The activity quantitative analysis method of pozzolanic is used, and activity effects were compared among the pulverized strontium slag, pulverized slag and fly ash using indexes, such as strength of cement glue-sand mortar, specific strength coefficient of activity effect and activity index. It is shown that the strength of cement mortar can be evaluated by strength of cement glue-sand mortar; however, strength of cement glue-sand mortar can not evaluate the strength contribution of the admixtures to the cement mortar quantitatively. The specific strength indicators can evaluate the activity effect of cement admixtures quantitatively, and the strength percentage of cement admixtures of the total strength on cement mortar specimens in various ages can also be evaluated quantitatively by specific strength indicators. The specific strength indicators can make up for the defects of the mortar strength analysis. Among the mixtures studied, pulverized slag and pulverized strontium slag of 800 °C combustion possess the best activity effect. The former is better in the later period active, while the latter is more conducive to the development of early stage activity.

**Key words:** fly ash; slag; strontium slag; combustion; strength of cement glue-sand mortar; activity effect; specific strength indicator