

施正伦, 周宛谕, 方梦祥, 等. 2011 石煤灰渣酸浸提钒后残渣作水泥混合材试验研究 [J]. 环境科学学报, 31(2): 395-400

Shi Z L, Zhou W Y, Fang M X, et al. 2011. Use of residue from acid leaching with stone coal ash as cement admixture [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 31(2): 395-400

石煤灰渣酸浸提钒后残渣作水泥混合材试验研究

施正伦*, 周宛谕, 方梦祥, 裘国华, 余德麒, 骆仲泐

浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027

收稿日期: 2010-05-14 修回日期: 2010-06-03 录用日期: 2010-06-04

摘要: 为探索提钒残渣用作水泥混合材的可行性, 根据提钒残渣的物化特性分析, 设计出合理的配料方案, 通过对试样的物理检验, 研究了提钒残渣的掺量对水泥性能的影响. 试验结果表明, 提钒残渣属于活性混合材, 在掺量为 25% ~ 40% 时, 可单独用作水泥混合材, 且不论单掺还是和水泥厂石煤渣对掺, 水泥各项性能指标均符合 GB175—2007《通用硅酸盐水泥》中复合硅酸盐水泥要求, 其强度均满足 32.5 强度等级水泥要求. 提钒残渣掺量的变化对抗压强度的影响远大于抗折强度, 且对后期强度的影响要大于早期强度. 随着提钒残渣掺量的递增, 水泥强度整体上呈现递减趋势.

关键词: 提钒残渣; 水泥混合材; 抗压强度; 抗折强度

文章编号: 0253-2468(2011)02-395-06 中图分类号: X705 文献标识码: A

Use of residue from acid leaching with stone coal ash as cement admixture

SH IZhenglun*, ZHOU Wanyu, FANG Mengxiang, QIU Guohua, YU Deqi, LUO Zhongyang

State Key Laboratory of Clean Energy Utilization Zhejiang University, Hangzhou 310027

Received 14 May 2010 received in revised form 3 June 2010 accepted 4 June 2010

Abstract In order to explore the feasibility of using the residue from acid leaching with stone coal ash for vanadium extraction as an active cement admixture, experiments were performed to investigate the impact of the amount of residue on the cement performance. The reasonable residue proportion was determined by analysis of the physicochemical characteristics of the residue and physical examination of cement samples with different residue proportions. The experimental results showed that the residue could be used as active cement admixture. It could be used alone as the active cement admixture at a mixed proportion of the residue between 25% ~ 40%. While the residue was used alone or mixed with the stone coal ash as cement active admixture, the cement samples could meet the requirements for composite Portland cement in the Standard of Common Portland Cement (GB175—2007) and the 32.5R cement strength grade. The strength of the cement samples decreased with the increase of the residue proportion. The residue proportion had greater effect on the cement compressive strength than the cement flexural strength, and its impact on the late strength was greater than that on the early strength.

Keywords Residue from acid leaching process; active cement admixture; compressive strength; flexural strength

1 引言 (Introduction)

在 20 世纪 30 年代, 西欧一些国家就发现了天然的火山灰、凝灰岩、浮岩以及硅藻土、蛋白石、燧石等物质具有活性, 并通称为“火山灰”物质 (高培伟等, 1994). 活性混合材是指具有火山灰性或潜在水硬性的混合材料, 如粒化高炉矿渣、火山灰质混合材料、粉煤灰等. 非活性混合材料是指活性指标不符合标准要求的潜在水硬性或火山灰性的混合材, 以及砂岩和石灰石 (沈威等, 1986).

我国水泥行业主要利用高炉矿渣、粉煤灰、火

山灰质材料等作水泥混合材. 由于水泥工业的迅猛发展和矿产资源的日益减少, 水泥混合材供应已凸显紧张局面, 开发水泥混合材新品种日渐成为水泥工业研究的当务之急. 近年来, 一些研究者分别对沸石、硬页岩、脱硫粉煤灰、垃圾焚烧灰、金属尾矿、煤矸石和煤渣等用作水泥混合材进行了试验研究 (高培伟等, 1994; 朱献, 1994; 倪明江等, 2007; 张文生等, 2006; 黄福龙等, 1997; 江阿兰等, 2009; 洪建平, 2008). Abali 等研究了将硼砂废渣、火山凝灰岩、斑脱石和粉煤灰的多种掺加用作水泥混合材 (Abali et al., 2006).

作者简介: 施正伦 (1955—), 男, E-mail: sz@zju.edu.cn * 通讯作者 (责任作者)

Biography: SH IZhenglun (1955—), male, E-mail: sz@zju.edu.cn * Corresponding author

浙江大学提出的中间盐法石煤灰渣直接酸浸提钒工艺(徐耀兵等, 2010), 在提钒的同时得到了副产品铵明矾, 同时排出大量的石煤灰渣酸浸提钒后残渣, 以下简称“提钒残渣”。以一个年产五氧化二钒 4000 吨的石煤综合利用工程为例, 年需灰渣 40×10^4 t 提钒后的残渣约 33×10^4 t(干基)。酸浸后的提钒残渣不仅水分高达 30% 左右, 且由于洗涤的不彻底还含有残留酸。如此巨量的提钒残渣如果堆放在尾矿库不利用, 不仅占用大量土地, 残留酸的外溢、渗漏将造成水体、生态环境的严重破坏; 一旦发生尾矿库溃坝事故还将引发财产的巨大损失和人身伤亡事故。

因提钒残渣研究开展的不足和其它活性材料的广泛应用, 提钒残渣在水泥混合材领域应用很少。研究发现(徐耀兵等, 2009), 石煤经过焙烧酸浸等处理后所得提钒残渣的主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 等, 其中硅含量很高。由于在酸浸过程中云母晶格被破坏, 其中的钒、铝、铁等元素生成可溶性物质而浸出, 活性得到了大幅度提高。因此, 开展提钒残渣作水泥混合材的试验研究, 探索提钒残渣用作水泥活性混合材的可行性, 使提钒残渣得到完全资源化综合利用, 对于消除残渣对生态环境的破坏, 提高企业的经济社会效益, 推进含钒石煤的高效综

合利用技术发展具有十分重要的现实意义。同时为水泥生产提供新的混合材来源, 有利于水泥生产的可持续发展。

2 试验方法 (Materials and methods)

2.1 试验原料

含钒石煤在浙江大学热能工程研究所自行设计的热功率为 1MW 大型循环流化床试验台中进行氧化燃烧, 形成飞灰和底渣, 其质量比例为飞灰:底渣 = 3:1。底渣用 1mm 孔径筛分, 大于 1mm 的筛上物用磨机粉磨, 并与小于 1mm 的筛下物和飞灰均匀混合, 得到含钒石煤灰渣。该灰渣通过中间盐法直接酸浸工艺提取五氧化二钒, 同时回收副产品铵明矾(徐耀兵等, 2010; 徐耀兵等, 2009)。酸浸提钒后的残渣即为本实验所用的提钒残渣。选用某水泥厂生产的硅酸盐水泥熟料和工业废石膏作水泥混合材试验所需熟料和石膏。为比较提钒残渣与通常作水泥混合材的石煤渣的差异, 同时进行了该水泥厂日常所用石煤渣作水泥混合材的试验。

依据 GB/T176—1996《水泥化学分析方法》对水泥熟料和粉磨后的提钒残渣、水泥厂石煤渣进行了化学分析, 结果见表 1 和表 2。

表 1 灰渣化学成分

Table 1 Chemical analysis of residue

灰渣	Loss	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Σ
提钒残渣	5.90%	86.22%	4.40%	1.22%	0.60%	0.43%	1.19%	99.96%
水泥厂石煤渣	7.20%	60.43%	6.12%	3.23%	13.80%	3.14%		93.92%

表 2 水泥熟料化学成分及矿物组成

Table 2 Chemical analysis and mineral composition of cement clinker

LOSS	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	CaO	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
2.64%	21.24%	4.84%	2.98%	64.21%	1.07%	0.80%	59.89%	15.73%	7.77%	9.06%

注: C_3S 为硅酸三钙, C_2S 为硅酸二钙, C_3A 为铝酸三钙, C_4AF 为铁铝酸四钙, CaO 为游离氧化钙。

由表 1 可知, 提钒残渣的烧失量和三氧化硫含量均符合 GB2847—2005《用于水泥中的火山灰质混合材料》的规定: Loss 5.9% ($< 10\%$), SO_3 : 1.19% ($< 3.5\%$)。表 2 中水泥熟料的硅酸钙矿物含量以及氧化钙和氧化硅质量比均大于 GB175—2007《通用硅酸盐水泥》所规定的下限值 66% 和 2.0

2.2 试验方法

提钒残渣分别按 10%、15%、25%、30%、35%、40% 和 45% 的质量比与熟料、石膏进行配比, 同时

将提钒残渣与水泥厂石煤渣对掺以及水泥厂石煤渣单掺进行比较性实验。按此配比方案在化验室球磨机中混合粉磨配制成水泥, 其比表面积控制在 $(300 \pm 10) \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 按标准方法制备试块。水泥物理性能检验按 GB/T1346—2001《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》GB/T17671—1999《水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)》进行, 细度按 GB/T1345—2005《水泥细度检验方法》检验。

3 试验结果 (Experimental results)

表 3 为不同配料的水泥试验样品物理检验结果.

表 3 提钒残渣作水泥混合材试验结果

Table 3 Experimental results of residue as active cement admixture

编号	细度 (80 μ m 筛余)	标准稠度用水量	凝结时间 /m in		安定性	抗折强度 /M pa		抗压强度 /M pa		强度等级
			初凝	终凝		3天	28天	3天	28天	
97300	8.6%	22.00%	50	95	合格	6.7	9.4	42.3	60.3	
87310C	5.7%	25.00%	90	150	合格	6.5	9.2	35.0	60.2	52.5R
82315C	5.6%	24.60%	120	180	合格	6.3	9.2	33.7	61.2	52.5R
77320C	6.0%	23.00%	100	160	合格	6.1	9.5	31.4	64.6	52.5R
72325C	7.8%	23.00%	125	190	合格	5.3	9.4	25.0	53.6	52.5R
67330C	8.9%	22.60%	115	180	合格	4.1	9.1	19.0	47.8	42.5R
62335C	9.1%	22.00%	120	185	合格	3.9	9.0	16.4	44.2	42.5
57340C	8.0%	26.00%	170	235	合格	3.5	9.0	14.4	42.9	32.5
52345C	11.0%	25.00%	165	230	合格	3.1	8.8	12.9	38.2	32.5
87310CS	8.0%	22.00%	95	160	合格	6.3	8.7	30.3	57.1	52.5R
82315CS	6.2%	22.00%	100	165	合格	6.0	8.8	31.0	57.6	52.5R
77320CS	7.4%	22.00%	135	210	合格	6.3	8.8	29.6	56.0	52.5R
72325CS	11.0%	22.00%	140	205	合格	5.5	9.0	26.0	52.5	52.5R
67330CS	10.2%	22.00%	135	210	合格	5.7	8.8	23.8	47.0	42.5R
62335CS	13.8%	22.00%	135	210	合格	5.0	8.8	19.9	44.1	42.5R
57340CS	14.0%	22.00%	145	210	合格	4.9	8.6	19.9	42.6	42.5R
52345CS	13.0%	22.00%	135	210	合格	4.2	8.3	17.8	38.1	42.5
67330S	12.2%	23.00%	140	205	合格	4.6	7.6	19.7	37.9	32.5R
52345S	12.5%	25.20%	135	210	合格	3.2	6.2	11.6	27.1	无

注: 表中编号的意义: 前两位数字表示熟料质量百分比, 第三位表示石膏质量百分比, 后两位表示灰渣混合材质量百分比, C表示提钒残渣单掺, CS表示提钒残渣和水泥厂石煤渣对掺 (如 77320CS的后两位数字 20即为提钒残渣 10% + 石煤渣 10%), S表示水泥厂石煤渣单掺.

4 分析与讨论 (Analyses and discussion)

4.1 提钒残渣对水泥物理性能的影响

从表 3 可知, 提钒残渣用作水泥混合材, 不论单掺还是和水泥厂石煤渣对掺, 掺量在 45% 以下所有水泥试样的各项性能指标均满足 GB175—2007 中 32.5 强度等级水泥要求. 当掺量在 10% ~ 25% 之间, 其强度满足 52.5R 强度等级水泥要求. 而水泥厂石煤渣, 在掺量为 30% 时, 也仅能满足 32.5 强度等级水泥要求, 掺量为 45% 时, 已不能满足 32.5 强度等级要求. 表明提钒残渣的活性要比水泥厂石煤渣好得多.

从表 3 中还可以看到, 提钒残渣单掺时, 掺量从 10% 到 40%, 水泥 28d 抗折强度与熟料相比, 几乎不降低, 当掺量为 45% 时, 其水泥 28d 抗折强度仍能达到 8.8MPa, 均超过 GB175—2007《通用硅酸盐水泥》中复合水泥所有强度等级的 28d 抗折强度指

标. 这就是提钒残渣最大的特点和优势, 抗折强度高. 高的水泥在建筑上是很受欢迎的, 这意味着在建筑施工中, 在达到相同混凝土质量指标的前提下, 可减少钢筋的用量, 从而降低建筑施工成本.

总体而言, 水泥的 3d 抗压、抗折强度和 28d 抗压、抗折强度整体趋势都随着混合材掺量的增加而降低. 当掺量在 20% ~ 30% 之间, 提钒残渣单掺水泥 3d 抗压、抗折强度降幅较快. 而 28d 抗压、抗折强度则在 15% ~ 25% 掺量区间, 呈现 \cap 型变化趋势, 在掺量为 20% 时达到最大值, 在整个掺量区间的降幅和速率要低于 3d 强度.

4.2 提钒残渣对水泥强度增进率的影响

提钒残渣在不同掺量下对水泥的 3d 和 28d 强度增进率 (高培伟等, 1994) 的影响见表 4 其中的数据表示掺入提钒残渣的水泥强度达到同龄期熟料强度的百分数. 从图 1 可以直观看出, 当掺量在 10% ~ 20% 之间, 提钒残渣水泥的 28d 抗压强度超

过熟料,且随着掺量的增加而提高,在掺量为 20% 时增进率达到最大值 107%。当掺量继续增加,增进率呈递减趋势。同样,提钒残渣水泥的 3d 强度则随着掺量的增加而递减,且降幅平稳。这意味着提钒残渣掺量的变化对抗压强度的影响远大于抗折强度,且对后期强度的影响要大于早期强度。

表 4 提钒残渣掺量对水泥强度增进率的影响

Table 4 Effects of residue proportion on rate of increase of cement strength

提钒残渣掺量	3d 强度增进率	28d 强度增进率
10%	83% (97%)	100% (98%)
15%	80% (94%)	101% (98%)
20%	74% (91%)	107% (101%)
25%	59% (79%)	89% (100%)
30%	45% (61%)	78% (96%)
35%	39% (58%)	73% (97%)
40%	34% (52%)	71% (98%)
45%	30% (46%)	63% (94%)

注:表中括号外数字为与熟料同龄期抗压强度相比的百分数,括号内数字为与熟料同龄期抗折强度相比的百分数。

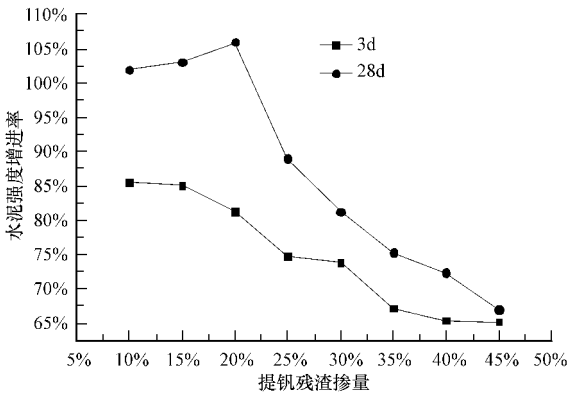


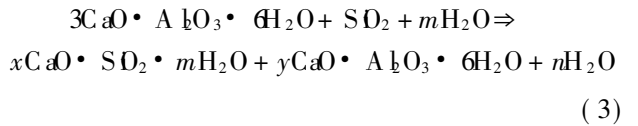
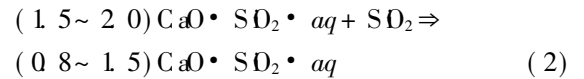
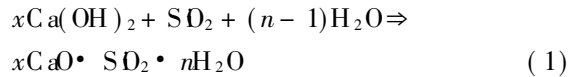
图 1 提钒残渣掺量对水泥强度增进率的影响

Fig 1 Effects of residue proportion on rate of increase of cement strength

4.3 机理分析

随着提钒残渣掺量大于 25% 以后进一步增加,水泥强度整体上呈现递减趋势。这是由于随着提钒残渣掺量的大幅增加,水泥中熟料含量比例相应大幅减少,势必导致水泥强度的降低。掺量在 15% ~ 25% 之间,提钒残渣水泥 28d 抗压、抗折强度出现∩型变化规律,掺量 20% 时甚至超过熟料强度,这是由于提钒残渣中的活性 SiO₂ 与熟料水化析出的 Ca(OH)₂ 相作用,生成比熟料水化产物中更多的水化硅酸钙凝胶。同时提钒残渣中的酸性氧化物总量 (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) 高达 91.84%,可以降低水

水化碱度,加快水化反应的进程。提钒残渣中的 SiO₂ 在灰渣加温酸浸提钒过程中强酸的作用下,晶格被破坏,介面力大大增强,表现出较好地可溶性,反应活性得到大大激发,能够与熟料水化产物 Ca(OH)₂、水化硅酸钙 (CSH)、水化铝酸钙 (CAH) 等发生二次反应 (裴新意等, 2008)。反应方程式如下:



随着水化时间的延长,提钒残渣中的活性组分与熟料生成物反应更加充分,生成更多的 CSH,水泥强度得到更大的发挥,有可能超过熟料强度。

相同掺量时,提钒残渣水泥的 3d 抗压抗折强度比水泥厂石煤渣水泥略低,但 28d 抗折抗压强度却要高出很多。分析其原因可能是加水后厂石煤渣中的 CaO 与 SiO₂ 发生反应,生成 CSH,而此时熟料的水化反应进展相对较慢,提钒残渣中活性组分发生二次反应的量少,所以厂石煤渣水泥的早期强度略高。但是随着水化反应逐步进行,加上提钒残渣中 SiO₂ 相对含量较多,二次反应产物 CSH 量急剧增加,同时厂石煤渣中的 CaO 水解生成的 Ca²⁺,在一定程度上延缓了其熟料的水化反应速率。因而提钒残渣水泥的后期强度很大。同样的,提钒残渣与水泥厂石煤渣对掺水泥的 28d 强度整体上都低于提钒残渣单掺时的强度。

图 2~图 3 给出了提钒残渣水泥和厂石煤渣水泥 3d 和 28d 水化产物 XRD 谱图。从图中我们可以看到两种水泥的 3d 水化产物中还有较多的 C₃S 未发生反应,只生成了少量的 Ca(OH)₂,提钒残渣水泥中有少量的钙矾石 (AFt) 生成。到 28d 时,熟料中的 C₃S 已经反应完全,水化产物以钙矾石为主。

硅酸盐水泥的水化产物按其结晶程度可粗略地分为两大类,一类是结晶度比较差,晶粒的大小相当于胶体尺寸的水化硅酸钙,它既是微晶质可以彼此交叉和连生,又因为其大小在胶体尺寸范围内具有凝胶的特性。另一类为结晶度比较完整、晶粒比较大的水化物,如氢氧化钙 CH、水化铝酸钙 AFt 及水化硫铝酸钙 AFm 等 (秦文政等, 2008 刘贤萍

等, 2008; Zhu *et al.*, 2008; Shen *et al.*, 2008).

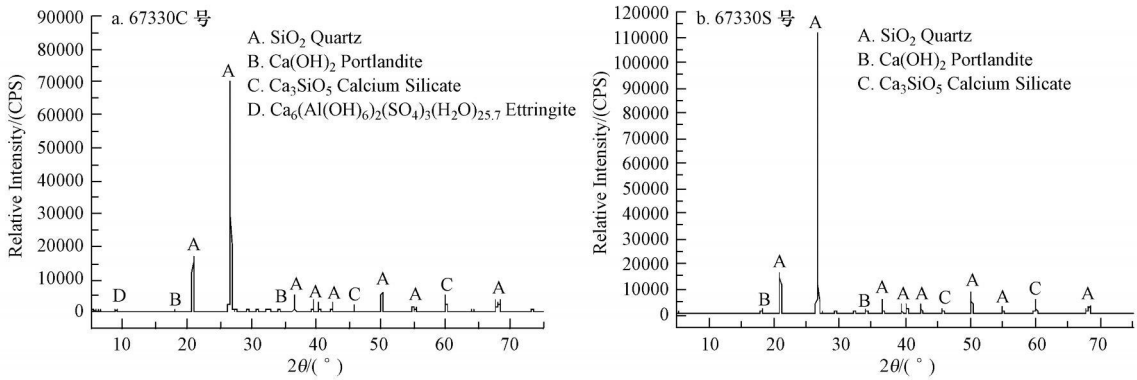


图 2 67330C号、67330S号样品 3d水化产物 XRD 谱图

Fig 2 XRD patterns of hydration products of cement sample within 3 days of sample preparation (NO. 67330C, 67330S)

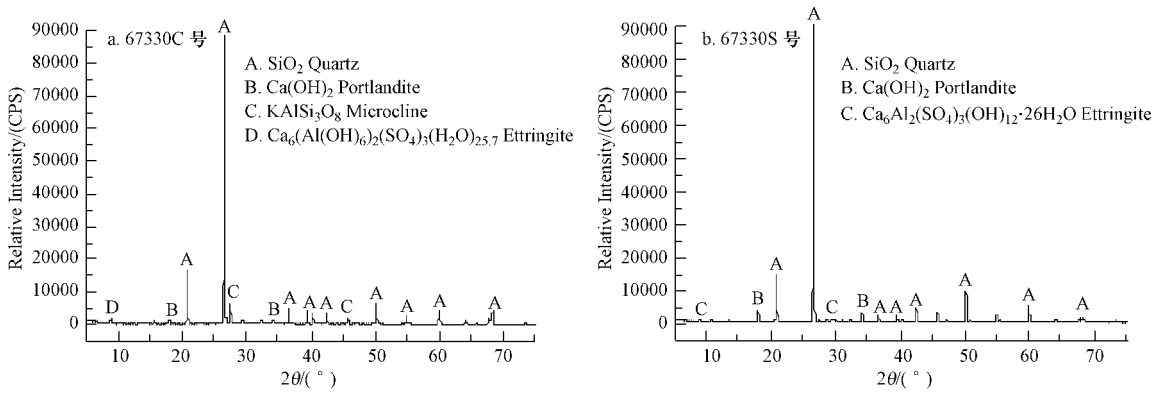


图 3 67330C号、67330S号样品 28d水化产物 XRD 谱图

Fig 3 XRD patterns of hydration products of cement sample within 28 days (NO. 67330C, 67330S)

图 4 给出了提钕残渣水泥 3d和 28d 水化产物 SEM 照片. 从图 4a 中我们可以清晰的看到水化硅酸钙 CSH 凝胶, CSH 为纤维状粒子, 是水化早期从水泥颗粒向外辐射成长的细长条状物质. 凝胶之间还有结晶完整、尺寸较大的六方板片状 CH 结晶存

在, 在宏观性能上表现出一定的强度特性. 从图 4b 中我们可以看到呈典型的棱柱状形貌的钙钕石, 其间还交叉着纤维状、针状的 CSH 凝胶. 这些水化产物所构成的浆体致密性好、强度高, 所以呈现出较好的抗压抗折特性.

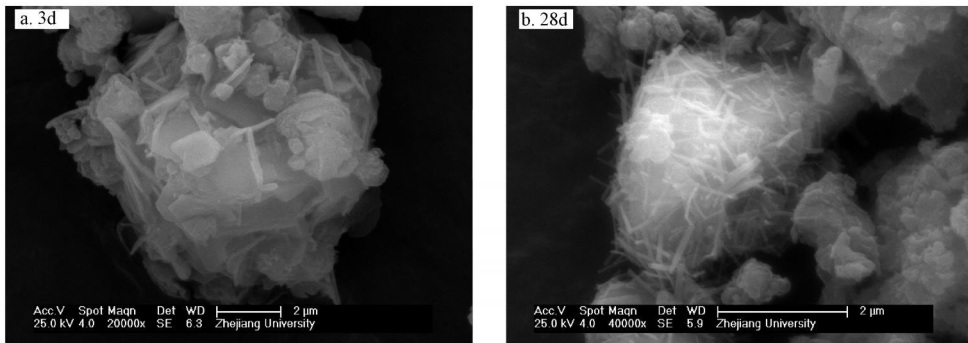


图 4 67330C 样品 3d和 28d水化产物 SEM 照片

Fig 4 SEM photo of hydration products of cement sample within 3 days and 28 days (NO. 67330C)

5 结论 (Conclusions)

1) 烧失量低于 10%, SO_3 低于 3%, 且 SiO_2 、 Al_2O_3 含量较高的提钒残渣属于活性混合材。在掺量为 25% ~ 40% 时, 可单独用作水泥混合材。提钒残渣的高活性优点, 使其有可能成为一种特殊的水泥混合材产品出售, 这将大大提高其身价, 从而大幅度提高石煤多联产综合利用的经济效益和环境效益。

2) 提钒残渣用作水泥混合材, 不论单掺还是和水泥厂石煤渣对掺, 水泥安定性、凝结时间等性能指标均符合复合硅酸盐水泥要求, 其强度均满足 32.5 等级水泥强度要求。

3) 提钒残渣掺量的变化对抗压强度的影响远大于抗折强度, 且对后期强度的影响要大于早期强度。

4) 随着提钒残渣掺量的递增, 水泥强度整体上呈现递减趋势。相同掺量时, 提钒残渣水泥的 3d 抗压抗折强度比水泥厂石煤渣水泥略低, 但 28d 抗压抗折强度却要高出很多。

责任作者简介: 施正伦 (1955—), 男, 浙江大学热能工程研究所, 研究员, 硕士生导师, 主要从事资源 (固废) 综合利用研究, 曾负责国家科技攻关、科技支撑计划、“863”、“973”等多项课题研究, 拥有发明专利 8 项, 在国内外学术期刊发表论文 50 多篇。电话: 0571 - 87952041, E-mail: szl@zju.edu.cn

参考文献 (References)

Abali Y, Bayca S U, Targan S. 2006. Evaluation of blends tin cal waste, volcanic tuff bentonite and fly ash for use as a cement admixture [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 131 (1/3): 126-130

高培伟, 许仲梓, 李东旭, 等. 1994 沸石用做水泥混合材的理论研究 [J]. *水泥工程*, (4): 16-19

Gao P W, Xu Z Z, Li D X, *et al*. 1994 Theoretical study on using zeolite as cement admixture [J]. *Cement Engineering* (4): 16-19 (in Chinese)

洪建平, 陈运本, 李玉寿, 等. 2008 煅烧硬页岩作水泥混合材的活性研究 [J]. *昆明理工大学学报 (理工版)*, 33 (3): 24-29

Hong J P, Chen Y B, Li Y S, *et al*. 2008. Study on activity of burnt shale as cement admixture [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology)*, 33 (3): 24-29 (in Chinese)

黄福龙, 陈起荣. 1997. 以煤矸石为混合材生产普通水泥 [J]. *福建建材*, (3): 33-35

Huang F L, Chen Q R. 1997. Producing Portland cement using gangue as admixture [J]. *Fujian Building Materials* (3): 33-35 (in Chinese)

江阿兰, 赵晶. 2009. 脱硫粉煤灰作为水泥混合材的可行性研究

[J]. *低温建筑技术*, 31 (1): 6-8

Jiang A L, Zhao J. 2009. Experimental study of desulfurized fly ash used for cement admixture [J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 31 (1): 6-8 (in Chinese)

刘贤萍, 王培铭. 2008 硅酸盐水泥熟料-煤矸石混合水泥的界面结构 [J]. *硅酸盐学报*, 36 (1): 105-112

Liu X P, Wang P M. 2008. Interface structure of Portland coal gangue blended cement [J]. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 36 (1): 105-112 (in Chinese)

倪明江, 焦有宙, 骆仲决, 等. 2007. 金属尾矿作水泥混合材活性试验研究 [J]. *环境科学学报*, 27 (5): 868-872

Ni M J, Jiao Y Z, Luo Z Y, *et al*. 2007. Experimental study on the utilization of metallic tailings as cement active admixture [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 27 (5): 868-872 (in Chinese)

裴新意, 赵鹏, 王尉和, 等. 2008. 粉煤灰的微观形态及其在水泥水化中的特性 [J]. *粉煤灰综合利用*, (6): 45-46

Pei X Y, Zhao P, Wang W H, *et al*. 2008. The microcosmic modality of fly ash and its characteristic in cement hydration [J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization* (6): 45-46 (in Chinese)

秦文政, 顾军. 2008. A、D 级油井水泥的水化产物及其微观结构 [J]. *石油与天然气化工*, 37 (4): 326-327

Qin W Z, Gu J. 2008. Hydration products and microstructure of class A and D oil well cements [J]. *Chemical Engineering of Oil and Gas* 37 (4): 326-327 (in Chinese)

沈威, 黄文熙, 闵荣荣, 等. 1986. *水泥工艺学* [M]. 北京: 中国建筑工业出版社

Shen W, Huang W X, Min P R, *et al*. 1986. *Cement Technology* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press (in Chinese)

Shen W G, Xia L Q, Ma W, *et al*. 2008. Investigation on nano-scale microstructure of C-S-H with atomic force microscope [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 36 (4): 487-497

徐耀兵, 施正伦, 骆仲决, 等. 2010. 含钒灰渣酸浸提钒工艺酸浸条件实验研究 [J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 44 (3): 406-411

Xu Y B, Shi Z L, Luo Z Y, *et al*. 2010. Experimental research on optimization of acid leaching conditions for extracting vanadium from ash containing vanadium by acid leaching [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 44 (3): 406-411 (in Chinese)

徐耀兵, 王勤辉, 施正伦, 等. 2009. 含钒灰渣酸浸液结晶铵明矾的工艺条件实验研究 [J]. *过程工程学报*, 9 (5): 86-90

Xu Y B, Wang Q H, Shi Z L, *et al*. 2009. Crystallization conditions of ammonium aluminum sulfate from acid leachate of the ash containing vanadium [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering* 9 (5): 86-90 (in Chinese)

张文生, 隋同波, 姚燕, 等. 2006. 垃圾焚烧灰作为水泥混合材的研究 [J]. *硅酸盐学报*, 34 (2): 229-232

Zhang W S, Sui T B, Yao Y, *et al*. 2006. Study on properties of incinerator ash as a cement admixture [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society* 34 (2): 229-232 (in Chinese)

Zhu H B, Wang P M. 2008. Effects of slag high-calcium fly ash and activating materials on early hydration degrees of cements [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 36 (4): 470-475

朱献. 1994. 用煤渣作水泥混合材的试验研究 [J]. *硅酸盐通报*, (3): 57-60

Zhu X. 1994. Experimental study on using cinder as cement admixture [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, (3): 57-60 (in Chinese)