

# 粉煤灰制备硫铝酸钙-阿利特水泥熟料的研究

赵宏伟<sup>1</sup> 李金洪<sup>1</sup> 梅 林<sup>1</sup> 刘 辉<sup>2</sup> 耿建刚<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学 矿物材料国家专业实验室, 北京 100083 2. 山东铝业股份有限公司, 山东 淄博 255052)

**摘 要:** 以粉煤灰为主要原料,  $\text{CaF}_2$  为矿化剂, 设计 MG 和 MS 值, 控制  $\text{CaO}$  和  $\text{CaSO}_4$  含量, 分别在 1 150、1 200、1 250、1 300 和 1 350℃ 温度下烧制高胶凝性硫铝酸钙-阿利特复合矿相水泥熟料。运用 X 射线粉晶衍射 (XRD) 和扫描电镜 (SEM) 等手段, 研究原料配方和煅烧温度对熟料物相组成的影响, 对熟料物相形成的反应历程作了探讨。实验结果表明, 在 1 300℃, 当  $\text{MG} = 1.05$ 、 $\text{MS} = 0.95$  时, 形成较理想的熟料, 物相组成约为:  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$  58.73%,  $\text{C}_3\text{S}$  23.99%,  $\text{C}_2\text{S}$  2.87%,  $\text{C}_{11}\text{A}_7 \cdot \text{CaF}_2/\text{C}_{12}\text{A}_7$  14.07%,  $f\text{-CaO}$  0.35%。熟料中主要物相硫铝酸钙晶体呈菱形十二面体, 发育完整, 形态规则, 颗粒大小约为 1~3  $\mu\text{m}$ , 阿利特 ( $\text{C}_3\text{S}$ ) 相物相为板状六角形, 晶体发育相对细小。

**关键词:** 硫铝酸钙-阿利特, 粉煤灰, 水泥熟料, 物相, 煅烧

中图分类号: X752 ; P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2006)06-0518-05

## The preparation of sulphoaluminate-alite cement clinker from fly ash

ZHAO Hong-wei<sup>1</sup>, LI Jin-hong<sup>1</sup>, MEI Lin<sup>1</sup>, LIU Hui and GENG Jian-gang<sup>2</sup>

(1. School of Material Science and Technology, Natural Laboratory of Mineral Materials, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Shandong Alumina Group Co. Ltd., Zibo 255052, China)

**Abstract:** Sulphoaluminate alite cements were successfully prepared from fly ash, bauxite and  $\text{CaF}_2$  as a fluxing agent by designing MG and MS values, i. e., the controlling of  $\text{CaO}$  and  $\text{CaSO}_4$  content, and the sintering at 1 150℃, 1 200℃, 1 250℃, 1 300℃ and 1 350℃ respectively. The effects of composition design and calcining temperature on the mineral phase of cement clinker were investigated by XRD and SEM, and the chemical reaction route and mechanism were discussed in this paper. The results indicate that the optimized mineral phase of cement clinker can be obtained under the following conditions:  $\text{MG} = 1.05$  and  $\text{MS} = 0.95$  at 1 300℃, and the phase compositions of cement clinker are  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$  58.73%,  $\text{C}_3\text{S}$  23.99%,  $\text{C}_2\text{S}$  2.87%,  $\text{C}_{11}\text{A}_7 \cdot \text{CaF}_2/\text{C}_{12}\text{A}_7$  14.07%, and  $f\text{-CaO}$  0.35%. The main phase  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$  in the cement clinker is well developed into regular and perfect rhombus-dodecahedron morphological crystals with sizes of 1~3  $\mu\text{m}$ , and the alite phase is developed into smaller hexagon crystals.

**Key words:** sulphoaluminate-alite; fly ash; cement clinker; mineral phase; sintering

水泥作为建筑领域中价廉而可靠的基础原料, 在现代社  
会中树立了极其稳固的地位。二十世纪 70 年代, 我国发明  
了硫铝酸盐水泥, 这类水泥是当代世界水泥发展史上的新品  
种, 与硅酸盐水泥和铝酸盐水泥相比, 它具早强、高强、高抗  
渗、高抗冻、耐蚀、低碱和生产能耗低等优良特性, 广泛应  
用于土木工程中的冬季施工工程、抗渗与防水工程、抢修工程、  
二次补强工程、灌浆工程、海洋及耐腐蚀工程等领域中, 具有  
十分乐观的发展前景。提高水泥的性能, 降低能耗, 节约优

质矿产资源, 减轻环境污染, 是未来水泥行业发展的主要方  
向(隋同波等 2003)。硫铝酸钙是具有良好胶凝性的水硬性  
物相, 是高性能硫铝酸盐水泥的主要矿相, 烧成温度低(1  
300℃ ± 50℃), 具有突出的快硬早强特性, 但需要大量优质  
铝矿资源, 生产成本高。阿利特 ( $\text{C}_3\text{S}$ ) 是传统硅酸盐水泥的  
主要物相, 有良好的胶凝性, 是水泥强度的主要来源, 但早期  
强度偏低, 烧成温度高 (>1 450℃), 能耗大。实现硫铝酸盐-  
阿利特的 1450℃ 的以下低温复合与共存, 最大发挥两种水

收稿日期: 2006-02-28; 修订日期: 2006-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(40602008), 矿物材料国家专业实验室开放基金资助项目(05005)

作者简介: 赵宏伟(1983-), 男, 本科生, 材料科学与工程专业, 联系作者: 李金洪, 环境矿物材料方向, E-mail: jinhong@cugb.edu.cn

泥矿相的优点,是制备新型高性能水泥研究的重点,也是目前我国高性能水泥基础研究领域的重要研究方向(沈晓冬等, 2002)。不少学者为之而努力,如范家骏等(1988)和沈晓冬等(2004)在传统硅酸盐水泥中引入少量的  $C_4A_3\bar{S}$  制备改性水泥。我国粉煤灰中的  $SiO_2$  和  $Al_2O_3$  含量较高(两者总和普遍  $>70\%$ ),且  $K_2O$ 、 $Na_2O$  等碱性挥发分含量低,主要由无定形的空心球状玻璃体和微晶质莫来石组成,蕴含较高的化学内能,具有良好的化学活性(马鸿文, 2005)。因此,粉煤灰常被用来制备普通硅酸盐水泥、碱激发胶凝材料或做混合材掺合料,但尚未见有利用粉煤灰制备硫铝酸钙-阿利特相高胶凝复合体系水泥的研究报道。本文设计以粉煤灰为原料,可部分取代硫铝酸盐水泥生产中的铝质、钙质原料,完全取代硅质原

料,以实现硫铝酸盐-阿利特相的低温复合,低成本生产高性能水泥,并对该高胶凝性复合水泥熟料形成的反应历程进行了研究。

## 1 实验部分

### 1.1 原料和配方设计

粉煤灰取自华北某电厂,属高铝粉煤灰,粉煤灰的粒度中位径  $d_{(0.5)} = 8.571 \mu m$ ,玻璃微珠的直径在  $0.5 \sim 15 \mu m$  之间,莫来石通常在  $1 \mu m$  以下且镶嵌分布在玻璃微珠上(李金洪等, 2005)。粉煤灰与铝矾土的化学成分见表 1。碳酸钙、硫酸钙和氟化钙等分别购自北京化学试剂厂,均为分析纯。

表 1 粉煤灰和铝矾土的化学成分

$w_B/\%$

Table 1 Chemical composition of fly ash and bauxite

原料	$SiO_2$	$TiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$MgO$	$CaO$	$Na_2O$	$K_2O$	烧失	总量
粉煤灰	48.13	1.66	39.03	3.71	1.05	3.30	0.21	0.69	1.551	99.33
铝矾土	4.91	3.55	88.60	0.91	1.05	0.33	0.01	0.08	0.03	99.50

设计 MG 和 MS 值,控制原料中  $CaO$  和  $CaSO_4$  的含量(Li *et al.*, 2001),以期最大产率生成  $C_4A_3\bar{S}$  和  $C_3S$ 。

$C_2S$  吸收转化为  $C_3S$ ;MG  $> 1$  时,表示此时有足量的  $CaO$  使  $C_2S$  转化,进而形成  $C_3S$ 。

$$MG = [CaO + 1.40 MgO - 0.70 Fe_2O_3 - 0.55 Al_2O_3] / (1.87 SiO_2) \quad (1)$$

$$MS = CaSO_4 / 0.44 Al_2O_3 \quad (2)$$

(1) 式中表示:1.00% (质量分数,下同)  $MgO$  相当于 1.40%  $CaO$ , 0.70%  $CaO$  被 1.00%  $Fe_2O_3$  吸收形成  $C_2F$ ; 0.55%  $CaO$  被 1.00%  $Al_2O_3$  吸收形成  $C_4A_3\bar{S}$ ; 1.87%  $SiO_2$  与 1.00%  $CaO$  形成  $C_2S$ 。式中, MG = 1 时,表示  $CaO$  恰被

(2) 式中表示:0.44%  $CaSO_4$  与 1.00%  $Al_2O_3$  形成  $C_4A_3\bar{S}$ 。当 MS = 1 时,  $CaSO_4$  全部被  $Al_2O_3$  全部吸收形成  $C_4A_3\bar{S}$ 。过量时,即 MS  $> 1$ ,  $CaSO_4$  将与  $C_2S$  反应形成  $2C_2S \cdot C\bar{S}$  对  $C_2S$  的稳定存在不利,也影响  $C_4A_3\bar{S}$  的形成。

根据式(1)和(2),适当控制 MG 和 MS 值,就能有效地控制  $C_4A_3\bar{S}$  和  $C_3S$  等物相生成,实验设计的配方及其化学组成见表 2。

表 2 设计 MG 和 MS 值及其化学组成

$w_B/\%$

Table 2 MG and MS values of prescription and chemical composition

样品	MG	MS	$CaO$	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$SO_3$	$CaF_2$	$Fe_2O_3$	$MgO$	$TiO_2$	$Na_2O$	$K_2O$
CM-1	1.10	0.90	53.94	23.63	12.77	5.94	1.02	1.07	0.43	0.96	0.05	0.17
CM-2	1.05	0.95	48.83	24.44	16.63	5.94	1.02	1.35	0.48	1.01	0.07	0.23
CM-3	1.00	1.00	48.81	23.23	17.80	5.94	1.02	1.43	0.49	0.96	0.08	0.25
CM-4	0.95	1.05	48.66	22.13	18.99	5.93	1.02	1.51	0.49	0.92	0.08	0.26
CM-5	0.90	1.10	48.41	21.14	20.19	5.93	1.01	1.57	0.49	0.89	0.08	0.28

### 1.2 实验方法

按照配方(表 2),配好生料,在震动磨中粉磨,所得粉体 200 目筛余  $< 8\%$ ,置于钢模,在 60MPa 下干压成型,制成  $\Phi 60 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  的圆柱体,放入快速升温炉中,分别在 1150、1200、1250、1300 和 1350℃ 下煅烧,保温 40min,迅速取出,鼓风机急冷至室温。烧后样品再次粉磨至 200 目,即得熟料,置于干燥器皿中测试待用。

XRD 分析采用 Philips X'Pert,电压 40kV,电流 40mA,

$Cu$  靶。采用自标法对熟料的 XRD 分析数据进行计算,从而获得熟料矿物组成(王英华, 1987)。取样品新鲜断面,喷金处理后,用于 SEM 观察,采用 JECL 公司生产的 JSM-6700F 型扫描电子显微镜。

## 2 结果与讨论

### 2.1 温度对熟料物相的影响

在硫铝酸钙矿物的合成中,随温度升高,原料发生一系

列的固相反应,并形成不同的矿相。研究配方在不同烧制温度下物相组成的变化,可以确定熟料物相形成的反应历程,从而找到最佳的制备条件。本文对配方在5个温度下熟料进行了全面的物相分析,图1为CM-2样熟料在各温度下的XRD结果。

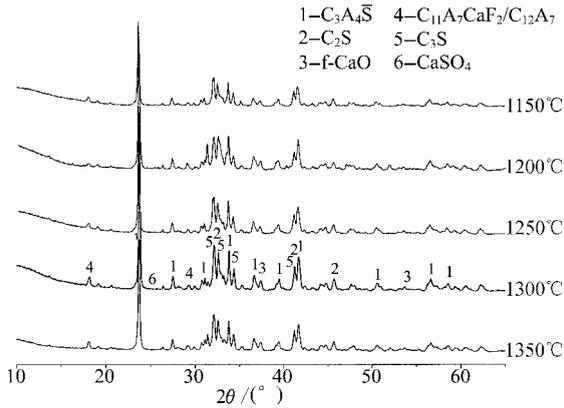


图1 熟料(CM-2)的XRD图(MG=1.05, MS=0.95)

Fig. 1 XRD patterns of sample CM-2 cement clinkers calcined at different temperatures

实验结果表明,在1150℃时,硫铝酸钙已出现,且在各种煅烧温度时,硫铝酸钙的衍射峰都要比其它物相衍射峰强度高且尖锐,说明硫铝酸钙在熟料体系中含量较多而且晶体发育良好,其X射线特征值分别为 $d_{(422)}=0.3760\text{ nm}$ ,  $d_{(444)}=0.2650\text{ nm}$ ,  $d_{(066)}=0.2166\text{ nm}$ 。在1150℃时,形成的物相依次有 $C_4A_3\bar{S}$ 、 $C_2S$ 、 $C_3S$ 、 $C_{12}A_7/C_{11}A_7\cdot CaF_2$ 以及少量的f-CaO,表明 $CaSO_4$ 已基本转化形成了 $C_4A_3\bar{S}$ ,含量约为54.60%。f-CaO含量约为0.56%。 $C_2S$ 的衍射峰强度较高,表明含量较多。 $C_3S$ 仅以重叠峰 $d=0.2789\text{ nm}$ (或 $2\theta=32.09^\circ$ )出现,说明在1150℃低温下主要为 $C_2S$ 和 $C_4A_3\bar{S}$ 的共存。熟料中出现的矿物 $C_{12}A_7$ 和 $C_{11}A_7\cdot CaF_2$ 的衍射峰完全重叠,两者为反应中间产物。

1200℃和1250℃时, $C_4A_3\bar{S}$ 衍射峰强度变高且尖锐, $C_3S$ 的衍射特征峰逐渐明显, $C_2S$ 衍射峰强度却开始降低, $C_{12}A_7/C_{11}A_7\cdot CaF_2$ 的衍射峰强度略有减弱。1300℃时, $C_3S$ 衍射峰明显增强,此时熟料中形成了约为23.99%的 $C_3S$ ;f-CaO含量仅为0.35%,说明其与 $C_2S$ 结合形成了 $C_3S$ ;此时 $CaSO_4$ 已被全部吸收形成 $C_4A_3\bar{S}$ , $C_4A_3\bar{S}$ 的衍射峰也达到最强,含量基本稳定,约为58.73%;体系中 $C_{12}A_7/C_{11}A_7\cdot CaF_2$ 已部分分解,产生 $Al_2O_3$ 与 $CaO$ ,有利于形成 $C_4A_3\bar{S}$ 。1350℃时, $C_4A_3\bar{S}$ 衍射峰有所降低, $C_{12}A_7/C_{11}A_7\cdot CaF_2$ 物相的衍射峰强度增高,f-CaO略微升高到0.45%,推测 $C_4A_3\bar{S}$ 开始分解, $C_3S$ 衍射强度基本保持不变。

由以上结果和分析可以看出, $C_4A_3\bar{S}$ 和 $C_3S$ 物相可以共存于同一种熟料体系中,但低温物相 $C_4A_3\bar{S}$ 和高温物相 $C_3S$ 的共存温度很狭窄,这与沈晓冬等(2004)的报道相似。实验

发现 $C_4A_3\bar{S}$ 大量形成在1150~1350℃之间, $C_3S$ 大量出现并稳定存在于1250℃以上,这与矿化剂 $CaF_2$ 增加体系反应液相量降低反应温度有关, $CaF_2$ 提供了变网阳离子及和非桥氧等效的 $F^-$ ,使 $SiO_2$ 熔体中硅氧阴离子团网络断裂,低聚物不断增加,从而使体系液相量增加,黏度下降,促进 $C_3S$ 在1450℃以下的低温合成。综合以上结果表明,1300℃为较理想的温度条件,此时 $C_4A_3\bar{S}$ 和 $C_3S$ 可以较大量共存, $C_4A_3\bar{S}$ 结晶度也较好,同时f-CaO含量也较少,熟料的易燃性也好,煅烧温度比以 $C_3S$ 为主要矿物的硅酸盐水泥约低150℃。

## 2.2 熟料物相组成与MS、MG值间的关系

以 $CaO$ 和 $CaSO_4$ 全部被吸收为前提,即 $MG=1$ 和 $MS=1$ ,形成硫铝酸钙-阿利特高胶凝性复合矿相水泥熟料体系的反应如下:

形成 $C_3S$ 的主要反应(周亚栋,1994;苏达根,2005):  
800℃,开始形成 $C_2S$



900~1100℃, $C_2AS$ 的形成与分解



1450~1300℃, $C_3S$ 结晶过程



$C_4A_3\bar{S}$ 的形成(郭俊才,1993;苏达根,2005):800℃,中间相CA和 $C_2S \cdot C\bar{S}$ 开始形成



1050~1350℃,



Li等(2001)指出,若配料不当,将生成 $C_2AS$ 和 $2C_2S \cdot C\bar{S}$ ,且大量存在的 $C_2AS$ 不利于 $C_2S$ 的形成, $2C_2S \cdot C\bar{S}$ 不利于 $C_2S$ 的稳定存在,而 $C_2S$ 的减少直接影响 $C_3S$ 的生成。由(4)(5)式可知, $C_2AS$ 是一种过渡相,当温度高于1100℃时,分解生成 $C_2S$ ,但如果存在足够 $CaO$ 存在于液相中参与反应(5), $C_2AS$ 将残留在熟料中不能大量形成CA,从而不利于 $CaSO_4$ 的吸收。本实验并未在熟料中发现 $C_2AS$ 、 $2C_2S \cdot C\bar{S}$ 等过渡相物相,说明在1150℃以上全部分解。毛若卿等(1997)在1000℃的XRD图谱中已找不到 $C_2AS$ 衍射峰,认为 $CaO$ 会有效地抑制 $C_2AS$ 的形成,而形成了大量的 $C_4A_3\bar{S}$ 、 $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$ 等物相,这也与本实验结果相符。

图2给出了不同煅烧温度下熟料体系中各种物相含量与MS、MG值的关系。由图2可见,当MS值在0.9~1.10之间变化时,各种物相的含量变化差异较大,并体现了不同的规律性。当MS=0.9时, $C_4A_3\bar{S}$ 含量较低,说明 $CaSO_4$ 含量控制不足, $C_3S$ 、 $C_2S$ 及 $C_{12}A_7/C_{11}A_7 \cdot CaF_2$ 含量较多,这也与设计较多的 $CaO$ 相一致,此时f-CaO含量也较高。当MS=0.95(MG=1.05),提供了较多的 $CaSO_4$ , $C_4A_3\bar{S}$ 含量明显

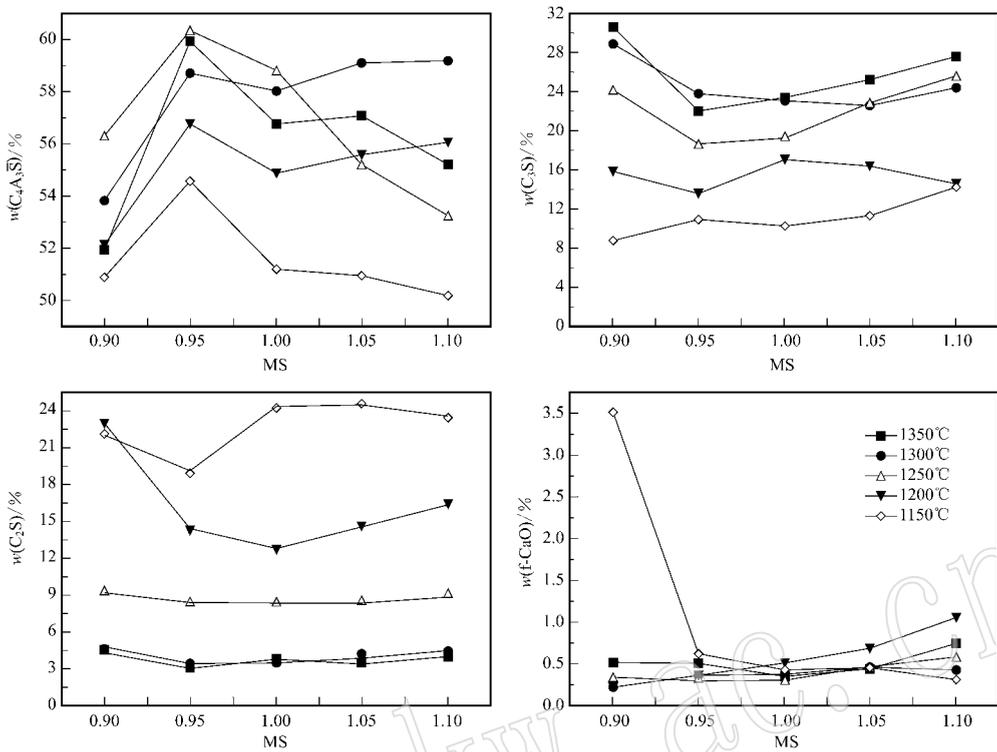


图 2 不同温度下熟料物相与配方变化规律

Fig. 2 Effects of MS ratios on the mineral phase of cement clinker calcined at different temperatures

增加,设计的  $CaO$  减少,物相  $C_3S$ 、 $C_2S$  和游离的  $f-CaO$  含量也都略有减少。当  $MS=1$  ( $MG=1$ ),  $CaSO_4$  和  $CaO$  在理论上都应全部被吸收形成  $C_4A_3\bar{S}$  和  $C_3S$  等物相,该条件下二者的含量最高,由于实际反应不完全,熟料中还存在着  $C_2S$  和  $C_{12}A_7/C_{11}A_7 \cdot CaF_2$  等,致使  $C_4A_3\bar{S}$  和  $C_3S$  并未达到最大产率。可见  $MS>1$  ( $MG<1$ ),过量的  $CaSO_4$  并没有导致  $C_4A_3\bar{S}$  含量的增加, $C_3S$ 、 $C_2S$  和游离  $f-CaO$  却略有上升,而在低温  $1150^\circ C$  和  $1200^\circ C$  的曲线变化上,各物相含量变化比较异常,可能与低温下各物相形成的稳定性或形成其他物相有关。

### 2.3 熟料的显微形貌

对 CM-2 熟料样进行 SEM 观察,由图 3a 可以看出,熟料基本上由结晶质颗粒组成,呈聚集态。高倍电镜下观察(图 3b)熟料中主要矿物硫铝酸钙呈菱形十二面体,发育完整,形态规则,结晶度高,轮廓清晰,粒径在  $1\sim 3\ \mu m$  之间。阿利特相为板状六角形或钝圆状,晶体发育相对细小,多被结晶良好的硫铝酸钙聚集体包裹,这与烧成温度低难以形成较大阿利特晶体有关。李艳君等(2001)在  $1300^\circ C$  就  $CaF_2$  对  $C_4A_3\bar{S}$  物相形成的影响研究中指出,少量  $CaF_2$  会促进四方晶系硫铝酸

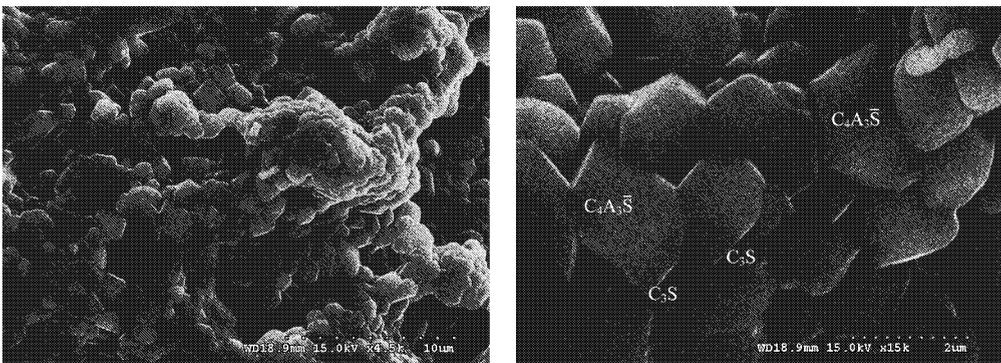


图 3 熟料(CM-2)SEM 形貌

Fig. 3 SEM photos of cement clinker(CM-2) calcined at  $1300^\circ C$

钙的发育,但  $\text{CaF}_2$  对硫酸盐水泥熟料的影响机理目前仍不清楚。

### 3 结论

(1) 以高铝粉煤灰为主要原料通过控制 MG 和 MS 值,在矿化剂  $\text{CaF}_2$  作用下,于  $1300^\circ\text{C}$  条件下成功实现硫酸钙-阿利特相的低温复合,制得新型高胶凝性复合矿相水泥熟料,煅烧温度比以  $\text{C}_3\text{S}$  为主要物相的硅酸盐水泥约低  $150^\circ\text{C}$ 。

(2) 煅烧温度和 MG、MS 值是影响熟料各物相发育的主要因素,当  $\text{MS}=0.95\sim 1.10$ ,  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$  在  $1150^\circ\text{C}$  已较多出现,于  $1300^\circ\text{C}$  大量形成并稳定存在,此时  $\text{C}_3\text{S}$  与  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$  大量共存。 $\text{CaF}_2$  促进了熟料中硫酸钙与阿利特相的低温复合。

(3) 当设计配方中  $\text{MG}=1.05$ 、 $\text{MS}=0.95$  时,在  $1300^\circ\text{C}$  烧制时,获得较佳的复合矿相水泥熟料,其物相组成: $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$  58.73%,  $\text{C}_3\text{S}$  23.99%,  $\text{C}_2\text{S}$  2.87%,  $\text{C}_{11}\text{A}_7\cdot\text{CaF}_2/\text{C}_{12}\text{A}_7$  14.07%, f-CaO 0.35%。熟料主要物相硫酸钙晶体呈菱形十二面体,发育完整,形态规则,颗粒大小约为  $1\sim 3\ \mu\text{m}$ ;阿利特( $\text{C}_3\text{S}$ )相为板状六角形,晶体发育相对细小。

### References

Guo Juncai. 1993. Progress in Cement and Technology [ M ]. Beijing : China Architectuer Materials and Industry Press ( in Chinese ).

Li Haoxuan , Dinesh K A , Cheng Jiping , *et al.* 2001. Microwave sintering of sulphoaluminate cement with utility wastes [ J ]. Cement and Concrete Research 31 : 1 257~1 261.

Li Jinhong , Ma Hongwen and Wu Xiwen. 2005. The preparation of  $\beta$ -Sialon powder from high-alumina fly ash : an experimental study [ J ]. Acta Petrologica et Mineralogica , 24 ( 6 ) 643~647 ( in Chinese with English abstract ).

Fan Jiajun , Li Xiuying , Tong Xueli , *et al.* 1988. Constitutes and preparation of a kind of alite-sulphoaluminate cemen [ P ]. China Patent , 86103649 ( in Chinese ).

Li Yanjun , Zhang Ning , Liu Feng , *et al.* 2001. Influence of  $\text{CaF}_2$  on the Formation and Hydration Properties of  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$  [ J ]. Journal of Building Materials A ( 3 ) 217~221 ( in Chinese ).

Ma Hongwen , *et al.* 2005. Industrial Minerals and Rock [ M ]. Beijing : Chemical Industry Press , 504~505 ( in Chinese ).

Mao Ruoqing , Xiong Jiaguo , Pan Guoyao , *et al.* 1997. Influence of existances of F , Cl and  $\text{SO}_3$  on  $\text{C}_2\text{AS}$  formation [ J ]. Journal of Wuhan U-

niversity of Technology , 19 ( 4 ) : 13~15 ( in Chinese ).

Shen Xiaodong , Wang Hongfen and Yuan Yuan. 2002. The hydration degree of admixture in Portland Cement containing  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$  [ J ]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society 6 : 41~45 ( in Chinese ).

Shen Xiaodong , Wang Hongfen , Yuan Yuan , *et al.* 2004. The study of Mechanical properties and hydrated properties of portland cement containing sulphoaluminate [ A ]. Foundational Research on Advanced Cements—Progress in 973 Project [ C ]. Beijing : China Spin Industry Press , 117 ( in Chinese ).

Su Dagen. 2005. Cement and Cement Thchnology [ C ]. Chemical Industry Press 3 : 31~38 ( in Chinese ).

Sui Tongbo , Zhu Xiaoling , Ni Zhujun , *et al.* 2003. The latest progress in reserch and application of international cement and concret [ J ]. Cement , ( 2 ) 66~69 ( in Chinese ).

Wang Yinghua. 1987. XRD Basis Technology [ C ]. Nuclear Press 4 : 190~194 ( in Chinese ).

Zhou Yadong. 1994. Physical Chemistury of Inorganic Materials [ M ]. Wuhan University of Technology Press , 104 ( in Chinese ).

### 附中文参考文献

郭俊才. 1993. 水泥及混凝土技术进展 [ M ]. 北京 : 中国建筑材料工业出版社.

李金洪, 马鸿文, 吴秀文. 2005. 利用高铝粉煤灰合成  $\beta$ -Sialon 粉体的实验研究 [ J ]. 岩石矿物学杂志, 24 ( 6 ) 643~647.

范家骏, 李秀英, 童雪莉, 等. 1988. 阿利特硫酸盐水泥的组成及制造方法 [ P ]. 中国专利, 86103649.

李艳君, 张宁, 刘峰, 等. 2001.  $\text{CaF}_2$  对  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$  矿物的形成及水化性能的影响 [ J ]. 建筑材料学报, A ( 3 ) 217~221.

马鸿文. 2005. 工业矿物与岩石 [ M ]. 北京 : 化学工业出版社, 504~505.

毛若卿, 熊家国, 潘国耀, 等. 1997. F、Cl、 $\text{SO}_3$  对  $\text{C}_2\text{AS}$  形成的影响 [ J ]. 武汉工业大学学报, 19 ( 4 ) : 13~15.

沈晓冬, 王洪芬, 袁园. 2002. 含  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$  矿物硅酸盐水泥中混合材反应程度的研究 [ J ]. 硅酸盐通报, 6 : 41~45.

沈晓冬, 王洪芬, 袁园, 等. 2004. 含硫酸盐硅酸盐水泥力学性能及水化产物研究 [ A ]. 高性能水泥基础研究——973 项目研究进展 [ C ]. 北京 : 中国纺织工业出版社, 117.

苏达根. 2005. 水泥与混凝土工艺 [ M ]. 化学工业出版社, 3 : 31~38.

隋同波, 朱晓玲, 倪竹君, 等. 2003. 国际水泥与混凝土研究及应用最新进展 [ J ]. 水泥 ( 2 ) 66~69.

王英华. 1987. X 射线衍射技术基础 [ M ]. 原子能出版社, 4 : 190~194.

周亚栋. 1994. 无机材料物理化学 [ M ]. 武汉理工大学出版社, 104.