

铝硅系耐火原料与碱蒸气反应侵蚀行为

王治峰¹, 李亚伟¹, 徐义彪¹, 桑绍柏¹, 马淑龙², 张海波², 高长贺²

(1. 武汉科技大学, 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室, 武汉 430081;

2. 北京金隅通达耐火技术有限公司, 北京 100085)

摘 要: 近年来, 污泥、生活垃圾作为水泥生产的部分燃料应用于水泥生产, 造成水泥窑炉衬材料硅莫砖的严重碱侵蚀破坏和剥落, 影响水泥窑的稳定运行。采用碱蒸气法系统研究了水泥窑硅莫砖用高铝矾土、莫来石(M60)及莫来凯特 3 种铝硅系耐火原料抗碱蒸气侵蚀行为。结果表明: 3 种铝硅系耐火原料的碱蒸气侵蚀行为, 与原料中的化学成分、玻璃相含量和成分及其显微结构等密切相关。对于以刚玉、莫来石为主的高铝矾土, 碱与刚玉、莫来石晶相发生反应形成钾霞石, 产生体积膨胀, 使得高铝矾土表面先发生疏松和开裂, 后碱蒸气渗入颗粒内部, 造成严重碱侵蚀破坏; 而对于以莫来石为主的莫来石(M60)原料, 碱与莫来石和玻璃相发生反应, 形成瞬间液相并析出白榴石相, 形成的液相阻止了碱的渗透, 使碱侵蚀仅发生在表面层而表现出优良的抗碱侵蚀性能。而莫来凯特原料中晶相莫来石与玻璃相含量相当, 玻璃相含量高达 46%, 其与碱蒸气发生化学反应形成更多的液相, 同时析出白榴石相, 因氧化钾反应溶解在该原料玻璃相中, 造成原料整体性侵蚀破坏。

关键词: 铝硅系耐火原料; 氧化铝; 氧化硅; 碱蒸气; 侵蚀行为

中图分类号: TQ175 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)06-1694-07

网络出版时间: 2022-06-01



Alkali Vapor Attack Behavior of Al_2O_3 - SiO_2 Refractory Raw Materials

WANG Zhifeng¹, LI Yawei¹, XU Yibiao¹, SANG Shaobai¹, MA Shulong², ZHANG Haibo², GAO Changhe²

(1. The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;

2. Beijing Jinyu Tongda Refractory Technologies Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: Sewage sludge and household garbage are used as an alternative fuel in recent production of cement. However, the alternative fuel causes serious alkali attack and spalling of bauxite-SiC refractories for cement kiln lining, thus having an impact on the operation of the cement kiln. In this paper, the alkali vapor exposure was used to evaluate alkali attack on some raw materials like bauxite, mullite (M60) and molochite, which were used to prepare mullite-SiC composite refractory as a lining of cement kiln. The results show that the alkali attack resistance of these raw materials is closely related to their chemical composition, phase composition and microstructures. Bauxite with corundum and mullite as main phases is attacked by alkali to form a kaliophilite phase and induce cracks and loose structure, further enhancing gaseous alkali penetration and serious damage. Mullite (M60) with mullite as a main phase is attacked by alkali to form leucite and transient liquid phase. The resultant liquid phase prevents from the penetration of alkali, and the attack only occurs on the surface layer, so mullite (M60) exhibits a superior alkali attack resistance. Molochite with mullite and glass (the content of 46%) reacts with alkali vapor to form more liquid phase and leucite. As alkali vapor is dissolved in the glass phase of molochilte, the integrity of molochite is destroyed by alkali attack.

Keywords: alumina-silica refractory raw materials; alumina; silica; alkali vapor; alkali attack behavior

收稿日期: 2021-11-05. 修订日期: 2022-01-20.

基金项目: 大宗铝硅酸盐无机固体废物相重构与转化利用科学基础(2019 YFC1904900); 轻量耐火材料微结构设计、调控及其性能研究(2019CFA050)。

第一作者: 王治峰(1982—), 男, 博士研究生。

通信作者: 李亚伟(1966—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2021-11-05. Revised date: 2022-01-20.

First author: WANG Zhifeng (1982—), male, Doctorial candidate.

E-mail: 150070831@qq.com

Correspondent author: LI Yawei (1966—), male, Ph. D., Professor.

E-mail: liyawei@wust.edu.cn

近年来, 污泥、生活垃圾等作为替代燃料被广泛应用于水泥熟料生产^[1-4], 其重要原因是水泥回转窑窑内温度高, 避免了二噁英等产生, 同时, 既节约了煤炭等化石燃料^[5], 又实现了良好社会效益^[6]。然而, 这些替代燃料中带入大量的碱性物质, 会在水泥窑中循环富集, 使得水泥窑炉衬遭受严重的碱侵蚀破坏和剥落, 影响水泥窑的稳定运行^[7-8]。因此, 急需开发出高抗碱侵蚀回转窑炉衬耐火材料, 以适应上述水泥窑协同处置技术发展的要求。

莫来石碳化硅耐火材料(简称硅莫砖)具有强度高、耐磨性和抗热震性优异等特点被用于水泥回转窑过渡带^[9-10]。目前, 硅莫砖生产过程中主要以氧化铝含量 85%以上高铝矾土碳化硅为原料, 经机压成型和高温烧制而成。最近, 有研究报道可通过调控材料的基质组成, 优化孔结构, 骨料涂覆, 阻止碱蒸气的侵蚀和向材料内的渗透, 提高其抗碱侵蚀性^[5-8, 11]。当基质组成中氧化铝/氧化硅摩尔比为 0.6 时, 材料具有高的荷重软化温度和良好的抗碱性^[12]; 而在材料制备过程中引入碳化硅细粉和单质硅粉, 会发生氧化而堵塞表面气孔, 大幅度降低材料的平均孔径和透气度, 同时强化了材料中骨料和基质界面的结合, 提高了材料的抗碱蒸气侵蚀性^[13]。事实上, 对于硅莫砖, 其中基质细粉部分占 30%~40%, 骨料(颗粒料)部分占 60%~70%, 除高铝矾土作为骨料外, 莫来石(M60)和莫来凯特也

有望成为硅莫砖的骨料, 其中莫来石(M60)化学组成与抗碱性能优异的红柱石相近^[14-15], 而莫来凯特作为莫来石和高硅氧玻璃相组成的复合原料, 其热膨胀系数低, 热震稳定性优良, 且高硅氧玻璃相存在, 也具有较强的抗碱侵蚀性^[16]。

本工作选取高铝矾土、莫来石以及莫来凯特 3 种铝硅系耐火原料, 采用碱蒸气法研究 3 种铝硅系耐火原料的抗碱蒸气侵蚀性能, 最后结合 Factsage 热力学软件综合分析讨论 3 种原料的碱侵蚀行为。

1 实验

1.1 原料及抗碱蒸气侵蚀实验

原料为高铝矾土(孝义市亿科新材料有限公司)、莫来石 M60 (阳泉金隅通达高温材料有限公司)、莫来凯特(益瑞石上海投资管理有限公司), 各原料的化学成分见表 1, 显气孔率及孔径结构参数见表 2。

表 1 铝硅系原料化学成分

Table 1 Chemical composition of alumina-silica refractory raw materials

Raw materials	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	R ₂ O
Bauxite	87.01	5.67	1.47	3.36	0.24	0.37	0.24
Mullite M60	63.02	27.86	2.30	2.78	0.54	0.45	1.73
Molochite	41.84	51.52	2.03	0.08	0.42	0.73	1.86

w—Mass fraction.

表 2 铝硅系原料显气孔率及气孔结构参数

Table 2 Apparent porosity and the pore parameters of alumina-silica refractory raw materials

Raw materials	Apparent porosity/%	Mean pore size/ μm	Volume fraction of different pore size/%	
			<3 μm	>10 μm
Bauxite	5.4	6.8	39	43
Mullite M60	5.5	21.2	18	65
Molochite	7.9	0.8	61	32

参照 GB/T 14983—2008(耐火材料抗碱性试验方法)所述方法进行铝硅系原料抗碱蒸气侵蚀实验。图 1 为原料抗碱蒸气侵蚀实验示意图。由图 1 可见: 首先将炭黑(C)与 K₂CO₃ 按照质量比 1:1 预混合制备侵蚀介质, 接着按照侵蚀介质与颗粒状试样质量的比为 1:1 装入封闭的石墨坩埚($\phi 80\text{ mm} \times 150\text{ mm}$)之中, 并用多孔的不锈钢网支撑体分隔, 将石墨坩埚置于刚玉匣钵($240\text{ mm} \times 130\text{ mm} \times 120\text{ mm}$)中并用焦炭掩埋, 并在 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 保温 10 h。

1.2 样品表征

用 ARL 9900 荧光分析仪分析铝硅系原料侵蚀前后的化学成分、晶相及玻璃相化学成分, 采用

YB/T 4584—2017 方法(莫来石物相分析方法)测定铝硅系原料侵蚀前后玻璃相含量。用荷兰 X'Pert pro 型 X 射线衍射仪检测原料侵蚀前后的物相组成, 测试条件: Cu 靶, K α_1 射线, 管电压为 40 kV, 管电流为 40 mA, 扫描范围(2θ)为 $10^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。采用 EVO18 型扫描电子显微镜分析原料侵蚀前后的显微结构, 并采用能谱仪(EDS, X-MAX50, Oxford, UK)进行成分分析。

利用 Factsage 6.2 计算获得 K₂O-Al₂O₃-SiO₂ 系三元相图, 依据化学分析中获得的氧化铝及氧化硅含量计算铝硅系原料玻璃相、晶相的 Al₂O₃/SiO₂ 摩尔比^[12], 分析玻璃相及晶相与碱反应过程。

2 结果与讨论

2.1 侵蚀前后质量及化学成分变化

铝硅系原料侵蚀后质量的变化率如图 1 所示。3 种铝硅系原料质量增加率从大到小顺序依次为高铝矾土、莫来凯特和莫来石 M60。铝硅系原料侵蚀前后的化学成分见表 3。由表 3 可知, 随着高温下碱蒸气向原料内部渗透与侵蚀, 侵蚀后原铝硅系原料中化学成分中除碱性氧化物有所增加外(如高铝矾土、莫来石 M60 和莫来凯特中碱性氧化物分别增加 4.18%、4.10%和 6.43%), 其它成分如氧化铝、氧化硅等均有一定程度的降低。由此认为: 图 1 原料侵蚀后质量的增加和化学成分的变化来源于碱蒸

气与材料的化学反应及碱在材料内部的沉积。

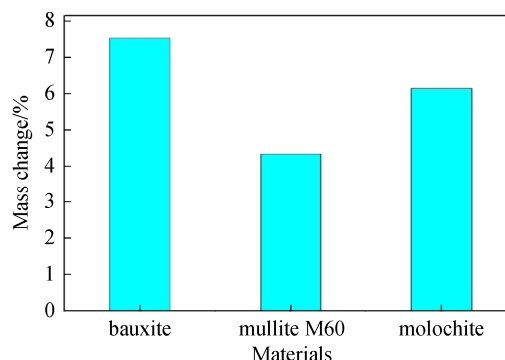


图 1 铝硅系原料侵蚀后质量的变化率
Fig. 1 Mass change ratio (MCR) of alumina-silica refractory raw materials before and after alkali attack

表 3 铝硅系原料侵蚀前后的化学组成

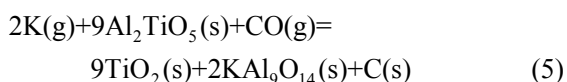
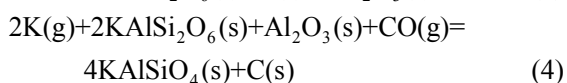
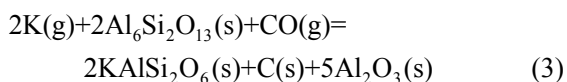
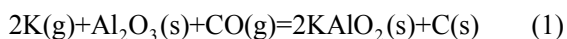
Table 3 Chemical composition of alumina-silica refractory raw materials before and after alkali attack

Raw materials	Before or after alkali attack	w/%						
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O
Bauxite	Before	88.17	5.75	1.49	3.40	0.34	0.60	0.23
Bauxite	After	87.43	3.59	0.58	3.23	0.24	0.37	4.41
Mullite M60	Before	63.86	28.22	2.33	2.82	0.55	0.51	1.74
Mullite M60	After	61.78	27.50	1.08	2.83	0.41	0.47	5.84
Molochite	Before	42.74	52.63	1.46	0.09	0.43	0.75	1.89
Molochite	After	41.62	48.08	1.23	0.07	0.14	0.45	8.32

w is mass fraction.

2.2 侵蚀前后物相组成变化

铝硅系原料侵蚀前后的物相组成变化和相对含量变化分别见图 2 和表 4。由图 2 和表 4 可以看出, 铝硅系原料受到碱蒸气侵蚀后物相组成均发生了不同程度的变化。高铝矾土侵蚀后材料中除刚玉和莫来石相外, 出现了钾霞石(KAlSiO₄)相及锐钛矿相, 且原有的钛酸铝相消失, 玻璃相含量增加, 反应如式(1)~式(5)所示。莫来石 M60 侵蚀后除莫来石外, 生成了钾霞石、石榴石(KAlSi₂O₆)及刚玉相, 反应如式(3)和式(4)所示, 原有的金红石相消失, 玻璃相含量减少。与莫来石 M60 类似, 莫来凯特侵蚀后的产物中除已有的莫来石相外, 也出现了钾霞石及石榴石, 玻璃相略有增加。



2.3 侵蚀前后显微结构变化

铝硅系原料碱侵蚀前后的显微结构分别如图 3 和图 4。从图 3 可以看出, 高铝矾土中刚玉及莫来石相呈粒状或短柱状分布, 钛酸铝相分布于刚玉及莫来石相晶粒之间。此外, 骨料内还存在大小不等的气孔; 莫来石 M60 中莫来石晶粒呈长柱状, 金红石相零星地分布于莫来石晶粒之间, 骨料中存在着大小不等的气孔, 且有气孔大于 50 μm, 这与前面表 2 莫来石平均孔径最大至 21.2 μm 相吻合; 相比于莫来石 M60 原料, 莫来凯特中的气孔要小得多, 孔径约 1 μm 并零星的分布于骨料内部, 莫来石晶粒之间出现的空隙, 则是材料中玻璃相较多且被氢氟酸腐蚀后留下的(表 4)。

图 4 为铝硅系原料碱蒸气侵蚀后的显微结构。由图 4 可以看出, 高铝矾土骨料被碱蒸气侵蚀后表面形成约 200 μm 左右的侵蚀层。结合图 2 可知, 该侵蚀层为钾霞石, 钾霞石的形成使得表面疏松且有部分已剥落, 除了表面形成的钾霞石侵蚀层外, 碱在颗粒内部也均有渗透沉积, 元素面扫描表明钾均匀分布于骨料晶粒晶界处。与高铝矾土相比, 莫来石 M60 原料碱蒸气侵蚀后表面及内部

较大气孔附近形成富钾产物层，对照图 2 推测，在这些表面和气孔周围存在侵蚀产物石榴石及钾霞石相，该反应层厚度在 100~200 μm 间。莫来凯特侵蚀后在颗粒表面及裂纹附近较大范围内(200 μm 以上)存在钾元素聚集，并在表面层钾元素富集区域形成裂纹，结合图 2 可知石榴石及钾霞石聚集在表面层。

2.4 讨论

表 5 为 3 种铝硅系原料抗碱侵蚀前后的晶相、

玻璃相中相关的化学成分分析结果。由表 5 可以看出，3 种原料碱侵蚀后玻璃相中氧化铝、氧化钾含量均有不同程度的提高，氧化硅含量降低，与此相比，3 种原料侵蚀后晶相中氧化钾含量均有提高。结合图 3 可知，上述原料受到侵蚀均发生 2 类反应，即晶相受碱蒸气侵蚀形成蚀变晶相如钾霞石等，同时部分形成玻璃相，其次玻璃相中随着碱的溶解侵蚀，也会产生晶相析出，但因原料中铝硅比、晶相和玻璃相含量不同，上述 2 种反应存在差异。

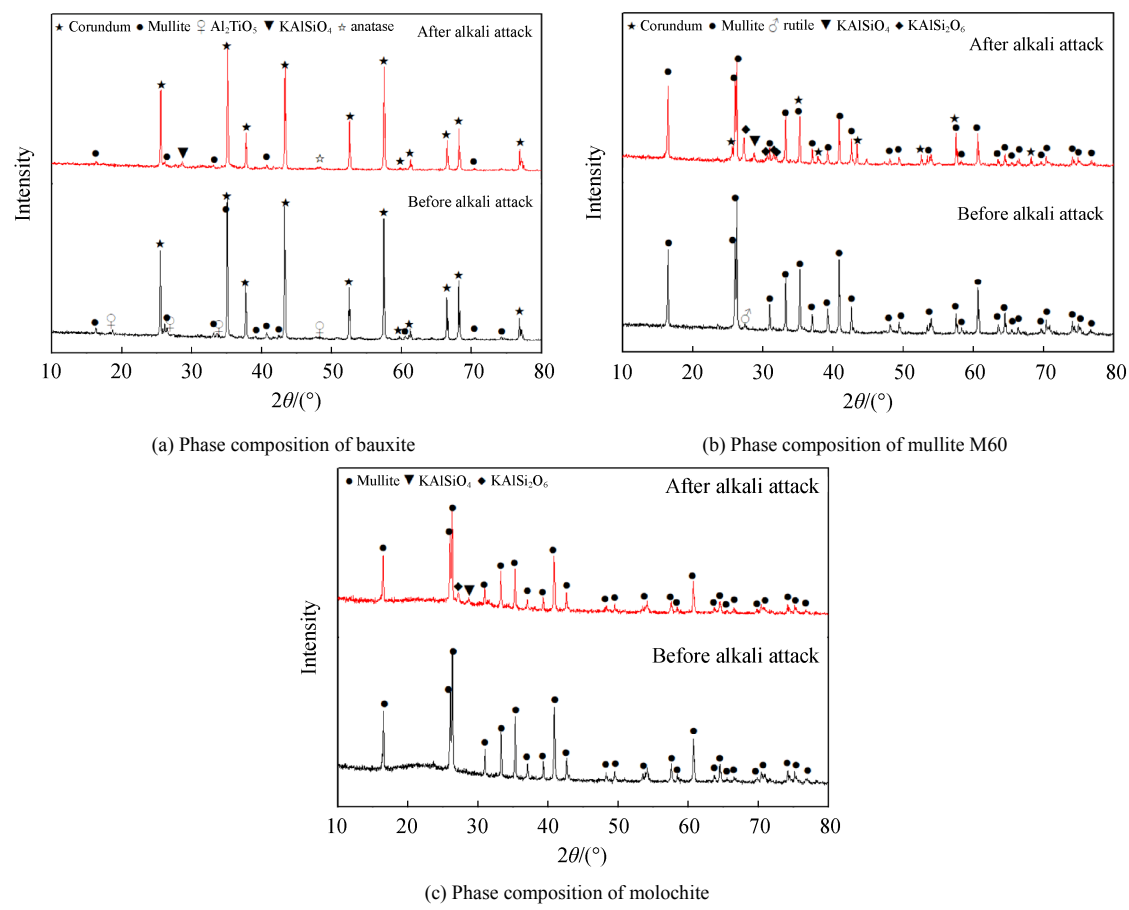


图 2 铝硅系原料碱侵蚀前后物相组成变化
Fig. 2 Phase composition of alumina-silica refractory raw materials before and after alkali attack

表 4 铝硅系原料侵蚀前后的物相组成

Raw materials	Phase composition			w(Glass)/%
	Main phase	Secondary phase	Minor phase	
Bauxite	Corundum (+++)	Mullite (++)	Al ₂ TiO ₅ (+)	8.57
Bauxite after alkali attack	Corundum (+++)		Mullite, KAlSiO ₄ (+)	16.84
Mullite M60	Mullite (+++)		Rutile (+)	22.02
Mullite M60 after alkali attack	Mullite (+++)		KAlSi ₂ O ₆ , KAlSiO ₄ , corundum (+)	6.46
Molochite	Mullite (+++)			45.82
Molochite after alkali attack	Mullite (+++)		KAlSi ₂ O ₆ , KAlSiO ₄ (+)	48.91

+++ represents main phase; ++ represents secondary phase; + represents minor phase.

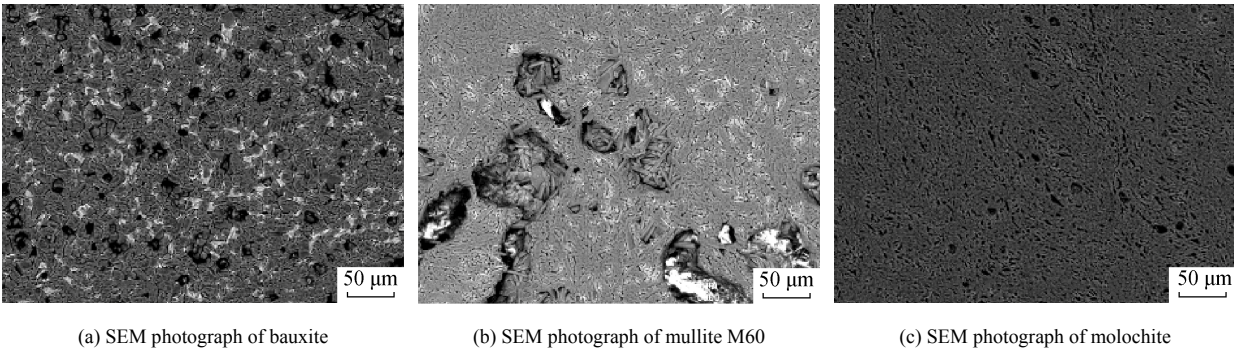


图 3 铝硅系原料显微结构
Fig. 3 Microstructure of alumina–silica refractory raw materials

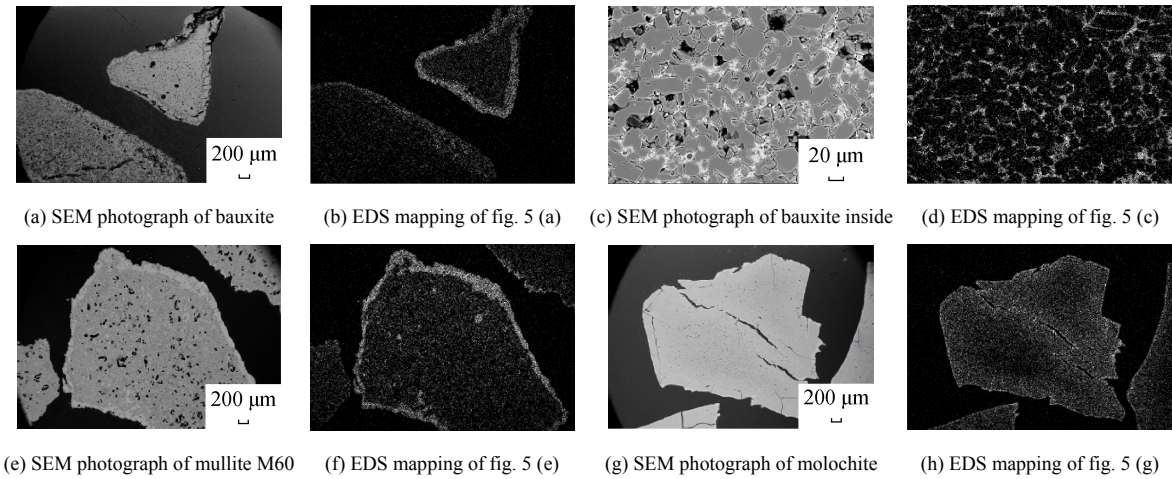


图 4 铝硅系原料碱蒸气侵蚀后的显微结构
Fig. 4 Microstructure of alumina–silica refractory raw materials after alkali attack

表 5 铝硅系原料侵蚀前后玻璃相及晶相的化学组成

Raw materials	Glass				Crystal phase			
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O
	w/%							
Bauxite	34.23	27.98	13.68	2.40	93.23	3.66	2.44	0.03
Bauxite after alkali attack	54.90	9.68	16.25	28.02	95.10	2.54	0.91	0.18
Mullite M60	15.31	61.96	3.95	7.48	77.53	18.69	2.49	0.12
Mullite M60 after alkali attack	17.00	49.98	7.24	24.67	69.16	22.81	1.57	4.11
Molochite	9.65	82.18	0.18	4.02	70.73	27.64	0.01	0.09
Molochite after alkali attack	22.50	67.81	0.09	7.64	59.91	29.19	0.05	8.97

高铝矾土中刚玉、莫来石晶相受到碱侵蚀后形成钾霞石，并发生体积膨胀，颗粒表面碎裂，碱蒸气渗入骨料内部，侵蚀反应加剧，玻璃相含量增加。而相比于高铝矾土，莫来石 M60 中玻璃相含量高达 22% (表 4)，该骨料中莫来石晶相受到碱侵蚀发生蚀变，弱于玻璃相受到碱渗入的影响，使碱侵蚀局限于颗粒表面(图 4b)，即骨料中的玻璃相具有吸收碱

蒸气的作用，碱渗入析出晶相占主导，造成莫来石 M60 受侵蚀后玻璃相含量的降低。莫来石 M60 中晶相莫来石则侵蚀中转化为钾霞石及刚玉相。莫来凯特原料中具有高的玻璃相含量(45.8%)，但受到莫来凯特侵蚀中玻璃相化学组成的影响，莫来石和玻璃相受到碱蒸气侵蚀后，析出钾霞石及白榴石，仍然保持较高含量的玻璃相含量。侵蚀后高铝矾土玻璃

相中氧化钛含量由 13.68% 提高到 16.25%，晶相氧化钛含量由 2.44% 降低到 0.91%；莫来石 M60 中玻璃相中氧化钛含量由 3.95% 提高到 7.24%，晶相中氧化钛含量由 2.49% 降低至 1.57%，这与前面衍射分析中钛酸铝及金红石的消失相符。

前述化学分析发现了碱侵蚀后原料晶相的侵蚀及玻璃相的析出过程，可以从 1000 °C 条件下 $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ 系三元相等温截面图 5 得以证实。从图 5 可以看出：高铝矾土晶相受到碱侵蚀后形成石榴石及刚玉相，随后转变为钾霞石。随着 K_2O 含量的提高，在 K_2O 含量约 0.13 mol 左右形成液相，液相的形成使得玻璃相含量增加。高铝矾土中占比较少的玻璃相虽然在侵蚀过程中同样先形成石榴石，随后转变为钾霞石，但在 K_2O 含量 0.24 mol 才形成液相。而 M60 侵蚀后均先形成石榴石及刚玉相，随后转变为钾霞石，并于 K_2O 含量约 0.18~0.20 mol 形成液相。莫来石 M60 玻璃相在碱侵蚀中析出石榴石，并于 K_2O 含量约 0.10 mol 时形成液相，石榴石

的析出造成玻璃相的减少。莫来凯特玻璃相与莫来石 M60 类似，碱侵蚀过程中也析出石榴石，并于 K_2O 含量约 0.05 mol 时形成液相。由此可见，3 种原料晶相、玻璃相在形成液相方面存在着明显的差异：晶相从高铝矾土、莫来石到莫来凯特，形成液相的 K_2O 含量在 0.13~0.20 mol 间波动，反映出形成液相的困难程度随着氧化铝含量的降低而提高；与晶相比，玻璃相形成液相困难程度随着氧化铝含量的降低而降低。除上述因成分的不同造成液相形成难易程度的差异外，莫来石及莫来凯特玻璃相含量差别大，造成液相形成后的转变过程也不同：莫来石中玻璃相受侵蚀后为瞬间液相，反应后析出侵蚀产物相(导致玻璃相含量降低)，而莫来凯特中玻璃相含量高达 45.8% 且呈连续状，该原料侵蚀后形成更多的液相/玻璃相(表 4)。莫来凯特侵蚀中形成大量的液相为碱的侵蚀提供了通道，不仅造成了表面区域的侵蚀开裂，而且还将形成的刚玉相侵蚀殆尽。

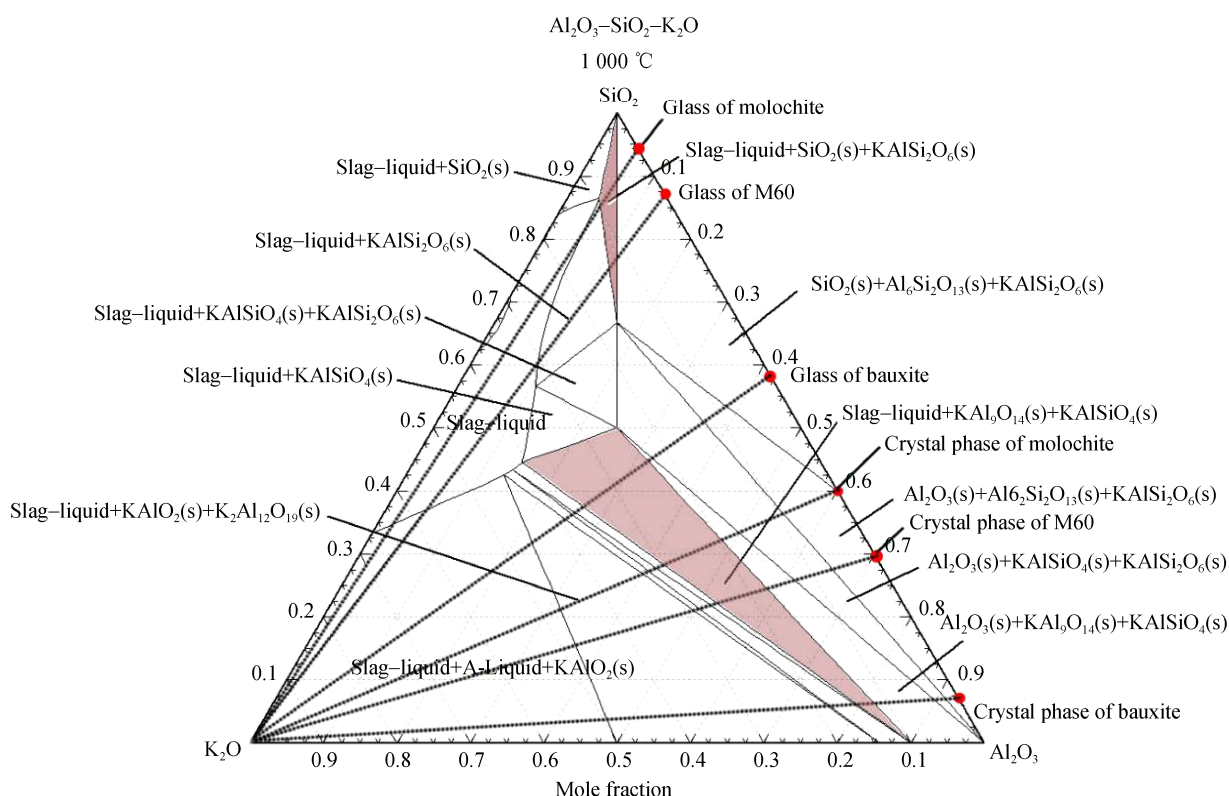


图 5 1000 °C 下 $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ 系三元相图

Fig. 5 Ternary phase diagram of $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ at 1000 °C

由表 3 还可以看出，因碱侵蚀 3 类原料中 CaO 、 MgO 有所降低，结合表 4 和显微结构中未发现含 CaO 、 MgO 相关的晶相，3 种原料中的 CaO 、 MgO

主要存在于玻璃相当中，对玻璃相的含量、成分及黏度有一定影响，从而在一定程度上会影响碱侵蚀前后的物相变化。

3 结论

3 种铝硅系原料碱侵蚀受其化学成分、玻璃相含量及显微结构的影响, 最终使得抗碱侵蚀性能由强到弱依次为莫来石 M60、莫来凯特和高铝矾土, 3 种原料碱侵蚀行为研究结果如下:

1) 对于氧化铝含量 88% 以上的高铝矾土, 其物相组成以刚玉、莫来石为主, 受碱蒸气侵蚀后形成石榴石, 进一步侵蚀会转变为钾霞石, 产生体积膨胀造成高铝矾土疏松。同时氧化铝含量较高的玻璃相侵蚀时, 也会形成石榴石及钾霞石, 进一步造成高铝矾土的疏松, 碱不断扩散进入高铝矾土内部造成严重侵蚀。

2) 对于氧化铝含量 60% 左右的莫来石, 其晶相莫来石受碱蒸气侵蚀后形成石榴石及刚玉相, 进一步侵蚀转变为钾霞石; 玻璃相含量比高铝矾土更高, 玻璃相在侵蚀过程中析出石榴石后会形成液相, 阻止碱向莫来石内部渗透, 使得碱侵蚀仅发生在表面层而表现出优良的抗碱侵蚀性能。

3) 对于氧化铝含量 42% 左右的莫来凯特, 其晶相莫来石与玻璃相含量相当, 且玻璃相中氧化铝含量最低, 其在侵蚀过程中除析出石榴石外, 形成大量呈连续分布的液相, 不断扩散到莫来凯特较深的区域, 并造成表面区域的开裂。

参考文献:

- [1] HUANG M, YING X, SHEN D, et al. Evaluation of oil sludge as an alternative fuel in the production of Portland cement clinker[J]. Constr Build Mater, 2017, 152: 226–231.
- [2] ARANDA USÓN A, LÓPEZ-SABIRÓN A M, FERREIRA G, et al. Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options[J]. Renew Sust Energ Rev, 2013, 23: 242–260.
- [3] RAHMAN A, RASUL M G, KHAN M M K, et al. Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process[J]. Fuel, 2015, 145: 84–99.
- [4] FANG P, TANG Z J, HUANG J H, et al. Using sewage sludge as a

denitration agent and secondary fuel in a cement plant: a case study[J]. Fuel Process Technol, 2015, 137: 1–7.

- [5] 王新频, 梁树峰, 赵娇, 等. 国外水泥工业替代燃料的应用进展[J]. 水泥技术, 2016(5): 40–46.
WANG Xinpin, LIANG Shufeng, ZHAO Jiao, et al. Cem Technol (in Chinese), 2016(5): 40–46.
- [6] TSILYANNIS C A. Cement manufacturing using alternative fuels: Enhanced productivity and environmental compliance via oxygen enrichment[J]. Energy, 2016, 113: 1202–1218.
- [7] VILLALBA WEINBERG A, VARONA C, CHAUCHERIE X, et al. Corrosion of Al_2O_3 - SiO_2 refractories by sodium and sulfur vapors: a case study on hazardous waste incinerators[J]. Ceram Int, 2017, 43(7): 5743–5750.
- [8] KIM D G, KONAR B, JUNG I H. Thermodynamic optimization of the K_2O - Al_2O_3 - SiO_2 system[J]. Ceram Int, 2018, 44(14): 16712–16724.
- [9] 徐平坤. 硅莫砖的技术性能及其在水泥回转窑的应用[J]. 新世纪水泥导报, 2010, 16(6): 51–55.
XU Pingkun. Cem Guide New Epoch(in Chinese), 2010, 16(6): 51–55.
- [10] 刘振英, 姚峰. 水泥窑用特种硅莫砖的研制及应用[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(1): 128–131.
LIU Zhenying, YAO Feng. Bull Chin Ceram Soc(in Chinese), 2012, 31(1): 128–131.
- [11] 刘燕, 桑绍柏, 武奇, 等. 玻璃陶瓷涂层对轻量莫来石-碳化硅材料抗碱侵蚀性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(12): 2751–2759.
LIU Yan, SANG Shaobai, WU Qi, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(12): 2751–2759.
- [12] REN B, LI Y W, JIN S L, et al. Correlation between chemical composition and alkali attack resistance of bauxite-SiC refractories in cement rotary kiln[J]. Ceram Int, 2017, 43(16): 14161–14167.
- [13] REN B, SANG S B, LI Y W, et al. Correlation of pore structure and alkali vapor attack resistance of bauxite-SiC composite refractories[J]. Ceram Int, 2015, 41(10): 14674–14683.
- [14] REN B, LI Y W, NATH M, et al. Enhanced alkali vapor attack resistance of bauxite-SiC refractories for the working lining of cement rotary kilns via incorporation of andalusite[J]. Ceram Int, 2018, 44(18): 22113–22120.
- [15] PRIGENT P, BOUCHETOU M L, POIRIER J. Andalusite: an amazing refractory raw material with excellent corrosion resistance to sodium vapours[J]. Ceram Int, 2011, 37(7): 2287–2296.
- [16] 张振禹, 张利英, 施倪承, 等. “莫来凯特”物相分析及热膨胀机理研究[J]. 中国陶瓷, 1997, 33(3): 4–5.
ZHANG Zhenyu, ZHANG Liying, SHI Nicheng, et al. China Ceram(in Chinese), 1997, 33(3): 4–5.