

26-33

莫来石的工艺矿物学特性及其应用

倪文 陈娜娜 赵万智 刘凤梅

(北京科技大学)

P616.4

A

莫来石作为一种人造矿物广泛出现于日用陶瓷、工业耐火材料及一些工业灰渣中。近代莫来石结构陶瓷和功能陶瓷的研究与应用,进一步扩展了应用领域,并促进了理论莫来石矿物学的发展。本文试图对莫来石矿物学的研究与应用作一系统的概述。

关键词 莫来石, 耐火材料, 陶瓷, 工艺矿物学



端矿工作

天然莫来石在地壳中非常稀少。最早发现于苏格兰的马尔岛(Isle of Mull),莫来石由此而得名。但人造莫来石矿物是最常见、应用最广的一种矿物。日常生活中所接触的粘土烧制品,包括瓷器、陶器、砖瓦等都含有大量莫来石。我国工业上所使用的 $\text{SiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$ 系耐火材料中,也都含有大量的莫来石。

近些年发展起来的莫来石结构陶瓷和功能陶瓷,标志着莫来石的应用进入了一个新的时代。

1 莫来石的矿物学特性

1.1 化学组成与晶体结构

莫来石与矽线石族矿物在晶体结构上颇为相似,以至于在很长时间内一些科学家不认为它是一种单独的矿物,人们也称莫来石为富铝红柱石^[1]。成分和结构的相似性,决定了它们在物理性质上的相似性(表 1)。

莫来石的晶体结构可以看作是由矽线石的结构演变而来,其晶胞由 4 个矽线石晶胞所组成,每个矽线石晶胞由 4 个 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 组成,即 $4\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 。因此,莫来石晶胞相

当于 $16\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 中有 4 个 Si^{4+} 被 Al^{3+} 置换。为了保持电价平衡,晶胞中出现了两个氧的空位。

表 1 莫来石与矽线石的性质比较^[2]

	莫来石	矽线石
化学式	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$
晶系	斜方	斜方
柱面角	$(110) \wedge (110) = 89^\circ 13'$	$(110) \wedge (110) = 80^\circ 15'$
光性方位	$c \parallel Ng, b \parallel Nm, a \parallel Np$	$c \parallel Ng, b \parallel Nm, a \parallel Np$
折射率	N_g	1.654~1.670
	N_m	1.644
	N_p	1.642~1.674
光轴角	40~50°(+)	10°(+)
比重	3.15	3.24

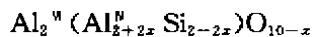
莫来石属斜方晶系。它含有平行于 c 轴的 AlO_6 八面体链。这些八面体链被横向的 (AlSiO_4) 四面体链所连接。理想的莫来石结构如图 1(a)^[3]所示。实际上由于氧的位置出现部分空位,致使配位场发生畸变,主要表现在 $\text{O}^{[3]}$ 位置的变化和至少 50% 阳离子由 T 到 T' 的位移(图 1(b))^[3]。

除了这种稳定形式之外,亚稳定的假四方莫来石也有报道^[4]。另外,以黄玉为先驱体而生成的莫来石晶须,也具有四方对称的特点^[5]。

实际上,莫来石的成分可以从 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 到 $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 连续变化。这种成分变

本文 1993 年 4 月收到,7 月改回,范若芬编辑。

化反映在结构上是氧的空位数的增加和阳离子位移的增加。在这种结构调整中,由共用斜方晶胞的棱和中心而形成的铝氧八面体链不发生变化。在这种缺陷结构中,莫来石的化学组成通常可以表示为:



式中, x 代表化学式中所缺少的氧原子数, VI 和 IV 分别代表铝的八面体配位和四面体配位。硅占据剩余的四面体空位。尽管铝在砂线石型 $(\text{Al}, \text{Si})^{\text{IV}}$ 四面体场中的有序化还不能检测,新的 $(\text{Al})^{\text{VI}}$ 八面体场中的铝可以用 XRD 和电子衍射分析 (electron diffraction analysis) 来检测^[6]。

1.2 化学稳定性

莫来石在碱金属氧化物的作用下发生分解,生成低熔点硅酸盐相和刚玉。在 Na_2O ,

K_2O 作用下,其分解反应是:

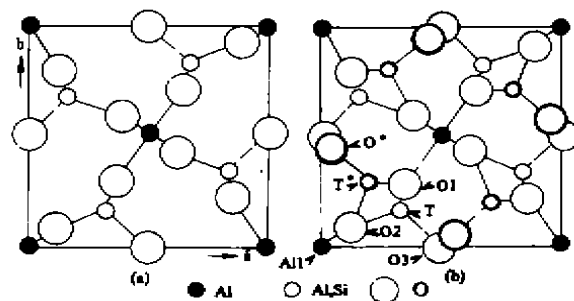


图1 莫来石晶体结构(沿 001 面)

(a)理想莫来石晶体结构(黑色原子位于 $Z=0$ 处);(b)实际莫来石平均晶胞(对于 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 成分的莫来石来说 $a=0.574, b=0.768, c=0.288$);重线处为部分充填并代表由于 O_3 处氧的缺位而引起位移的原子; $\text{O}1, \text{O}2, \text{O}3$ 分别代表位移前阴离子的位置; O^* 表示位移后阴离子的位置;箭头代表位移方向; T 及 T^* 分别代表位移前阳离子的位置



在较高的温度条件下($\geq 1300^\circ\text{C}$),这些硅酸盐相以玻璃态熔出。在玻璃相较多的情况下,反应生成的 Al_2O_3 将随之熔入玻璃相。 Li_2O 也能促使莫来石分解,温度达 900°C 时, Li_2O 即使量很少,也能促使莫来石分解。在较高的温度下莫来石的分解加速。据报道,在 1500°C 时, $0.5 \sim 0.2\text{mol}\% \text{Li}_2\text{O}$ 便可使莫来石完全分解^[2]。

对以上粘土或矾土为主要原料的冶金用耐火材料来说, MgO 、 CaO 、 FeO 、 MnO 等的侵蚀显得尤为重要。含有 $1.5\text{wt}\% \text{MgO}$ 的试样,在 1500°C 加热 $2 \sim 10\text{h}$,不影响莫来石的结构,当 MgO 增加到 2% ,并延长保温时间时,会使莫来石的数量减少。加入 $18.6\% \text{MgO}$ 时,莫来石完全分解。加入 $1.12\% \text{CaO}$ 便能使莫来石分解 10% ,当加入 $11.5\% \text{CaO}$

时莫来石完全分解,并形成 43.4% 刚玉和 56.6% 钙长石^[2]。在还原气氛下,莫来石晶体会在较低的温度下分解。在一氧化碳的作用下,莫来石在 $>1000^\circ\text{C}$ 时就会缓慢分解,生成刚玉和 SiO_2 气体。即使没有一氧化碳的作用,在较低的氧分压下也会在莫来石的稳定温度范围内发生缓慢分解。如在 1650°C ,于氢气中加热莫来石,则刚玉增多而莫来石减少。

总的来说,莫来石具有很高的化学稳定性,在碳酸性熔剂、碱性熔剂及玻璃熔融体中都表现出较强的抗侵蚀能力。

1.3 Al_2O_3 — SiO_2 系相图与莫来石固溶体

Al_2O_3 — SiO_2 体系中的相平衡问题主要集中在两个方面:①莫来石的熔融表现;②莫来石的固溶体范围。

最近的两个比较有代表性的相图见图2^[7]和图3^[8]。图2、图3的主要共同点是莫来石的不一致熔融,这些结果与早期 Bowen 和 Grieg 的研究成果相一致。

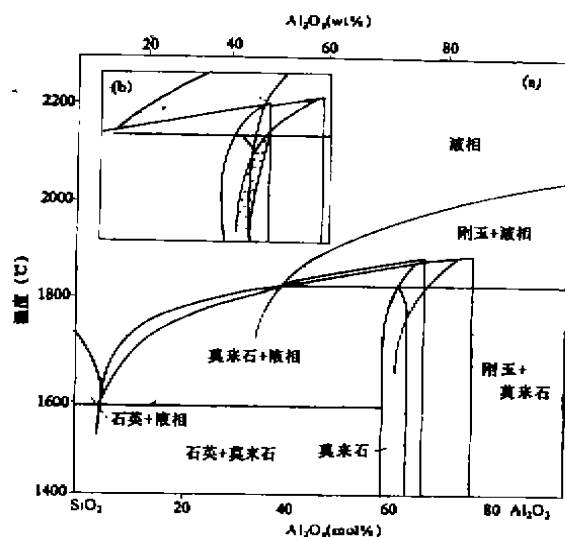


图2 $\text{SiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$ 体系稳定与亚稳定相图
(b)为将 Klug 等图3的莫来石固溶体范围(阴影区)叠加于(a)之上而形成的综合图(据 Askay 等, 1991)

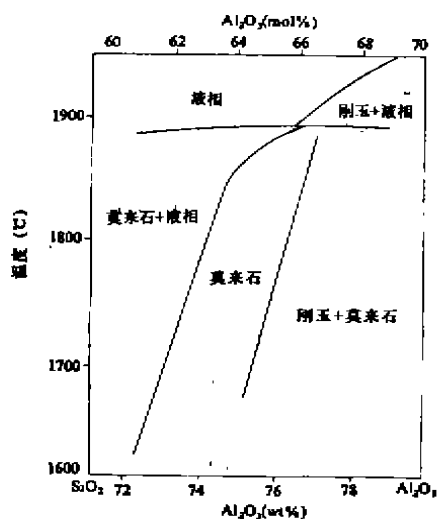


图3 $\text{SiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$ 体系相图
(据 Klug 等, 1990)

两个图的中部主要区别是:①终融温度和成分;②固溶体的范围。图2的左上角是由图3叠加于图2之上而形成的综合图。在综

合图上揭示出两个重要问题:①在一幅图中的莫来石相域的亚稳定延伸覆盖了另一幅图的稳定相域;②一幅图中的亚稳定态(一致)熔融温度与另一幅图中的稳定态(不一致)熔融点相对应。因此,这两种结果完全可能是由实验方法和解释方法不同而引起的。

各种各样的莫来石样品(包括固态反应及熔融生长的样品)结构分析表明,莫来石的固溶体可以含有 70wt%~84wt% 氧化铝($x=0.17\sim0.59$),这与最近的相平衡研究相吻合。除了以上讨论的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ 莫来石固溶体以及可能存在的亚相外,莫来石还能与 TiO_2 、 Fe_2O_3 及 Cr_2O_3 等氧化物形成固溶体。

在锻烧高铝矾土合成莫来石的过程中, TiO_2 大部分进入结晶相,固溶于莫来石和刚玉。在低于 1200°C 时, Ti^{4+} 没有进入莫来石晶格。随着 Al_2O_3 含量和温度的变化, TiO_2 的固溶量会有较大的变化,许多报道均赞同 TiO_2 的固溶随着莫来石中 Al_2O_3 增高而变大的观点。而温度对 TiO_2 固溶量的影响也许更为复杂。但很多人认为,随着温度的升高, TiO_2 在莫来石中的固溶量会增大;也有人认为,莫来石中 TiO_2 最大固溶量为 6%。莫来石可以固溶 9%~8% 的 Fe_2O_3 ,但由于铁的氧化—还原反应等因素,使影响 Fe_2O_3 反应固溶量的因素较为复杂。

2 莫来石的生成

2.1 传统陶瓷及耐火材料中的莫来石

在近代材料科学体系形成以前,人们只是在制作瓷器、陶器、砖瓦等粘土制品时无意地进行着莫来石的合成工作。现代材料科学的发展,为人们有意识地合成某种矿物提供了理论基础。而合成莫来石的理论基础是 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ 二元相图。最直接的办法是将活性 Al_2O_3 和 SiO_2 按比例充分混合,在高温下,通过固体扩散来合成莫来石(烧结法)。该法合成的莫来石结晶细小,组织结构均匀,常有较高的气孔率(5%~25%)。另一种方法是

将高纯石英和工业氧化铝按比例混合后放在电弧炉中熔融,然后在冷却过程中结晶出莫来石晶体(电熔法)。该法制成的莫来石结晶较粗且常有气孔,但总的气孔率较烧结莫来石块体小。我国电熔合成莫来石到80年代初期才逐渐引起重视,但由于成本较高一直未大规模生产。目前只有梅河口砂轮厂等少数几家企业能够批量生产^[9]。

实际上,在耐火材料工业中所使用的莫来石熟料,大多是用天然矿物原料或者大部分采用天然矿物原料来合成。与高纯电熔莫来石相比,采用全天然原料或部分天然原料用烧结法合成的莫来石具有成本低、性能适中的特点,因而具有较大的市场。合成莫来石的成功试验所采用的天然原料包括:特级生焦宝石^[10]、矾土精料^[11]、苏州土^[12]、高岭石、煤矸石,以及蓝晶石、红柱石、矽线石等。为了调节原料的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 比例,一般采用加入

工业氧化铝或磨细石英粉等办法。有时也采用工业氧化铝的中间产品如氟化铝、氢氧化铝(水铝石)等。

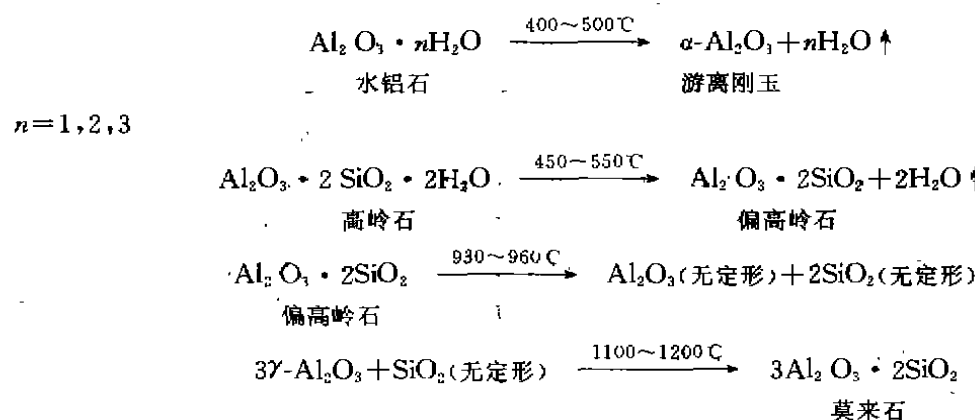
用天然原料合成莫来石的工艺流程随所用原料不同而有较大变化,但一般可分为两大类,即湿法和干法。湿法流程为:

配料→混合细磨(湿法)→酸洗除铁→过滤→干燥→压块→烧成→熟料。

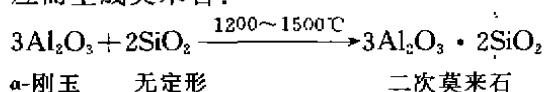
干法流程为:

配料→混合细磨(干法)→电磁除铁→压块→干燥→烧成→熟料^[13]。

用天然原料合成的莫来石熟料一般含有较多的玻璃相或其他杂质矿物,其性能也比用高纯工业原料合成的莫来石稍差。用高纯的天然原料也可以合成性能优良的莫来石。如以特级高铝矾土和特级高岭石粘土为原料,在烧结过程中可以发生如下一系列物理化学变化:

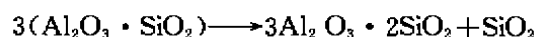


由上述反应生成的游离刚玉($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)和无定形 SiO_2 在较高温度下再发生固相反应而生成莫来石:



此反应通常被称为二次莫来石化,而由偏高岭石生成莫来石和游离石英的反应又被称为一次莫来石化。近几年开发的由煤矸石合成莫来石新技术主要是应用了以上反应原理。

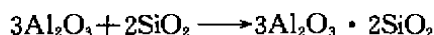
以矽线石族矿物(矽线石、红柱石、蓝晶石)为基本原料,配以适当比例的工业氧化铝或特级高铝矾土熟料通过高温锻烧合成莫来石熟料。自80年代以来,我国的许多科学工作者对蓝晶石、红柱石、矽线石的莫来石化行为进行了研究。其中以林彬荫等的研究较为系统。以蓝晶石、红柱石、矽线石及高铝原料为基本原料合成莫来石的反应可概括为^[11,14,15]:



莫来石

其中矽线石的分解温度最高在 1500~1550℃,红柱石次之,在 1350~1400℃,蓝晶石分解温度最低,在 1250~1350℃。在反应的同时产生一定量的体积膨胀(表 2)。其中天然蓝晶石为超高压矿物,因此有最大的体

积膨胀。矽线石族矿物在转变过程中的膨胀性常被用来制作在使用过程中不收缩或微膨胀的不烧耐火制品。由上式反应产生的游离 SiO_2 (方石英)继续与高铝原料中的 Al_2O_3 反应生成莫来石,即所谓二次莫来石化:



α-刚玉 方石英

莫来石

二次莫来石化也产生一定量的体积膨胀。在碱性杂质较多的情况下,方石英进入熔

融玻璃相。

表 2 矽线石族矿物加热物理化学变化

矿物名称	矽线石	红柱石	蓝晶石
开始转变为莫来石的温度范围	1500~1550℃	1350~1400℃	1300~1350℃
转化速度	慢	中	快
转化所需时间	长	中	短
转化后体积膨胀	7%~8%	3%~5%	16%~18%
莫来石结晶过程	在整个晶粒发生	在颗粒表面开始,逐步深入内部	同红柱石
莫来石结晶形态及大小	短柱状、针状,长约 3μm	针状、柱状,长约 20μm	长针状,长约 35μm
莫来石结晶方向	平行于原矽线石晶面	平行于原红柱石晶面	垂直于原蓝晶石晶面

2.2 精细陶瓷中的莫来石

现代精细莫来石陶瓷通常是指莫来石功能陶瓷和高强结构陶瓷。根据陶瓷制品的形态又分为块体材料、薄膜材料和纤维材料。这些精细莫来石陶瓷一般是用高纯超细的活性化学原料制作的。一些常见的超微粉的制备技术包括:气相沉积法(CVD)、水解法和溶胶-凝胶法。用这些方法制备的微粉有一个共同的特点,就是活性高,并大部分处于非晶质状态。因此,微粉可以在较低的温度下烧结。特别是近几年发展起来的复相超微粉制备技术和单相先驱体制备技术,克服了机械混合不均匀的困难,从而制备出密度高、晶粒微细、性能优良的制品。

然而,即使是已达纳米级或分子级混合的复相超微粉,其莫来石化的过程与以粘土为主要原料的莫来石化过程有一定的相似性。但当 Al_2O_3 与 SiO_2 的混合达原子级混合

时(例如单相莫来石先驱体),莫来石的形成温度可降至 980℃。例如由化学气相沉积法或高温喷雾裂解法而产生的非晶质先驱体可以直接转化为莫来石。相反,当混合均匀程度在纳米级范围时(例如复相先驱体),在莫来石形成之前通常要经过刚玉化阶段。这样就阻碍了莫来石的生成。致使莫来石的形成温度推迟到 1200~1300℃。如通过有机物或盐的快速水解而产生的粉末或凝胶一般为复相先驱体^[16]。因而在这些体系中也能观察到做为过渡相出现的立方氧化铝。由于氧化铝的结晶和莫来石的生成几乎是在同一温度开始的(980℃)。因此,借助于反应的放热是难将二者区分开的。

如前所述,高岭石在 >980℃ 时分解成无定形 Al_2O_3 和无定形 SiO_2 。这种分解产物也相当于一种复相超微粉,但 SiO_2 高于莫来石的理论组成。尽管高岭石具有由 $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$ 与

($\text{Al}_2(\text{OH})_4$) $^{2-}$ 叠加的层状结构,但这种混合程度还不足以阻止游离 Al_2O_3 和游离 SiO_2 的出现,而不是在加热过程中($<980^\circ\text{C}$)直接出现莫来石。在继续升温过程中,游离的无定形 Al_2O_3 转变为 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($>980^\circ\text{C}$)。莫来石的形成是在更高的温度下($1100\sim 1200^\circ\text{C}$),即前面所讲的一次莫来石化。

3 莫来石制品性能、用途及开发前景

3.1 热性能与机械性能

在常温下,与合金钢相比,莫来石制品算不上是一种高强结构材料。陶瓷特有的较低的断裂韧性($\leq 2\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)限制了其抗压强度在 $200\sim 500\text{MPa}$ 的范围内。因而在大多数情况下,莫来石陶瓷还不能用来代替金属材料。但对于一般结构材料,如窑具、燃烧器、均热器等这个强度已经足够了。在更高的强度场合,如陶瓷发动机、燃气轮机叶片等也已获得了一定程度上的成功。用于这些场合的莫来石陶瓷,一般具有接近于零的显气孔率和近于理论值的密度,因而具有很高的抗压强度(近于 500MPa)和抗冲击强度(近于 $2\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)。在高温下,莫来石制品具有很低的热膨胀系数和较低的导热系数,因而,具有优良的抗热震性。故此作为冶金、电力及其它行业窑炉的耐火材料已得到了广泛的应用。最近的研究表明,高纯莫来石制品可以保持它的常温强度至 1500°C ,甚至略有增加^[17],因而具有很好的抗高温蠕变性。莫来石良好的高温强度和高温氧化条件下的化学稳定性,使它成为一种杰出的高温材料。

用于普通耐火材料的莫来石制品,由于高的气孔率、较多的杂质。因此,耐火度和强度都比莫来石精细陶瓷低。这些材料的耐火度一般在 $1700\sim 1800^\circ\text{C}$,荷重软化温度一般在 $1500\sim 1600^\circ\text{C}$,常温抗压强度在 $50\sim 100\text{MPa}$ 。例如,上海耐火材料厂用该厂自己生产的莫来石熟料制成的连铸塞头砖,体积密度在 2.5 以上,显气孔率 $<17.5\%$,荷重软

化温度 $>1600^\circ\text{C}$,常温耐压强度 $>670\text{kg}/\text{cm}^2$, 850°C 水冷次数最高可达 6 次^[18]。熔铸莫来石制品的耐火度可达 1900°C ,荷重软化温度可 $>1700^\circ\text{C}$,常温抗压强度可达 490MPa 。烧成的耐火材料有更强的抗渣性。由天津大学与梅河口砂轮厂联合研制的电熔莫来石再烧结制品,其荷重软化开始温度 $\geq 1700^\circ\text{C}$, 0.2MPa 荷重下于 1550°C 持续 50h 的蠕变率仅 0.16% ,常温耐压强度达 160MPa 以上, 1100°C 水冷循环试验结果表明,抗热震性良好,可经受 35 次循环,并具有良好的抗玻璃熔体侵蚀的能力。制品的比重 ≥ 2.6 ,显气孔率 $\leq 16.3\%$,吸水率 $\leq 6.3\%$ ^[9]。

陶瓷的机械强度与晶粒的大小、形状和取向有关。晶粒越细小越均匀,机械强度越高。而用单相或复相超微粉制作的精细陶瓷正是朝着这个方向发展。同时将莫来石精细陶瓷与氧化锆复合或用陶瓷晶须来增韧可使韧性大大提高。因而莫来石精细陶瓷有可能在许多高温场合取代金属,而达到高温合金所不能达到的性能。

3.2 电性能

新一代计算机系统所要求的高性能集成电路,使得低介电常数陶瓷基片的发展受到了极大的重视。同时,这些陶瓷基片还必须能承担高的线路密度,能在低温下烧结并与象铜这样的金属烧结在一起,而且与硅具有相匹配的热膨胀系数。莫来石陶瓷作为一种基片材料,有很低的介电常数($\epsilon=6.7$),因此,传导滞后的时间要比刚玉($\epsilon=9.8$)^[19]低 17% ,另外,莫来石有很低的热膨胀系数($4\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $20\sim 200^\circ\text{C}$)并和硅的热膨胀系数非常接近^[7]。因此,莫来石陶瓷和莫来石质玻璃—陶瓷复合材料被用作高性能集成电路的候选材料。最近的研究表明,一种莫来石和玻璃的复合材料可以将介电常数降至 $\epsilon=4.5$ 。如前所述,用溶胶—凝胶法制备的复相微粉可在 1250°C 烧结。如果制作莫来石—玻璃复合

材料,烧结温度还可望进一步降低。因此,莫来石是可能与铜复合的一种理想材料。

3.3 光学性能

近几年,关于莫来石光学性质的研究主要集中在用它作为一种窗口材料。莫来石对波长在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 的中红外波段的光具有良好的透过性。尽管 50 年代曾经一度对莫来石的红外透过性进行过许多研究,并且曾试图制造出光学级莫来石陶瓷^[24],但直到最近莫来石作为红外透明窗口的实验才在 Prochazka 和 Klug^[21] 的努力下获得首次成功。图 4 比较了莫来石与其他现代红外窗口材料的透光性。

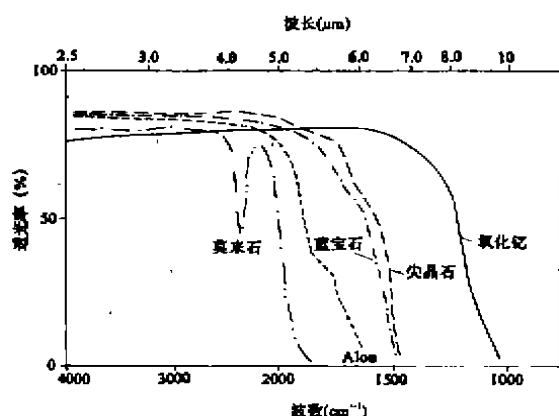


图 4 几种单相陶瓷材料在中红外波段的透光性比较

Alon 指氧氮化铝,是 Aluminum Oxynitride 的缩写

从图中我们可以看到两个特点:(1)在 $4.3\mu\text{m}$ 波长处的吸收带对莫来石的整体透光性来说是不利的;(2) $5\mu\text{m}$ 处的突然下降在其它窗口材料的转折点之下。Prochazka 和 Klug^[21] 将 $4.3\mu\text{m}$ 处的吸收带归于基体中的四方氧化硅。后来的研究表明,由 CVD(化学气相沉积)法制备的粉末和用单相先驱体烧结的莫来石没有这个吸收带,但用复相凝胶制作的莫来石有此吸收带。通过对溶胶-凝胶法制备的莫来石的仔细研究,发现了纳米级的无定形包体,这些包体可能导致 $4.3\mu\text{m}$ 处吸收带的形成。Askay^[7] 仔细研究了取自致密化样品的莫来石颗粒。他们发现每一颗

粒中都包含有一些独立分布的,近于圆形的囊状体,尺寸在 $3\sim 20\text{nm}$ 。分析表明,这些包体的组成大约是 $88\text{mol}\%\text{SiO}_2$ 和 $12\text{mol}\%\text{Al}_2\text{O}_3$ 。

透光率在 $5\mu\text{m}$ 处的突然降低是由于基质中的 SiO_2 键的存在,因此是由材料的本质决定的。莫来石作为一种优良的红外透光材料,其潜在用途主要应用在高化学侵蚀性环境和高温、高机械应力的场合。

作为激光晶体材料是莫来石的另一项有前途的应用。固体激光器的光学活性剂通常需要用结晶质的主体来稳定和保护,因为离子的电子层结构对晶体场的强度是最敏感的。但是使用晶体会大大降低活性剂的量子效率。因此,人们不得不把注意力移向非晶质体,而最近,莫来石作为光学活性剂 Cr^{3+} 的基本材料显示出极大的优越性。在莫来石中 Cr^{3+} 的量子效率可增加 $30\%\sim 40\%$ 。最近的研究表明,研制出激光晶体质量的多晶莫来石材料是有希望的。

4 结论

莫来石最早发现于自然界,但对莫来石大量的应用和研究却是人们对普通陶瓷和耐火材料有了一定的科学认识才开始的。莫来石的广泛应用又进一步促进了理论莫来石矿物学的发展及 $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 体系相平衡的深入研究。较纯的莫来石制品有着优良的机械性能、热性能及化学稳定性,再加上原料廉价易得,因而在耐火材料领域里得到了广泛的应用。

80 年代末和 90 年代初兴起的莫来石精细陶瓷热进一步开发了莫来石优异的机械性能、光学性能和电学性能。这些应用又为莫来石矿物学的理论研究奠定了基础。预计未来 10 年,莫来石精细陶瓷将在机械、激光、微电子等领域得到实际和更广泛的应用。

参考文献

- 1 吉木文平著,张绶成译,非金属矿物工学,北京:科学出版社

- 版社,1962.
- 2 林彬荫等.耐火矿物原料,北京:冶金工业出版社,1989.
 - 3 Epicier T. J. Am. Ceram Soc., 1991, 74 (10):2359~66.
 - 4 Schneider H. et al. J. Am. Ceram Soc., 1988, 71 (3):162~164.
 - 5 Merk N. et al. Journal of Material Research, 1991, 6 (4):825~34.
 - 6 Angel R. J. et al. American Mineralogist, 1986, 71:1476~1482.
 - 7 Askay et al. J. Am. Ceram Soc., 1991, 74 (10):2343~58.
 - 8 Klug et al. J. Am. Ceram Soc., 1990, 1:15~43.
 - 9 谈家琪等.硅酸盐学报, 1988, 16(3):274~279.
 - 10 赵增林.耐火材料, 1985, 19(4):30~31.
 - 11 王玺堂等.耐火材料, 1991, 25(1):15~17.
 - 12 徐平坤等.耐火材料, 1982, 16(4):15~23.
 - 13 林彬荫等.耐火材料, 1991, 25(4):203~206.
 - 14 林彬荫等.耐火材料, 1990, 24(1):28~32.
 - 15 林彬荫等.耐火材料, 1989, 23(1):20~23.
 - 16 Okada K. et al. J. Am. Ceram Soc., 1987, 70(10):245~247.
 - 17 Dokko P. C. et al. J. Am. Ceram Soc., 1977, 60 (3~4):150~155.
 - 18 孙爱珍.耐火材料, 1982, 16(5):36~39.
 - 19 Tummala R. R. J. Am. Ceram Soc., 1991, 74(5):895~908.
 - 20 Roy R. et al. American Mineralogist, 1953, 7:725~728.
 - 21 Prochazka S. et al. J. Am. Ceram Soc., 1983, 66 (2):874~880.

Industrial Mineral Features of Man-made Andalusite and its Application

Ni Wen, Chen Nana, Zhao Wanzhi, Liu Fengmei

Man-made andalusite(or Mo) has been applied in daily ceramics, industrial refractory and ash slag. In recent years, study and application on textural and functional ceramics of Mo has been further extended, which promotes the development of theoretic Mo mineralogy. This paper outlines in a systematic way the study and application of Mo mineralogy.

《中国铁矿志》正式出版发行

《中国铁矿志》是汇集了冶金地质系统数十名专家、学者历时三年编纂的,是一部全面、系统反映我国有史以来,特别是新中国成立以来铁矿的资源状况、勘查开发历史和现状的志书。它是容实用性、资料性、知识性和收藏性于一体的大型工具书。

《矿志》涉及范围广,时间跨度大,资料翔实,数据可靠,内容丰富,文字简练,图文并茂。一册在手即可方便、快速地查到我国铁矿资源的分布、地质特征、矿产储量,古代、近代铁矿勘查和开发历史,当代铁矿地质勘查、工作方法、科学研究的经验和成就。书中按省(市、自治区)记述了铁矿资源分布和利用概况,选列了157个重要的或典型的铁矿床实例,详细地描述了它们的地质特征、发现和勘查历程、开采技术条件以及开发利用情况。

《矿志》共分了3篇35章178节,收录了332幅图件,138个表格,彩图8页,正文562页,100余万字,16开本,冶金工业出版社最新出版。国际书号:ISBN 7-5024-1449-5/TD·223。可供工业管理、地质勘查、各级生产企业矿山、科研情报人员和地质矿业院校师生阅读。精装本定价每册68元,平装本每册定价56元。

订购处:冶金工业部《地质与勘探》编辑部,地址:北京市安外安贞里2区11楼1层,邮编:100029。开户银行:农行北京朝阳支行双北桥分理处,帐号:80113310,户名:冶金部《地质与勘探》编辑部