

文章编号:1007-967X(2007)06-0026-05

硅石选矿提纯工艺研究现状^{*}

刘国库¹, 张文军¹, 马正先¹, 吕 勇²

(1. 辽宁工程技术大学 资环学院矿物加工系, 辽宁 阜新 123000; 2. 山西省煤炭规划设计院, 山西 太原 030045)

摘 要:作为高纯石英粉生产原料的天然高品级水晶日趋匮乏, 研究用硅石矿物替代天然水晶生产高纯石英原料迫在眉睫。本文综述了国内外硅石矿物原料替代天然水晶生产高纯石英砂的研究现状; 系统总结了擦洗、磁选、浮选、酸浸的常规方法和非常规方法以及去除包裹体的选矿提纯工艺的研究和进展; 提出了我国硅石矿物选矿提纯工艺研究的发展方向 and 制约其发展速度的主要因素。

关键词:高纯石英; 硅石; 选矿; 提纯; 包裹体

中图分类号:TD873.3

文献标识码:A

随着科学技术的进步, 光电源、电子工业、光通讯、SiO₂ 薄膜材料、大规模和超大规模集成电路、激光、航天、军工等高科技产业迅猛发展, 对高品级的石英原料的需求量很大。但由于这些特种石英原料对质量的要求很高, 通常需求含量大于 99.9%, 甚至 99.99%, 而允许的杂质含量非常低。只有高品级天然一、二级水晶能达到要求。而天然水晶资源日趋枯竭, 特别是高品级天然水晶资源更是稀缺, 并且在世界各地分布极不平衡, 95% 的水晶集中在巴西和马达加斯加, 使得除此以外的国家都在努力寻找替代品。目前解决水晶替代原料有三种途径^[1]: (1) 人造水晶; (2) 溶胶-凝胶及四氧化硅气相沉淀法等人工合成; (3) 用天然硅石加工提纯后代替水晶。由于人造水晶和人工合成法产量低、能耗大、成本高, 故大规模生产有较大的困难。用自然界大量存在的硅石(包括石英岩、石英砂岩、脉石英为主要矿物的岩石), 经提纯后来制备高纯或超高纯石英原料, 具有来源广泛, 生产成本低, 批量大等优点, 是代替天然水晶的最为有效的途径。

1 国内外替代水晶的高纯石英原料的加工现状

我国从 20 世纪 80 年代末开始研究石英玻璃的普通石英原料的提纯方法和工艺, 已经取得一定进展, 所研究产品能够达到二、三、四级水晶的水平。但由于水晶在我国的储量有限, 价格昂贵, 质地不均匀, 有些矿物杂质和工艺过程中的混杂物不可能

除掉。江苏连云港地区目前处于用水晶作原料制取超纯石英砂的国内最高水平, 但是大量的工业化生产, 矿物组织的均匀性和内在品质的化学含量的不稳定。只适合于中、低档石英玻璃, 高纯、低羟基石英原料的技术难关还未攻克, 我国大口径石英管、高质量石英棒和石英锭以及光通信使用的石英玻璃仍需要大量进口。

北京矿冶研究总院作为我国最早的研究机构, 代表了我国在该领域的最高水平, 但是国外最高水平还有一定差距。该院从矿物成矿机理、矿物特性入手, 特别是在浮选提纯技术等方面进行了较为深入的研究。

国外早在 20 世纪 70 年代就开始研究利用石英砂制备高纯石英砂的技术。20 世纪 80 年代美国 PPCC 公司在英国西北海岸 Foxdale 地区的花岗岩中提纯石英, 产品 SiO₂ 的含量达 99.99%, Fe 杂质小于 1×10^{-6} , 其他过渡元素小于 5×10^{-6} ; 20 世纪 90 年代到目前世界上最大的高纯石英供应商 - 美国 Unimin 公司在北卡罗来那州 Spruce Pine 地区的花岗岩中分选、提纯出高纯石英, 经提纯后 SiO₂ 的含量达 99.99% 以上, 纯度最高者 SiO₂ 的含量达 99.999% 以上, 其高纯石英在国内外原料市场占据垄断地位^[2]。氧化硅的纯度目前正在由 99.999 2% 向 99.999 4% 的方向发展。

日本的 Kemmochi 和 Sato 分别在传统工艺基础上, 综合使用浮选、磁选、电选、高温氯化等物理、化学方法提纯技术, 将脉石英加工成超高纯石英玻

^{*} 收稿日期: 2007-07-19

作者简介: 刘国库(1982—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事矿物加工工程方面的研究。

璃原料,以满足光学、光纤套管、电子工业用高档石英玻璃生产的需要^[3]。

2 硅石杂质赋存状态

硅石除了主要矿物石英外,通常伴有长石、云母、粘土和铁质等杂质矿物。制备的高纯和超高纯石英原料,是除了二氧化硅外其它都是杂质,其中主要的有害杂质是含铁和含铝杂质,所以硅质原料提纯方法和工艺流程的进步和改进也主要体现在对含铁杂质和含铝杂质的有效脱除上。

铁在硅石中常以以下几种形式存在^[4]:以微细粒状态赋存在粘土,或者高岭土化的长石中;以氧化铁薄膜形式附着在石英颗粒的表面;含在重矿物和铁矿物等颗粒中;在石英颗粒内部呈浸染或透镜状状态或以固溶态存在于石英晶体内部。此外,加工过程中也会混入一定量的机械铁。

含铝杂质主要来自长石、云母和粘土矿物,还有 Al^{3+} 替代 Si^{4+} 存在于石英晶格中。这种异价类质同象的替换,常造成碱金属阳离子进入结构空隙,以保持电子的平衡,形成结构杂质。

此外,硅石中普遍存有流体包裹体,按其成因可分原生包裹体、假次生包裹体、次生包裹体三类^[5]:

原生包裹体是先于主矿物或与主矿物同时形成的包裹体,其特点是包裹体生成后不发生空间上的移动。原生包裹体占据主矿物结晶构造位置上,均匀分布于晶体中。

假次生包裹体是在主矿物结晶过程中,由于应力和构造作用,使已结晶的矿物发生破碎和裂开,在这些裂隙中,成矿溶液又重新进入而产生重结晶时形成的包裹体。其特点是形成之后在空间上发生过位移。假次生包裹体外端终止于晶体内的一个生长面,并存在着明显的排列面。

次生包裹体是形成于主矿物结晶基本完成之后任何过程的包裹体,晶体形成后,因受外界作用力的影响而破裂,产生裂隙,这时在环境中活动的含矿溶液就有可能渗入晶体内成为包裹体。次生包裹体一般在后期构造愈合的位置上,常沿裂隙分布,且几组包裹体可以相交,形状较为复杂。

流体体积很小,一般直径在微米左右,粉碎石英矿时,次生包裹体就容易被机械破裂,但原生包裹体,就很难破裂消除,即使用高温滚烧也只能将表面局部气体包裹体炸裂,不足以改变内部微小气泡状态^[1]。流体包裹体中的小分子气体可以通过高温

和延长排气时间等排出。但 CO 、 CO_2 等气体极难从固体或熔体中排出,造成熔制产品缺陷^[6]。

3 选矿提纯工艺

根据硅石矿物原料的杂质和包裹体的赋存状态,在选矿提纯工艺主要分擦洗-磁选-浮选-酸浸等工艺流程,随着选矿工艺研究的不断深入,又引进了电选和生物选矿等。

3.1 擦洗

擦洗是借助机械力和砂粒间的磨剥力来除去石英砂表面的薄膜铁、粘结及泥性杂质矿物的选矿方法,它可以进一步擦碎未成单体的矿物集合体,再经分级作业对泥质性杂质矿物进行有效脱除。该工艺一般作为硅石矿物原料入选前的预处理工艺。

目前,主要有机械擦洗、棒磨擦洗和加药高效强力擦洗和超声波擦洗等方法。

机械擦洗,一般认为影响擦洗效果的因素主要是来自擦洗机的结构特点和配置形式,其次为工艺因素,包括擦洗时间和擦洗浓度。研究表明,砂矿擦洗浓度在50%~60%之间效果最好;擦洗时间原则上以初步达到产品质量要求为基准。

棒磨擦洗,影响擦洗效果主要因素为矿浆浓度、擦洗时间、加棒量及棒配比。由于棒磨机的磨矿介质是线性接触的,因此,棒磨过程具有选择性、产品的粒度较为均匀、过粉碎现象较轻。采用此工艺,一方面强化了擦洗效果,另一方面可以改变原砂的粒度组成,为石英砂进一步的分选提供了矿物学基础^[7]。

加药高效强力擦洗,加药的目的是增大杂质矿物和石英颗粒表面的电斥力,增强杂质矿物与石英颗粒相互间的分离效果。牛福生^[8]在对云南某地石英砂矿采用加药高效强力擦洗,得到 Fe_2O_3 含量0.1%以下, SiO_2 含量也大于99%的很好的擦洗提纯效果。

超声波擦洗^[9]主要是去除颗粒表面的次生铁薄膜(即“薄膜铁” $FeOOH$)。铁质薄膜固附着于颗粒表面和裂隙面,在选矿中使用的机械擦洗方法不能使其分离出来,它是造成天然硅砂铁质过高、难以去除的主要原因。在超声波作用下,粘附在颗粒表面的铁杂质便脱落下来进入液相,从而达到除铁的目的。与其它机械擦洗方法相比,这种方法不仅可以消除矿物表面的杂质,而且可以清除颗粒解理缝隙处的杂质,因而,其除铁效果更好。

3.2 磁选

磁选,可以最大限度地清除包括连生体颗粒在内的磁性矿物,如赤铁矿、褐铁矿、黑云母、钛铁矿、黄铁矿和石榴石等杂质矿物,也可除去带有磁性矿物包裹体的粒子。有湿式和干式磁选两种方式:田金星^[10]对某硅石料采用干式磁选初选,主要除去含铁矿物及其连生体颗粒,其研究表明随磁场强度的增大,杂质的脱除率上升,磁场强度达到 10 000 Oe 时,为最佳场强,得到精矿 $\text{SiO}_2 \geq 99.10\%$, Fe_2O_3 含量 $\leq 0.070\%$;强磁选或高梯度磁选通常采用湿式,对含杂以褐铁矿、赤铁矿、黑云母等弱磁性杂质矿物为主的石英砂,利用湿式强磁机在 10 000 Oe 以上可以选出;对含杂以磁铁矿为主的强磁性矿物,则采用弱磁机或中磁机进行选别效果比较好。上村宏·田渊平次^[7]采用强磁机对濑户石英砂进行了试验条件研究,结果表明,磁选次数和磁场强度对磁选除铁效果有重要影响,随磁选次数的增加,含铁量逐渐减少;而一定的磁场强度下可除去大部分的铁质,但此后磁场强度即使提高很多,除铁率也无多大变化。另外,石英砂粒度越细,除铁效果越好,其原因是细粒石英砂中含铁杂质矿物量高的缘故。刘理根,高惠民^[11]等采用强磁选对湖北蕲春某石英矿研究,获得精矿产率 78%、石英品位 99.9% 的最好分离效果。郭金福^[12]对安阳石英砂岩矿矿石采用干式强磁选和湿法高梯度磁选研究,结果表明,高梯度磁选效果优于其他磁选效果,但设备投资大,处理能力低。

石英砂原砂中含杂质矿物较多时,仅采用擦洗、脱泥和磁选是不能将石英砂提纯成高纯砂的,为了进一步提高石英砂的纯度和降除杂质含量,通常采用浮选的方法。

3.3 浮选

浮选是为了除去硅石矿物原料中的长石、云母等非磁性伴生杂质矿物。

3.3.1 长石杂质矿物的去除

石英、长石在物理性质、化学组成、结构构造等方面相似,浮选成为它们分离的主要方法。在常规工艺中是采用阳离子捕收剂和氢氟酸活化剂在酸性 pH 范围内进行石英-长石浮选分离的,始于 20 世纪 40 年代,也称“有氟有酸”法。它在强酸性及氟离子参与下,用阳离子捕收剂优先浮选长石。由于氟离子危害环境,20 世纪 70 年代,日、美等国开始研究硅砂“无氟”浮选法。日本片柳昭在强酸性介质

(硫酸)条件下,加入阴阳离子混合捕收剂,优先浮选长石,实现石英-长石的浮选分离。俗称“无氟有酸”法。

“无氟有酸”是目前应用比较广泛,如冈比亚^[13]石英砂选矿提纯工艺采用此法得到玻璃一级品硅质原料,内蒙古角干区石英砂矿、内蒙古的通辽、新疆的昌吉的硅砂矿^[14]等都采用此工艺。也有人作过多价金属法降低其表面电性,水玻璃抑制石英,在酸性介质中用阴离子捕收剂分离石英-长石的试验,但未见其工业应用的报道。

为进一步完善石英-长石浮选分离工艺,去除强酸对环境等的影响,从 1984 年开始,唐甲莹^[15]等开始研究阴阳离子混合捕收剂浮选分离石英-长石新工艺,该法被称为硅砂“无氟无酸”浮选法,并成功用于工业生产。由于“无氟无酸”还不如 HF 法和酸法成熟,目前未见其它工业应用的报道,但其无腐蚀性的优点,在分离硅酸盐矿物、氧化矿物中已显示良好的应用前景。

张兄明^[16]等以山东旭口石英砂为原料进行中碱性正浮选选矿试验研究,实现石英与长石的成功分离。该项技术已成功应用于山东荣成旭口硅砂矿,生产出高质量稳定的玻璃用砂,解决实际生产中的难题,但其作用机理还有待进一步的研究和探讨。

碱性浮选石英法^[14] - 在高碱性介质条件下 ($\text{pH} = 11 \sim 12$) 以碱土金属离子为活化剂,以烷基磺酸盐为捕收剂,可优先浮选石英,实现石英与长石的分离。同时加入非离子表面活性剂,如 1-十二烷醇,可使石英回收率急剧上升,而对长石影响不大,从而有利于二者分离。目前该方法还仅限于实验室结果,未见有在工业生产中获得实际应用的报道。

3.3.2 云母矿物的去除

云母与石英的晶体化学特征有很大不同,其基本荷电机理与长石相同,因此大部分云母矿物伴随着长石等杂质矿物的浮选去除同时也被除去了。

王泽杭^[1]选用 E-8 捕收剂进行云母和水晶分离研究,主要利用云母格子电荷特性进行浮选。当 pH 值在 2~3 时石英动电位趋向于零,石英几乎不浮游,从而达到抑制石英的目的。田金星^[10]用硫酸作调整剂石油磺酸钠为捕收剂,松油醇为起泡剂浮选去除云母,去除率达到 70% 左右。

一般而言,经过擦洗、脱泥、磁选和浮选后,赋存较多杂质的集合体颗粒已基本被清除,石英砂的纯度可达到 99.3%~99.9%,基本上满足工业用砂的

需求。

3.4 酸 浸

原矿经磁选和浮选分离之后, SiO_2 纯度已达 99.93%。但高纯或超高纯石英砂中 SiO_2 含量高于 99.99%, 含铁量要低于几个 ppm 的含量, 这就需要采用酸浸法来进行处理。

酸浸是利用石英不溶于酸(HF 除外), 其它杂质矿物能被酸液溶解的特点, 从而可以实现对石英的进一步提纯。常用酸类有 HCl 、 HNO_3 、 H_2SO_4 、HF 等; 还原剂有亚硫酸及其盐类等。研究发现^[7]: 上述酸类对石英中的非金属杂质矿物均有良好的去除效果, 但对不同的金属杂质, 酸的种类及其浓度影响较为显著。一般认为各种稀酸对 Fe、Al、Mg 的去除均有显著效果; 对 Ti 和 Cr 的去除采用较浓的 H_2SO_4 、王水或 HF 酸进行酸浸处理效果较好; 对石英表面的 Fe、Ti 尤其是各种裸露的包裹体的脱除采用 HF 有较好效果。但 HF 能溶解 SiO_2 应严格控制用量。由于混酸酸浸能产生协同效应, 溶解杂质的作用更强, 因此, 通常使用上述酸类组成的混合酸进行杂质矿物的酸浸脱除。其次, 酸液浓度和混合酸的配比应根据实际矿物杂质特征来制定合理的混合酸配比, 才能更好的发挥其协同效应。

酸浸温度对处理时间和除杂效果影响很大, 可分为热酸处理和冷酸处理。冷酸处理时间一般很长。热酸可加快杂质溶解, 处理一般采用搅拌浸出, 时间较短。牛福生^[8]等对云南某石英砂岩经过搅拌冷酸酸浸 16 h SiO_2 含量达到 99.99%, Fe_2O_3 含量为 0.001%, 而热酸处理 2 h SiO_2 含量 99.98%, Fe_2O_3 含量 0.001%。周永恒^[3]对脉石英高温酸浸试验研究石英粉杂质含量由处理前的 34×10^{-6} 降低到含量低于 20×10^{-6} , 可作为高性能石英玻璃原料。

搅拌和超声波可增加酸液与石英颗粒表面接触的机会, 同时利用冲击波或颗粒间相互碰撞摩擦, 使溶解出的可溶性杂质化合物不沉积在砂粒表面, 增大反应的接触面积, 有利于提高酸浸除杂效果。韩宪景^[17]在空气搅拌浸出槽中, 其最终产品含 SiO_2 为大于 99.99% 含 Fe_2O_3 小于 2 ppm。

在一些欧美国家比较系统地研究了石英酸浸提纯处理, 而且包裹体易溶解于氢氟酸, 能降低石英粉料中的包裹体含量。经过酸浸处理后的石英砂, 可获得纯度达 99.99% 的高纯和超高纯石英砂^[7]。

3.5 去除包裹体工艺研究

经历过擦洗 - 磁选 - 浮选 - 酸浸后获得的二氧化硅微粉粒子中的杂质仍然存在。因为石英中存在大量的含有杂质的包裹体, 其直径在微米左右, 数量可达 10^9 个/ cm^3 , 在研磨过程中会有一部分包裹体被打开, 但是粉体内部的包裹体仍完整存在。因此硅石代水晶生产高纯石英粉关键之一是要解决硅石内含有大量气液包裹体的难题。

目前研究去除包裹体的方法有: 差异腐蚀法、氯化脱气和热爆裂法。

差异腐蚀法, 就是利用富含气液包裹体的颗粒与结晶完好的颗粒腐蚀速率的差异达到去除气液包裹体的目的。张士轩^[18]利用氢氟酸等对东海和山东石英矿物进行差异腐蚀方法处理, 去除气液包裹体的效果明显, 且粒度越细效果越好, 但应用差异腐蚀的方法对气液包裹体的去除是有限的。

氯化脱气就是利用颗粒表面与内部在高浓氯气作用下产生的化学位梯度, 促使气液包裹体扩散出去。在该技术领域, 美国尤尼明公司已发展成为国际上先导地位。而我国还未见在这一领域的研究报道。

热爆裂法就是采用高温滚烧使气体包裹体炸裂, 再经过酸洗和水洗来去除包裹体。李清海等^[19]研究用热爆裂法除去二氧化硅微粉中杂质。结果表明, 热爆裂对打开石英粒子内部包裹体有良好效果, 可获得更高纯度的二氧化硅微粉。但是热爆裂法还不足以改变内部微小气液状态。

由于石英中包裹体含量十分丰富, 去除包裹体技术还仅限于实验室研究阶段。因此, 目前只有从自然界寻找含气液包裹体少的硅石, 如: 岩浆岩型花岗岩中的石英晶粒、变质岩型石英中的远古代石英、水热生长型石英中早期形成的伟晶岩型石英等, 是硅石代水晶唯一的可行的途径。

3.6 其他选矿工艺和方法

硅石矿物预选的选矿提纯研究出了上述的常规方法外, 最近有人研究其他方法如:

廖青^[20]等在水和少量磷酸盐分散剂的传媒体质中, 将 - 0.15 mm 的沉积石英砂岩颗粒粉未经超声波处理, 达到光学玻璃用砂的标准; 赵洪力^[9]用超声波技术处理含“薄膜铁”石英砂的试验, 得到较好的除铁效果。试验证明, 与机械擦洗相比, 处理时间可缩短 2/3, 除铁率提高 15% ~ 45%。

包申旭^[21]采用射频介电选矿对江西省某脉石

石英矿除杂研究,结果表明此法对除去含铝杂质矿物效果不明显;对含铁杂质矿物效果明显,除铁率79.97%。

张士轩^[22]对东海水晶,贵州水晶将石英粉料装入电炉内的耐热石英管中采用高温 HCl(g) 法除杂研究,实验结果表明:高温 HCl(g) 法作用强度明显大于 HCl 酸浸法;高温 HCl(g) 法对杂质的作用有极限;Al、B 是石英矿物中最难去除的杂质。

用微生物浸除石英砂颗粒表面的薄膜铁或浸染铁是新近发展起来的一种除铁技术。据国外研究结果表明:以黑曲霉菌浸除铁效果最佳,Fe₂O₃ 的去除率多在75%以上,精矿 Fe₂O₃ 的品位低达0.007%。并且发现用大多数细菌和霉菌预先栽培好的培养液浸出铁的效果更好^[7]。

4 结 论

石英砂的选矿提纯工艺流程的是根据原料矿中杂质矿物的赋存状态、选矿成本和制品的工业用途的要求确定的方法按一定的工序联合起来制定的。

目前最成熟和工业应用最广泛的是“无氟有酸性”法,中、碱性和其他方法还仅限于实验室研究,但由于其自身的优越性,具有良好的应用前景。因此其工业化应用研究将是今后发展的方向。

硅石矿物选矿提纯工艺研究虽然已取得很大的进展,但发展很缓慢,每年发表该方面的论文不足十篇。笔者认为制约硅石代替水晶的选矿提纯工艺的发展的主要因素是:其一,SiO₂ 和微量元素含量的化验分析的成本和需求精确度太高,不能被广泛的研究;其二,包裹体的去除技术还不理想,只有极少含包裹体数量少的硅石矿物有可能经选矿提纯后替代天然水晶生产高纯或超高纯石英粉。而绝大多数的含包裹体较多的硅石矿物还不能用于深加工生产

高纯或超高纯石英粉。

参考文献:

- [1] 王泽杭. 用硅石生产高纯石英粉的研究及工业应用[J]. 国外金属矿选矿, 1998, (6): 23~25.
- [2] 金达表, 张兄明, 邹蔚蔚. 高纯石英的加工工艺研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2004, (4): 44~48.
- [3] 周永恒. 高纯度石英的酸浸实验研究[J]. 矿物岩石, 2005, 25(3): 23~26.
- [4] 杨 涛, 蒋述兴. 高纯超细电子级石英粉的制备技术综述[J]. 化工矿产地质, 2006, 28(3): 185~188.
- [5] 周永恒, 李 林, 杨学东. 石英玻璃的硅石原料矿特征[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2001, (5): 26~28.
- [6] 欧阳恒, 张术根, 谷 湘. 溱浦高纯硅矿床石英流体包裹体研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2006, (2): 55~64.
- [7] 牛福生, 徐晓军, 高建国, 等. 石英砂选矿提纯工艺研究[J]. 云南冶金, 2001, 30(1): 18~21.
- [8] 牛福生, 倪 文. 高纯石英砂选矿提纯试验研究[J]. 中国矿业, 2004, 13(6): 57~59.
- [9] 赵洪力. 用超声波进行的石英砂除铁试验研究[J]. 玻璃与搪瓷, 2004, 23(2): 44~49.
- [10] 田金星. 高纯石英砂的提纯工艺研究[J]. 中国矿业, 1999, 8(3): 55~58.
- [11] 刘理根, 高惠民, 张凌燕. 高纯石英砂选矿工艺研究[J]. 非金属矿, 1996, (4): 39~41.
- [12] 郭金福. 安阳石英砂岩矿矿石精选净化新工艺研究[J]. 非金属矿, 2000, 23(5): 41~42.
- [13] 刘渝燕, 张会堂, 洪 飞. 冈比亚石英砂矿无氟浮选提纯新工艺试验[J]. 山东地质, 2002, 18(2): 42~45.
- [14] 于福顺. 石英长石无氟浮选分离工艺研究现状[J]. 矿产保护与利用, 2005, (3): 52~54.
- [15] 戴 强, 唐甲莹, 程正柄. 石英 - 长石浮选分离的进展[J]. 非金属矿, 1996(2): 16~21.
- [16] 张兄明, 郭银祥, 孙学成. 硅砂浮选新工艺 - 中、碱性介质中分离长石和石英[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2004, (2): 28~30.
- [17] 韩宪景. 超高纯石英砂深加工生产[J]. 国外金属矿选矿, 1998, (7): 31~32.
- [18] 张士轩. 去除硅石中气液包裹体的研究[J]. 锦州师范学院学报(自然科学版), 2002, 23(3): 13~15.
- [19] 李清海, 翟玉春, 等. 热爆裂法去除 SiO₂ 微粉中的杂质[J]. 有色金属, 2005, 57(3): 41~43.
- [20] 廖 青, 朱建军, 石玉光. 超声波提纯石英砂的试验研究[J]. 江苏冶金, 2002, 30(4): 15~18.
- [21] 包申旭. 超细高纯石英制备试验研究[D]. 武汉理工大学硕士学位论文, 2004. 11.
- [22] 张士轩. 石英矿物纯化的研究[J]. 锦州师范学院学报(自然科学版), 2001, 22(4): 28~30.

Present Situation of Researching on Purifying Silica by Mineral Processing

LIU Guo-ku¹, ZHANG Weir-jun¹, MA Zheng-xian¹, LU Yong²

(1. College of Resource and Environmental engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. Shanxi Institute of Coal Plan and Design, Taiyuan 830045, China)

Abstract: Natural high grade quartz, as the high pure quartz powder production, is deficient day by day. So the research of producing the high pure quartz with the silica mineral substitutes for natural quartz is imminent. The latest research process of producing the high pure quartz sand with silica mineral substitutes for natural quartz is reviewed, and the purification technology and minerals processing, including conventional method as scouring, magnetic separation, flotation; and non-conventional method and wipe off inclusion, were also reviewed in detail. It is pointed out that the development direction of the purification of silica mineral in the mineral process and the primary factors of restricting its development speed in China.

Key words: high-purity quartz; silica; minerals processing; purification; inclusions