



热力粉碎石英的粉磨特性

于福家, 徐 昌, 陈晓龙, 楚文城, 苏全磊

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为了提高石英矿的粉磨效率, 采用天然石英矿为原料, 系统地研究热力粉碎石英矿的粉磨特性。结果表明, 热力粉碎能够改变石英矿的物理结构, 大幅度降低矿块的硬度, 显著提高石英的粉磨效率。影响石英热力粉碎效果的主要因素有煅烧温度、煅烧时间和煅烧粒度。煅烧温度大于 600 °C 后可以实现石英的有效粉碎, 以 800~900 °C 为宜。煅烧粒度越小, 其粉磨效率越高。煅烧时间与矿块的尺寸有关, 其长短由石英矿块内外温度达到平衡的时间来确定。热力粉碎石英与未经热力粉碎的石英相比, 不仅大大提高了磨矿效率, 而且磨矿产品的粒度分布更窄、更细、更均匀。

关键词: 热力粉碎; 石英; 磨矿速率; 粒度

中图分类号: TD97 **文献标志码:** A

文章编号: 1008-5548(2016)06-0035-04

Effect of thermal treatment on grinding characteristics of quartz

YU Fujia, XU Chang, CHEN Xiaolong,

CHU Wencheng, SU Quanlei

(College of Resources and Civil Engineering,
Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: In order to improve the grinding efficiency of quartz, the grinding characteristics of natural quartz and calcined quartz by thermal treatment was systematically studied. The results show that the grinding efficiency of calcined quartz is improved dramatically in that the physical structure of the quartz can be changed by thermal treatment to reduce its hardness. The main effect factors of the quartz thermal treatment include calcination temperature, time and the size of quartz. Calcination temperature should be higher than 600 °C to achieve effective grinding of quartz, and it is usually set between 800 to 900 °C. The smaller size of quartz is, the higher grinding efficiency is. And calcination time is related to the size of quartz, which is determined by the

balance time at which the quartz internal temperature is equal to its external temperature. Comparing with natural quartz, the grinding efficiency of calcined quartz is greatly improved and the size of its grinding product is finer and more uniform.

Keywords: thermal grinding; quartz; grinding rate; size

石英粉是一种重要的工业非金属矿产材料, 不仅在玻璃、陶瓷、冶金、建筑、化工、塑料及耐火材料等传统领域的应用不断扩大, 而且在计算机芯片、光导纤维、新型电光源、高绝缘封接材料、特种光学玻璃、保温材料等高新领域的应用也日益广泛^[1-3]。然而, 石英矿作为制备石英产品的原料, 因为其莫氏硬度高达 7, 所以矿块坚硬而难以加工粉碎。为了解决这一技术难题, 粉磨前可以预先对石英矿进行热力粉碎。热力粉碎就是对矿石进行高温煅烧后冷却水淬^[3-4]。采用热力粉碎法加工石英矿, 一方面可以用热力降低石英矿块硬度, 从而降低石英的粉磨能耗; 另一方面可以利用高温煅烧后, 在石英矿表面形成的微裂隙, 提高石英中微量金属的浸出除杂效果。由此可见, 采用热力粉碎方法不仅可以提高石英的粉磨效率, 而且也有利于天然高纯石英的提纯加工^[5-13]。

热力粉碎虽然没有改变石英矿的组分, 但因为热胀冷缩的作用, 石英矿块的硬度和结构等物理特性发生改变, 因此, 相同条件下, 热力粉碎石英与未经热力粉碎石英相比, 其破碎粉磨特性必然有所不同^[14-16]。故此, 本文中以内蒙某石英矿为原料, 对热力粉碎后石英矿的粉磨特性进行全面系统的研究。

1 热力粉碎前后试样性质

试验用石英矿样取自内蒙某大型石英矿, 原矿样的化学元素分析结果见表 1。热力粉碎石英样品均在 600~1 200 °C 温度下煅烧指定的时间, 然后采用喷淋的方式进行冷却水淬。图 1 和图 2 是试样原料与经过 900 °C 热力粉碎后样品的 X 射线衍射(XRD)图谱。表 1 和图 1、图 2 的结果表明, 热力粉碎石英虽然改变了矿石的硬度、光泽等物理特性, 但对石英的化学成分及矿物组成基本没有影响。

收稿日期 2016-03-23, 修回日期 2016-09-28。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目, 编号: 2012AA030314。

第一作者简介: 于福家(1961—), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为矿物加工。E-mail: yufujia@163.com。

表 1 石英矿化学多元素分析结果

Tab. 1 Chemical analysis of 1# quartz ores

组分	Al ₂ O ₃	总 Fe	MgO	K ₂ O	CaO	SiO ₂
质量分数/%	0.63	0.045	0.050	0.019	0.10	98.05

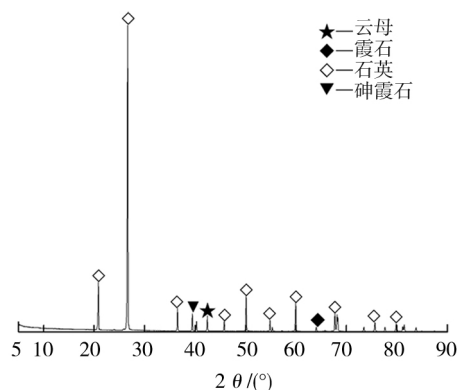


图 1 石英原料的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD spectrum of not calcined quartz ores

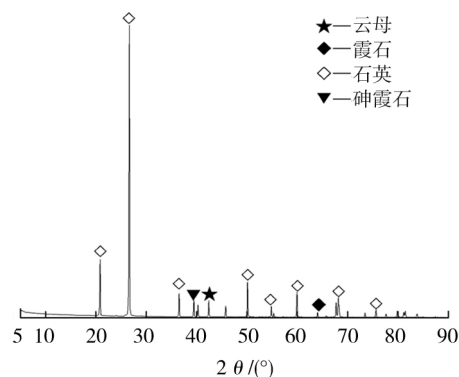


图 2 900 °C 煅烧石英的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD spectrum of quartz ores calcined at 900 °C

2 热力粉碎石英的强度

石英的热力粉碎是将石英矿块在一定的温度下煅烧足够的时间,然后把矿块放入水中进行水淬。热力粉碎时,石英矿块中单个晶粒及晶粒之间存在各向异性,这种各向异性使得石英矿块在受热膨胀和骤冷收缩时,会引起应力集中,产生裂纹甚至破碎;同时,石英矿中还有不同的杂质矿物,这些矿物在煅烧和冷却时,膨胀系数各不相同,也促进了石英矿的碎裂。由此可知,热力粉碎会使石英矿块的结构及强度发生变化。经过不同煅烧温度热力粉碎后,利用油压万能试验机测定的 25~42 mm 石英矿样的承压力,得到石英矿样承压力与煅烧温度关系曲线如图 3 所示。

由图可以看出,随着煅烧温度的升高,矿块的承压力开始时迅速减小,而后趋于平缓。未煅烧石英矿

块的承压力在 12 kN 以上,当煅烧温度达到 600 °C 时,矿石的承压力已大幅度减小至 1 kN 左右,降幅达 91.67%。可见,热力粉碎后,石英矿块的强度明显降低,这将大大减少石英矿碎磨的能耗,大幅度提高碎磨效率。

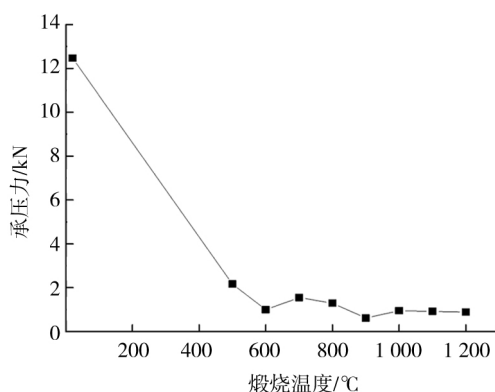


图 3 石英矿样承压力与煅烧温度关系曲线

Fig. 3 Relationships of calcination temperature and bearing pressure of quartz

3 热力粉碎对石英粉磨特性的影响

经热力粉碎后,石英矿的结构发生了改变,强度大幅度降低,这必将影响石英的碎磨特性。本研究采用指定粒级的磨矿生成速率和粒度组成作为指标,对热力粉碎石英的粉磨特性进行分析。磨矿生成速率是指相同磨矿条件下,各试样指定粒度单位时间、单位磨机容积的比生产能力。

3.1 煅烧温度对石英磨矿效率的影响

取适量 25~42 mm 粒级石英矿样,分别在 20 (室温)、600、800、900、1 000、1 100、1 200 °C 下煅烧 1 h,并进行水淬。然后,将经热力粉碎的石英矿块破碎至适当粒度,在相同条件下进行磨矿试验。图 4 为粗粒级 0.074~0.355 mm 和细粒级 0~0.074 mm 的磨矿生成速率与煅烧温度的关系曲线。

由图可知,热力粉碎后,0.074~0.355 mm 和 0~0.074 mm 2 个粒级的磨矿生成速率均随着煅烧温度的升高而提高,但当煅烧温度达到 900 °C 时,增幅变缓,温度超过 1 100 °C 时又开始降低,故石英矿适宜的热力粉碎温度为 900~1 100 °C。以煅烧温度 1 000 °C 为例,此时粗粒级 0.074~0.355 mm 的磨矿生成速率由未煅烧石英矿的 6.03 g·L⁻¹·min⁻¹,大幅度提高到 9.68 g·L⁻¹·min⁻¹,磨矿效率提高了 60.53%;细粒级 0~0.074 mm 的磨矿生成速率则由未煅烧石英矿的 6.37 g·L⁻¹·min⁻¹ 提高到 7.81 g·L⁻¹·min⁻¹,磨矿效率提高了 22.61%。显然,热力粉碎可以大幅度提高石英矿的粉磨效率,并且更有利于粗磨矿。

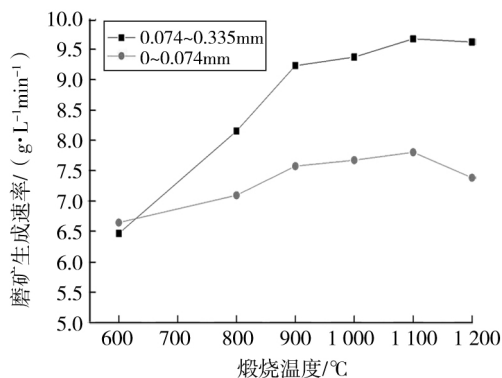


图4 磨矿生成速率与煅烧温度的关系曲线

Fig. 4 Relation curve between formation rate of grinding and calcination temperature

3.2 煅烧时间对石英磨矿的影响

石英矿块粒度不同,热力粉碎时需要的煅烧时间也不同。25~42 mm 粒级石英矿样在 900 °C 条件下煅烧不同时间,热力粉碎后,在相同条件下进行磨矿时,磨矿产品的粒度特性曲线如图 5 所示。

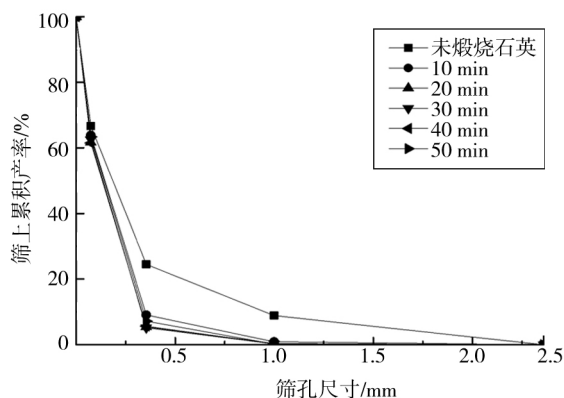


图5 不同煅烧时间磨矿产品的粒度特性曲线

Fig. 5 Influence of calcination time on size characteristic curves of grinding products

由图可知,对于 25~42 mm 粒级石英矿样,当煅烧时间超过 10 min 时,不同煅烧时间各磨矿产品的粒度特性变化趋势相近,说明相同粒度的石英矿热力粉碎时,在适宜的煅烧温度下,当煅烧时间足够长(使石英矿块内外温度达到平衡)后,热力粉碎石英的粉磨特性基本相同。

3.3 煅烧粒度对石英磨矿的影响

将 0~2.36、5~13、>13~25、>25~42、>100 mm 5 个粒级的石英矿,在 900 °C 下煅烧 1 h 后水淬,对不同粒度的热力粉碎石英试样在相同条件下进行磨矿。图 6 是磨矿产品中粗粒级 0.074~0.355 mm 和细粒级 0~0.074 mm 的生成速率与石英矿煅烧粒度的关系曲线。由图可以看出,随着煅烧粒度的增大,粗粒级 0.074~

0.355 mm 和细粒级 0~0.074 mm 的磨矿生成速率均呈现出下降的趋势,但粗粒级的磨矿生成速率高于细粒级。煅烧粒度大磨矿效率低的原因,主要原因是粒度大的颗粒水淬时,矿块内外冷却温度和温度梯度出现较大差异,致使矿块内部石英水淬不完全。

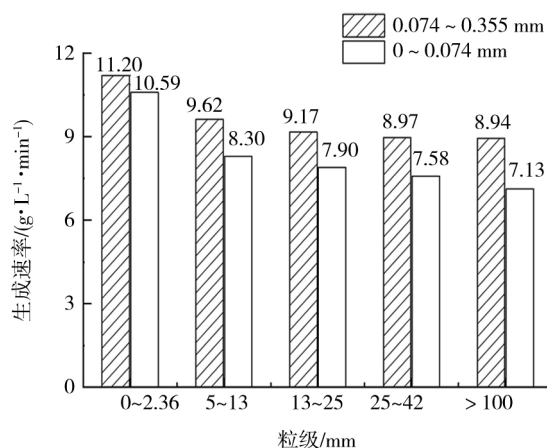


图6 磨矿生成速率与煅烧粒度的关系曲线

Fig. 6 Relation curve between formation rate of grinding and calcination particle size

3.4 热力粉碎石英磨矿产品的粒度特性

石英矿经过热力粉碎后,其结构发生了改变,质地变得疏松,能够大幅度提高粉磨效率。热力粉碎过程对石英矿硬度等物理特性的改变,也使得相同条件下磨矿产品的粒度分布特性有明显的变化。粒度为 25~42 mm 在 900 °C 下热力粉碎的石英矿样与未经过热力粉碎的石英矿样,在相同的磨矿条件下,磨矿产品的粒度分布曲线如图 7 所示。

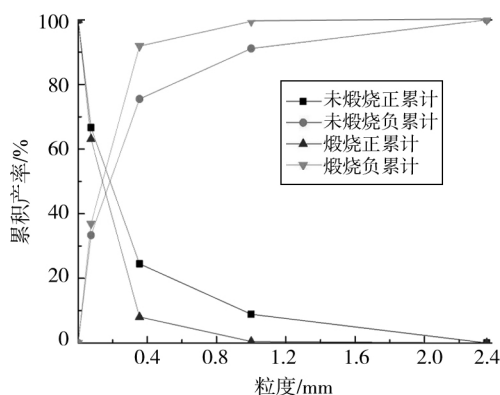


图7 石英矿磨矿产品粒度分布特性

Fig. 7 Grinding products size distribution of quartz

由图可以看出,与未经热力粉碎石英矿的磨矿产品的粒度组成相比,热力粉碎石英矿的磨矿产品中粗粒级含量很少,磨矿细度显著提高,而且粒度特性曲线的斜率更大,最大粒度明显减小,说明磨矿产品粒度分布相对更窄、更均匀。

4 结语

1) 热力粉碎能够大幅度降低石英矿的机械强度, 明显提高石英的粉磨效率。

2) 热力粉碎的煅烧温度、煅烧时间、煅烧粒度是影响石英矿热力粉碎的主要因素, 而热力粉碎效果直接影响石英的粉磨特性。试验结果表明, 煅烧温度大于 600 °C 后可以实现石英的有效粉碎, 通常以 800~900 °C 为宜; 煅烧粒度越小, 其粉磨效率越高, 且磨矿产品的粒度分布越细; 煅烧时间与煅烧矿块粒度大小有关, 取决于矿块内外温度达到平衡需要的时间。

3) 热力粉碎石英矿与未经热力粉碎石英矿相比, 在相同的磨矿条件下, 磨矿产品中粗粒级明显减少, 粒度明显变细, 磨矿产品粒度分布更加均匀。

参考文献(References):

- [1] 周永恒. 透明石英玻璃原料及其加工[J]. 非金属矿, 2000, 23(2): 32-24.
- [2] 管俊芳, 毛益林, 荆正强, 等. 超细石英粉/PP 复合材料的力学性能研究[J]. 矿冶工程, 2007, 27(5): 77-80.
- [3] SHACKELFORD J, DOREMUS R H. Ceramic and glass materials: structure, properties and processing[M]. Berlin: Springer, 2008: 34-65.

- [4] HAUS R, PRINZ S, PRIESS C. Assessment of high purity quartz resources[M]. Berlin: Springer, 2012: 29-51.
- [5] MONROE J S, WICANDER R. The changing earth: exploring geology and evolution[M]. Pacific Grove: Cengage Learning, 2011: 22-49.
- [6] 韩宪景. 超高纯石英砂深加工生产[J]. 国外金属矿选矿, 1987, 35(7): 31-32.
- [7] 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.
- [8] WEIL J A. A review of the EPR spectroscopy of the point defects in a-quartz: the decade 1982-1992 [M]. The Physics and Chemistry of SiO₂ and the Si-SiO₂ Interface, 1993, 2: 131-144.
- [9] 赵洪力. 石英砂岩的热力粉碎研究 [J]. 中国非金属矿工业导刊, 2002(5): 24-26.
- [10] DAL MARTELLO E. Impurity distribution and reduction behaviour of quartz in the production of high purity silicon[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2012.
- [11] 阎勇, 姜政志, 朱伟长, 等. 石英粉提纯工艺研究[J]. 非金属矿, 2008, 31(5): 14-16.
- [12] 孙传尧, 印万忠. 硅酸盐矿物浮选原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 35-79.
- [13] 段其九, 段玉伟, 谢大春. 电子工业用坩埚及内衬材料的高纯石英砂的提纯方法: 中国, 201110076932.0[P]. 2011-07-13.
- [14] 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.
- [15] 谈高, 刘来宝, 廖其龙. 利用天然脉石英制备高纯超细 SiO₂ 粉体[J]. 功能材料, 2012, 43(24): 398-401.
- [16] 王耐和, 刘开平, 赵鹏. 煅烧与球磨相结合试制纳米石英粉的研究[J]. 矿产综合利用, 2007(6): 18-19.

(上接第 25 页)

离减小, 抗压强度也随着欧式距离的减小而增大; 同时, 分形维数增大, 孔径分布已经很复杂, 孔结构得到改善, 体系的紧密堆积程度和孔结构分形特征同时控制抗压强度的发展; 而当硅灰掺量增加到 10% 以上时, 虽然基体的欧式距离在减小, 但由于硅灰的团聚作用, 孔结构的分形维数反而减小, 孔径分布变得单一, 平均孔径较大, 结构相对疏松, 抗压强度并不能得到有效的提高。

3 结论

1) 欧式距离与分形维数具有较高的相关性, 为 85.36%, 分形维数随着欧式距离的减小先增大后减小, 且在欧式距离为 64.68 时, 分形维数达到峰值 3.21。

2) 随分形维数的增大, 水泥浆体平均孔径减小, 孔隙率和孔比表面积增大, 孔结构得到细化和改善。

3) 当欧式距离从 85.65 减小至 57.42 时, 分形维数从 3.17 增大到 3.21, 抗压强度增大, 最大增幅为 27.77%; 欧式距离从 57.42 减小至 37.61 时, 分形维数从 3.21 减小到 3.03, 抗压强度的增长幅度不明显。

4) 最佳掺量为: 水泥掺量 72%、硅灰掺量 4%、超细水泥掺量 24%、水灰比 0.185、减水剂掺量 0.37%。

参考文献(References):

- [1] PANDEY S P, SHARMA R L. The influence of mineral additives on the strength and porosity of OPC mortar[J]. Cement & Concrete Research, 2000, 30(1): 19-23.
- [2] 戈雪良, 陆采荣, 梅国兴. 磷渣颗粒分布对水泥胶凝体系力学性能的影响[J]. 材料导报, 2016, 30(12): 140-144.
- [3] 丰曙霞, 刘贤萍. 粉煤灰粒径特征对水泥砂浆性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2015, 33(5): 707-710.
- [4] 李红奇, 郑剑之. 粉煤灰的粒径及掺量对高性能混凝土强度的影响[J]. 北方交通, 2015(8): 22-25.
- [5] ANDREASEN A H M. Zur Kenntnis des mahlgutes [J]. Kolloidchemische Beihefte, 1928, 27(6): 349-358.
- [6] DINGER D R, FUNK J E. Particle size analysis routines[J]. Am Ceram Soc Bull, 1989, 68(8): 1406-1408.
- [7] BROUWERS H J H. The role of nanotechnology for the development of sustainable concrete[J]. ACI Special Publication, 2008, 254: 69-92.
- [8] 陈晓梅, 王文华. 玄武岩纤维橡胶混凝土孔径的多重分形分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(7): 46-49.
- [9] 谢超, 王起才, 李盛, 等. 不同水灰比、养护条件下混凝土孔结构、抗压强度与分形维数之间的关系 [J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(12): 3695-3702.
- [10] 李盛, 王起才, 马莉, 等. 不同含气量水泥砂浆孔体积分形维数研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(6): 54-60.
- [11] 韦江雄, 余其俊, 曾小星, 等. 混凝土中孔结构的分形维数研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 121-124.
- [12] 崔巩, 刘建忠, 姚婷, 等. 基于 Dinger-Funk 方程的活性粉末混凝土配合比设计[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(S2): 15-19.