

超细粉碎研究现状及其在磷矿加工领域中的应用

李营营¹, 李凤久¹, 王迪², 李国峰¹

1. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063210;

2. 鲁中矿业有限公司, 山东 济南 271100

中图分类号: TD921⁺.2; TD971⁺.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)06-0047-05

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.06.007

摘要 超细粉碎技术是将原材料加工成微米甚至纳米级别的一种重要技术手段, 其研究能够有效提高资源利用率。阐述了超细粉碎过程中, 由于机械力的作用, 导致晶粒尺寸减小, 晶体发生错位和缺陷, 进而产生晶格畸变等晶体结构变化, 并简述添加助磨剂对超细粉碎的影响; 叙述了超细粉碎技术引起磷矿的性质及结构的变化, 以及对释磷能力的影响。介绍了常用超细粉碎设备, 着重叙述其工作原理、适用范围及优缺点等。

关键词 机械力; 超细粉碎; 磷矿石; 助磨剂; 粉碎设备

机械力化学是指机械力作用在物料上, 导致物料发生变形、解离和缺陷, 从而引起物质结构、物理-化学性质以及反应活性等变化的科学^[1]。机械力化学的概念由德国学者 Ostwald 首次提出, 当时认为此概念属于化学范畴^[2], 由此机械力化学作为一种边缘化学分支逐渐受到关注。Perters 等^[3]对机械力作用过程中发生的化学反应进行了大量试验研究, 并在“第一届欧洲粉体会议”上, 论述了粉体技术与机械力化学的关系, 明确指出机械力应包括机械压力、摩擦力以及液体、气体所产生的压力等。

矿石颗粒的粉碎过程, 其本质是机械能转化为内能, 致使颗粒变形或破裂的过程^[4]。一般将矿石颗粒粉碎至粒径为 0.1~10 μm 的过程称为超细粉碎^[5]。在超细粉碎过程中, 机械力作用所产生的能量施加在物体颗粒时, 会导致颗粒发生晶格畸变、晶格缺陷和无定形化等, 同时还会伴随表面游离基形成等现象^[6-8]。因此, 在分析超细粉碎时, 不能将其看作是简单的颗粒尺寸减小的物理过程, 应同时关注晶体结构发生的物理化学变化^[9]。本文系统讨论了关于超细粉碎的研究与应用。

1 超细粉碎的研究进展

20 世纪 50 年代后期, 我国相关学者充分认识到超

细粉碎的重要性, 但当时国内只是将重点放在对工业食品的加工上, 直到发现超细粉碎可以作为一种制备化合物与合金手段后, 该技术在矿物加工和改性、聚合物改性等方面的研究和应用逐渐得以拓展^[10-12]。

1.1 超细粉碎过程对物料物理化学性质的影响

随着对超细粉碎的深入了解, 发现在机械力不断作用下, 颗粒尺寸不断减小和比表面积增大, 一定程度后, 达到磨平平衡, 但粉体性质一直变化, 发生机械力化学效应。

Kravchenko VP^[13]研究了球磨(鼓磨)和喷射磨对高炉矿渣粉的粒度分布和比表面积的影响, 了解到随着平均粒径的减小, 粉末的比表面积逐渐增大且活性增加。Edwin H. Mena^[14]研究了超细粉磨对桑叶活性成分提取及其抗氧化活性的影响。结果表明, 在超细粉磨过程中, 随粒径逐渐减小, 活性成分含量明显增多。李鹏举^[15]以豫西南低品位滑石为试验原料, 采用超细粉碎-表面改性一体化工艺对其进行改性试验。结果表明, 粉碎后的滑石中位径由 13.560 μm 降低至 6.192 μm , 接触角由 43.5°增大至 128.5°, 表面活性明显提高。张少明^[16]以氢氧化铝和高岭土混合物为原料, 通过超细粉碎技术制备了单相莫来石。结果表明, 随着磨矿时间的延长, 颗粒发生细化, 导致颗粒比表面

收稿日期: 2020-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51804123)

作者简介: 李营营(1993-), 女, 硕士研究生, Email: liyingying930826@163.com。

通信作者: 李凤久(1977-), 男, 河北唐山人, 博士, 教授, 主要从事复杂难选高效分选理论与技术。Email: tslifengjiu@126.com。

积和无序程度均增大,粉体的键能反而会减小,从而导致了颗粒间能量的增加,反应活化能减小。

超细粉碎过程中,由于物料与物料、物料与介质的碰撞,导致矿物颗粒细化,活性增强,且发生化学反应,使得表面自由能和物料密度等物理化学性质发生变化。

1.2 超细粉碎过程对物料晶体结构变化的影响

超细粉碎过程中,机械力作用的影响,导致物料受力前后晶型转变、晶体结构、键能、价键性质和结合能发生变化。

王宇斌^[17]利用 SEM、XRD 和 XPS 等手段对超细粉碎后的白云母进行分析检测。结果表明,随着粉碎时间的延长,白云母的对称伸缩振动吸收峰发生分裂,导致粉体结构遭到破坏,并出现无定形化现象。

田文^[18]以钛铁矿为试验原料,利用超细粉碎技术对其进行机械活化。结果表明,机械活化作用会导致钛铁矿的晶格发生畸变,比表面积增加,进而加快矿样的氧化速度。

白培康等^[19]用高能球磨制备 Mo-3%Cu 纳米晶体复合粉末,在球磨过程中,粉末受到介质的反复碰撞,使得颗粒之间发生破裂,产生原子级表面和晶界,大量的原子存在于晶界上。随晶格缺陷和晶界的增加,表面自由能升高,加快原子的扩散。

强烈的机械力化学作用,使得超细粉碎矿物时,晶体结构发生变化;由于晶格畸变在晶格点阵中粒子的排列失去周期性,形成晶格缺陷;破坏晶体结构形成非晶态层,导致结晶颗粒发生无定形化。

1.3 助磨剂对超细粉碎过程的影响

颗粒在超细粉碎过程中,粒径减小至微米后,会发生团聚现象,使得粉碎难度增加。为了防止颗粒的再团聚,获得更细的颗粒,提高粉碎效率,添加助磨剂是一种常用的手段^[20,21]。

潘东^[21]对煤基碳素进行干式粉磨试验,研究了将石英砂作为助磨剂时,其用量对超细粉碎过程的影响。试验结果表明,随着石英砂用量的增加,煤基碳素粉体的中值粒径先减小后趋于不变。郭高巍^[22]以河北某地白云母精矿为原料,在白云母超细粉碎过程中添加助磨剂,并利用 SEM 和 XRD 等检测手段考察了助磨剂对白云母粉碎效果的影响。研究发现,当用六偏磷酸钠作助磨剂时,颗粒表面会吸附磷酸根离子,导致晶体的结晶度降低,云母料浆的黏度下降,从而起到助磨作用,提高磨矿效率。

针对非金属矿在超细粉碎过程中存在着效率低和能耗高等问题,吴一善^[23]研究了助磨剂对高岭土超细

磨过程的影响。列举了几种有效助磨剂,如单一药剂六偏磷酸钠、柠檬酸钠、油酸钠和混合药剂(六偏磷酸钠加柠檬酸钠),并发现矿浆中存在 Ca^{2+} 和 Fe^{3+} 离子时,对高岭土的助磨作用会产生不利影响,且 Ca^{2+} 离子的影响较 Fe^{3+} 离子大。

综上所述,超粉碎过程中,不同种类添加剂会导致不同的化学效应产生,矿物颗粒的粒径和结晶度等物理化学性质及晶体结构发生变化,从而提高磨矿效率。

2 超细粉碎设备研究现状

目前国内研发的超细粉碎设备较为成熟,基本能满足市场需求。常用的超细粉碎设备主要有冲击式磨机、搅拌磨机、气流磨机和振动磨机等^[39,40]。

2.1 冲击式磨机

冲击式磨机是利用围绕水平或垂直轴高速旋转的回转体(棒、锤和叶片等)对物料产生激烈的冲击和剪切等作用,使其与器壁或固定体以及颗粒之间产生强烈的冲击碰撞从而使颗粒粉碎的超细粉碎设备,可用于中等硬度物料粉碎,如滑石、大理石和方解石等^[40]。入料粒径一般在 8 mm 以内,产品粒度可达到 3~74 μm 。冲击式磨机的主要优点是可调节细度、结构简单、安装紧凑、操作容易、占地面积小和效率高等;缺点是高速运行过程中会产生过热现象。因此,在完善设备时,可考虑使用冷却方式,同时为了避免零件磨损较大,应采用抗压耐磨性能好的材料^[41]。

2.2 搅拌磨机

搅拌磨机是具有发展前景的超细粉碎设备之一,主要是通过搅拌轴的旋转,搅动筒体内充填的磨矿介质(钢球、氧化锆球、瓷球、刚玉球和砾石等)和物料,使其在筒体内运动,多被用于非金属矿深加工,制备颜料等^[40]。入料粒径一般在 3 mm 以内,产品粒度在 0.1~45 μm 之间。这类磨机的优点是结构简单、操作容易、振动小、噪音低、产品细度可调节、粒径分布均匀和研磨效率高;缺点是工作中大多使用湿式粉磨,导致后续的固-液分离和干燥成本较高。

2.3 气流磨机

气流磨机工作原理是将压缩空气通过喷管加速气流,喷出的射流带动物料作高速运动,使物料碰撞、摩擦剪切而粉碎,大多应用于大理石、高岭土和滑石等中等硬度以下的非金属矿物超细粉碎加工中,也可用于保健食品、稀土和化工原料等加工中^[40]。进料粒度一般控制在 1 mm 以下,成品粒度在 1~30 μm 之间,但生产能力较小。气流磨机具有自动化程度高和产能大的

优点,缺点是设备造价高、占地面积大、能耗大、高细度产品少、零件磨损较大和缺乏自主创新机型等^[42,43]。由于气流磨机是我国研究最多、型号最全、技术较为成熟的超细粉碎设备,因此在市场上很受欢迎。

2.4 振动磨机

振动磨机是以球或棒为介质,加工产品细度可至几微米的超微细粉碎设备,工作原理是利用研磨介质在作高频振动的筒体内对物料进行冲击、研磨和剪切等作用,使物料在短时间内被粉碎。可广泛用于化工、冶金、建材、陶瓷、耐火材料和非金属矿等行业的超细粉体加工^[40]。入料粒径一般在6 mm以内,产品粒度在1~74 μm 之间。振动磨机具有体积小、能耗低、产量高、结构紧凑、操作简单、维修方便和产品粒度均匀等优点,缺点是噪音大和对零件要求高等^[44]。

3 超细粉碎在磷矿资源领域的应用

随着超细粉碎技术的发展,其应用范围越来越广泛,有学者将该技术应用于磷矿粉碎的应用领域,并取得了一定的进展^[25]。我国磷矿资源丰富,但以中低品位磷矿为主。由于原矿中磷品位较低,选矿比大,导致磷矿石的利用率低^[26,27]。磷矿粉经超细粉碎后,会降低其颗粒尺寸,增大其比表面积,破坏磷矿物的晶体结构,促进其同象置换作用,破坏晶格结构,进而提高磷矿粉中有效成分的溶解与释放能力,即增加有效磷的含量^[28],提高磷矿资源利用率。

3.1 超细粉碎对磷矿物理化学性质的影响

我国磷矿资源丰富,但分布不均匀,由于普通磷矿粉颗粒粒径较大,比表面积较小,不利于磷矿粉养分的释放,从而影响其利用效率^[29]。利用超细粉碎技术活化磷矿,使得矿石的性质发生变化,有利于提高磷矿资源的利用率。

Minjigmaa等^[30]采用机械化学方法对蒙古国某磷矿石进行试验研究,结果表明,当磷矿石的比表面积由2.23 m^2/g 增加至2.98~3.04 m^2/g 时,磷矿石中有效磷的含量由6%增加至16.2%~17.4%。张平等^[31]运用行星式球磨机对我国成因类型不同的12种磷矿石进行了超细粉碎,经过活化后,辛集磷矿有效磷质量分数可达7.95%,其它磷矿石有效磷质量分数皆达到12%~15%,超细粉碎技术大幅度提高了有效磷含量。Amgalan等人^[32]对布伦卡安矿床中的磷矿进行机械处理,以便用干燥法制备肥料。将磷酸盐样品在振动球磨机中研磨15~120 min,并用XRD、FTIR和粒度分析仪等常用的表征手段对其进行分析。试验研究表明,经超细粉碎加工过的磷矿粉,肥效时间是过磷酸钙作用的

2~3倍,作物产量是过磷酸钙的95%。

超细粉碎活化后,磷矿石颗粒粒度减小,比表面积增大,从而导致磷矿石的接触面积增加,有效磷的含量增加,枸橼率发生明显变化,增大磷肥作用时间。

3.2 超细粉碎对磷矿晶体结构变化的影响

磷矿超细粉碎过程中,机械力的作用破坏了矿物的晶体结构,发生位错、变形、缺陷甚至形成非晶态物质,有利于同象置换,使得有效磷含量增加,有望直接作为磷肥使用。

Jargalbat P^[33]利用X射线、中子和同步粉末衍射技术,对Burenkhan、Tsakhiruul和Aldarkhan天然磷矿和机械化学活化后的样品分别进行了晶体结构研究。结果表明,机械活化后,有新的晶相形成,氟磷灰石的晶格畸变较强,尤其是 $[\text{PO}_4]^{3-}$ 四面体的畸变,使得氟磷灰石的晶格能增加,溶解度随之提高。王晨等^[34]采用X射线衍射分析技术和X射线光电子能谱等表征手段对不同粒度的磷矿粉进行测试。结果显示,随着磷矿粉细度的增加,氟磷灰石衍射峰的峰高呈降低趋势,进而认为氟磷灰石的结晶程度不断降低,逐渐变为无定形态。高宏^[35]采用机械力化学法对中低品位磷矿进行活化,结果表明,随着磨矿时间的延长,晶粒产生缺陷,发生晶格应变,形成纳米结构,导致磷矿石活性增加,提高了有效磷含量。

利用XRD和SEM等检测手段分析可知,超细粉碎过程中由于机械力作用于磷矿,使得其结晶度降低,产生无定形化,由于晶格发生缺陷,从而发生晶格畸变等晶体结构变化。

3.3 活化剂对磷矿超细粉碎过程的研究

超细粉碎过程中,适当地添加活化剂能有效改变磷矿粉本身的化学成键结构,为促进中低品位磷矿的充分利用、降低磷肥的生产成本提供了有力保障。

Wu等^[36]采用改性蒙脱石对超细粉碎活化处理云南某磷矿石,发现活化后的磷矿粉中水溶性磷和有效磷含量均有明显增加,尤其是有效磷含量达到了19%左右,与酸化磷肥中有效磷的含量非常接近。魏静^[37]研究超细粉碎磷矿过程中添加不同活化剂的影响,结果表明,添加膨润土和沸石等作为活化剂可提高磷矿中有效磷的含量,且沸石产地不同对磷矿作用也不同。孙逊^[38]采用机械化学法与添加活化剂法(生理酸性肥料—硫酸铵、氯化铵)对磷矿粉进行复合活化,研究了超细粉碎过程及活化剂对磷矿粉的活化效果。结果表明,采用机械化学法活化磷矿粉,随着活化次数增加和活化时间延长,有效磷含量随之增加。

超细粉碎过程中添加活化剂,有利于磷素在土壤

中的释放与作物吸收,可明显提高磷矿的有效磷含量,即提高表面活性与枸溶率,提高磷矿石有效成分的溶解与释磷能力。

4 结论

(1)超细粉碎过程中,由于机械力化学作用,导致颗粒细化,表面自由能变化,会破坏晶体结构,产生晶格畸变;粉碎至一定细度时,颗粒会产生团聚,此时适当添加助磨剂,可提高粉碎效率。

(2)常用的超细粉碎设备有冲击式磨机、气流磨机、搅拌磨机和振动磨机,且每种类型设备的结构也存在着较为明显的差异性,均有着相应的优缺点,可根据对产品的具体要求、原料物料来选择相应的设备。我国自主生产的超细粉碎设备,基本能满足市场需求。

(3)磷灰石经超细粉碎作用后,降低颗粒粒径、增大其比表面积,破坏磷矿物的晶格结构,增加有效磷含量,添加适量的活化剂更能提高磷矿中有效成分的溶解与释放能力,即增加枸溶率。

参考文献:

- [1] 尹艳红,朱应禄.机械力化学及其发展趋势[J].冶金丛刊,2008(6): 37-39.
- [2] 闫蒙钢,慈洁琳.物理化学的奠基者—奥斯特瓦尔德[J].大学化学, 2013,28(6): 71-74
- [3] 杨华明,邱冠周,王淀佐.超细粉碎机械化学的发展[J].金属矿山, 2000(9): 21-24,31.
- [4] 尹小冬,王长会,谭涌,等.超细粉碎技术现状与应用[J].中国非金属矿工业导刊,2009(3): 46-49.
- [5] 王瑛玮.矿物超细粉碎方法研究与磨矿试验[D].长春:吉林大学, 2005.
- [6] 罗驹华.非金属矿物粉体机械力化学研究进展[J].化工矿物与加工, 2004(11): 5-8.
- [7] 张平,孟磊,石元亮.不同类型磷矿石的机械活化效果研究[J].化工矿物与加工,2014,43(8): 13-15,19.
- [8] STRATIGAKI MARIA, GOSTL ROBERT. Methods for Exerting and Sensing Force in Polymer Materials Using Mechanophores. [J]. Chem Plus Chem, 2020, 85(6): 1095-1103.
- [9] 李冷,曾宪滨.粉碎机械力化学的进展及其在材料开发中的应用[J].武汉工业大学学报,1993(1): 23-26.
- [10] WU KJ, JU T, DENG Y, et al. Mechanochemical assisted extraction: A novel, efficient, eco-friendly technology. [J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 66: 166-175.
- [11] KATCHALSKY A, ZWICK M. Zwick. Mechanochemistry and ion exchange[J]. Journal of Polymer Science, 1955, 16(82): 221-23.
- [12] AHMED EJAZ, KAROTHU DURGA PRASAD, et al. From mechanical effects to mechanochemistry: softening and depression of the melting point of deformed plastic crystals.[J]. Journal of the American Chemical Society 2020, 142(25): 11219-11231.
- [13] KRAVCHENKO VP, BAGLYUK GA, TROTSAN AI. Effectiveness of jet milling for producing superfine powders from blast-furnace slag. [J]. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2017, 55: (11-12).

- [14] EDWIN H. MENA, TAO LIU, XIANYAN LIAO, et al, Junyi Huang. Effect of superfine grinding on the phytochemicals and antioxidant activities of mulberry leaves[J]. Science Journal of Public Health, 2016, 4(3): 138.
- [15] 李鹏举,谭琦,赵姬,等.低品位滑石超细粉碎-表面改性一体化研究[J].矿产保护与利用,2016(3): 45-48.
- [16] 罗驹华,张少明.机械力化学法制备单晶莫来石的机理研究[J].硅酸盐学报,2005(5): 568-571.
- [17] 王宇斌,文堪,汪潇,等.白云母粉体超细磨过程研究[J].矿产保护与利用,2019(2): 70-74.
- [18] 田文,吕莉,梁斌,等.机械活化对钛铁矿高温氧化过程的影响[J].化学反应工程与工艺,2011,27(6): 537-542.
- [19] 胡保全,白培康,程军.高能球磨制备 Mo-3%Cu 纳米晶复合粉末特性[J].功能材料,2011,42(S1): 73-75.
- [20] DUAN H, MU XF, WANG Y. The efficiency analysis on assistant-grinding of lignosulfonate and its modified composites. [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018, 2(2): 21-23.
- [21] 潘东,杨建国,葛源,等.煤基碳素的石英砂超细助磨研究[J].矿产保护与利用,2018(5): 106-109,150.
- [22] 郭高巍.白云母超细粉体的制备及助磨机理的研究[D].西安:西安建筑科技大学,2015.
- [23] 吴一善,温建康.高岭土助磨工艺研究[J].非金属矿,1993(3): 8-12.
- [24] 李冷,曾宪滨.石墨的粉碎机机械力化学研究[J].武汉工业大学学报, 1996(1): 50-53.
- [25] 单志伟,李凤久,刘立伟,等.超细粉磨活化河北某磷矿粉试验研究[J].矿产综合利用,2020(2): 55-59.
- [26] XIAO YH, SHI-LL, FANG YC, et al. Variability of environmental factors and the effects on vegetation diversity with different restoration years in a large open-pit phosphorite mine. 2019, 127: 245-253.
- [27] 韩凤兰,吴澜东.天然羟基磷灰石超细粉碎试验研究[J].矿产保护与利用,2007(2): 17-19.
- [28] 杨华明,陈德良,邱冠周.超细粉碎机械化学的研究进展[J].中国粉体技术,2002,8(2): 32-37.
- [29] 林胜.我国超细粉碎设备的现状与展望[J].中国粉体技术,2016,22(2): 78-81,85.
- [30] MINJIGMAA A, TEMUJIN J, KHASBAATAR D, et al. Influence of mechanical distortion on the solubility of fluorapatite[J]. Minerals Engineering, 2006, 20(2): 194-196.
- [31] 张平,孟磊,石元亮.不同类型磷矿石的机械活化效果研究[J].化工矿物与加工,2014,43(8): 13-15,19.
- [32] MINJIGMAA A, OYUN-ERDENE G, ZOLZAYA T, et al. Phosphorus fertilizer prepared from natural burenkhaan phosphorite (mongolia) by a mechanical activation. [J] Geosystem Engineering 2016, 19(3): 119-124.
- [33] JARGALBAT P, BATDEMBEREL G, CHADRAABAL SH, et al. Crystal structure of mongolian phosphorite minerals and mechanochemistry [J]. Physical Chemistry, 2014, 4(2): 30-34.
- [34] 王晨,高宏,应媛芳,等.机械化学法活化磷矿的机理研究[J].硅酸盐通报,2018,37(12): 4007-4011.
- [35] 王晨,高宏,刘淑红,等.中低品位磷矿粉的机械力化学活化与活性表征[J].化工矿物与加工,2012,41(7): 1-4.
- [36] 谢超,吴三琴,张泽阳,等.机械力化学法制备有机改性蒙脱石粉体[J].中国粉体技术,2014,20(1): 7-12.
- [37] 魏静,周恩湘,张桂银,等.不同活化剂对磷矿粉的活化作用[J].河

北农业大学学报,2001(1):13-15.

[38] 孙逊,孟磊,石元亮.磷矿粉机械活化有效性研究[J].吉林农业科学,2014,39(1):47-50.

[39] 林胜.我国超细粉碎设备的现状与展望[J].中国粉体技术,2016,22(2):78-81,85.

[40] 于大雪,武敬杰.秸秆超细粉碎设备现状及研究[J].吉林化工学院学报,2019,36(12):60-62,78.

[41] 郑水林.超细粉碎设备现状与发展趋势[J].中国非金属矿工业导刊,2004(3):3-6,26.

[42] 徐鹏金.浅述石墨超细粉碎的研究现状[J].中国粉体工业,2019(5):19-24.

[43] 张国旺,黄圣生.超细粉碎技术的应用和发展[J].矿业快报,2002(1):1-3.

[44] 姚敏.振动磨动态特性分析及变频控制研究[D].长春:吉林大学,2005.

Research Status on Ultrafine Crushing and Its Application in Processing of Phosphate Rock

LI Yingying¹, LI Fengjiu¹, WANG Di², LI Guofeng¹

1. School of Mining Engineering, North China University of Technology, Tangshan 063210, Hebei, China;
2 Luzhong Mining Co. LTD, Jinan 271100, Shandong, China

Abstract: Ultrafine crushing technology is an important technical means to process raw materials into microns or even nanometers, and its research can effectively improve resource utilization. Due to mechanical force, grain size reduction, crystal dislocation, and defects were introduced, in the process of ultrafine crushing, which will result in lattice distortion and other structural changes. The effect of grinding agents on ultrafine crushing was also listed. Furthermore, the effect of ultrafine crushing on the crystalline structure of minerals and the phosphorus release capacity of phosphate ore were mainly discussed. Meanwhile, the typical ultrafine crushing equipment and its applicable scope and advantages and disadvantages are introduced.

Key words: mechanical force; ultrafine crushing; phosphate ore; grinding agents; crushing equipment

引用格式:李营营,李凤久,王迪,李国峰.超细粉碎研究现状及其在磷矿加工领域中的应用[J].矿产保护与利用,2020,40(6):47-51.
Li YY, Li FJ, Wang D and Li GF. Research status on ultrafine crushing and its application in processing of phosphate rock[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2020, 40(6): 47-51.