



# 超声波技术在矿物浮选中的研究、 应用现状及发展趋势

陈兰兰<sup>1,2</sup>, 卢东方<sup>1,2</sup>, 王毓华<sup>1,2</sup>, 程志勇<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083;  
2. 中南大学 战略含钙矿物资源清洁高效利用湖南省重点实验室, 长沙 410083)

**摘要:** 超声波技术的广泛应用基于超声波所具有的两种特性, 一是超声波作为一种信息载体, 二是超声波作为一种能量形式。本文所总结的超声波在矿物浮选方面的应用, 正是基于超声波作为一种能量形式, 通过它(或者由它所产生的超声空化)与传声介质相互作用所产生的效应, 从而对矿物浮选产生影响。本文从超声波应用于矿物浮选的原理出发, 综述超声波对矿物、浮选药剂和矿浆产生的作用及应用现状, 总结应用于浮选的超声波设备, 最后提出超声波应用于浮选的发展展望。结果表明: 超声波效应会对浮选产生不同作用, 可通过设置不同的超声波参数和不同的处理方式调控浮选行为, 改善浮选指标, 从而达到所需的目的。

**关键词:** 超声波; 浮选; 矿物; 药剂; 矿浆

文章编号: 1004-0609(2021)-04-1042-15

中图分类号: TD923

文献标志码: A

**引文格式:** 陈兰兰, 卢东方, 王毓华, 等. 超声波技术在矿物浮选中的研究、应用现状及发展趋势[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(4): 1042–1056. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37770

CHEN Lan-lan, LU Dong-fang, WANG Yu-hua, et al. Research and application of ultrasonic technology in mineral flotation and development trend[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(4): 1042–1056. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37770

浮选是矿物选别最重要的方法之一, 随着资源的枯竭, 选别出高指标的精矿产品愈加困难。矿物表面受矿泥罩盖<sup>[1–3]</sup>、黏液涂层<sup>[4]</sup>、氧化<sup>[5–6]</sup>和金属离子吸附<sup>[7–9]</sup>的影响, 使矿物难以暴露新鲜表面, 直接与药剂作用参与浮选。一些原有的浮选药剂具有不易分散、用量较大、不易乳化和药剂活性低等缺点<sup>[10]</sup>。还有一些难溶性颗粒药剂(如苯丙黑药)在浮选过程中的停留时间较短, 还未与矿物充分作用发挥药效就与尾矿一同排出, 增加了用药量, 若增加搅拌时间和搅拌强度又会造成选矿成本增加和效率降低<sup>[11]</sup>。浮选是在固、气、液三相中进行的, 泡沫量、泡沫的稳定性、泡沫层的厚度和泡沫的形状大小等均影响浮选指标。这些矿物浮选存在的问

题, 可以通过超声波技术得到不同程度的解决。浮选主要利用超声波的机械作用, 其中包括机械搅拌、相互扩散、均匀化和凝聚作用, 从而对物质产生影响, 为浮选创造有利条件。

本文旨在阐明超声波技术应用于浮选的原理, 并综述了超声波对矿物、浮选药剂和矿浆产生的作用, 总结了应用于浮选的超声波设备。将超声波技术作为一种预处理方法或者在浮选的同时进行超声波处理均对浮选具有重要意义。

## 1 超声波技术应用于浮选的原理

超声波技术应用于浮选的原理主要基于超声

**基金项目:** 钒钛资源综合利用国家重点实验室资助项目(2020P4FZG03A); 国家自然科学基金资助项目(51974366); 中南大学研究生自主探索创新项目(2020zzts740); 战略含钙矿物资源清洁高效利用湖南省重点实验室资助项目(2018TP1002)

**收稿日期:** 2020-07-06; **修订日期:** 2021-03-11

**通信作者:** 卢东方, 副教授, 博士; 电话: 15399906602; E-mail: 82559428@qq.com

处理中液体的空化效应和 Bjerknes 效应, 如图 1 所示。超声空化是指当超声波能量到达一定值时, 液体中就会产生许多微小气泡(空化核), 这些气泡在超声作用下振荡、生长, 当声场能量达到空化阈值时, 空化气泡产生闭合与崩塌<sup>[12]</sup>。超声空化可引起一些基本效应如热效应、机械效应和化学效应。Bjerknes 力最早是由 BJERKNES 父子发现的, BJERKNES 父子发现, 当流体中脉动的物体同相振荡时彼此吸引, 而当它们反相振荡时又相互排斥<sup>[13]</sup>。后来这种在流体中脉动物体之间的相互作用力就被称为 Bjerknes 力<sup>[14]</sup>。超声场中的 Bjerknes 力是指气泡所受的吸引或者排斥力, Bjerknes 效应是指气泡因 Bjerknes 力而发生的聚集和分离行为。

## 1.1 超声空化效应

超声空化包括瞬时空化和稳态空化, 不同空化状态取决于声压和声频大小。两种空化现象在媒质中可同时存在, 在一定条件下稳态空化可转化为瞬时空化, 瞬时空化和稳态空化可共同作用于矿物浮选。

### 1.1.1 瞬时空化

当声压幅值大于液体中的静压力(即  $p_m \geq p_0$ )

时, 气泡初始半径小于共振半径<sup>[15]</sup>(即满足  $R_0 < R_o$ ) 的气泡, 因声压负压相的到来而不断增大, 而当声压正压相到来时, 气泡先因惯性继续增大到最大半径  $R_m$ , 然后迅速收缩直到崩溃闭合, 这种有闭合的气泡运动, 通常称为“瞬时空化”<sup>[16]</sup>。这一过程一般需要较大的声强(大于  $10 \text{ W/cm}^2$ )和较短生存周期的空化泡。气泡在声场振荡、生长过程中会不断积聚能量, 当气泡完全闭合(崩塌)之后, 气泡内积累的能量将以向外辐射的冲击波形式释放出来, 从而对周围物质产生作用。

瞬态空化过程中气泡所释放的巨大能量将对矿物表面的不容性杂质产生强大的冲击和剥离作用, 使杂质脱落于水溶液中, 矿物将暴露新鲜表面, 从而有利于矿物浮选。此外瞬态空化还对矿物表面组分具有溶蚀作用, 使其暴露出活性位点, 同样有利于浮选。

### 1.1.2 稳态空化

当声压幅值远远小于液体中的静压力(即  $p_m \ll p_0$  时), 在弱声场(声强的强度小于  $10 \text{ W/cm}^2$ )作用下, 气泡所做的稳定的小振幅脉动现象, 通常称为“稳定空化”, 稳态空化泡将持续振荡而不发生溃灭<sup>[17]</sup>。

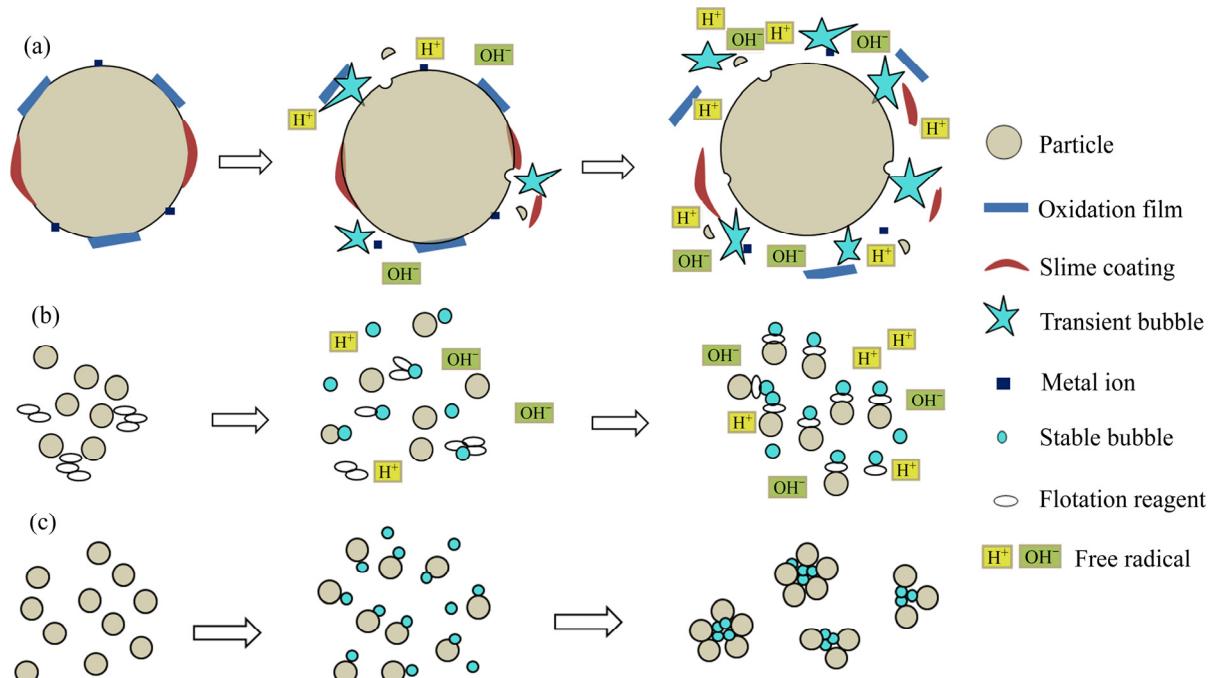


图 1 超声瞬态空化、稳态空化和 Bjerknes 效应对矿物浮选的影响

Fig. 1 Effect of ultrasonic transient cavitation(a), stable cavitation(b) and Bjerknes power(c) on mineral flotation

稳态空化可以使在物体表面的沾染物溶解，稳态空化气泡可形成于物体表面与污染层之间，发生振荡而使污染物溶解于泡沫中，此外稳态空化还有助于水溶液中的油脂乳化<sup>[18]</sup>。因此稳态空化可用于去除矿物表面可溶性杂质和浮选药剂的分散和乳化。稳态空化还可形成大量稳定的微小气泡，这些微小气泡会进行大量的振荡，在此过程中，表面活性剂有足够的时间吸附在气泡/溶液界面上，并使更多的气体溶解形成气泡，充分发挥药效作用<sup>[19]</sup>。微小气泡还能通过桥接增强颗粒聚集，进而增加颗粒聚集体与浮选气泡的碰撞黏附概率，提高矿物可浮性<sup>[20-21]</sup>。

## 1.2 Bjerknes 效应

Bjerknes 力通常有两种类型：一种是主 Bjerknes 力，即气泡在声波波节或波腹处受到的吸引或排斥力，这是由外界声场所引起的气泡振荡产生的力；另一种是次 Bjerknes 力，即相邻两个气泡之间的吸引或排斥力，这是一个气泡振荡对另一个气泡振荡产生的影响<sup>[22-23]</sup>。当控制不同超声波参数，Bjerknes 力会对气泡的运动特性产生不同影响。在驻波场中，主 Bjerknes 力使气泡聚集在波腹或者波节处。而经典次 Bjerknes 理论认为两个相互作用的气泡只能表现出下列行为：如果驱动声频率位于两个气泡的共振频率之间，则气泡间相互排斥，否则相互吸引<sup>[22]</sup>。因此气泡在声场作用中除了发生与空化效应相关的运动外，还会在一定的外部环境下发生聚合和分离，并形成一定形状的气泡群或气泡团<sup>[24]</sup>；如“葡萄串状气泡群”<sup>[25]</sup>，“锥状气泡群”<sup>[26]</sup>和“Lichtenberg 图”<sup>[27]</sup>。

Bjerknes 效应正是通过影响超声场中矿化气泡的运动特性从而对浮选产生作用。在 Bjerknes 力作用下，这些载有细粒矿物的微泡可以通过聚合作用而使细粒矿物聚集，从而提高矿粒与气泡的有效黏附率<sup>[12, 22-24]</sup>。

## 2 超声波对浮选的作用

超声对浮选的作用可概括为超声对矿物、浮选药剂和矿浆的作用，这些作用正是基于超声空化效应和 Bjerknes 效应。

### 2.1 超声对矿物的作用

超声对矿物的作用主要是利用超声的空化效应产生的机械搅拌作用，这一过程主要在矿物的预处理中进行。超声场中空化气泡的瞬间崩塌释放的巨大能量对矿物表面产生清洁、溶蚀和脱硫等作用。

#### 2.1.1 清洁作用

矿物表面杂质可通过洗矿去除，即矿物表面覆盖的矿泥、黏液涂层、氧化膜等在水力和机械力的作用下脱除<sup>[28-29]</sup>。利用超声波在水中的空化作用可实现对矿物表面的清洁，如图 2 所示。气泡瞬态空化时发出的冲击波在矿物周围产生上千个大气压力，对矿物表面杂质层反复冲击，从而破坏杂质层与矿物表面的吸附和引起杂质层本身破坏而脱离矿物表面；气泡的稳定空化也能对表面进行擦洗，微小气泡“钻入”矿物裂缝中做振动，使杂质脱落<sup>[30]</sup>。

运用超声处理对矿物表面进行清洗的研究已有很多。石坚<sup>[31]</sup>以超声波清洗为处理手段对风化煤进行处理，研究发现在超声空化作用的冲击下风化煤颗粒表面得到清洗，暴露出疏水的新鲜表面，可浮性提高。VIDELA 等<sup>[32]</sup>用超声波处理硫化铜尾矿，发现超声空化效应可以清洁矿物颗粒表面和减少黏液涂层的吸附，促进药剂作用。陈经华等<sup>[33]</sup>通过超声波清洗消除了硫化矿表面氧化膜对可浮性的影响，可浮性明显提高，该方法耗时短，工艺简单。陆英等<sup>[34]</sup>探讨了超声波强化氧化后磁黄铁矿浮选的机理，结果表明：超声波处理能使磁黄铁矿表面氧化物溶解，暴露硫贫铁表面及部分新鲜磁黄铁矿表面，经超声波处理后的磁黄铁矿零电点负移，矿物表面疏水性增强，改善了浮选指标。王石<sup>[36]</sup>、郭伟<sup>[37]</sup>通过研究发现超声预处理可以减少煤表面亲水基团的含量，提高煤的疏水性；超声脱附可以降低煤灰分含量，改善浮选指标。程金华<sup>[38]</sup>研究了超声波对硫铁矿表面性质的影响，发现超声波对硫铁矿表面有清洗、氧化和剥蚀作用，可清除黏附在黄铁矿表面的杂质，并剥蚀黄铁矿中含有的某些有害矿物。彭樱等<sup>[39]</sup>在研究超声波对黄铜矿与辉钼矿可浮性的影响时结果表明：在海水作为媒介时，短时间超声作用矿物使表面  $Mg(OH)_2$  沉淀等亲水物质脱落，导致黄铜矿与辉钼矿可浮性增强，但长时间超声处理矿物表面会重新氧化，可浮性均降低。

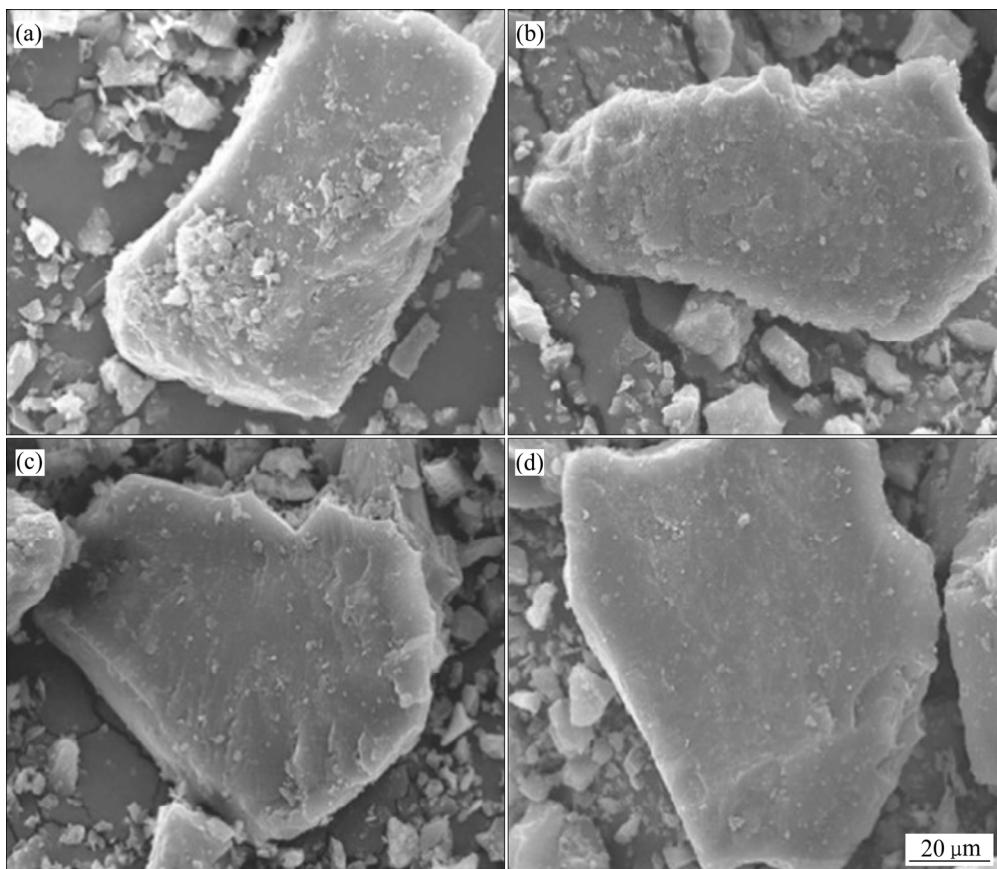


图2 不同超声功率下炼焦中煤的扫描电镜照片<sup>[35]</sup>

**Fig. 2** SEM images of coking middlings with different ultrasonic power<sup>[35]</sup>: (a) Without ultrasonic pretreatment; (b) 180 W; (c) 270 W; (d) 360 W

### 2.1.2 溶蚀作用

矿物的表面溶蚀主要通过改变矿物表面元素的数量、状态和位置来影响矿物表面性质, 可通过物理或化学方法实现矿物表面的溶蚀<sup>[40]</sup>。矿物的表面溶蚀可引起晶体化学、表面化学和溶液化学的变化, 从而影响矿物的浮选行为。将表面溶蚀作为一种改变矿物表面性质的预处理手段, 有助于改善矿物的浮选行为。如锂辉石在 NaOH 预处理条件下矿物表面发生溶蚀, 矿物表面锂和铝的相对含量升高, 锂辉石的浮选回收率升高<sup>[41]</sup>。此外, 郑海涛等<sup>[42]</sup>通过研究发现 NaOH 浸泡处理可使锂辉石表面发生溶蚀, 机械搅拌作用可进一步促进锂辉石的表面溶蚀, 更大程度地提高锂辉石的可浮性。同样作为一种能量形式的超声波, 通过超声空化效应所引起的机械搅拌作用可达到普通低频搅拌达不到的效果, 强化矿物表面的选择性溶蚀效果, 为浮选创造有利条件。

有研究团队<sup>[43-46]</sup>将超声波作为表面改性手段探究它对钛铁矿浮选的影响。结果发现超声波处理后钛铁矿表面成分变化显著,  $\text{Fe}^{2+}$ 转化为  $\text{Fe}^{3+}$ , 与捕收剂反应时,  $\text{Fe}^{2+}$ 的活性高于  $\text{Fe}^{3+}$ 的, 提高了钛铁矿表面的相应  $\text{Fe}^{3+}$ 含量, 从而增强了捕收剂的化学吸附。并且经超声处理后, 脉石矿物钛辉石和橄榄石表面溶解了大量的  $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{Mg}^{2+}$ , 捕收剂与这些离子相互作用, 而不利于其在脉石矿物表面的吸附(见图 3), 因此, 可以更有效实现它们的分离。

### 2.1.3 脱硫作用

超声对矿物的脱硫作用主要是针对煤而言的。煤在燃烧过程中会产生大量的  $\text{SO}_2$ 污染, 因此脱除煤中的硫分成为急需解决的问题。超声脱硫是基于超声空化引起的化学效应, 即利用超声空化在液体中产生的高温、高压、放电、冲击波及射流等极端效应加速化学反应或实现一般条件下难以进行的反应<sup>[16]</sup>。水介质中超声空化可诱发自由基( $\text{H}^+$ 和

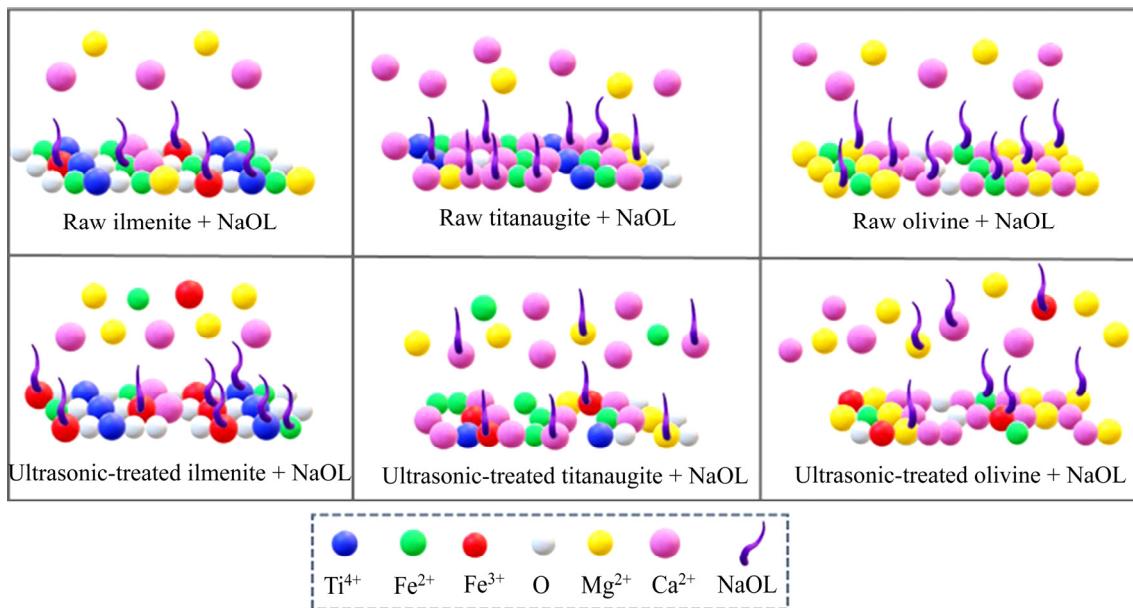


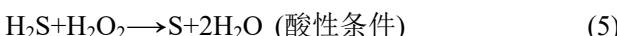
图3 超声处理前后钛铁矿、钛辉石和橄榄石表面NaOL的吸附模型<sup>[44]</sup>

**Fig. 3** Adsorption model of NaOL species on ilmenite, titanaugite, and olivine surfaces before and after ultrasonic treatment<sup>[44]</sup>

$\text{OH}^-$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 和 $\text{H}_2$ 的生成(如式(1)~(4)所示):



这些产物随后进行与水中溶解物有关的二次反应生成大量高活性物质如 $\text{OH}$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{HO}_2$ 和 $\text{O}_2$ ，这些强氧化剂在不同pH条件下可与煤表面的硫组分发生氧化反应(见式(5)~(7))，最终生成可溶性硫酸盐溶于水中。



KANG等<sup>[47]</sup>在研究利用超声波提高煤泥浮选除硫除灰性能的可行性时，发现超声波处理可均提高煤的憎水性和黄铁矿、杂质的亲水性，最佳浮选指数、最佳脱硫指数和脱硫率也均有所提高。康文泽等<sup>[48]</sup>通过超声波煤泥试验表明，超声处理可通过改变矿物表面性质大幅度提高脱硫完善度和浮选完善度。曾维晨<sup>[49]</sup>将超声波和微波联合用于炼焦煤

的脱硫，发现超声处理可加快溶液中羟基自由基( $\text{OH}$ )的产生速率；同时使煤样的粒度变细，比表面积、总孔容和平均孔径均增加，印证了超声波在脱硫方面的化学效应和物理作用。与传统方法相比，超声脱硫具有处理时间短，药剂消耗低和设备简单等优点<sup>[50]</sup>，将超声波技术应用于工业上煤料脱硫仍是今后研究的重点。

## 2.2 超声对浮选药剂的作用

超声空化所产生的机械搅拌、相互扩散和均匀化作用会对浮选药剂产生影响，利用这些超声作用可增强浮选药剂的溶解扩散和弥散乳化效果，同时超声波也会使药剂的溶液性质和聚集状态产生变化。

### 2.2.1 分散乳化作用

超声的高频振动、辐射压力以及空化气泡闭合后产生的局部冲击波，可粉碎液体中的细颗粒使其细化和均匀化；将较大、不均匀和不易溶解的乳滴分散成微小、均匀的乳浊液，提高药剂活度<sup>[16]</sup>。使其与矿物充分接触，提高药剂作用效果。

超声处理浮选药剂可降低药剂用量、减少药剂作用时间、简化浮选流程和提高浮选指标等优势，带来一定的经济效益，因此关于超声用于浮选药剂

的乳化分散的研究有很多。陈东等<sup>[51]</sup>在对常用浮选药剂进行超声波作用机理研究时, 对药剂进行染色处理, 通过色素扩散来观察药剂分散速度; 通过灰度变化来确定其乳化效果。结果表明超声波处理可以用于各类浮选设备, 加速浮选药剂的分散与乳化。李海兰等<sup>[52]</sup>借助超声波辅助粉煤灰浮选脱碳, 在浮选试验中加入被超声波分散和乳化的捕收剂煤油, 浮选效率、精矿的烧失率和回收率均有所提高。何双杰<sup>[53]</sup>对起泡剂进行化学改性与超声乳化联合作用改性试验, 以溶解度、表面张力和浮选效果等指标测定药剂效果, 结果表明超声乳化可以提高起泡剂利用率和气泡性能。单独进行超声乳化或化学改性, 均能提高其浮选产率, 联合作用时浮选产率会更高。此外, 近年来关于超声分散乳化浮选药剂的专利也不断增多, 说明超声乳化浮选药剂正从理论走向实际应用, 并不断发展壮大。牛福生等<sup>[54]</sup>发明了一种超声预处理煤泥浮选药剂的制备方法及使用设备, 利用超声探头对浮选药剂原料和清水的混合液进行超声处理制备浮选药剂, 提高了药剂的选择性和浮选速度。该设备不仅可以对煤泥浮选药剂进行超声预处理, 还可以对浮选药剂和煤泥的混合液进行二次处理, 进一步提高了药剂的质量和增加了精煤产率。尹德夺<sup>[55]</sup>发明了一种浮选药剂超声波乳化器, 浮选药剂经过该设备乳化后形成极小油滴, 乳状液表面呈水性, 便可以快速、充分、均匀地分散在矿浆中。乳化后药剂直径变小、表面积增加, 大大提高了药剂和矿粒碰撞概率, 从而在加快浮选速度的同时也降低了药剂的用量, 提高了浮选效率。

## 2.2.2 药剂溶液性质与微观结构的改变

当空化气泡崩溃时会伴随产生高温、高压、放电和冲击波等极端效应, 使溶液中浮选药剂产生各种物理化学反应。这些反应改变了某些药剂分子的结构; 诱导了某些极性离子或极性状态的形成; 破坏分子间的作用平衡, 使水化作用减弱, 作用力减小。原来溶于液体中的气体因为过饱和状态而逸出, 从而导致浮选药剂溶液如电导率、表面张力、溶氧量、临界胶束浓度、吸附量等溶液性质和微观结构发生变化。

黄哲誉<sup>[56]</sup>对阴离子捕收剂、阳离子捕收剂、螯合捕收剂进行超声处理, 通过研究发现超声时间、

超声功率对捕收剂溶液的电导率、表面张力、溶解氧含量、临界胶束浓度均有不同的影响。这些影响可从不同方面增强捕收剂与矿物的作用效果, 提高了矿物的浮选回收率。薛娟琴等<sup>[57]</sup>、胡松青等<sup>[58]</sup>研究功率超声波对溶液性质的影响, 实验结果表明, 超声波作用使溶液的黏度和表面张力暂时下降, 电导率长期升高。而在浮选中, 溶液黏度、和表面张力的降低均有利于浮选的进行。唐超<sup>[59]</sup>在研究超声波预处理对捕收剂吸附量及分散性的影响, 分别用分光光度计测量和光学显微镜观察超声波处理前后油滴的吸附量和分散情况。结果表明, 一方面超声处理在保证浮选回收率的同时可使柴油在煤表面的吸附量降低, 降低了药剂用量; 另一方面超声处理使柴油更加均匀高效地吸附于煤表面, 增强了捕收剂与煤的作用效果。

## 2.3 对矿浆的作用

超声对矿浆的作用主要指对矿浆中气泡的作用, 主要包括微泡的形成(见图 4)和聚合作用(见图 5)。矿浆在进入浮选机中会不断地被充气和搅拌, 并产生大量的气泡而使矿粒悬浮, 矿浆中气泡的行为是影响浮选指标的关键。通过调节超声频率和功率等参数条件可改善矿浆中气泡的形成与运动, 从而改善浮选行为。

### 2.3.1 微泡的形成

超声稳定空化效应可使矿浆中形成微小的气泡; 瞬态空化效应下气泡的破裂也可形成微小的气泡。但只有当液体压力大于整流扩散阈值(从振荡转变为生长的最小压强称为整流扩散阈值)而小于瞬态空化阈值(泡沫的行为由生长变为破裂时的最小压强)时, 才会有大量微小气泡形成<sup>[12]</sup>。控制好超声波的参数, 经超声处理后矿浆中泡沫直径明显会减小。在气体流量不变的情况下, 气泡尺寸的减小可以提高气泡-矿粒的碰撞效率、气泡-矿粒的附着效率和产生的气泡数, 从而有利于提高浮选回收率<sup>[60]</sup>。图 6 显示了超声条件下浮选泡沫尺寸明显减小的情况<sup>[61]</sup>。要实现矿物的有效浮选, 矿浆中需要有足够数量和合适尺寸的泡沫, 使目的矿物疏水并附着于气泡上升, 实现矿物分选<sup>[62]</sup>。

虽然目前关于超声对泡沫数量和尺寸的影响与浮选性能之间的关系研究鲜见报道, 但从理论

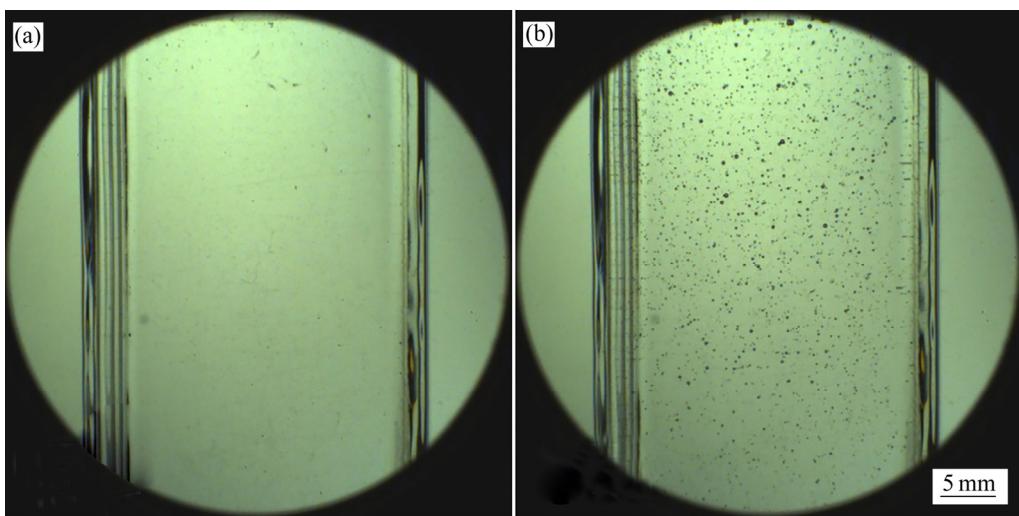


图4 超声空化效应在自来水中形成的微泡<sup>[12]</sup>

**Fig. 4** Formation of tiny bubbles in tap water owing to stable cavitation effect<sup>[12]</sup>: (a) Without ultrasound; (b) With ultrasound

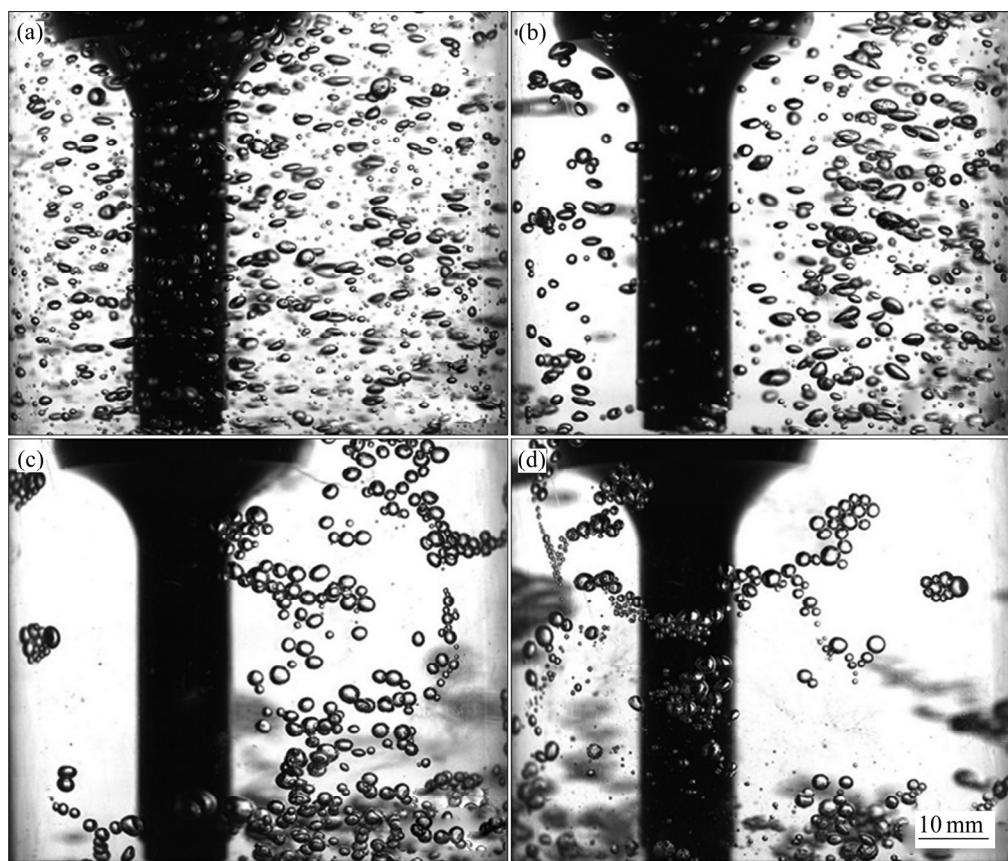


图5 超声处理3 s时不同超声功率对气泡聚集的影响<sup>[61]</sup>

**Fig. 5** Images of effect of different ultrasound powers on bubble aggregates at 3 s of ultrasonic treatment<sup>[61]</sup>: (a) 0 W; (b) 20 W; (c) 110 W; (d) 200 W

上来说超声是可以通过促进微泡的形成而提高浮选回收率。一方面，超声的稳定空化效应可产生大量的稳定气泡；另一方面气泡的平均尺寸随声功率

的增大而增大，随超声频率的增加而减小，只要控制好超声频率、功率等参数条件，可控制好泡沫尺寸达到合适的浮选范围<sup>[63]</sup>。PENG 等<sup>[64]</sup>在研究超声

波浮选高灰褐煤的机理时,发现超声波处理能产生大量的微气泡,覆盖在煤表面,增强了褐煤颗粒的可浮性。与常规浮选相比,覆有微泡的褐煤表面更容易附着在气泡上,超声波浮选加速了煤与气泡的附着。

### 2.3.2 聚合作用

聚合作用是指利用超声波的 Bjerknes 力使附着有细粒矿物的气泡相互聚合而使浮选回收率升高,这一过程一般在超声波驻波(可由频率相同、传输方向相反的两个传感器组合发出)条件下发生。细粒矿物的浮选一直是选矿的难题,通过超声波聚合作用将若干个微细粒矿物团聚在一起增大颗粒直径,从而增大与浮选气泡的碰撞概率,便能有效提高浮选回收率(如图 7 所示)。聚合作用受超声波的频率、波长和水位等的影响<sup>[65]</sup>,控制好超声波的条件,

Bjerknes 力可以使细颗粒聚集而不发生明显的分离。

CHEN 等<sup>[66]</sup>在研究超声波驻波对煤的聚集特性时,设置超声频率为 200 kHz, <75 μm 和 75~125 μm 之间的煤粒能够迅速聚合在一起,有利于浮选。通过光学显微镜观察聚集体发现超声空化气泡在煤颗粒间起着桥梁的作用,团聚体的形成是煤颗粒通过空化气泡在 Bjerknes 力作用下在波节/波腹处聚集的结果。MAO 等<sup>[61]</sup>在煤浮选的矿浆中同时进行超声处理(即超声和浮选同步进行),结果表明:超声改变气泡是提高回收率的原因之一,超声波通过声场中的气泡的振荡行为和 Bjerknes 效应来提高煤的浮选效果。由于超声的 Bjerknes 力的作用,气泡呈现出聚集的现象;由于气泡振荡的作用,气泡呈现出更加规则的球形。



图 6 浮选过程中泡沫的图像<sup>[67]</sup>

Fig. 6 Images of froth during flotation process<sup>[67]</sup>: (a) Conventional; (b) Ultrasonic

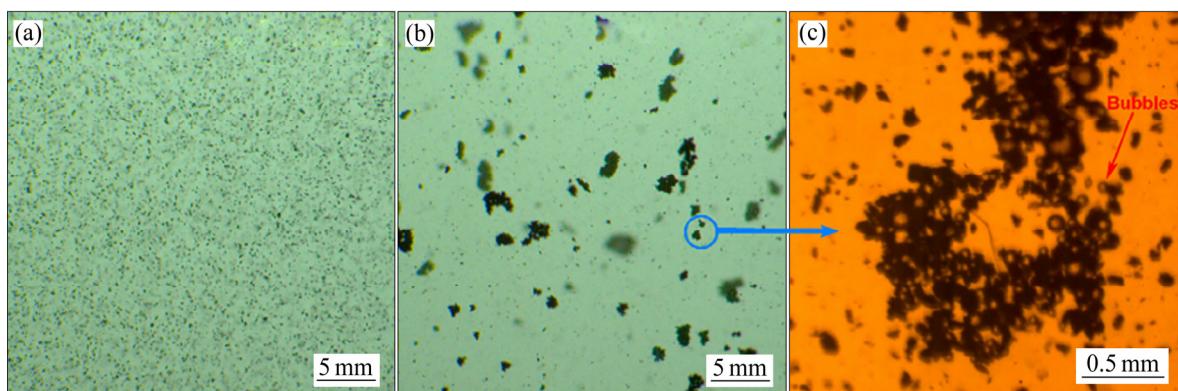


图 7 在 200 kHz 时超声波对煤颗粒( $74\sim125 \mu\text{m}$ )的聚集<sup>[66]</sup>

Fig. 7 Aggregation of coal particle ( $74\sim125 \mu\text{m}$ ) by ultrasonic treatment at 200 kHz<sup>[66]</sup>: (a) Before ultrasound; (b), (c) After ultrasound

### 3 超声波浮选设备及其大型化应用

本文所总结的超声波浮选设备是指利用超声波作为一种能量形式(即功率超声波)而生产制造的一系列设备,通过超声波能量对物质进行处理。功率超声波在媒质中传播时会产生一系列效应,如力学效应、热效应和化学效应等,通过这些效应对矿物、药剂和矿浆进行搅拌、分散和清洗以及促进氧化、还原、聚合和解聚等作用。根据换能器形状、结构和数量的不同应用于浮选的超声波设备类型主要分为槽式、探头式和超声波浮选柱,超声波清洗机和超声波处理器是槽式和探头式最具典型的代表,基于这两种超声波设备原型,可改造成适用于浮选前预处理或浮选同时处理的多种设备类型。

#### 3.1 超声波浮选设备

##### 3.1.1 槽式

槽式超声波浮选设备发出的声波是平行的,相比于探头式超声波设备,虽然较难获得高声强,但容器中的入射能量均匀分布,且处理量也更大<sup>[68]</sup>。清洗(搅拌)槽、换能器以及超声波发生器是组成槽式超声波浮选设备必不可少的一部分,超声波清洗机、超声波浮选机和超声波搅拌槽均属于这一类型的设备。超声波清洗机主要可用于矿物和药剂的预处理工作,利用超声波的空化机械效应对矿浆中的矿石颗粒表面进行高效清洗和分散,对药剂进行乳化和活化,使目标矿石颗粒裸露新鲜表面,增强药剂与矿物的相互作用。赵江<sup>[69]</sup>发明了一种微纳米气泡水超声波振动洗矿机,采用一级在水箱内振动清洗,二级在传送带上进行喷洗的工作模式,保证了矿石清洗的质量,微纳米气泡水具有净化的特性,经过循环过滤系统可大大提高水的循环利用率。超声波浮选机既可以用作矿物及药剂在浮选前的预处理工作,又可以在浮选的同时进行超声处理。曾兴民等<sup>[70]</sup>在浮选槽体内或外设置超声装置,并在浮选装置浮选矿物时启动超声装置。利用超声波强化机械搅拌功能对矿物进行擦洗,显著改善药剂与目标矿石颗粒的吸附过程;利用超声能量改善药剂活性和矿化气泡特性,提高目标矿石回收率和精矿品位。一般的矿用搅拌槽具有搅拌时间长、效果不佳

和处理量小等缺点,若增大处理量又会降低搅拌强度。超声搅拌槽在搅拌槽的底部或侧部增加了超声波发生器,在缩短搅拌时间的同时增强了机械搅拌的强度,增大了处理量。陈占金等<sup>[71]</sup>发明了一种带有超声波发生器的矿浆搅拌槽,搅拌槽底部设置了超声波发生器,利用超声波对浮选矿浆进行预处理,去除矿浆中矿物颗粒表面污染及附着的矿泥,减少选矿药剂的消耗,优化选别效果。

##### 3.1.2 探头式

探头式超声波浮选设备从探头尖端产生球面波,超声波强度随传输距离而变化,容易产生较高的声强,伴随着强烈的空化效应<sup>[72]</sup>。此类设备一般用于药剂的处理和实验室少量矿物的处理,对工业规模矿物的处理具有挑战性。将超声波探头置于浮选槽和药剂槽中间,利用强烈的空化效应对矿浆和药剂进行处理,达到良好的分散乳化效果。姚卫东等<sup>[73]</sup>采用超声波对某磷矿进行预处理选矿,将超声波发生探头插入矿浆进行超声波处理,结果表明,超声波处理能提高颗粒的表面电位,增加矿物活性,提高浮选回收率和精矿品位。WANG 等<sup>[74]</sup>将超声波探头分别放置于装有矿浆和药剂的烧杯中进行搅拌预处理,然后进行常规浮选粉煤灰,结果表明超声波处理有利于粉煤灰中残余碳特别是小颗粒的富集,明显改善了浮选效果。

##### 3.1.3 超声波浮选柱

浮选柱对细粒和超细粒矿物具有优异的浮选性能,早在 20 世纪 90 年代,有学者<sup>[75]</sup>就对超声波强化浮选柱进行了初步探索,认为超声波的空化作用有利于产生细小的气泡,在一定条件下,可达到较好的分选效果。针对浮选柱充气器易结垢堵塞、粗颗粒与气泡接触几率小、对各类矿石的适应性不强等缺点,将超声波技术引入浮选柱装置,在常规浮选柱体上安装超声振子接口,既能实现浮选柱所特有的优势,又能客服其现有缺点,从而强化浮选柱的浮选性能。沈政昌等<sup>[76]</sup>发明了一种矿物浮选柱,实现了工业规模以超声波为介质的超声介质浮选柱技术,即实现超声波技术对药剂的乳化分散作用,强化药剂的使用效果;对矿泥夹带的微细粒矿物颗粒的清洗作用,提供其矿化的最优条件,防止尾矿夹带跑掉;利用超声波的空化作用强化矿浆内部的搅拌作用,促进矿浆中溶解空气在粗颗粒和微

细颗粒析出, 提高浮选柱的总体回收率。李晨等<sup>[77]</sup>提出了一种旋流—静态微泡浮选柱超声强化管流段装置, 采用超声波激振方法增加矿浆流动湍流强度, 使湍流强度的增加更为明显, 而且方便调节以适配不同粒级的矿物颗粒。

### 3.2 大型化应用

超声波浮选设备的大型化应用还比较少, 大多数研究表明超声波在浮选领域的应用都是在实验室规模内开展。对于将超声波应用于工业规模, 目前有两个问题必须加以考虑。第一个问题是超声波所需的能量的估计, 以及达到大规模下这种机制的预期效果, 大型化应用将在很大程度上取决于所需超声波能量的估计量, 因为这将决定选择一个超声波槽或一个以上的超声波探头, 使它可在系列配置和尺寸上达到商业要求。第二个问题是增加超声波所带来生产成本的增加与提高产品综合收益的比值。因此, 只要资金成本能够保持在低水平, 大型操作在经济上是可行的, 可以通过超声波系统的间歇运行和几个操作单元的超声波设备共享来实现<sup>[78]</sup>。任佳<sup>[79]</sup>参考超声波浮选柱对洛阳某钼矿选厂进行的适应性工业试验实例, 证明采用超声波辅助浮选可提高选矿效率达4%, 同时具有去泥效果。将超声波应用于浮选并实现工业规模具有一定的前景和现实意义, 值得深入研究。

## 4 总结与展望

本文主要从超声空化效应和Bjerknes效应的角度综述了超声技术在矿物浮选中的作用, 包括超声对矿物、浮选药剂和矿浆的作用。利用超声对物质的机械搅拌、相互扩散、均匀化和凝聚作用对浮选产生影响, 可以是某个作用对浮选产生影响, 也可以是多个作用共同的结果。对矿物主要是表面清洁、溶蚀和脱硫作用; 对药剂主要是乳化分散和改变药剂溶液性质的作用; 对矿浆主要是产生微泡和聚合作用。在整个选矿流程中, 超声波设备可以起到多种设备的作用, 既可以对浮选前的矿物或者药剂进行预处理; 又可以在浮选的同时进行超声处理, 对矿物、药剂和矿浆产生作用。超声波技术既能简化选别流程又能降低设备成本。超声波技术应

用于浮选的发展展望如下:

1) 通过精确控制参数条件实现超声波对浮选的不同作用。超声波的各种效应对频率、声强、波长等超声波参数条件都有严格要求, 参数条件不同可能会对物质产生不同作用甚至相反作用, 如矿粒的分散和聚集行为。不同情况下的矿物处理需要超声波产生的不同作用, 如在细粒浮选中希望通过颗粒聚集更容易地黏附到浮选气泡上, 故应控制好超声波聚合作用所需的条件; 在正常粒度范围的浮选中希望增大颗粒与气泡的碰撞概率, 所以应控制好超声波形成微泡的条件, 使矿浆中产生大量的气泡而不发生团聚, 从而增大气泡与矿物的碰撞概率。精确地控制好超声参数, 从而使所需的那种超声作用最大化, 有利于最大程度地实现浮选分离效果。然而目前关于超声波参数对物质的作用与浮选性能之间的关系的研究仍有空缺, 这将是以后的重点研究方向。

2) 将超声波技术应用于工业选矿。大量研究表明超声波技术应用于浮选可以提高浮选的各项指标, 但关于这方面的应用目前只是在实验室范围内开展, 关于超声波浮选在工业应用方面还未普及, 如果将超声波技术应用于工业浮选新增的价值远大于增加超声波处理带来的生产成本, 既能缩短选矿流程, 又能提高选矿效率, 那么将超声波技术应用于工业规模是可以实现的。

## REFERENCES

- [1] 邓海波, 赵磊. 细粒矿泥与钨矿物凝聚行为和对浮选分离影响的机理研究[J]. 中国钨业, 2011, 26(3): 19–22.  
DENG Hai-bo, ZHAO Lei. On the mechanism of flocculating fine grain sludge ore to tungsten minerals and its influence to flotation separation[J]. China Tungsten Industry, 2011, 26(3): 19–22.
- [2] 黄川. 矿泥对孔雀石浮选行为的影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018: 41–57.  
HUANG Chuan. Research of the effect of slime on flotation behaviors of malachite[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018: 41–57.
- [3] 李明晓, 刘殿文, 张文彬. 矿泥对某氧化锌矿石浮选指标的影响[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2010, 35(5): 7–9.  
LI Ming-xiao, LIU Dian-wen, ZHANG Wen-bin. Effect of

- slime on oxidized zinc ore flotation[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2010, 35(5): 7–9.
- [4] YU Yue-xian, MA Li-qiang, WU Lun, et al. The role of surface cleaning in high intensity conditioning[J]. Powder Technology, 2017, 319: 26–33.
- [5] YIN Wan-zhong, XUE Ji-wei, LI Dong, et al. Flotation of heavily oxidized pyrite in the presence of fine digenite particles[J]. Minerals Engineering, 2018, 115: 142–149.
- [6] 姜凯, 刘杰, 韩跃新, 等. 自然氧化对黄铁矿可浮性的影响及其机理研究[J]. 金属矿山, 2019(2): 111–114.  
JIANG Kai, LIU Jie, HAN Yue-xin, et al. Effect of natural oxidation on floatability of pyrite and its mechanism[J]. Metal Mine, 2019(2): 111–114.
- [7] 李明阳, 胡义明, 皇甫明柱, 等. 金属离子对硅酸盐矿物浮选行为影响的研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2018(3): 61–66.  
LI Ming-yang, HU Yi-ming, HUANGFU Ming-zhu, et al. Research on the effects of metal ions on silicates flotation[J]. Journal of Mineral Resources Protection and Utilization, 2018(3): 61–66.
- [8] 王淀佐, 胡岳华. 浮选溶液化学[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1988: 132–138.  
WANG Dian-zuo, HU Yue-hua. Flotation solution chemistry[M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1988: 132–138.
- [9] 张作金, 代淑娟, 韩佳宏, 等. 菱镁矿浮选体系中金属离子对脉石矿物可浮性影响研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(2): 118–123.  
ZHANG Zuo-jin, DAI Shu-juan, HAN Jia-hong, et al. Research progress on the effect of metal ions on the floatability of gangue minerals in magnesite flotation system[J]. Journal of Mineral Resources Protection and Utilization, 2019, 39(2): 118–123.
- [10] 左康苗, 李刚. 煤泥浮选药剂现状与发展分析[J]. 化工管理, 2019(35): 109–110.  
ZUO Kang-miao, LI Gang. Current situation and development analysis of slime flotation reagents[J]. Chemical Enterprise Management, 2019(35): 109–110.
- [11] 陈东, 梁殿印, 韩登峰, 等. 超声波对常用浮选药剂分散乳化效果研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2011(3): 50–53.  
CHEN Dong, LIANG Dian-yin, HAN Deng-feng, et al. Effect of ultrasonic treatment on the emulsion dispersion of common flotation reagent[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2011(3): 50–53.
- [12] CHEN Yu-ran, TRUONG V N T, BU Xiang-ning, et al. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 60: 104739.
- [13] KOBELEV Y A, OSTROVSKY L A. Nonlinear acoustic phenomena due to bubble drift in a gas-liquid mixture[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1989, 85(2): 621–629.
- [14] 何国庚, 罗军, 黄素逸. 空泡溃灭的 Bjerknes 效应[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2000(3): 337–341.  
HE Guo-geng, LUO Jun, HUANG Su-yi. Bjerknes force during bubbles collapse[J]. Journal of Hydrodynamics(Series A), 2000(3): 337–341.
- [15] 王捷. 超声空化气泡运动过程的数值分析[J]. 价值工程, 2011, 30(1): 196–197.  
WANG-Jie. Numerical analysis of bubble dynamics in ultrasonic cavitation[J]. Value Engineering, 2011, 30(1): 196–197.
- [16] 冯若, 姚锦钟, 关立勋. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999: 78–88.  
FENG Ruo, YAO Jing-zhong, GUAN Li-xun. Ultrasound manual[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1999: 78–88.
- [17] 张鹏利, 林书玉, 朱华泽. 稳态与瞬态空化时空化泡的辐射声压[C]// 中国声学学会. 中国声学学会 2017 年全国声学学术会议论文集. 上海: 声学技术出版社, 2017: 491–492.  
ZHANG Peng-li, LIN Shu-yu, ZHU Hua-ze. The radiation pressure of steady state and transient cavitation bubble[C]// Acoustical Society of China. Proceedings of the 2017 National Acoustical Conference of the Chinese Acoustical Society. Shanghai: Technical Acoustics Press, 2017: 491–492.
- [18] 王萍辉, 方湄. 超声空化清洗技术及其应用[J]. 河北理工学院学报, 2002(4): 62–68.  
WANG Ping-hui, FANG Mei. A study on ultrasonic cavitation cleaning technology and its application[J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 2002(4): 62–68.
- [19] ASHOKKUMAR M. The characterization of acoustic cavitation bubbles — An overview[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(4): 864–872.
- [20] ZHOU Z A, XU Zheng-he, FINCH J A, et al. On the role of cavitation in particle collection in flotation—A critical review II [J]. Minerals Engineering, 2009, 22(5): 419–433.
- [21] 凌向阳. 泡沫稳定性及气–液界面颗粒运动对泡沫相浮选的影响机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019: 20–25.

- LING Xiang-yang. Study on the effect mechanisms of froth stability and particle motion at the air-water interface on froth phase flotation[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019: 20–25.
- [22] 马艳, 林书玉, 徐洁. 声场中气泡间次 Bjerknes 力和气泡群聚现象[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 40–44.  
MA Yang, LIN Shu-yu, XU Jie. The secondary Bjerknes force between two spherical bubbles and bubble accumulation[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science), 2018, 46(2): 40–44.
- [23] 焦俊杰. 超声场中空化气泡运动与融合的理论分析和试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014: 19–20.  
JIAO Jun-jie. The experimental study and theoretical analysis of cavitation bubble movement and coalescence in ultrasound field[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014: 19–20.
- [24] 沈壮志, 刘文强. Bjerknes 力对微气泡运动特性的影响[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 24–27.  
SHEN Zhuang-zhi, LIU Wen-qiang. The effect of Bjerknes force on motive behaviors of micro-bubble[J]. Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science), 2013, 41(2): 24–27.
- [25] DOINIKOV A A, ZAVTRAK S T. On the “bubble grapes” induced by a sound field[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1999, 1/2(6): 25–29.
- [26] MOUSSATOV A, GRANGER C, DUBUS B. Cone-like bubble formation in ultrasonic cavitation field[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2003, 10(4/5): 191–195.
- [27] METTIN R, LUTHER S, OHL C D, et al. Acoustic cavitation structures and simulations by a particle model[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1999, 6(1): 25–29.
- [28] 王长涛, 刘润清, 林上勇, 等. 湖南某萤石矿洗矿泥选矿工艺研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(4): 43–46.  
WANG Chang-qing, LIU Run-qing, LIN Shang-yong, et al. Beneficiation process for ore-washing slime from a fluorite mine in Hunan Province[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(4): 43–46.
- [29] 郭腾博, 李少平, 黄超军, 等. 碳酸锰矿选矿工艺研究现状与进展[J]. 金属矿山, 2019(12): 118–123.  
GUO Teng-bo, LI Shao-ping, HUANG Chao-jun, et al. Research status and development of beneficiation process of manganese carbonate ore[J]. Metal Mine, 2019(12): 118–123.
- [30] 李雅莉. 超声波清洗的原理和实际应用[J]. 清洗世界, 2006(7): 31–35.
- LI Ya-li. Ultrasonic cleaning principle and application[J]. Cleaning Word, 2006(7): 31–35.
- [31] 石坚. 超声波处理改善风化煤泥浮选效果研究[J]. 煤矿现代化, 2020(3): 163–165.  
SHI Jian. Study on improvement of flotation effect of weathered coal slime by ultrasonic treatment[J]. Coal Mine Modernization, 2020(3): 163–165.
- [32] VIDELA A R, MORALES R, SAINT-JEAN T, et al. Ultrasound treatment on tailings to enhance copper flotation recovery[J]. Minerals Engineering, 2016, 99: 89–95.
- [33] 陈经华, 孙传尧. 超声波清洗对方铅矿、闪锌矿和黄铁矿可浮性的影响[J]. 矿冶, 2005, 14(4): 13–16.  
CHEN Jing-hua, SUN Chuan-yao, Effect of ultrasonic cleaning on floatability of galena, sphalerite and pyrite[J]. Mining and Metallurgy, 2005, 14(4): 13–16.
- [34] 陆英, 程芳琴. 超声波强化氧化磁黄铁矿浮选的机理研究[J]. 金属矿山, 2019(4): 88–92.  
LU Ying, CHENG Fang-qin. Research on the mechanism of the oxidized pyrrhotite flotation improvement by ultrasonic[J]. Metal Mine, 2019(4): 88–92.
- [35] MAO Yu-qiang, XIA Wen-cheng, PENG Yao-li, et al. Ultrasonic-assisted flotation of fine coal: A review[J]. Fuel Processing Technology, 2019, 195: 106150.
- [36] 王石. 煤吸附表面活性剂前后超声作用下的洗选效应[J]. 山西化工, 2020, 40(1): 18–20.  
WANG Shi. Effect of coal adsorbing surfactant before and after ultrasound[J]. Shanxi Chemical Industry, 2020, 40(1): 18–20.
- [37] 郭伟. 表面活性剂选择性吸/脱附对低阶煤可浮性影响的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019: 59–61.  
GUO Wei. Study on the effect of surfactat selective adsorption/desorption on the floatability of low rank coal[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019: 59–61.
- [38] 程金华. 超声波强化硫铁矿浮选的试验及机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017: 62–63.  
CHENG Jin-hua. Experimental and mechanism study on ultrasonic enhancement of pyrite flotation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017: 62–63.
- [39] 彭樱, 李育彪, 王洪锋, 等. 超声波对黄铜矿与辉钼矿可浮性的影响[J]. 金属矿山, 2020(2): 24–28.  
PENG Ying, LI Yu-biao, WANG Hong-duo, et al. Effect of ultrasonic wave on the floatability of chalcopyrite and molybdenite[J]. Metal Mine, 2020(2): 24–28.

- [40] 印万忠, 孙传尧. 硅酸盐矿物浮选原理的研究进展[C]//《矿业快报》编辑部. 第四届全国矿山采选技术进展报告会论文集. 马鞍山: 矿业快报, 2001: 127–132.  
YIN Wan-zhong, SUN Chuan-yao. Research progress on flotation principle of silicate minerals[C]// The Editorial Department of Mining Express. Proceedings of the fourth national mining and dressing technology progress report. Ma'anshan: Mining Express, 2001: 127–132.
- [41] WANG Yu-hua, ZHU Guang-li, ZHANG Lei, et al. Surface dissolution of spodumene and its role in the flotation concentration of a spodumene ore[J]. Minerals Engineering, 2018, 125: 120–125.
- [42] 郑海涛, 王毓华, 赵悦豪, 等. NaOH 和机械搅拌对锂辉石表面及浮选行为的影响[J]. 有色金属工程, 2019, 9(6): 61–68.  
ZHENG Hai-tao, WANG Yu-hua, ZHAO Yue-hao, et al. Influence of NaOH and mechanical agitation on the surface and flotation behaviour of spodumene[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(6): 61–68.
- [43] SHU Kai-qian, XU Long-hua, WU Hou-qin, et al. Effects of ultrasonic pre-treatment on the flotation of ilmenite and collector adsorption[J]. Minerals Engineering, 2019, 137: 124–132.
- [44] FANG Shuai, XU Long-hua, WU Hou-qin, et al. Influence of surface dissolution on sodium oleate adsorption on ilmenite and its gangue minerals by ultrasonic treatment[J]. Applied Surface Science, 2020, 500: 144038.
- [45] SHU Kai-qian, XU Long-hua, WU Hou-qin, et al. Influence of ultrasound pre-treatment on ilmenite surface chemical properties and collectors' adsorption behaviour[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 57: 98–107.
- [46] 徐龙华, 方帅, 巫侯琴. 氧化矿表面改性调控浮选分离的研究综述[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2020, 37(2): 1–6.  
XU Long-hua, FANG Shuai, WU Hou-qin. Flotation separation on oxidized ores by surface modification and regulation: A review[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences) 2020, 37(2): 1–6.
- [47] KANG Wen-ze, XUN Hai-xin, CHEN Jun-tao. Study of enhanced fine coal de-sulphurization and de-ashing by ultrasonic flotation[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 17(3): 358–362.
- [48] 康文泽, 丁淑芳, 胡军. 超声波对煤泥浮选的影响[J]. 黑龙江科技学院学报, 2010, 20(3): 183–188.  
KANG Wen-ze, DING Shu-fang, HU Jun. Effect of ultrasonic treatment on slime flotation[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2010, 20(3): 183–188.
- [49] 曾维晨. 炼焦煤微波与超声波联合脱硫研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015: 81–82.  
ZENG Wei-chen. Research on coking coal desulfurization by microwave combined with ultrasonic[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015: 81–82.
- [50] AMBEDKAR B, NAGARAJAN R, JAYANTI S. Ultrasonic coal-wash for de-sulfurization[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(3): 718–726.
- [51] 陈东, 梁殿印, 韩登峰, 等. 超声波对常用浮选药剂分散乳化效果研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2011(3): 50–53.  
CHEN Dong, LIANG Dian-yin, HAN Deng-feng, et al. Effect of ultrasonic treatment on the emulsion dispersion of common flotation reagent[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2011(3): 50–53.
- [52] 李海兰, 王凡, 王录峰. 超声波辅助粉煤灰浮选脱碳[J]. 清洁煤技术, 2018, 24(4): 46–49.  
LI Hai-lan, WANG Fan, WANG Lu-fang. Ultrasonic-aided flotation decarbonization of fly ash[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(4): 46–49.
- [53] 何双杰. 超声乳化与化学改性协同作用对起泡剂性能的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2015: 35–49.  
HE Shuang-jie. Effect of the foaming agents properties by the combination of ultrasonic emulsification and chemical modification[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015: 35–49.
- [54] 牛福生, 张晋霞, 赵亚伟, 等. 一种超声预处理煤泥浮选药剂的制备方法及使用设备: 中国, CN109482368A[P]. 2019–03–19.  
NIU Fu-sheng, ZHANG Jin-xia, ZHAO Ya-wei, et al. The invention relates to a preparation method and a using device of an ultrasonic pretreatment coal slime flotation reagent: China, CN109482368A[P]. 2019–03–19.
- [55] 尹德夺. 浮选药剂超声波乳化器: 中国, CN208494042U[P]. 2019–02–15.  
YIN De-duo. Floatation reagent ultrasonic emulsifier: China, CN109482368U[P]. 2019–03–19.
- [56] 黄哲誉. 超声波对捕收剂溶液性质及其与白钨矿、萤石、方解石表面吸附的影响[D]. 赣州: 江西理工大学, 2019: 19–60.  
HUANG Zhe-yu. Effect of ultrasonic on the properties of collector solution and it's adsorption on the surface of scheelite, fluorite and calcite[D]. Ganzhou: Jiangxi

- University of Science and Technology, 2019: 19–60.
- [57] 薛娟琴, 吴川眉. 超声波对溶液性质的影响[J]. 金属世界, 2008(1): 25–28.
- XUE Juan-qin, WU Chuan-mei. Influence of ultrasonic wave on the properties of several solution[J]. Metal World, 2008(1): 25–28.
- [58] 胡松青, 李琳, 郭祀远, 等. 功率超声对溶液性质的影响[J]. 应用声学, 2003, 22(1): 26–30.
- HU Song-qing, LI Lin, GUO Si-yuan, et al. Effect of powerful ultrasound on some properties of several solution[J]. Applied Acoustics, 2003, 22(1): 26–30.
- [59] 唐超. 超声预处理对煤泥浮选过程的强化作用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014: 42–56.
- TANG Chao. Research on ultrasonic pretreatment enhancing the flotation process of coal slime[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014: 42–56.
- [60] MIETTINEN T, RALSTON J, FORNASIERO D. The limits of fine particle flotation[J]. Minerals Engineering, 2010, 23(5): 420–437.
- [61] MAO Yu-qiang, CHEN Yu-ran, BU Xiang-ning, et al. Effects of 20 kHz ultrasound on coal flotation: The roles of cavitation and acoustic radiation force[J]. Fuel, 2019, 256: 115938.
- [62] 代敬龙, 谢广元, 刘姗姗, 等. 浮选气泡尺寸影响因素分析[J]. 选煤技术, 2007(5): 7–10.
- DAI Jing-long, XIE Guang-yuan, LIU Shan-shan, et al. Analysis of influencing factors of flotation bubble size[J]. Coal Preparation Technology, 2007(5): 7–10.
- [63] BROTHCIE A, GRIESER F, ASHOKKUMAR M. Effect of power and frequency on bubble-size distributions in acoustic cavitation[J]. Physical Review Letters, 2009, 102(8): 84302.
- [64] PENG Yao-li, MAO Yu-qiang, XIA Wen-cheng, et al. Ultrasonic flotation cleaning of high-ash lignite and its mechanism[J]. Fuel, 2018, 220: 558–566.
- [65] MURAMATSU H, YANAI S, MIZUSHIMA Y, et al. A novel particle separation technique using 20-kHz-order ultrasound irradiation in water[J]. Journal of Physics (Conference Series), 2015(656): 012117.
- [66] CHEN Yu-ran, XIE Guang-yuan, CHANG Jing, et al. A study of coal aggregation by standing-wave ultrasound[J]. Fuel, 2019, 248: 38–46.
- [67] OZKAN S G. Further investigations on simultaneous ultrasonic coal flotation[J]. Minerals, 2017, 7(10): 177.
- [68] GOLE V L, GOGATE P R. A review on intensification of synthesis of biodiesel from sustainable feed stock using sonochemical reactors[J]. Chemical Engineering and Processing, 2012, 53: 1–9.
- [69] 赵江. 一种微纳米气泡水超声波振动洗矿机: 中国, CN205496166U[P]. 2016–08–24.
- ZHAO Jiang. A micro nanometre bubble water ultrasonic vibration washing machine: China, CN205496166U[P]. 2016–08–24.
- [70] 曾兴民, 梁中堂. 一种超声浮选方法及其装置和用途: 中国, CN101844111A[P]. 2010–09–29.
- ZENG Xing-min, Liang Zhong-tang. The invention relates to a method of ultrasonic flotation and its device and application: China, CN101844111A[P]. 2010–09–29.
- [71] 陈占金, 郑洁, 栾玲. 带有超声波发生器的矿浆搅拌槽: 中国, CN102921527A[P]. 2013–02–13.
- CHEN Zhan-jin, ZHENG Jie, LUAN Ling. Pulp mixing tank with ultrasonic generator: China, CN102921527A[P]. 2013–02–13.
- [72] YASUI K, TUZIUTI T, IIDA Y. Dependence of the characteristics of bubbles on types of sonochemical reactors[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2005, 12(1): 43–51.
- [73] 姚卫东, 李军, 金央, 等. 超声波用于磷矿选矿的研究[J]. 非金属矿, 2013, 36(5): 50–52.
- YAO Wei-dong, LI Jun, JIN Yang, et al. Research for ultrasound used to phosphate beneficiation[J]. Non-Metallic Mines, 2013, 36(5): 50–52.
- [74] WANG Wei-dong, LIU Ding-hua, TU Ya-nan, et al. Enrichment of residual carbon in entrained-flow gasification coal fine slag by ultrasonic flotation[J]. Fuel, 2020, 278: 118195.
- [75] 王凡, 赵志军. 超声波强化浮选柱初探[J]. 煤炭加工与综合利用, 1998(6): 17–19.
- WANG Fan, ZHAO Zhi-jun. Preliminary study on ultrasonic enhanced flotation column[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 1998(6): 17–19.
- [76] 沈政昌, 卢世杰, 史帅星, 等. 一种矿物浮选柱: CN101642732[P]. 2010–02–10.
- SHEN Zheng-chang, LU Shi-jie, SHI Shuai-xing, et al. A mineral flotation column. China, CN101642732[P]. 2010–02–10.
- [77] 李晨, 王永恒, 丁梓洋, 等. 旋流-静态微泡浮选柱超声强化管流段矿化装置: CN205868558U[P]. 2017–01–11.
- LI Chen, WANG Yong-heng, DING Zi-yang, et al. Ultrasonic enhanced mineralizing device for tubular flow section of cyclonic static microbubble flotation column. China, CN205868558U[P]. 2017–01–11.

- [78] 韩登峰, 陈东, 张建一. 超声波在浮选技术中的应用与发展[C]// 北京金属学会中国金属学会中国有色金属学会. 北京金属学会第五届冶金年会论文集. 北京: 矿业工程, 2008: 161–165.  
 HAN Deng-feng, CHEN Dong, ZHANG Jian-yi, Application and development of ultrasonic wave in flotation technology[C]// Beijing Metal Society China Metal Society China Nonferrous Metals Society. Beijing: Mineral Engineering, 2008: 161–165.
- [79] 任佳. 超声波技术优化浮选柱浮选特性试验[C]// 中国冶金矿山企业协会技术委员会. 第六届中国矿业科技文汇. 成都: 中国冶金矿山企业协会技术委员会, 2015: 165–168, 178.  
 REN Jia. Optimization of flotation characteristics of flotation column by ultrasonic technology[C]// Technical Committee of China Association of Metallurgical and Mining Enterprises. The 6th China Mining Science and Technology Collection. Chengdu: Association of Metallurgical and Mining Enterprises, 2015: 165–168, 178.

## Research and application of ultrasonic technology in mineral flotation and development trend

CHEN Lan-lan<sup>1,2</sup>, LU Dong-fang<sup>1,2</sup>, WANG Yu-hua<sup>1,2</sup>, CHENG Zhi-yong<sup>1,2</sup>

(1. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China;  
 2. Key Laboratory of Hunan Province for Clean and Efficient Utilization of Strategic Calcium-containing Mineral Resources, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The wide application of ultrasonic technology is based on two characteristics of ultrasonic, one is ultrasonic as an information carrier, the other is ultrasonic as a form of energy. The application of ultrasonic in mineral flotation summarized in this paper is based on the fact that ultrasonic is a kind of energy form, it (or the ultrasonic cavitation produced by it) interacts with the acoustic medium to produce an effect on mineral flotation. This work is based on the principle of ultrasonic applied to mineral flotation, and summarizes the effect and application status of ultrasonic on minerals, flotation reagents and pulp, also summarizes the ultrasonic equipment used in flotation, and finally puts forward the development prospect of ultrasonic application in flotation. The results show that the ultrasonic effect has different effects on flotation. Different ultrasonic parameters and different treatment methods can be set to regulate the flotation behavior and improve the flotation index, so as to achieve the purpose we need.

**Key words:** ultrasonic; flotation; mineral; reagent; pulp

**Foundation item:** Project(2020P4FZG03A) supported by the State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, China; Project(51974366) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2020zzts740) supported by the Independent Exploration and Innovation of Graduate Students in Central South University, China; Project(2018TP1002) supported by the Key Laboratory of Hunan Province for Clean and Efficient Utilization of Strategic Calcium-containing Mineral Resources, China

**Received date:** 2020-07-06; **Accepted date:** 2021-03-11

**Corresponding author:** LU Dong-fang; Tel: +86-15399906602; E-mail: 82559428@qq.com

(编辑 王超)