不同粉碎机理的钢渣中 RO 相解离性能

侯新凯,张锦,武志江,黄瑞涛,王丹,郭海涛

(西安建筑科技大学材料与矿资学院,陕西西安710055)

摘 要:为寻求钢渣中 RO 相解离的最佳粉碎机制,选取高压辊磨机(辊压机)、立式辊磨机(立磨)和球磨机 制备的4种粒度分布钢渣粉,每种钢渣粉机械筛分为7个粒级并制成光片。人工统计 RO 相在5 种解离类 中分布率、相表面参数,以单体解离度和解离>75%的含量,2个指标表征解离性能;以相比界面面积和自由 表面率,2个参数表征脱离解离量。4 种钢渣粉中脱离解离量都高,RO 相属于易解离矿物。粉碎设备脱离解 离量高低次序为辊压机、立磨、球磨,同一设备粉磨细度越高,脱离解离量越大。RO 相粒级解离度以嵌布粒 度为界分为解离度平稳区和下降区,平稳区解离度稳定在高值且与设备无关;下降区挤压粉碎设备解离度 高,粒级解离度随粒度增大降低幅度较大。

关键词:钢渣;RO相;脱离解离;相比界面面积;挤压床粉碎

中图分类号:X757 文献标识码:A 文章编号:1001-0076(2018)05-0115-06

DOI:10.13779/j. cnki. issn1001 - 0076.2018.05.015

Comparison of Different Breakage Mechanisms in Terms of RO Phase Liberation Properties in Steel Slag

HOU Xinkai, ZHANG Jin, WU Zhijiang, HUANG Ruitao, WANG Dan, GUO Haitao (College of Materials and Mineral Resources, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to find the best breakage mechanism of RO phase liberation in steel slag, four kinds of steel slag powder with different particle size distribution have been comminuted respectively by high – pressure grinding rolls (roller press), vertical roller mill (vertical mill) and ball mill. Each of them was actually sieved into 7 size fractions then made into polished section. The proportion of RO phase grain in the five liberation classes and the phase surface parameters were manually counted. The liberation properties were characterized by the two index parameters of liberation degree and the amount of $75\% \sim 100\%$ liberated, while the amount of liberation by detachment was described by phase specific interfacial area and free surface percentage. As the RO phase in steel slag is easy to be released from the rock matrix, the amount of liberation by detachment of four steel slag powders is large. The priority sequence of comminution equipment in terms of the amount of liberation by detachment is roller press, vertical mill, ball mill. The finer the steel slag powder made by the same equipment, the better the amount of liberation by detachment. Liberated minerals could be divided into two regions by the average dissemination size of RO phase. The first region is a stability zone for liberation properties, in which the degree of liberation is independent of particle size and device. The second region is a decline zone, in which the liberation degree significantly decreases with increasing the particle size.

Key words: steel slag; RO phase; liberation by detachment; phase specific interfacial area; compressed bed breakage

^{*} 收稿日期:2018-04-11

基金项目:陕西省自然科学基础研究计划项目(2016JM5010);山西省科技创新项目(2013101038) 作者简介:候新凯(1966-),男,山西永济人,博士,教授,硕士生导师,E-mail:houxinkail@126.com。

引 言

分选出钢渣粉中水化惰性矿物-RO相,能显 著地提高钢渣粉的水化活性^[1],将钢渣粉磨使 RO 相从围岩中解离是分选的必要条件之一。粉磨通常 占矿物加工能耗的30%~50%^[2],有选择性地沿着 矿物相晶粒间粉碎是理想的粉碎方式,这样不仅减 小粉磨物料的粉碎比、降低能耗,而且减少了难选的 细颗粒。不同粉碎方法物料应力状态和矿物解离效 果有重大差别,常用的基本粉碎方法有冲击法、挤压 法、磨剥法、劈裂法,实际粉磨设备是几种粉碎方法 的联合粉碎,以设备的主导粉碎方式分为冲击粉碎 与挤压粉碎。冲击粉碎设备有球磨机、棒磨机、锤式 磨机,物料粉碎时受到急剧猝发的撞击后,直接断裂 无残余应力,因此物料中不会由弛豫作用产生新的 裂纹^[3]。挤压粉碎设备有活塞冲模压力机、高压辊 磨机(辊压机)、立式辊磨机(立磨),该粉碎方式属 于料层粉碎或层压粉碎,高应力状态下颗粒之间应 力传递,使各颗粒之间出现强烈的交互作用力,直至 颗粒破碎、产生裂纹^[4],显微分析也证实辊压机粉 磨产品内部裂纹数量多、分布广,存在许多晶内微裂 纹和晶界微裂纹^[5]。

关于挤压粉磨设备的促进矿物解离作用,按产 生的效果将报道文献分为两类:一类是确认挤压粉 碎有强化矿物解离作用。Celik^[6]测得辊压机使水 泥熟料矿物沿晶界破碎,提高了硅酸盐矿物的解离 度,与球磨机熟料粉中硅酸三钙相比, 38~45 μm 粒级解离度提高了 12%, 20~32 μm 粒级解离度提 高了10%。Hosten^[7]用活塞冲模压力机(压强30、 60 MPa)、棒磨机分别粉磨铬铁矿矿石,挤压粉碎产 品5个粒级铬铁矿单体解离度明显高于棒磨,粒级 越大、压强越高,差异越明显。另一类认为挤压粉碎 并没有选择性解离作用。Vizcarra^[8]用活塞冲模压 力机和锤式磨机分别试验两种矿样:低品位磁铁矿 (伴生黄铜矿)、高品位闪锌矿,结果表明有用矿物 和脉石矿物的粒级解离特征与粉碎方式及产品粒度 分布都无关。这意味着挤压粉碎设备,并没有明显 地改善粉碎产品中矿物的解离度。总之,挤压粉碎 强化矿物解离作用,对不同物料产生的效果不同。 钢渣中 RO 相分选是近几年提高钢渣活性的新技 术^[1],关于钢渣中 RO 相粉磨解离特征未见文献报 道,而设计钢渣粉磨工程时,选取粉磨设备、设定钢 渣粉粒度以及粒度分布等,都需要 RO 相解离特征 的资料。

论文选取辊压机、立磨、球磨制备的4种粒度分 布钢渣粉,每种钢渣粉机械筛分为7个粒级。采用 矿物显微图像测定法(反光显微镜)测定各粒级 RO 相矿物解离度和相表面参数,作为粉磨设备、钢渣粉 粒度和粒度分布的函数,以揭示他们与 RO 相解离 特征间的关系。

1 试验

1.1 钢渣粉制备

太钢碳钢转炉钢渣,经过热闷处理除铁后的尾 渣,其化学成分见表1。3种粉磨设备制成4种粒度 的钢渣粉:(1)辊压机钢渣粉,钢渣尾渣破碎至-20 mm,用 HFCG150-100型辊压机闭路粉磨,经O-Sepa 选粉机分选细粉为辊压机钢渣粉(G);(2)球磨 钢渣粉,辊压机钢渣粉 G 再经3.2 m×13 m 三仓开路 球磨机粉磨得到粗(Q₁)、细(Q₂)球磨钢渣粉;(3)立 磨钢渣粉,钢渣尾渣破碎至-3 mm,用 LGM /LGMS 实验室小型立磨,闭路粉磨得到立磨钢渣粉(L)。

| | | 表 1 | 表 1 钢渣的化学成分 | | | | | |
|----|---------|---------|-----------------------------|------------|------------|------|--|--|
| | Table 1 | Chemic | al compos | sitions of | steel slag | | | |
| 成分 | CaO | SiO_2 | $\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$ | FeO | Al_2O_3 | MgO | | |
| 含量 | 40.93 | 13.87 | 11.16 | 13.29 | 4.29 | 9.40 | | |
| 成分 | MnO | LOI | P_2O_5 | Total | f – CaO | _ | | |
| 含量 | 1.06 | 2.57 | 1.30 | 97.87 | 2.79 | _ | | |

图 1 为 Malvern Mastersizer 2000 激光粒度分析 仪,测得 4 种钢渣粉粒度分布函数 *F*。RRB 方程表 达式为:

$$R(d) = 100 \, \exp[-(d/d_{\rm e})^n] \tag{1}$$

(1)式中*R*(*d*)为累计筛余百分数,*d_e*为特征粒径,*d*为粒度,*n*为均匀性系数。G,L,Q₁,Q₂的*d_e*分别为39.0、29.0、38.5、23.5 μm, *n* 值分别为1.13、1.08、1.11、0.97。



图14种树直初的程度分节曲线 Fig. 1 Particle size distribution curves of the 4 steel slag powders

1.2 光片的制备

(1)分级上述4种钢渣粉于105℃烘干后,筛 分成-18、18~25、25~38、38~45、45~55、55~65、+65 µm7个粒级。前2个粒级用无水乙醇湿法筛分,超 声波为振动源;后5个粒级用干法机械振动筛分。

(2)制片参照标准 C1356-07^[9]制备光片。环 氧树脂与三乙醇胺混溶,加入粉体中混匀固化,经切 割、粗磨、细磨、粗抛、细抛5 道工序制成光片。

1.3 解离度测试方法与仪器

(1)方法 MLA 矿物标准库中缺乏 RO 相的数据,需采用光学显微镜显微分析,人工识别、分类和统计二维图像中矿物相。

-25 μm 粒级放大倍数 200 ×,其他粒级放大 倍数 100 ×,观察统计过程采用步进法逐个视域分 析。单偏光显微镜下钢渣中 RO 相的图像如图 2 所 示,RO 相呈白色。含 RO 相颗粒按其中 RO 相含量 分为五个解离类:0 ~ 1/4、1/4 ~ 2/4、2/4 ~ 3/4、 3/4~4/4、4/4(单体),分别标注为A、B、C、D、E 类。 每个试样统计含 RO 相颗粒 900~1 600 个。



图 2 RO 相的单偏光显微镜下形貌 Fig. 2 The morphology of RO phase under polarized light microscope

(2) 仪器 奥林巴斯全自动金相显微镜(BX61) 观察并采集图像,用 OLYCIA m3 金相图像系统软件 辅助统计。

2 结果与讨论

2.1 RO 相的解离度

将钢渣粉筛分为7个粒级,每个粒级物料质量 与试样总量之比为该粒级产率。图像分析中采用颗 粒的 Martin 径表征粒度,用仪器配置的 OLYCIA m3 软件能给出指定两点的距离,也能给出矿物相边界 线的长度和面积。在整个含 RO 相颗粒体系中,需 计算五个解离类的含量,以0~1/4 解离类为例,含量计算式如下:

$$L_{A} = \frac{1/8 \sum A_{i}}{1/8 \sum A_{i} + 3/8 \sum B_{i} + 5/8 \sum C_{i} + 7/8 \sum D_{i} + 8/8 \sum E_{i}}$$
(2)

(2)式中 L_A 是A解离类的比率; A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i 、 E_i 分别是A、B、C、D、E解离类中第i个颗粒的粒径。同理可计算其他4类的比率。每个试样7个粒级的产率、颗粒统计数以及所计算的RO相在各解离类中分布率都列在表2。

图 3 显示 4 种钢渣粉 RO 相矿物解离度的粒级 分布特征。



(a)是 RO 相单体解离度;(b)是 RO 相解离 >75% 的含量
 图 3 RO 相矿物解离度的粒级分布特征
 Fig. 3 Grain size distribution characteristics of liberated

RO phase minerals

RO 相解离 > 75% 的含量就是 L_E 与 L_D 之和,表示为 L_{ED} 。矿物解离 > 95% 的颗粒也很容易在下游浮选工序中回收^[10,11],气力分选钢渣中 RO 相时,颗粒矿物解离 > 75% 的钢渣粉回收效果也较好,故作为表征 RO 相解离特征的另一个指标。

图 3(a)中 RO 相单体解离度的粒级分布特征, 以 45 µm 为分界径划分为解离度平稳区和下降区, 在平稳区单体解离度随粒级变化很小并保持高数 值,在下降区单体解离度随粒级增大降幅较大。钢 渣中 RO 相的平均嵌布粒度也是 45 µm^[12], RO 相 嵌布粒度与单体解离度分界径重合。在平稳区各试

| Table 2 | The distribution | of steel slag size | fraction and | measured | particle | numbers and | l proportion | of RO | phase in | liberation | classes |
|---------|------------------|--------------------|--------------|----------|----------|-------------|--------------|-------|----------|------------|---------|
|---------|------------------|--------------------|--------------|----------|----------|-------------|--------------|-------|----------|------------|---------|

| 4百日 | 收六 477 / | 产率/% | | RO 相在解离类中分布率/% | | | | | |
|-------|--------------|------|-------------|----------------|----------|----------|----------|------|--|
| 细石 | 型级/μm | | 犯り 奴 | <1/4 | 1/4 ~2/4 | 2/4 ~3/4 | 3/4 ~4/4 | 4/4 | |
| G | | 39.4 | 907 | 1.7 | 2.4 | 3.8 | 7.0 | 85.1 | |
| L | - 18 | 50.6 | 1 223 | 1.7 | 1.5 | 1.7 | 9.3 | 85.8 | |
| Q_1 | - 10 | 42.9 | 1 360 | 1.7 | 1.8 | 2.5 | 8.0 | 86.0 | |
| Q_2 | | 57.6 | 1 458 | 0.8 | 1.1 | 1.8 | 9.9 | 86.4 | |
| G | | 4.9 | 1 161 | 1.8 | 2.7 | 4.4 | 8.6 | 82.5 | |
| L | 18 25 | 6.1 | 926 | 2.1 | 1.5 | 2.9 | 9.9 | 83.7 | |
| Q_1 | 18 ~ 25 | 9.4 | 828 | 2.2 | 2.8 | 2.6 | 10.1 | 82.3 | |
| Q_2 | | 5.0 | 1 325 | 1.3 | 1.4 | 2.4 | 11.4 | 83.4 | |
| G | | 13.9 | 1 131 | 2.4 | 2.1 | 4.5 | 10.5 | 80.5 | |
| L | 25~38 | 11.8 | 1 248 | 2.4 | 1.9 | 3.9 | 12.1 | 79.6 | |
| Q_1 | 25 ~ 58 | 7.9 | 1 244 | 2.3 | 2.8 | 2.4 | 10.5 | 81.9 | |
| Q_2 | | 12.9 | 1 468 | 1.8 | 2.2 | 2.3 | 11.6 | 82.1 | |
| G | | 10.8 | 1 184 | 3.1 | 2.3 | 4.4 | 14.0 | 76.2 | |
| L | $38 \sim 45$ | 9.5 | 1 315 | 4.0 | 4.5 | 4.3 | 8.8 | 78.4 | |
| Q_1 | 50 - 45 | 12.7 | 1 613 | 2.7 | 3.0 | 7.3 | 8.0 | 79.0 | |
| Q_2 | | 11.2 | 1 433 | 2.0 | 2.8 | 3.5 | 11.2 | 80.5 | |
| G | | 9.3 | 1 573 | 5.6 | 4.7 | 6.2 | 16.5 | 67.0 | |
| L | 45~55 | 6.1 | 1 534 | 5.0 | 5.9 | 8.7 | 15.4 | 65.1 | |
| Q_1 | 15 55 | 11.1 | 1 337 | 5.0 | 9.2 | 9.2 | 19.1 | 57.5 | |
| Q2 | | 7.0 | 1 546 | 7.7 | 6.2 | 7.2 | 16.0 | 62.9 | |
| G | | 8.1 | 1 632 | 8.7 | 7.8 | 10.0 | 18.8 | 54.7 | |
| L | 55~65 | 7.2 | 1 320 | 8.2 | 6.8 | 13.5 | 21.3 | 50.2 | |
| Q_1 | 55 65 | 8.9 | 1 057 | 11.6 | 15.6 | 19.9 | 31.2 | 21.6 | |
| Q2 | | 5.1 | 1 389 | 14.5 | 10.6 | 9.9 | 19.2 | 45.7 | |
| G | | 13.6 | 1 024 | 15.5 | 11.4 | 11.0 | 16.5 | 45.6 | |
| L | + 65 | 8.6 | 1 011 | 12.8 | 12.9 | 13.0 | 18.8 | 42.5 | |
| Q_1 | | 7.1 | 978 | 17.5 | 19.6 | 16.7 | 27.3 | 18.8 | |
| Q2 | | 1.2 | 1 138 | 16.0 | 13.3 | 11.4 | 20.6 | 38.7 | |

样的粒级单体解离度基本相同且稳定在 75% ~ 85%,最大偏差 <4.5%;同一试样粒级从 18~45 μm 粒级单体解离度降低不大,一般变化范围 6% ~ 9%。总之,在平稳区 RO 相粒级单体解离度,与粉 磨方式无关且随粒度变化不大。

在下降区各试样的粒级单体解离度出现差异, 随着粒度增大差异越来越大,在粗粒级如 55~65 μm 粒级,G 的单体解离度比 Q₁ 的高出 33.1%。由 图 3(a)对比分析粉碎方式的单体解离度,G 和 L 各 点位置均高于 Q₁ 和 Q₂,G 点位置高于 L,粉碎方式 的矿物解离效果高低次序是:挤压粉碎 > 冲击粉碎; 辊压机 > 立磨 > 球磨。对比同一粉磨方式下物料细 度因素的作用,在下降区 Q₂ 各点位置均高于 Q₁,他 们之间距离随粒级增大而加大,例如在 55~65 μm 粒级 Q₂ 比 Q₁ 高 24.1%。Q₂ 和 Q₁ 的 d_e 值分别为 23.5 μm 和 38.5 μm,粉体粒度越细,其粒级单体解 离度越高。分析粉磨方式与 RO 相单体粒度的关 系,G、L,Q₂,Q₁ 的 +65 μm 粒级中 RO 相单体平均粒 度分别为 76.5、74.8、72.1、69.4 μm。单体粒度越大 越易分选,单体粒度和解离度表征的结果一致,粉体 物料中 RO 相解离效果高低次序为 G、L、Q₂、Q₁。

图 3(b)RO 相解离 >75% 的含量与单体解离度 的粒级分布特征相似,同样以 45 μm 为分界径划分 为解离度平稳区、解离度下降区。在平稳区 RO 相 解离 >75% 的含量比单体解离度数值高出约 10%, 同一试样随粒级增大数值变化不大,但各试样之间 数值却有明显的差异。例如 G 和 Q₁ 一直处于 Q₂ 的下方,他们的 d_e 值分别为 39.0、38.5、23.5 μm, 物料粒度越细,平稳区 RO 相解离 >75% 的含量越 大。下降区 RO 相解离 >75% 的含量比单体解离度 数值高出 15% 以上,图中同粒级试样位置高低次序 仍为 G、L、Q₂、Q₁,粉磨方式、细度对 RO 相解离 > 75% 的含量作用,与单体解离度表征结果相同。

2.2 RO 相的相比表面参数

高登将粉碎使矿物解离的机理分为粉碎解离和

脱离解离两种。粉碎解离意味着随机粉碎颗粒成碎 片,连生体颗粒数量比例减少、单体形式的颗粒量提 高。脱离解离则指粉碎时使物料的碎裂沿着不同矿 物组分的界面发生,从而使不同固相相互脱离而解 离,是一种理想的解离方式。实际粉碎过程往往两 种机理同时存在,各自所占的比例因矿石性质、矿物 种类和粉磨方式等因素而异。通常以有用组分的两 个表面参数,间接反映粉碎过程中两种解离方式的 相对比例。一个是相比界面面积(Phase specific interfacial area),简称为 *PSIA*^[13],另一个是自由表面 率(Free surface percentage),简称为 *FS*。

PSIA 是指目标矿物单位体积与其他组分矿物 相接触的面积。如果在粉碎过程仅发生粉碎解离, 粉体粒度减小而 PSIA 却是常数,即相界面守恒,这 是随机解离分析建模的基本假设条件之一^[14,15]。 粒度相同的粉体 PSIA 值越小,粉碎过程中脱离解离 量越大,矿物解离效果越好。FS 是目标矿物自由表 面占矿物相总表面(自由表面 + 界面表面)的百分 率,粒度相同粉体的 FS 值越大脱离解离量越多,解 离效果越好。分析矿物界面特征时,若用单个颗粒 的测定结果表征则存在偏差,需要统计大量的代表 性颗粒群数据进行分析。以二维方法研究矿物解离 特征时,体积用面积表示,面积用线表示。测定 RO 相的相面积、界面长度和自由面长度,汇总于表3。

表 3 中界面总长度除以相总面积得到 PSIA 值, 4 种试样各粒级的 PSIA 值如图 4 所示。





由图 4 可知,4 种试样粉碎过程中随粒度减小, PSIA 值逐渐降低,即粉碎过程中存在 PSIA 值损失, 表明不论用哪种方式粉磨钢渣,都存在 RO 相的脱 离解离。从 +65 μm 粒级到 - 18 μm 粒级,4 种试 样的 PSIA 值都减小了一半以上,由于 PSIA 值减量 越大脱离解离量越大,说明钢渣中 RO 相属于易解 离的矿物。矿物解离的难易性涉及该矿物与围岩间 的粘结力、矿物嵌布粒度、界面形态等诸多因素^[16]。

表 3 RO 相的相面积、界面长度和自由面长度

| able 3 | Phase | area, | inter | facial | bound | lary | and | free |
|--------|-------|-------|-------|--------|-------|------|-----|------|
| | c | 1 | 1 | C D | 0 1 | | | |

| | | Sunace Dounda | ry of ito phase | |
|-------|---------|--------------------|-----------------|---------|
| 编号 | 粒级/μm | 面积/μm ² | 界面长/μm | 自由面长/μm |
| G | | 17 550 | 383 | 5 677 |
| L | - 18 | 7 927 | 262 | 4 566 |
| Q_1 | 10 | 15 712 | 926 | 5 296 |
| Q_2 | | 22 259 | 967 | 6 395 |
| G | | 45 879 | 1 460 | 9 398 |
| L | 18~25 | 16 866 | 587 | 5 318 |
| Q_1 | 10 25 | 15 100 | 1 022 | 4 567 |
| Q_2 | | 74 493 | 3 630 | 20 632 |
| G | | 48 275 | 1 783 | 8 557 |
| L | 25~38 | 42 144 | 1 761 | 10 211 |
| Q_1 | 25 50 | 44 513 | 4 517 | 7 875 |
| Q_2 | | 26 390 | 2 242 | 6 775 |
| G | | 67 425 | 2 665 | 8 595 |
| L | 38~45 | 108 402 | 5 107 | 10 657 |
| Q_1 | 50 45 | 57 517 | 7 026 | 7 408 |
| Q_2 | | 31 963 | 3 033 | 5 910 |
| G | | 83 961 | 6 289 | 8 204 |
| L | 45 ~ 55 | 89 324 | 7 205 | 8 152 |
| Q_1 | 15 55 | 59 920 | 7 596 | 5 548 |
| Q_2 | | 114 459 | 11 764 | 11 024 |
| G | | 97 345 | 8 493 | 8 597 |
| L | 55~65 | 83 369 | 8 208 | 7 098 |
| Q_1 | 55 65 | 61798 | 7 999 | 5 161 |
| Q_2 | | 69 641 | 7 454 | 5 689 |
| G | | 130 978 | 12 370 | 10 506 |
| L | +65 | 209 730 | 22 327 | 14 962 |
| Q_1 | 1.00 | 88 898 | 11 659 | 3 696 |
| Q_2 | | 170 149 | 19 222 | 10 955 |

如图 4 所示,4 种试样对应粒级的高低位置次 序为 $Q_1 > Q_2 > L > G$,位置越低脱离解离量越大,由 此证实挤压粉碎比冲击粉碎 RO 相解离效果好。G, Q_1 试样 d_e 值分别为 39.0、38.5 µm,粒度相近,他们 之间的距离远比 G 与 L 间距离大。这反映出不同 挤压粉碎设备之间的解离效果差异,远小于它与冲 击粉碎设备间的差异。G 与 L 两种挤压粉碎试样, 在 45 µm 附近 PSIA 值出现较大跳跃,即在 RO 相嵌 布粒度附近出现大量的脱离解离,此时以穿晶断裂 粉碎方式的比例较低。两种球磨物料 Q_1 和 Q_2 的 PSIA 值跳跃粒径在 25~38 µm 附近,比挤压粉碎的 跳跃粒径降低约 10 µm,即在低于嵌布粒度时发生 脱离解离,表明以穿晶断裂粉碎方式比例较大,使 PSIA 值跳跃径向小粒径偏移。 由表 3 中自由界面总长度除以相边界总长度得到 FS 值,4 种试样各粒级的 FS 值见图 5。



Fig. 5 Free surface percentage of RO phase

物料粉磨粒度减小过程中产生出新自由表面, FS 值逐渐增加,矿物解离度提高。相同粒度在界面 值相同条件下,FS 值越高矿物自由界面值越大,解 离效果越好。图5 中各试样点高低位置大致次序为 G>L>Q₂>Q₁,与解离度表征的结果一致。

物料粉碎过程中两种断裂方式对 FS 值增长效 果不同,穿晶断裂产生新自由表面分子值变大,但分 母中界面值并没有减小,FS 值增量小;晶间断裂产 生新自由面不仅使分子值变大,而且将分母中界面 值减小,FS 值增量大。将 FS 值跳跃量大的位置近 似地看作发生脱离解离粒级,G 与 L 试样在 45 μm 附近是发生脱离解离;Q₁ 和 Q₂ 在 45~25 μm 较宽 区域都发生脱离解离。由 FS 值跃变区间宽度看 出,挤压粉碎在嵌布粒度发生脱离解离形成单体颗 粒,继续粉磨穿晶断裂 FS 值缓慢增长;而冲击粉碎 的穿晶断裂量大,FS 值跃变量小跃变区间宽,形成 FS 值缓慢增长的曲线。由 FS 值的粒级分布图看出 挤压粉碎比冲击粉碎脱离解离量大。

3 结论

(1) 钢渣中 RO 相属于易解离矿物,3 种设备粉 磨钢渣时都发生了大量的脱离解离。他们产生脱离 解离量从高到低的次序为辊压机、立磨、球磨,挤压 粉碎设备之间的脱离解离量差别比冲击粉碎设备之 间的差别小。

(2)RO 相粒级单体解离度以嵌布粒度为分界 径,分为解离度平稳区和下降区。平稳区 RO 相单 体解离度稳定在75%~85%,随粒度增大变化小且 与粉磨方式基本无关。下降区 RO 相单体解离度随 粒度增大下降较大,粉磨方式间解离效果差异显著。

(3)RO 相解离 > 75% 的含量分布与单体解离 度类似,在平稳区量值高出约 10%,下降区高出 15%以上。同种粉磨设备,粉磨越细粒级解离度越 高,脱离解离量也越大。

参考文献:

- [1] 侯新凯,梁爽,刘柱燊,等. 钢渣生产高活性钢渣粉和惰性矿物产品的工艺:201611105595.2[P]. 2017-05-31.
- [2] Tromans D. Mineral comminution: energy efficiency considerations[J]. Minerals engineering, 2008, 21(8):613-620.
- [3] Lewis F M, Coburn J L, Bhappu R B. Comminution: a guide to size - reduction system design - 1 [J]. Mining engineering, 1976, 28(9):29-34.
- [4] Schönert K. A first survey of grinding with high compression roller mills [J]. International journal of mineral processing, 1988, 22(1):401-412.
- [5] Han Y X, Liu L, Yuan Z T, et al. Comparison of low grade hematite product characteristics in a high – pressure grinding roller and jaw crusher[J]. Minerals and metallurgical processing, 2012, 29(2):75 – 80.
- [6] Celik I B, Oner M. The influence of grinding mechanism on the liberation characteristics of clinker minerals [J]. Cement and concrete research, 2006, 36(3):422-427.
- [7] Hoşten Ç, Özbay C. A comparison of particle bed breakage and rod mill grinding with regard to mineral liberation and particle shape effects[J]. Minerals engineering, 1998, 11(9):871-874.
- [8] Vizcarra T G, Wightman E M, Johnson N W, et al. The effect of breakage mechanism on the mineral liberation properties of sulphide ores[J]. Minerals engineering, 2010, 23(5):374-382.
- [9] Stutzman P E. Microscopy of clinker and hydraulic cements
 [J]. Reviews in mineralogy and geochemistry, 2012, 74(1): 101 - 146.
- [10] Wang E, Shi F N, Manlapig E. Mineral liberation by high voltage pulses and conventional comminution with same specific energy levels[J]. Minerals engineering, 2012, 27 – 28:28 – 36.
- [11] 袁致涛,马玉新,毛卫东,等.马耳岭选矿厂尾矿中磁铁矿 再回收试验研究[J].矿产保护与利用,2014(2):44-48.
- [12] 侯新凯,贺宁,袁静舒,等. 钢渣中二价金属氧化物固溶体 的选别性研究[J]. 硅酸盐学报,2013,41(8):1142-1150.
- [13] Leißner T, Hoang D H, Rudolph M, et al. A mineral liberation study of grain boundary fracture based on measurements of the surface exposure after milling[J]. International journal of mineral processing, 2016, 156:3-13.
- [14] Meloy T P. Liberation theory eight, modern, usable theorems[J]. International journal of mineral processing, 1984, 13(4):313-324.
- [15] Barbery G. Mineral liberation: measurement, simulation and practical use in mineral processing [M]. Quebec: editions GB, 1991.

| 表 6 | | 试机 | 佯吸水 | 率测i | 试结果 | |
|-----|-----|-----|-----|-----|------|--|
| 1 | TV7 | . 1 | . • | | C .1 | |

| Table 6 | Water absorption rate of the samples | | | | | | |
|---------|--------------------------------------|-------|-------|--|--|--|--|
| 编号 | 干重/g | 湿重/g | 吸水率/% | | | | |
| 1 | 83.15 | 83.88 | 0.88 | | | | |
| 2 | 93.43 | 93.97 | 0.58 | | | | |
| 3 | 59.44 | 59.68 | 0.4 | | | | |
| 4 | 85.12 | 85.47 | 0.41 | | | | |

准,3 号和4 号试样吸水率达到瓷质砖标准。在生 产控制中,可通过测定陶瓷材料吸水率来预测陶瓷 产品的性能^[13]。

从表4~表6可以看出,3号陶瓷试样抗压强度、抗折强度最高,吸水率最低。试验的最佳配比为低品位铝质岩 60.86%、高岭土 28.68%、石英砂 2.46%、白云石 8%。

3 结论

(1)试验原料铝质岩的主要矿物组成为一水硬 铝石和高岭石,还有少量的锐钛矿;主要化学成分为 Al₂O₃、SiO₂,含量分别为40.6%、38.5%。

(2)通过试验得出较优配方为低品位铝质岩
60.86%、高岭土 28.68%、石英砂 2.46%、白云石
8%,在此基础上,陶瓷样品的抗折强度、抗压强度和
吸水率分别为 8.2 MPa、49.1 MPa 和 0.4%。

(3)对力学性能最好的3号试样 XRD 测试分析,试样主要矿物组成为镁铝尖晶石(MgAl₂O₄)、石英(SiO₂)、尖晶橄榄石(Mg₂SiO₄),三者比例分别为55%、25%、20%。扫描电镜配合能谱分析,镁铝尖晶石与尖晶橄榄石紧密结合,形成网状结构,网状结构中充填有莫来石、石英等矿物增加了陶瓷的力学强度。

参考文献:

- [1] 聂爱国,谢宏.峨眉山玄武岩浆与贵州高砷煤成因研究[J]. 煤田地质与勘探,2004,32(1):8-10.
- [2] 冯聪,薛亚洲.我国铝资源开发利用现状及综合利用对策建议[J].矿产保护与利用,2013(3):55-58.
- [3] 倪元,张杰.利用低品位铝质岩制备耐火砖的试验研究[J]. 现代矿业,2010(12):108-109.
- [4] 王建蕊,张杰,李琼琼,等. 铝质岩制备矿物聚合物材料的实验研究[J]. 硅酸盐通报,2014(9):2212-2216.
- [5] Teore,常亮.用于耐火材料的镁铝尖晶石[J].耐火与石灰, 1989,14(7):18-22.
- [6] 江副正信. 尖晶石的特性及在耐火材料中的应用[J]. 耐火 与石灰, 1991(10):21-26.
- [7] Sarkar R, Das S K, Banerjee G. Calcination effect on magnesium hydroxide and aluminium hydroxide for the development of magnesium aluminate spinel[J]. Ceramics international, 2000, 26(1):25-28.
- [8] Cunha Duncan F N, Bradt R C. Synthesis of magnesium aluminate spinels from bauxites and magnesias [J]. Journal of the American ceramic society, 2010, 85(12):2995-3003.
- [9] 李小明,杨志红. 自分散低温烧成镁铝尖晶石制品的研究 [J]. 陶瓷工程,1997,31(1):6-9.
- [10] 黄宏,黄朝晖,房明浩,等. LiCoO₂ 合成过程对镁铝尖晶石 陶瓷侵蚀的研究[J]. 硅酸盐通报,2011,30(3):515-518.
- [11] Sarkar R, Das S K, Banerjee G. Effect of additives on the densification of reaction sintered and presynthesised spinels [J]. Ceramics international, 2003, 29(1):55-59.
- [12] 徐晓虹,刘鑫坤,吴建锋,等. 原位合成镁铝尖晶石 堇青 石复相陶瓷的研究[J]. 武汉理工大学学报,2016,38(3): 15-22.
- [13] 钦征骑. 新型陶瓷材料手册[J]. 江苏陶瓷, 2005(3):45.
- [14]《陶瓷墙地砖生产》编写组.陶瓷墙地砖生产[M].北京:中国建筑工业出版社,1983.
- [15] 汪德宁,徐颖,徐东,等. 金属间化合物 FeAl 与α-Al₂O₃ 的 界面润湿行为及合金元素 Y 和 Nb 的作用[J]. 材料科学与 工艺,1996(1):5-9.

引用格式:石秀林,张杰,张玉松,等.利用低品位铝质岩制备镁铝尖晶石陶瓷[J].矿产保护与利用,2018(5):121-125.
 SHI Xiulin, ZHANG Jie, ZHANG Yusong, et al. Synthesis of magnesia spinel ceramics from low grade aluminite[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2018(5):121-125.

HOU Xinkai, ZHANG Jin, WU Zhijiang, et al. Comparison of different breakage mechanisms in terms of RO phase liberation properties in steel slag[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2018(5):115-120,125.

投稿网址:http://kcbh.cbpt.cnki.net

E - mail:kcbh@ chinajournal.net.cn