

基于矿石真实破裂数值模拟的层压粉碎适宜料层厚度研究

雷顺林, 李丽匣, 付坤, 刘栋杰, 潘一鸣, 张兴婕

东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819

中图分类号: TD921 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)03-0120-07
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.03.014

摘要 高压辊磨机以其独特的层压粉碎原理优势在金属矿山节能降耗中发挥着重要的作用, 由于矿石力学性质、均质性、给矿粒度的不同, 在相同设备中不同的床层厚度, 会影响其层压粉碎效果。本文以鞍山式赤铁矿石为研究对象, 基于矿石宏观力学性质及真实破裂数值模拟(RFPA), 表征层压粉碎适宜颗粒床层厚度。首先进行矿石的抗压强度、抗拉强度试验, 借助数值模拟表征矿石的均质度 m 。构建直径为10 mm赤铁矿颗粒、不同床层厚度的数值模型, 在水平方向有约束条件下进行压载试验, 模拟高压辊磨机的层压粉碎过程, 通过应力传递、三维裂纹贯通破坏模式、相对粉碎能耗, 确定适宜的料层厚度。结果表明, 层压粉碎床层厚度为8层颗粒直径的粉碎形式表现为对角线贯通, 有利于应力传递, 促进整个床层颗粒产生粉碎, 能量利用率高。本文的研究结果, 为工业上确定高压辊磨机适宜的料层厚度提供研究基础。

关键词 高压辊磨机; 层压粉碎; 数值模拟; 力学性质

高压辊磨机实施的是准静压的料层粉碎(层压粉碎), 当物料层受到辊面挤压时, 矿石颗粒本身充当传压介质, 矿石颗粒之间相互挤压产生巨大的压力导致颗粒破碎, 粉碎产品内部的微裂纹发育比较充分, 细粒级含量高, 矿物解离好^[1-2], 在降低碎磨作业能耗和提高磨矿效率方面, 具有明显的优势。层压粉碎过程中, 不同颗粒床层产生不同的粉碎贯通形式, 从而影响粉碎的能耗和产品的粒度。目前工业上对于高压辊磨机适宜辊缝的选择, 主要是基于半工业试验或者经验公式^[3-4], 前者需要的物料量一般为2~5 t, 后者是基于高压辊磨机的辊径而非考虑到矿石性质和给矿粒度。而矿石的碎磨性与其自身力学性质、给矿粒度有关, 且矿石组成上的非均质性、成矿过程造成的微缺陷及无序度, 使矿石力学性能存在很强的尺寸效应。

本文通过矿石的单轴抗压试验和巴西圆盘劈裂试验, 确定矿石的抗压强度和抗拉强度。运用RFPA (Real Failure Process Analysis) 数值模拟方法, 真实性还原矿石的细观力学性质, 引用均质度 m 表征矿石力学性质的非均质性, 通过边界元数值模拟方法计算应力强度因子, 依据应力强度因子的大小确定裂纹扩展

的长度^[5]。构建不同矿石颗粒层的数值模型, 研究矿石颗粒在层压粉碎过程中的应力传递、裂纹扩展形式、比能耗, 确定适宜的料层厚度, 可为优化高压辊磨机的操作辊缝提供借鉴。

1 试验原料与试验设备

1.1 试验原料

试验使用的鞍山式赤铁矿石取自鞍钢集团齐大山铁矿, 按试验要求分别将样品制备为三种:

单轴抗压强度试验样品: 按照国际岩石力学学会实验室和现场试验标准专业委员会(ISRM)制定的岩石材料单轴抗压强度的标准^[6], 采用2000×800×1500 mm岩心切割机, 切割5块直径50 mm、高度100 mm的圆柱体标准试样。

单轴抗拉强度试验样品, 按照国际岩石学会实验室和现场试验标准专业委员会(ISRM)推荐采用巴西圆盘劈裂法(简称劈裂法)测定岩石的单轴抗拉强度^[6]的标准, 采用2000 mm×800 mm×1500 mm岩心切割机, 切割5块直径50 mm、高度25 mm的扁平状圆柱

收稿日期: 2023-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(52174243)

作者简介: 雷顺林(2000—), 男, 本科生, 主要从事破碎和磨矿研究。

通信作者: 李丽匣(1980—), 女, 博士, 教授, 研究方向为金属矿石碎磨及预选技术, Email: Lilixia@mail.neu.edu.cn。

体标准试样。

将矿样采用 $\phi 150 \times 250$ 颚式破碎机破碎, 破碎产品混匀筛分, 制备 -12 mm 的样品, 经筛分测得其 $d_{80}=10\text{ mm}$ 。

1.2 软件系统及试验设备

1.2.1 RFPA 软件系统

采用考虑岩石破坏损伤过程中的非线性、非均质性和各向异性等特点的 RFPA 方法, 即采用真实性破坏过程分析方法开展本文的数值模拟研究工作。真实性破坏过程分析充分考虑了岩石缺陷分布的随机性以及非均质性, 是一种基于统计损伤理论和有限元理论的计算方法^[7-8]。RFPA 用统计损伤的本构关系能够模拟岩石破坏的渐变过程, 实现岩石的非线性、非均质性和各向异性的破坏过程数值模拟, 得到了广泛的应用^[9]。RFPA 软件界面以模型为中心, 主菜单在软件界面上方, 具体如图 1 所示。

RFPA 破坏分析具体步骤: (1) 实体建模和网格剖分; (2) 施加载荷; (3) 基元相变分析。图 2 为数值模型破坏分析流程^[7]。

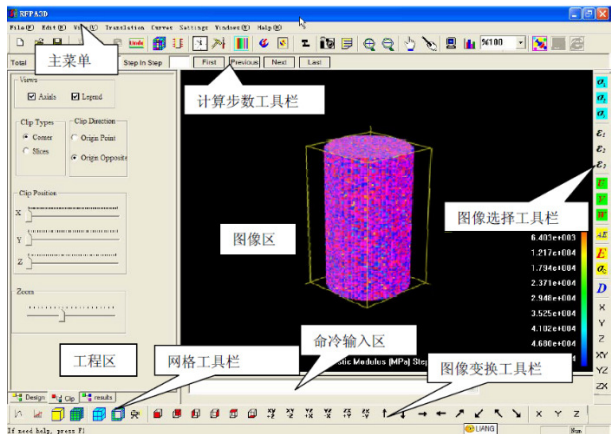


图 1 RFPA 软件工作界面
Fig. 1 RFPA software interface diagram

1.2.2 试验设备

样品切割采用 $2000 \times 800 \times 1\,500$ 岩心切割机(荆州华孚信息技术有限公司生产), 单轴抗压强度试验采用 YAW-1000 压力试验机(济南中路试验机制造有限公司生产), 抗拉强度试验采用 TYJ-2000 电液伺服岩石三轴试验机(长春试验机厂生产)。

1.3 试验方法

单轴抗压强度试验中, 将标准圆柱体试件置于压力试验机中心, 在圆柱侧壁贴有两组互相垂直的应变片, 如图 3 所示。以恒定速率加载, 直至样品破坏。进行 5 块试样的单轴抗压强度试验, 取平均值。

图 4 为巴西圆盘劈裂法试验加载及破坏图, 试验

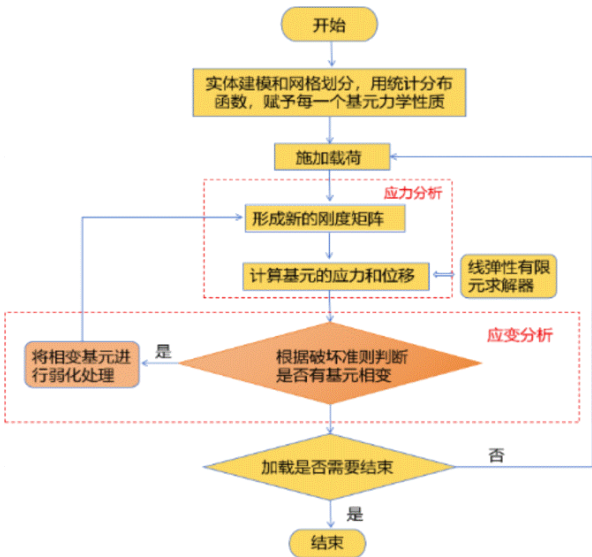


图 2 RFPA 数值模型破坏分析流程
Fig. 2 The failure analysis flow chart of RFPA numerical model



图 3 赤铁矿石单轴压缩试样图
Fig. 3 Uniaxial compression sample of hematite ore

前, 将扁平状圆柱体试件置于电液伺服岩石三轴试验机上下承压板之间, 轴向加压时, 在试件的上下端面形成线性集中载荷, 圆盘试件端面在拉应力作用下, 沿加载方向破裂^[6]。对 5 块试样进行试验, 结果取平均值。

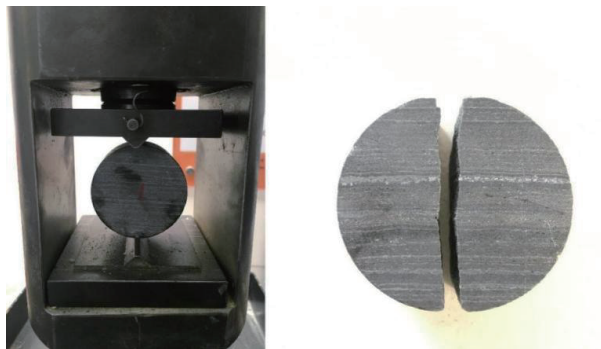


图 4 巴西圆盘劈裂法试验加载及破坏图
Fig. 4 Brazilian disc splitting test loading and failure diagram

在 RFPA 数值模拟中, 根据模拟经验以及文献查阅, 材料的强度和弹性模量在细观上服从 Weibull 分布, 试样细观和宏观的强度、弹性模量之间的关系如式(1)、(2)^[10]:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 0.2602 \ln m + 0.0233 \quad (1.2 \leq m \leq 50) \quad (1)$$

$$\frac{E}{E_0} = 0.1412 \ln m + 0.6476 \quad (1.2 \leq m \leq 10) \quad (2)$$

式中, m 为材料的均质度, 描述材料宏观力学参数的均匀性; σ 和 E 分别为试样的宏观强度和弹性模量; σ_0 和 E_0 表示 Weibull 分布赋值时试样细观强度和弹性模量。

m 的取值选择 2.6、2.8、3.0、3.2、3.4, 分别代入式(1)和式(2), 试算得到岩石材料细观强度和弹性模量。建立直径 50 mm、长度 100 mm 圆柱体模型, 数值模型的加载条件为单轴加载, 步长为 0.002 mm/step。

-12 mm 矿石样品经筛分测得其 $d_{80}=10$ mm, 因此在层压粉碎数值模拟过程中, 矿石颗粒数值模型的粒径取 10 mm。建立层数为 4、6、8、10、12 的床层数值模型, 进行 5 组模型的压载破坏模拟。床层模型参数属性: 圆颗粒直径 10 mm, 颗粒破坏力 3 500 N, 颗粒床层分布 8×8, 颗粒层数 4、6、8、10、12, 基元体积 1 mm³, 模型基元数量 1 024 000(8 层时)。压载边界条件: X 方向初始加载量 0, 加载增量 0.01 mm/step, Y 、 Z 方向初始加载量 0, 加载增量 0。总加载步 200, 求解类型为平面应力, 加载方法为正常加载, 重力方向无加载, 计算方法为空洞单元。

表 1 岩石单轴抗压强度试验结果

Table 1 Test results of rock uniaxial compressive strength

编号	直径/mm	高度/mm	横截面积/mm ²	最大破坏载荷/kN	单轴抗压强度/MPa	轴向弹性模量/MPa	泊松比
1	49.72	100.20	1 940.58	423.77	218.37	189 037	0.361 3
2	49.50	99.50	1 923.45	470.25	244.48	156 205	0.358 4
3	49.52	100.10	1 925.00	519.69	269.97	149 780	0.355 4
4	49.70	100.28	1 939.02	560.64	289.13	163 042	0.329 1
5	50.06	100.10	1 967.21	525.56	267.16	169 326	0.345 8
		平均值		499.98	257.82	165 477	0.350 0

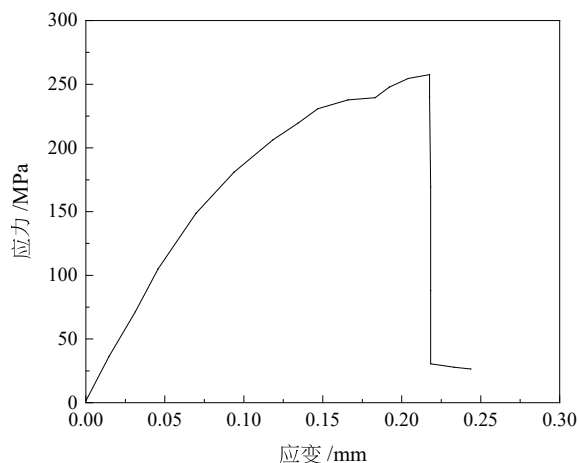


图 5 试样单轴压缩应力—应变曲线

Fig. 5 Uniaxial compression stress-strain curve of sample

2 结果与分析

2.1 单轴抗压强度

进行 5 块样品的单轴抗压强度试验, 按照式(3)~(5)计算矿石单轴抗压强度、轴向弹性模量和泊松比^[6]:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3)$$

式中, σ —样品单轴抗压强度, MPa; P —最大破坏载荷, N; A —圆柱体的横截面积, mm²。

$$E_e = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_{hb} - \varepsilon_{ha}} \quad (4)$$

式中, E_e —样品弹性模量, MPa; σ_a —应力应变关系曲线上起点的应力值, MPa; σ_b —应力应变关系曲线上终点的应力值, MPa; ε_{ha} —应力 σ_a 对应的应变值; ε_{hb} —应力 σ_b 对应的应变值。

$$\nu_{av} = -\frac{\Delta \varepsilon_d}{\Delta \varepsilon_l} = -\frac{\varepsilon_{db} - \varepsilon_{da}}{\varepsilon_{lb} - \varepsilon_{la}} \quad (5)$$

式中, ν_{av} —样品的泊松比; $\Delta \varepsilon_d$ —径向应变; $\Delta \varepsilon_l$ —轴向应变; ε_{da} —轴向应力 σ_a 的径向应变; ε_{db} —轴向应力 σ_b 的径向应变; ε_{la} —轴向应力 σ_a 的轴向应变; ε_{lb} —轴向应力 σ_b 的轴向应变。

单轴抗压强度试验结果如表 1 所示, 试样加载过程中的应力—应变曲线如图 5 所示。

由试验结果可知, 岩石力学性质呈现较大的离散性, 单轴抗压强度平均值为 257.82 MPa, 轴向弹性模量平均值为 165.47 GPa, 泊松比平均值为 0.35。

2.2 单轴抗拉强度试验结果

圆盘试件的抗拉强度 σ_t 与载荷 P 的关系^[6]:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dt} \quad (6)$$

式中, σ_t —岩石的单轴抗拉强度, MPa; P —试件破坏时的极限压力, N; d 、 t —试件的直径和长度, mm。

巴西圆盘劈裂试验共进行 5 组试样, 试验结果如表 2 所示。

由试验结果可知, 该矿石样品的单轴抗拉强度平均值为 17.23 MPa, 上文已测得试样单轴抗压强度为 257.82 MPa, 则拉压比 $\lambda=257.82/17.23=14.96$ 。

2.3 铁矿石均质度 m 的确定

建立圆柱体模型, 直径 50 mm, 长度 100 mm, 如下图 6 所示。引入均质度 m 描述材料宏观力学参数的非均匀性, 依据式(1)和式(2)对 m 进行试算。 m 的取值分别选择 2.6、2.8、3.0、3.2、3.4 代入式(1)和式(2), 确定数值模拟中岩石材料的细观强度和弹性模量。数值模型的加载条件为单轴加载, 步长为 0.002 mm/step, 数值模型压载结果列于表 3。

表 2 岩石单轴抗拉强度试验结果

Table 2 Test results of rock uniaxial tensile strength

试样 编号	直径/mm	长度/mm	质量/g	密度/(kg·m ⁻³)	破坏最大 载荷/kN	岩石抗拉 强度/MPa
1	50.08	25.26	169.87	3 415.8	35.39	17.82
2	50.04	25.10	172.63	3 498.8	33.54	17.01
3	49.60	25.06	169.74	3 507.7	32.80	16.81
4	50.10	25.20	169.82	3 420.3	30.70	15.49
5	49.70	25.24	169.30	3 459.3	37.50	19.04
平均值				3 460.4	33.40	17.23

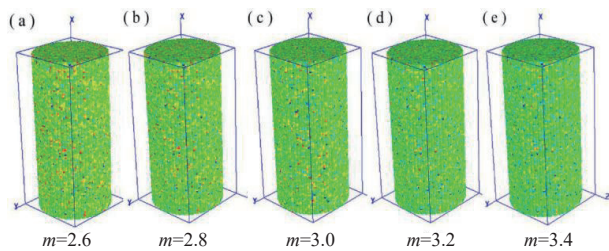


图 6 不同材料均质度 m 的数值模型

Fig. 6 Numerical model of different homogeneity m

表 3 岩石数值模型试验结果

Table 3 Test results of Rock numerical model

m	抗压 强度 σ_c /MPa	弹性 模量 E /GPa	细观抗压 强度 σ_0 /MPa	弹性 模量 E_0 /GPa	数值模拟 结果/MPa
2.6	257.82	165.48	948.22	211.48	253.19
2.8	257.82	165.48	885.37	208.67	250.63
3.0	257.82	165.48	834.37	206.85	255
3.2	257.82	165.48	790.86	203.84	252
3.4	257.82	165.48	754.52	201.8	252.2

不同材料均质度下, 试样的峰值强度与均质度的关系如图 7 所示; 模型残余强度与应变曲线如图 8 所示; 均质度 $m=3.0$ 时, 岩石试样和数值模型在单轴压缩下的应力—应变曲线如图 9 所示。

从图 7 可以看出, $m=3.0$ 时, 数值模型的峰值强度为 255 MPa, 此时与矿石宏观单轴压缩的峰值强度最相近, 从图 8 可见, 不同均质度数值模型在应变软化之后变异的差异较大, 随着岩石均质度的提高, 残余强度趋向于稳定。从图 9 可以明显看出, 在 $m=3.0$ 时, 模型加载初期, 应力曲线与实体矿石呈现相同的变

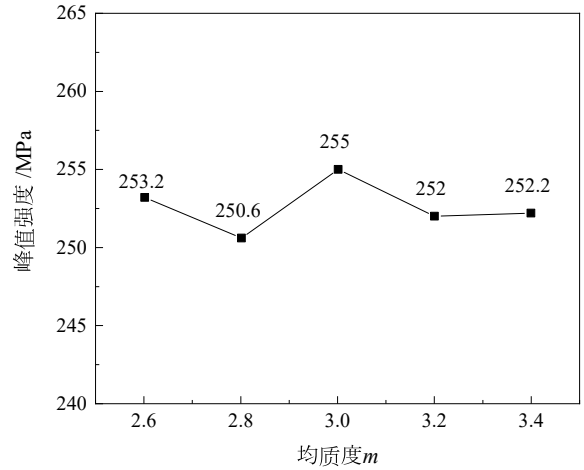


图 7 单轴压缩下峰值强度与均质度 m 曲线图

Fig. 7 Curve of peak pressure and homogeneity m under uniaxial compression

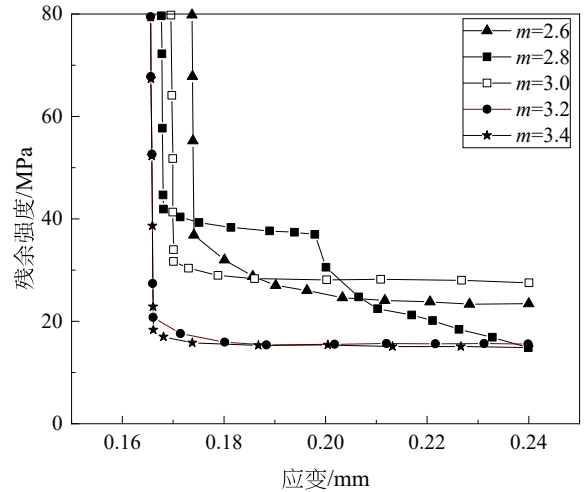


图 8 模型残余强度与应变曲线图

Fig. 8 Residual intensity versus strain curve

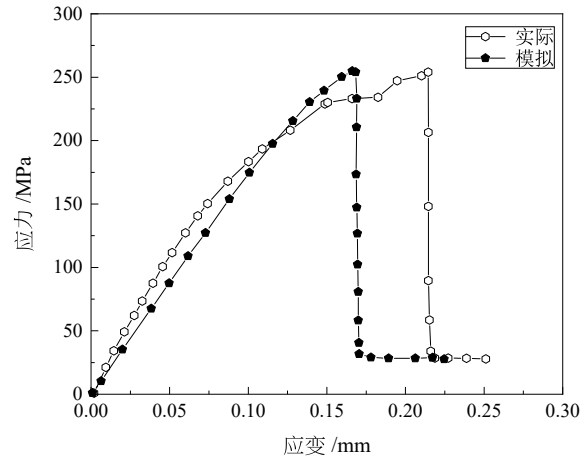


图 9 试样与数值模型单轴压缩下的应力—应变曲线图

Fig. 9 Stress-strain curve of sample and numerical model under uniaxial compression

趋势, 几乎重叠; 应变大于 0.18 之后, 数值模型压载后的残余强度在 28 MPa 附近, 赤铁矿石的残余强度也

在 28 MPa 附近^[9]。将数值模型压载曲线与物理试验结果比较发现, $m=3.0$ 时数值模拟结果与宏观试件压载结果最为吻合。

2.4 层压粉碎数值模拟

2.4.1 不同厚度床层颗粒数值模拟

在高压辊磨机工作过程中, 颗粒的粉碎发生在两辊之间的有限空间内。在挤压力的作用下, 物料层的密实度不断增加, 颗粒间相互传递应力, 当应力超过一定值后, 颗粒发生粉碎^[10]。为了研究不同颗粒层的

压载粉碎和三维裂纹贯通破坏模式, 分别建立矿石颗粒层数为 4、6、8、10、12 的床层数值模型, 如图 10 所示, 在受限空间内施加载荷, 进行层压粉碎模拟。

4 层、6 层、8 层、10 层颗粒床层的数值模型压载到 25 步, 12 层颗粒的床层数值模型压载到 36 步, 压载后的最大主应力变化图和声发射图如图 11 所示。

从图 11 中可以看出, 4、6 和 12 层颗粒粉碎形式表现为平行贯通, 8 和 10 层颗粒粉碎形式表现为对角线贯通, 对角线贯通粉碎形式导致整个床层颗粒产生粉碎, 促进了应力的传递, 增大了矿石颗粒粉碎的强度。

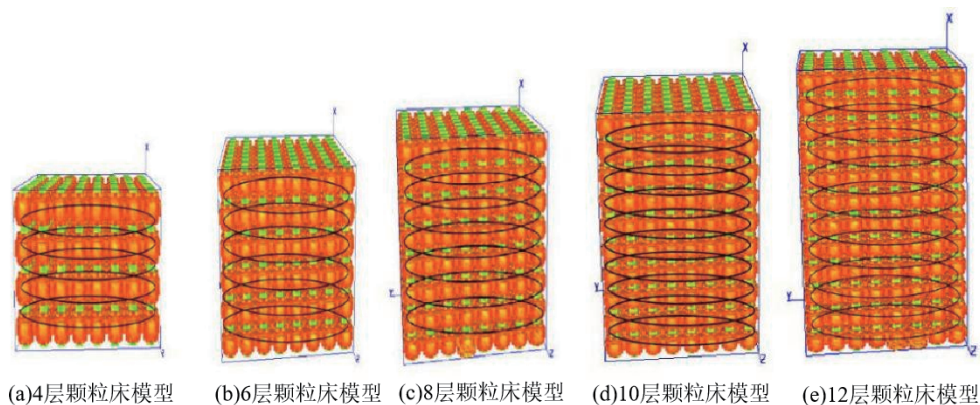


图 10 不同颗粒层数的床层数值模型

Fig. 10 Configuration models with different layers

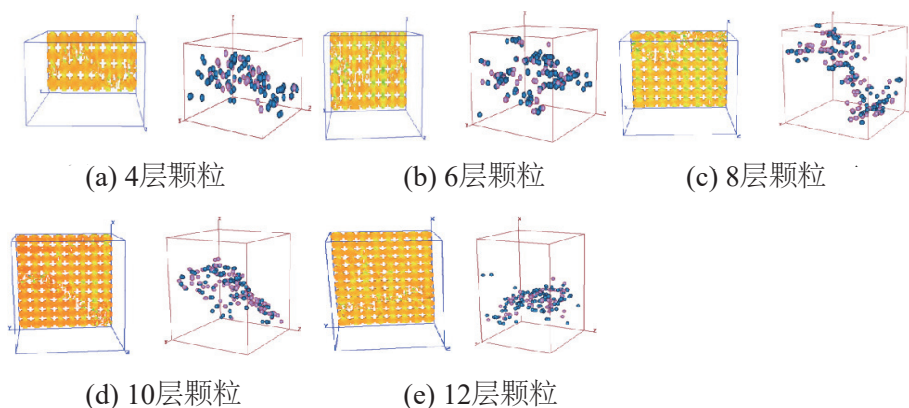


图 11 不同层数床层数值模型最大主应力变化图和声发射图

Fig. 11 Maximum principal stress and AE of different configuration models

2.4.2 不同厚度床层颗粒粉碎能耗

不同床层颗粒数值模型随着位移的加载, 基元不断发生相变, 床层内部矿石颗粒发生粉碎, 相互贯通, 模型承受载荷随位移变化如图 12 所示, 图中 L 表示纵向的颗粒层数。

从图 12 可以看出, 随着床层厚度的增加, 不同颗粒层数数值模型的载荷—位移曲线呈现相同的变化趋势, 床层 L 由 4 层增加至 10 层时, 峰值载荷不断增加, 继续增加至 10 层时, 峰值载荷下降, 但是由 10 层增加

至 12 层时, 峰值载荷继续增加。当颗粒层为 8 层时, 此时床层在压载过程中的峰值载荷 $F=628800$ N。

不同床层颗粒数值模型的基元不断发生相变的过程中, 数值模型不断有声发射产生, 同时随着矿石颗粒不同程度的破坏伴随着不同声发射能量的释放, 不同颗粒层数粉碎过程中累积声发射能量如图 13 所示。

从图 13 可以看出, 在床层数值模型粉碎过程中, 累积声发射能量随着矿石颗粒床层数的增加而先增加后降低。当颗粒层数 $L=8$ 时, 累积声发射能量达到最大值 19.28 kJ, 之后累积声发射能量不断降低。累

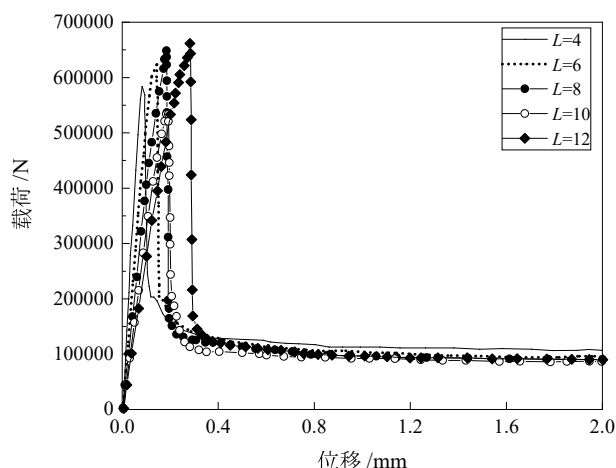


图12 不同颗粒层载荷—位移曲线

Fig. 12 Stress-strain curve of different particle layers

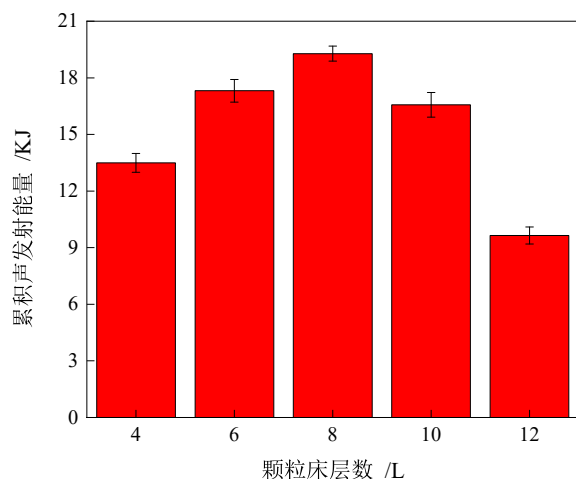


图13 不同颗粒层数的累积声发射能量

Fig. 13 Cumulative AE energy of different particle layers

积声发射能量能够表示矿石颗粒粉碎的数量和程度,式(7)为矿石相对粉碎能耗 η 的表达式。

$$\eta = \frac{\int F(s)ds}{E} \quad (7)$$

式中, F —床层数值模型粉碎过程中的载荷(应力),N;
 s —床层数值模型粉碎过程中的应变,m; E —床层数值模型粉碎过程中累积声发射能量,J。

分别计算不同颗粒床层数的矿石相对粉碎能耗,结果如图14所示。

从图14可以看出,随着颗粒床层数的增加,矿石相对粉碎能耗先减少后增加,在 $L=8$ 时,矿石颗粒粉碎的能耗最低,说明8层颗粒层粉碎时,矿石颗粒在较少的外力作用下可取得相对最佳的粉碎效果。矿石相对粉碎能耗直观反映了不同床层颗粒层数对矿石颗粒粉碎过程中粉碎能耗的影响,从图14中得到床层颗粒层压粉碎矿石粉碎能耗随着床层颗粒厚度存在最低值。在高压辊磨机实际生产过程中,调节矿石颗粒在高压辊磨机压缩区层压粉碎的床层厚度,促使应力在床层颗粒间的传递,可有效降低高压辊磨机

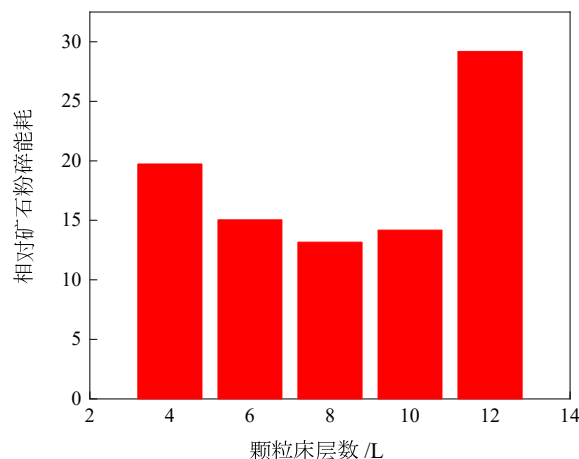


图14 不同颗粒层数的矿石相对粉碎能耗

Fig. 14 Specific comminuting energy consumption of different particle layers

实际生产过程中的粉碎能耗。

3 结论

(1)宏观力学性质测试结果表明,鞍山式赤铁矿石的单轴抗压强度、单轴抗拉强度、拉压比、轴向弹性模量、泊松比平均值分别为257.82 MPa、17.23 MPa、14.96、165.47 GPa、0.35。均值度为 $m=3.0$ 时,数值模拟结果与宏观试件力学性质一致性最好。

(2)由于应力传递和集中程度不同,4、6和12层颗粒床层的粉碎形式表现为平行贯通,8和10层颗粒粉碎形式表现为对角线贯通,促进了应力的传递,能量利用率高。对于10 mm的鞍山式赤铁矿石颗粒,适宜的层压粉碎颗粒床层厚度为8层。

(3)对于粒度不同、力学性质不同的矿石,存在着层压粉碎能量利用率最高、粉碎效果最优的料层厚度,如何将此 d_{80} 粒度的适宜床层厚度与宽粒级给矿、不同辊径设备进行耦合,后续将结合实际矿石试验进行研究。本文研究结果,对工业上高压辊磨机适宜辊缝的确定,具有实际意义。

参考文献:

- [1] YDOGAN A, ERGUN L, BENZER H. High pressure grinding rolls (HPGR) applications in the cement industry[J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(2): 130-139.
- [2] 陈运双,李丽匣,袁致涛,等. 高压辊磨机在金属矿选矿与球团预处理领域的工艺和操作参数[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(6): 164-170.
CHEN Y S, LI L X, YUAN Z T, et al. Comparison on Process and Operational Parameters of HPGR in the Field of Pellet Pretreatment and Metal Ore Beneficiation [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(6): 164-170.
- [3] PARKER B, ROWE P, LANE G, et al. The decision to opt for high pressure grinding rolls for the Boddington expansion[C]. *Proc International Autogenous and Semi Autogenous Grinding Technology*, Vancouver Canada, 2001: 93-106.
- [4] HART S, PARKER B, REES T, et al. Commissioning and ramp up of

- the HPGR circuit at newmont boddington gold[C]. Proc International Autogenous and Semi Autogenous Grinding Technology, Vancouver, Canada, 2001: 1-21.
- [5] 张彤, 孟庆元, 王富耻. 无序材料微裂缝分形几何与尺寸效应的微观机理[J]. 材料研究学报, 2004, 18(5): 549-555.
- ZHANG T, MENG Q Y, WANG F Y. Microscopic mechanism of fractal geometry and size effect of microcracks of disordered materials[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2004, 18(5): 549-555.
- [6] ULUSAY R. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014 [M], Heidelberg: Springer International Publishing Switzerland, 2015.
- [7] 刘晓明. 金属矿隐患空区三维信息获取及其动力失稳数值分析技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- LIU X M. Technology of 3D information acquisition and dynamic destabilization numerical analysis of disaster cavity in metal mine [D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [8] 许长新, 路燕泽, 甘泽, 等. 基于细观尺度的胶结充填体破坏模拟试验研究[J], 2016, (4): 18-22.
- Simulation Research on cemented tailings backfill damage based on microscopic scale[J], Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2016, (4): 18-22.
- [9] TANG C. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(2): 249-261.
- [10] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂: 数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- TANG C A, ZHU W C. Concrete damage and fracture: numerical test [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [11] YU Q L, YANG S Q, RANJITH P G, et al. Numerical modeling of jointed rock under compressive loading using X-ray computerized tomography[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016(49): 877-891.

Research of Suitable Material Layer Thickness for Lamination Comminution Based on Numerical Simulation of Real Failure Process Analysis

LEI Shunlin, LI Lixia, FU Kun, LIU Dongjie, PAN Yiming, ZHANG Xingjie

School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, 110819, Liaoning, China

Abstract: HPGR (High pressure grinding rolls) plays an important role in energy-saving and consumption-reduction in metal mines owing to its unique advantages in the lamination crushing principle. Given the differences in mechanical properties, homogeneity and particle size of feed ores, different material layer thickness in a same equipment affects HPGR lamination crushing performance. In this study, taking Anshan-type hematite ores as the research object, suitable particle layer thickness for lamination crushing was characterized based on the macro-mechanical properties and the numerical simulation of real fracture (RFPA) of ores. The tests of compressive strength and tensile strength of standard ore samples were first carried out, and the homogeneity of ore was characterized by numerical simulation. Then, numerical models of variable layer thicknesses with $\Phi 10$ mm spherical hematite particles were configured, and the ballast tests were performed with horizontal constraint simulating the HPGR lamination comminuting process. Finally, an appropriate layer thickness was determined by analyzing the processes of stress transfer and three-dimensional crack penetration failure coupled with the relative energy consumption. It was shown that the fracture mode of configuration with a thickness of 8 layers was diagonal penetration, which was conducive to stress transfer promoting the comminution of particles in the whole bed with a high energy efficiency. Results provided a research basis for determining a suitable layer thickness of HPGR in industry.

Keywords: high pressure grinding rolls; lamination comminution; numerical simulation; mechanical properties

引用格式: 雷顺林, 李丽匣, 付坤, 刘栋杰, 潘一鸣, 张兴婕. 基于矿石真实破裂数值模拟的层压粉碎适宜料层厚度研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(3): 120-126.

LEI Shunlin, LI Lixia, FU Kun, LIU Dongjie, PAN Yiming, ZHANG Xingjie. Research of suitable material layer thickness for lamination comminution based on numerical simulation of real failure process analysis[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(3): 120-126.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn



通信作者简介:

李丽匣(1980—), 女, 河北定州人, 东北大学矿物工程系教授、博士生导师, 加拿大 UBC 大学访问学者、冶金矿山行业专家委员会委员、国际矿物加工论坛专家委员会委员。主要研究方向: 矿石碎磨理论与预选技术。主持国家自然科学基金项目 4 项、科技部高端外国专家项目 3 项、国家重点研发计划子课题 3 项、省部级项目 9 项、企业项目 25 项。获省部级科学技术奖 5 项, 授权发明专利 8 项, 第一/通信作者发表 SCI 检索论文、中文核心论文 51 篇, 编著/参编 6 部学术著作。