文章编号:1674-2869(2025)03-0237-08

贵州瓮福地区钙镁质磷矿石解离特性研究

黄小芬[1,3,4],何桂旭[1,3,4],张 覃[*2,3,4]

1. 贵州大学矿业学院,贵州 贵阳 550025;2. 贵州科学院,贵州 贵阳 550001;
3. 喀斯特地区优势矿产资源高效利用国家地方联合工程实验室,贵州 贵阳 550025;
4. 贵州省非金属矿产资源综合利用重点实验室,贵州 贵阳 550025

摘 要:通过光学显微镜镜下鉴定、X射线荧光光谱、X射线衍射、BPMA工艺矿物学参数自动分析等分析测试手段,研究了贵州瓮福地区中低品位钙镁质磷矿石的矿物组成、主要矿物的嵌布特征及矿物解离特性等。研究表明:矿石中主要有用矿物为磷灰石集合体和少量微晶状、柱状磷灰石,脉石矿物为白云石、石英,矿物嵌布粒度细,磷灰石多以镶嵌、包裹等形式与白云石、石英紧密共生,部分细粒级白云石被包裹在磷灰石中,磨矿过程中磷灰石、白云石较难单体解离,矿石磨至-75 μm后,仍有约50%的磷灰石和约30%的白云石与其他矿物连生或被包裹,且白云石在磨矿过程中易泥化,是影响选别指标的重要因素。通过实验室闭路循环磨矿可有效降低白云石等易泥化矿物的过磨,从而提高磷精矿P_2O_5含量及MgO脱除率。

关键词:磷矿石;磷灰石;白云石;嵌布特征;解离特性

中图分类号:TD 91 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202312012

Liberation characteristics of Ca-Mg-bearing phosphate ore in Wengfu district, Guizhou

HUANG Xiaofen[1,3,4], *HE Guixu*[1,3,4], *ZHANG Qin*[*2,3,4]

1. College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Academy of Science, Guiyang 550001, China; 3. National & Local Joint Laboratory of Engineering for Effective Utilization of Regional Mineral Resources from Karst Areas, Guiyang 550025, China; 4. Guizhou Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Non-metallic Mineral Resources, Guiyang 550025, China

Abstract: This study investigated the mineral composition, occurence patterns, and liberation characteristics of a medium-to-low grade calcium-magnesium phosphate ore from the Wengfu area of Guizhou Province using optical microscopy, X-ray fluorescence spectroscopy (XRF), X-ray diffraction(XRD), and BGRIMM Process Mineralogy Analysis (BPMA). Results indicated that the ore primarily comprises the valuable mineral apatite aggregates with minor microcrystalline and columnar apatite, while dolomite and quartz dominate the gangue minerals. The apatite exhibits intricate intergrowths with dolomite and quartz through fine-grained inlays and inclusions, with some fine dolomite particles encapsulated in apatite. Liberation analysis revealed that even after grinding to a particle size below 75 μm, approximately 50% of apatite and 30% of dolomite remaine interlocked or encapsulated with other minerals. Notably, dolomite is prone to overgrinding and slime formation during comminution, critically impacting separation efficiency. Laboratory-scale locked-cycle grinding experiments demonstrated that optimized grinding protocols effectively mitigated dolomite overgrinding and argillization, achieving a phosphate concentrate with enhanced P_2O_5 content and

收稿日期:2023-12-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFE0110300)

作者简介:黄小芬,博士,高级实验师。Email:xfhuang@gzu.edu.cn

***通信作者**:张 覃,博士,教授。Email: zq6736@163.com

引文格式:黄小芬,何桂旭,张覃. 贵州瓮福地区钙镁质磷矿石解离特性研究[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(3):237-244.

improved MgO removal rate.

Keywords: phosphate ore; apatite; dolomite; occurence characteristics; liberation behavior

磷矿作为一种不可再生战略资源，是生产磷肥及磷化工产品不可缺少的原料，在国民经济和农业生产中扮演着重要角色[1]。磷矿石主要有用成分为磷酸盐，同时伴生稀土、钙、镁、氟、硅、碘等共伴生资源[2]。据统计，截至2024年，全球磷矿储量共740亿t，主要分布在非洲、北美、亚洲、中东、南美等60个国家和地区，其中摩洛哥储量500亿t，占全球磷矿资源总储量的67.57%，中国磷矿储量37亿t，居世界第二位[3]。我国磷矿类型主要有沉积磷块岩型、变质磷灰岩型和岩浆岩磷灰石型3种，其中沉积型磷矿占全国总量的85%，是目前开发利用的主要对象，且大部分为中低品位矿石，易选高品位磷矿石较少，P_2O_5的平均含量仅为17%，P_2O_5含量低于25%的中低品位磷矿储量约占80%[4]。

我国磷矿资源分布极不平衡，主要分布在湖北、四川、云南、贵州，其中贵州省磷矿储量4.88亿t，居全国第四位[5]。贵州磷矿主要分布在瓮福、开阳、织金3大矿区，均属于海相沉积型磷矿[6]，目前已探明的工业磷矿床类型主要是产在碳酸盐岩含磷岩系中的磷块岩矿床。根据磷矿石中主要脉石矿物的含量，沉积型磷矿可分为钙镁质磷矿、硅质磷矿和硅钙质磷矿3种类型[7]，其中钙镁质磷矿石占多数，其有用矿物为磷灰石，伴生矿物主要是白云石等[8]。由于白云石与磷灰石嵌布粒度细，物理化学性质相似，磷矿石中磷灰石与白云石的浮选分离一直是实现钙镁质磷矿石高效利用的关键和难题[9]。通过磨矿将有用与脉石矿物解离是有效浮选的前提[10]。但矿物解离度与磨矿产品粒度密切相关，虽然细磨能增加矿物解离度，但磨矿后产生的大量细粒矿物对浮选过程有显著影响。细粒矿物具有较高的表面能，且易溶解和与药剂发生非选择性吸附，细粒矿物还可能罩盖在相对粗粒的矿物颗粒上，形成“矿泥罩盖”或“夹带”，对分选产生不利影响[11]。

针对贵州瓮福地区钙镁质磷矿选矿提磷、降镁效果不佳，精矿中镁含量较高及尾矿中磷损失严重等问题，本文考察了磷矿石矿物组成、主要元素的赋存状态、主要矿物连生特征、矿物嵌布特性、矿物解离特性等，不仅可以为浮选分离提供重要的工艺矿物学资料，也为制定合理的浮选脱镁工艺和提高选别指标提供理论依据。

1 矿石性质

1.1 结构构造特征

本研究所用磷矿石的构造特征如图1所示。该试样构造类型多样，主要包括块状构造及条带状构造，少见方解石脉。

条带状构造：主要由隐晶质磷灰石、白云石、石英、方解石等各自相对集中而定向排列构成颜色交替变化的条纹或条带[图1(a-b)]。

块状构造：主要由隐晶质磷灰石呈致密块状产出，呈灰黑、灰白色，致密坚硬[图1(c-f)]。块状构造风化矿中部分矿物被风化淋失，质地松散[图1(f)]。

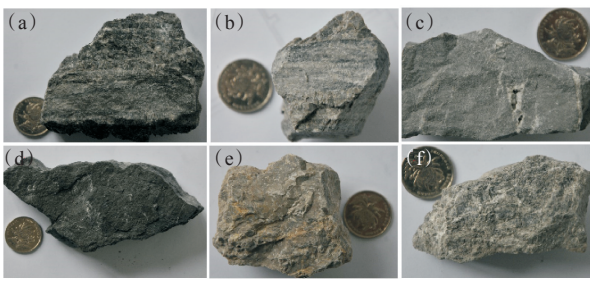


图1 磷矿石的宏观构造：(a, b)条带状构造，(c, d, e, f)块状构造

Fig. 1 Macroscopic structure of phosphate ore: (a, b) strip structure, (c, d, e, f) massive structure

1.2 矿石化学组成与矿物组成

磷矿石原矿的X射线荧光光谱(X-ray fluorescence spectrometry)分析结果列于表1中，矿石中P_2O_5质量分数为22.70%，MgO质量分数为7.22%，SiO_2、Fe_2O_3和Al_2O_3质量分数较低。矿石属于中低品位钙镁质磷矿石，选矿需要脱除的主要有害元素为MgO。

磷矿石原矿X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析结果如图2所示，结合工艺矿物学参数

表1 磷矿石原矿XRF分析

Tab. 1 XRF results of phosphate raw ore %

成分	P_2O_5	CaO	MgO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	K_2O	TiO_2	Na_2O	LOI 1000
含量	22.70	41.10	7.22	9.98	0.39	0.43	0.11	0.02	0.23	16.48

自动分析测定得到磷矿石的矿物组成列于表2中。该磷矿石矿物组成简单，矿石中主要有用矿物为氟磷灰石，含量为63.47%；脉石矿物主要为白云石，含量为26.70%，其次为石英，含量为7.21%；其他脉石矿物如透闪石、白云母、黄铁矿等含量极少。

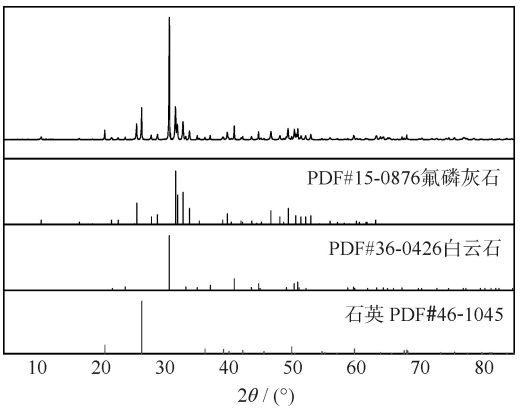


图2　磷矿石原矿XRD分析

Fig. 2　XRD patterns of phosphate raw ore

表2　原矿矿物组成

Tab. 2　Composition of raw ore

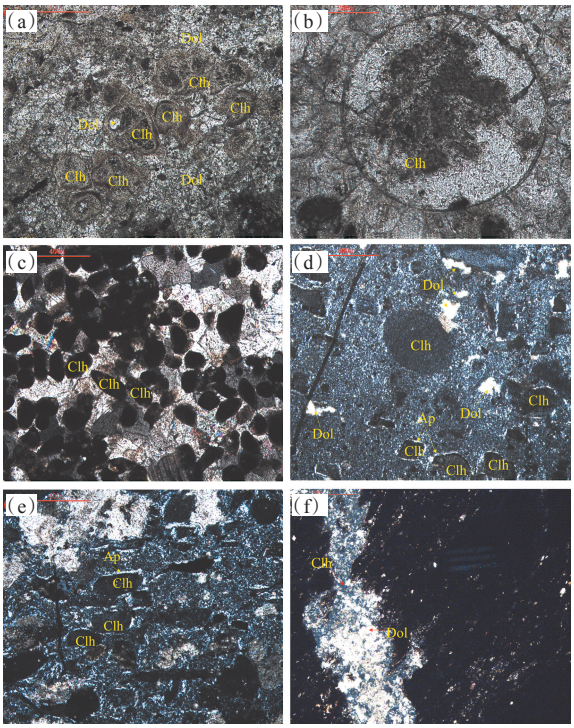
矿物	分子式	含量 / %
氟磷灰石	$Ca_5[PO_4]_3(OH,F)$	63.47
白云石	$CaMg[CO_3]_2$	26.70
石英	SiO_2	7.21
白云母	$K\{Al_2[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2\}$	0.18
磁铁矿	Fe_3O_4	0.14
方解石	$CaCO_3$	0.13
黄铁矿	FeS_2	0.04
其他	–	2.13
合计	–	100.00

2　主要矿物嵌布特征

2.1　磷灰石

磷灰石嵌布特征如图3、图4所示，由图3、图4可知，矿石中磷酸盐矿物主要为胶状磷灰石集合体和少量微晶状、柱状磷灰石。胶状磷灰石集合体显微镜下为均质全消光，主要呈鲕粒状、团粒状、椭球状及不规则细微粒状产出[图3(a-e)]。隐晶质磷灰石分布于胶状磷灰石集合体边缘，组成胶状磷灰石集合体的轮廓，镜下为略显光性的隐晶-微晶集合体，轮廓不清[图3(d-e)]。少部分含磷矿物呈结晶较好的磷灰石产出，单偏光下无色透明，呈纤维状、六方柱状等不均匀分布于胶状磷灰石集合体中(图4)。磷灰石多与脉石矿物互相胶结，还见部分细晶脉石矿物(白云石)充填于磷灰石内部[图3(f)]。

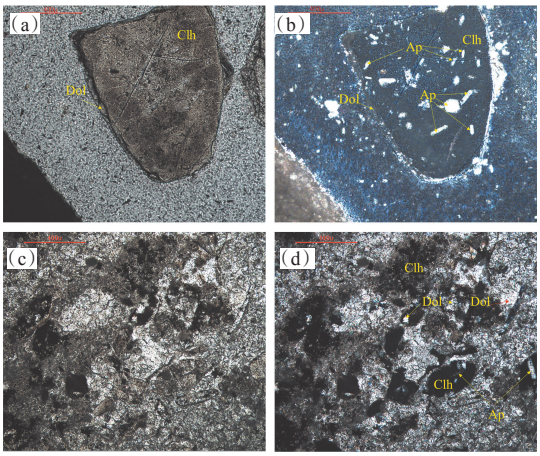
磷灰石背散射图像如图5所示，能谱分析结果列于表3中，由图5可知，部分磷灰石与白云石毗邻连生或形成镶边结构，部分细粒级白云石和石英被磷灰石包裹，石英也与磷灰石形成镶嵌、包裹结构。磷灰石粒度分布及与其他主要矿物的定量嵌布关系如图6所示，由图6可知，磷灰石颗粒粒度差异较大，粒度分布不均匀，一般在-417+38 μm粒级，少数分布在-38 μm，有极少部分粒度可达到+417 μm，-75 μm含量占17.57%。该磷矿石属于极不等粒嵌布，是影响浮选的重要因素之一。磷灰石的单体解离度较小，单体含量为22.96%，磷灰石主要与白云石和石英连生，分别占30.13%和25.38%。



注：Clh：胶磷矿；Ap：磷灰石；Dol：白云石。

图3　偏光显微镜下胶磷矿与隐晶质磷灰石嵌布特征：(a)鲕粒状胶磷矿与细晶白云石胶结[胶磷矿内部包裹碳质，10×(单偏光)]，(b)颗粒状胶磷矿[20×(单偏光)]，(c)由内碎屑和填隙物两部分组成，内碎屑为含藻颗粒状胶磷矿，部分被白云石充填替代；填隙物主要为白云石[10×(正交偏光)]，(d,e)颗粒状胶磷矿具隐晶质磷灰石轮廓[10×(正交偏光)]，(f)条带中胶磷矿和白云石胶结[10×(正交偏光)]

Fig. 3　Embedded characteristics of amorphours collophanite and cryptocrystalline apatite under optical microscope: (a) oolitic collophane cemented with fine-crystalline dolomite [carbonaceous material encapsulated within the collophane, 10× (plane-polarized light)], (b) granular collophane [20× (plane-polarized light)], (c) composed of intraclasts and interstitial material [the intraclasts consist of algal-bearing granular collophane, partially filled and replaced by dolomite; the interstitial material is primarily dolomite, 10× (orthogonal polarized light)], (d, e) granular collophane exhibiting micritic apatite outlines [10× (orthogonal polarized light)], (f) banded collophane [10× (orthogonal polarized light)]



注:Clh:胶磷矿;Ap:磷灰石;Dol:白云石。

图 4 偏光显微镜下磷灰石的嵌布特征:(a,b)细晶白云石充填于胶磷矿内部及微晶磷灰石环绕胶磷矿边缘[10×(a为单偏光,b为正交偏光)],(c,d)胶磷矿颗粒中包裹柱状磷灰石、白云石和碳质物[10×(c为单偏光,d为正交偏光)]

Fig. 4 Embedded characteristics of apatite under optical microscope: (a, b) fine-crystalline dolomite collophane, and apatite[10× (a: plane-polarized light; b: orthogonal polarized light)], (c, d) collophane grains apatite, dolomite, and carbonaceous [10× (c: plane-polarized light, d: orthogonal polarized light)]

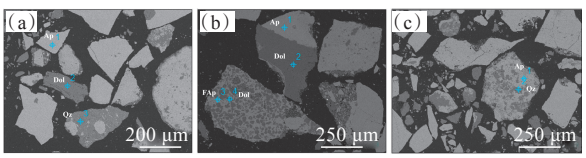


图 5 磷灰石扫描电镜背散射图像

Fig. 5 BSE of apatite SEM

表 3 磷灰石扫描电镜能谱分析

Tab. 3 Energy spectrum analysis of apatite SEM %

元素	a-1	a-2	a-3	b-1	b-2	b-3	b-4	c-1	c-2
O	35.15	53.70	51.45	36.99	53.24	37.00	53.84	37.19	49.93
Mg	–	18.95	–	–	18.55	–	–	–	–
F	–	–	–	–	–	4.88	–	–	–
Si	–	–	48.55	–	–	0.52	–	–	50.07
P	19.99	–	–	19.30	–	17.51	–	19.44	–
Ca	44.86	27.35	–	43.71	28.21	40.08	27.40	43.37	–

注:a、b、c后面的数字对应图5中的能谱分析数据。

2.2 白云石

白云石嵌布特征如图7所示,由图7可知,白云石多以泥晶微晶结构产出,多与磷灰石互相胶结,部分颗粒被包裹于磷灰石中。白云石背散射图像如图8所示,能谱分析结果列于表4中,由图8可知,白云石与磷灰石紧密共生,部分细粒级白云石被包裹在磷灰石中,白云石中还检测出Al、Si、K等杂质元素。白云石粒度分布及与其他主要矿物的定量嵌布关系如图9所示。由图9可知,白云石粒度集中在−417 μm,其中−38 μm含量较高,

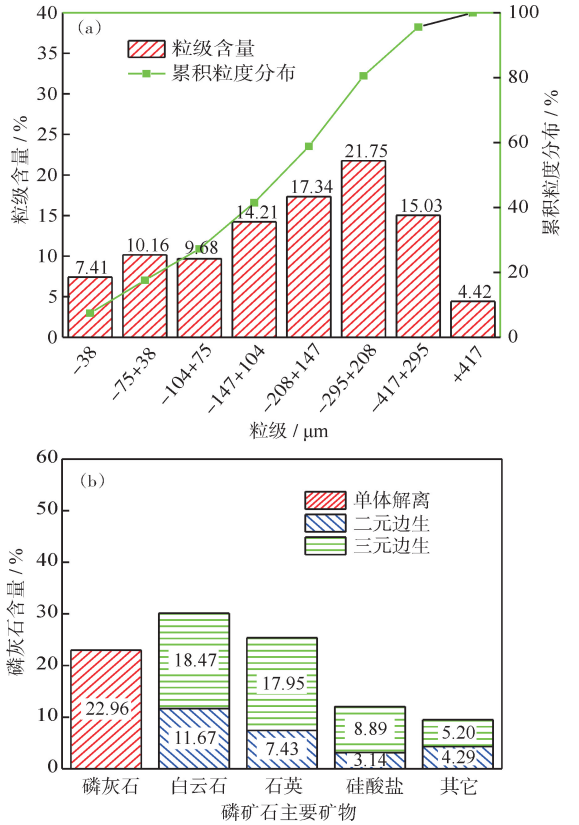
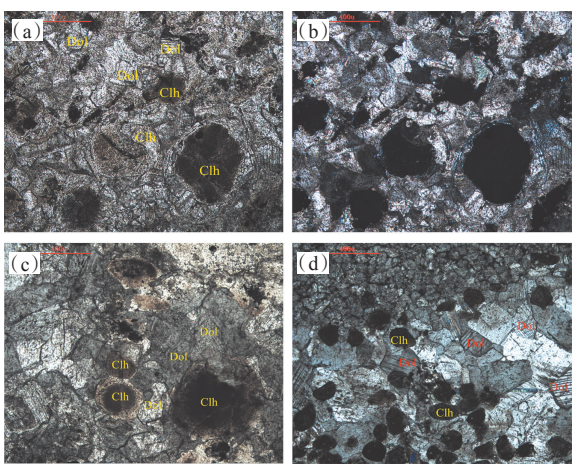


图 6 磷灰石粒度分布及与其他主要矿物定量嵌布关系:(a)粒度分布,(b)定量嵌布

Fig. 6 Particle size distribution of apatite vs. quantitative distribution of other major minerals: (a) paticle size distribution, (b) quantitative distribution



注:Clh:胶磷矿;Ap:磷灰石;Dol:白云石。

图 7 偏光显微镜下白云石的嵌布特征:(a,b,c)鲕粒状胶磷矿,细晶白云石胶结和胶磷矿内部包裹碳质[10×(a为单偏光,b,c为正交偏光)],(d)白云石作为填隙物充填于胶磷矿内碎屑[10×(正交偏光)]

Fig. 7 Embedded characteristics of dolomite under optical microscope: (a, b, c) oolitic collophane cemented with fine-crystalline dolomite. Carbonaceous material is encapsulated within the collophane[10× (a: plane-polarized light; b, c: orthogonal polarized light)], (d) dolomite, as interstitial material, fills collophane intraclasts[10× (orthogonal polarized light)]

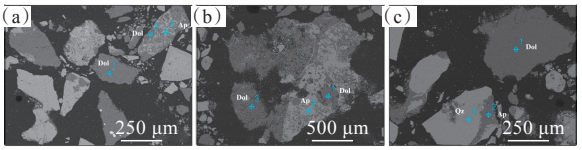


图 8　白云石扫描电镜背散射图像

Fig. 8　BSE of dolomite SEM

表 4　白云石扫描电镜能谱分析

Tab. 4　Energy spectrum analysis of dolomite SEM　%

元素	a-1	a-2	a-3	b-1	b-2	b-3	c-1	c-2	c-3
O	52.63	54.88	35.64	54.03	35.05	46.68	54.12	50.71	37.15
Mg	16.18	17.55	–	18.15	–	17.76	18.72	–	–
Al	2.07	0.65	0.63	–	–	0.57	–	–	–
Si	2.17	–	–	–	–	–	–	49.29	–
P	–	–	19.83	–	20.10	–	–	–	18.98
Ca	26.65	26.92	43.91	27.81	44.85	35.00	27.16	–	43.86

注：a、b、c后面的数字对应图8中的能谱分析数据。

占15.13%，−75 μm含量为28.15%。白云石的单体解离度较小，单体含量为37.79%，白云石主要与磷灰石连生，占50.18%。

2.3　主要元素赋存状态

磷及主要杂质元素在主要矿物中的含量及分配率如图10所示，由图10结合以上矿石的矿物组成、化学组成和能谱分析结果可知，矿石中P_2O_5含量为22.70%，矿石中磷元素几乎全部以磷灰石的

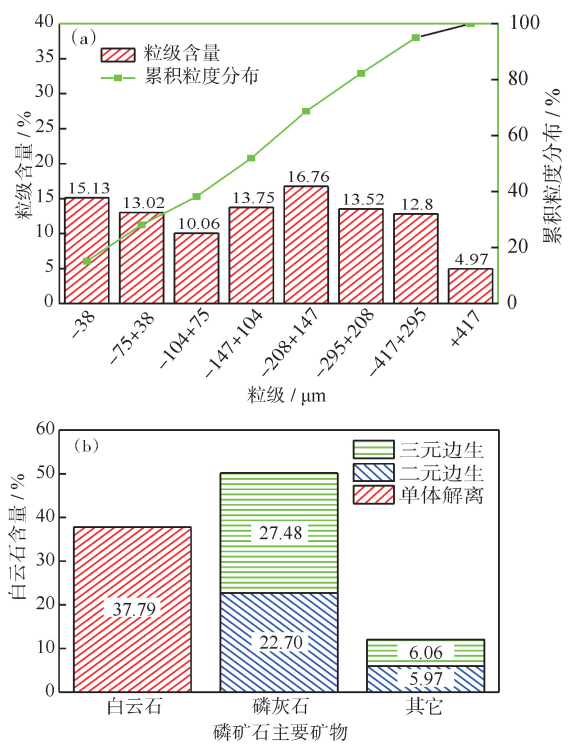


图 9　白云石粒度分布及与其他主要矿物定量嵌布关系：(a)粒度分布，(b)定量嵌布

Fig. 9　Particle size distribution of dolomite vs. quantitative distribution of other major minerals: (a) paticle size distribution, (b) quantitative distribution

形式赋存，是主要目的矿物。MgO含量为7.22%，镁主要赋存于白云石中，只有极少量镁赋存于硅酸盐矿物中。SiO_2含量为9.98%，硅主要赋存在石英中，少数赋存于硅酸盐矿物中，但矿石中硅及其他杂质元素如铝、铁含量较低，对应载体矿物的含量也较低。

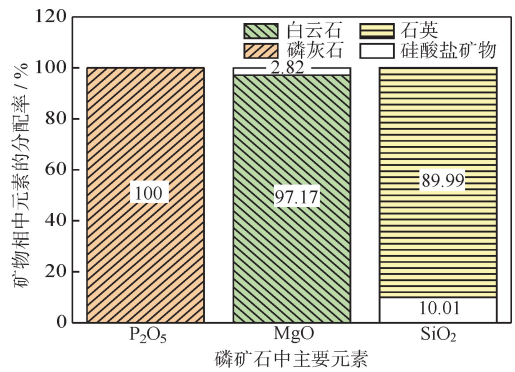


图 10　磷及主要杂质元素在主要矿物中的含量及分配率

Fig. 10　Contents and distribution ratios of P and other main impurity elements in main minerals

3　磨矿产品解离特性分析

将100 g磷矿石原矿加入刚玉球磨罐中，磨矿浓度60%，分别采用陶瓷球和陶瓷棒作为磨矿介质磨矿25 min，在XBM三辊四筒磨矿机中进行磨矿，得到棒磨和球磨产品磨矿细度分别为−75 μm占90.86%和86.50%。针对棒磨和球磨的磨矿产品，采用BPMA矿物参数自动分析系统统计其粒度分布，分析磨矿产品中主要矿物磷灰石、白云石和石英的解离特性，以及矿物与其他主要矿物的嵌布关系。磷灰石粒度分布及与其他主要矿物的定量嵌布关系如图11所示。由图11可知，棒磨和球磨产品中磷灰石颗粒平均粒径分别为20.0和33.3 μm。棒磨产品中磷灰石−10 μm粒级占18.25%，−38+10 μm、−75+38 μm和+75 μm粒级分别占52.23%、26.99%和2.51%；磷灰石单体解离度为50.7%，与白云石、石英和硅酸盐矿物连生的磷灰石含量分别为16.51%、7.09%和6.89%。球磨产品中磷灰石−10 μm粒级占13.11%，−38+10 μm、−75+38 μm和+75 μm粒级分别占41.23%、25.48%和20.17%；磷灰石单体解离度为48.09%，与白云石、石英和硅酸盐矿物连生的磷灰石含量分别为15.03%、14.93%和7.57%。结合粒度分布统计可知，磨矿后磷灰石粒度较细，大部分单体粒度小于75 μm，由于磷灰石与其他矿物连生或被包裹，导致细磨后单体解离度仍小于50%，需要继续细磨才能更好实现单体解离。

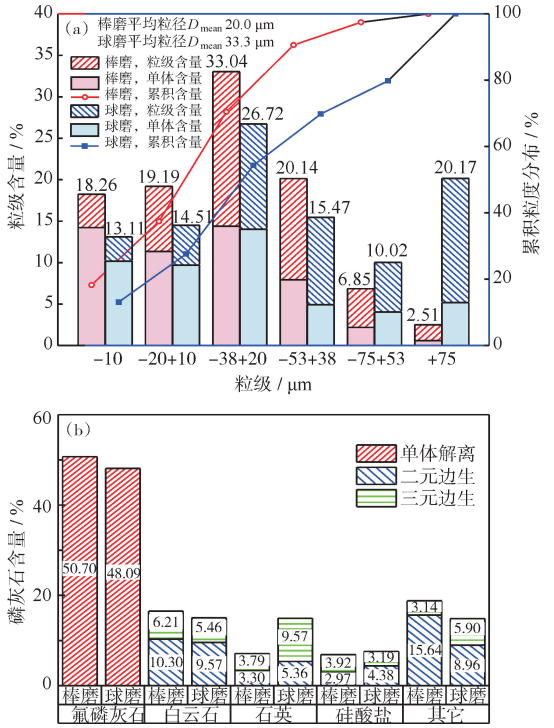


图 11　磨矿产品中磷灰石粒度分布及与其他主要矿物的定量嵌布关系：(a)粒度分布，(b)定量嵌布

Fig. 11　Particle size distribution of apatite vs. quantitative distribution of other minerals in grinding products: (a) paticle size distribution, (b) quantitative distribution

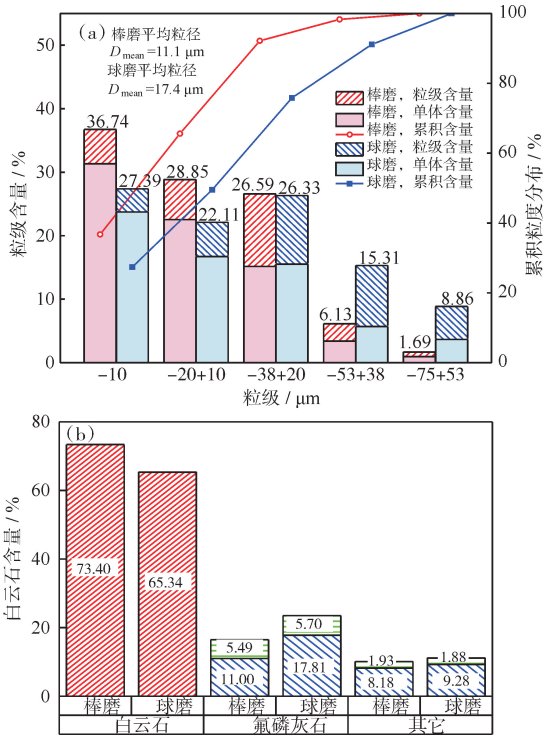


图 12　磨矿产品中白云石粒度分布及与其他主要矿物的定量嵌布关系：(a)粒度分布，(b)定量嵌布

Fig. 12　Particle size distribution of dolomite vs. quantitative distribution of other minerals in grinding products: (a) paticle size distribution, (b) quantitative distribution

磨矿产品中白云石粒度分布及与其他主要矿物的定量嵌布关系如图12所示。由图12可知，棒磨和球磨产品中白云石颗粒平均粒径分别为11.1和17.4 μm。棒磨产品中白云石−10 μm粒级占36.74%，−38+10 μm、−75+38 μm粒级分别占55.44%和7.81%；白云石单体解离度为73.40%，与磷灰石和其他矿物连生的白云石含量分别为16.49%和10.11%。球磨产品中白云石−10 μm粒级占27.39%，−38+10 μm、−75+38 μm粒级分别占48.44%和24.16%；白云石单体解离度为65.34%，与磷灰石和其他矿物连生的白云石含量分别为23.51%和11.16%。结合粒度分布统计可知，与磷灰石相比，白云石可磨度更低，更容易细磨，单体解离度更高，但大部分单体颗粒粒度小于53 μm，细磨后仍有约30%的白云石与其他矿物连生或被包裹。

4　矿石中影响磷回收的矿物学因素

矿石中含磷矿物与脉石矿物的嵌布特征是影响磷回收的主要因素之一。磷灰石主要以镶嵌、包裹等形式与白云石紧密连生，白云石与磷灰石紧密嵌布，决定了含磷矿物在磨矿时较难与脉石矿物很好的单体解离；其次是矿石中含磷矿物与脉石矿物嵌布不均匀，且嵌布粒度细，属于极不等粒嵌布，这使得磷灰石与白云石的解离困难，从而影响精矿中P_2O_5含量和P_2O_5回收率的提高。此外，矿石中白云石含量较高，其矿物量占总矿物量的26.70%，与有用矿物磷灰石嵌布关系紧密，虽然提高矿石的磨矿细度可增加矿物解离度，但由于白云石硬度较低，在磨矿过程中易泥化，无论是棒磨还是球磨，磨矿产品中−10 μm含量均较高，且此时仍有大于30%的白云石未单体解离。因此，通过磨矿进一步增加白云石单体解离度会加重白云石的泥化，从而增加磷灰石与白云石浮选分离的难度，使得磷精矿中镁含量难以降低，对选别流程造成负面影响。

5　浮选试验

由上述研究可知，磷矿石原矿有用矿物(磷灰石)和主要脉石矿物(白云石)嵌布粒度较细，矿物之间紧密连生，需要细磨才能使磷灰石和白云石单体解离，但脉石矿物白云石在磨矿过程中易泥化，体系中过多细泥会降低磷灰石和白云石分选选择性，因此在保证矿物单体解离的基础上，磨矿细度又不宜过高。

采用GJBW脂肪酸类捕收剂，H_2SO_4/H_3PO_4作

为抑制剂，对钙镁质磷矿石进行反浮选试验。磨矿方式分为实验室仿闭路磨矿和开路磨矿两种，闭路磨矿时，将原矿加入刚玉球磨罐中，加水后磨矿2 min，将磨矿产品中细颗粒筛出，筛上产品返回刚玉研磨罐进行下一轮磨矿，直到所有产品都通过筛子。试验分别采用150和106 μm孔径筛子进行筛分，得到两种闭路磨矿产品，其磨矿细度分别为−75 μm占63.9%和−75 μm占71.6%。第2种磨矿方式为开路磨矿，将原矿加入刚玉球磨罐中，加水后一次磨矿到一定的时间获得磨矿产品。浮选试验流程如图13所示，浮选结果列于表5中。不同磨矿条件下产品粒度分布如图14所示，由图14可知，在相同的磨矿细度条件下，开路磨矿−30 μm细粒级和+100 μm粗粒级含量都更高，闭路磨矿−100+30 μm中间粒级含量更高，闭路磨矿每次磨矿时间短，避免了过磨[14]。

由表5可知，开路磨矿时，在相同磨矿细度条件下，使用H_3PO_4作为调整剂时浮选效果优于H_2SO_4。使用H_2SO_4作为抑制剂时，磨矿细度为−75 μm占72.4%时，磷精矿P_2O_5含量为31.88%，P_2O_5回收率为93.08%，MgO含量为1.57%，MgO脱除率为86.19%；磨矿细度为−75 μm占86.5%时，磷精矿P_2O_5含量为30.84%，P_2O_5回收率为93.23%，MgO含量为2.03%，MgO脱除率为82.16%；磨矿细度增加后磷精矿P_2O_5含量和MgO脱除率均降低。使用H_3PO_4作为抑制剂时，也得到了相似的试验结果。说明随着磨矿细度的增加，虽然矿物解离程度提高了，但磨矿产品泥化程度也增加了，反而恶化浮选过程，这验证了磷矿石磨矿产品解离特性的分析结果。当采用闭路磨矿时，使用H_2SO_4作为抑制剂，在与开路磨矿相当的磨矿细度(−75 μm占71.6%)条件下，磷精矿P_2O_5含量为32.61%，P_2O_5回收率为91.87%，MgO含量为1.07%，MgO脱除率为91.32%，磷精矿P_2O_5含量和MgO脱除率

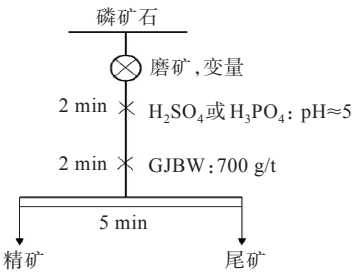


图13　浮选试验流程

Fig. 13　Flowsheet of flotation experiment

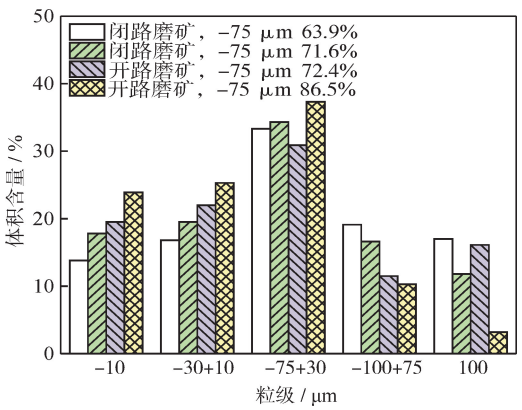


图14　不同磨矿条件下产品粒度分布

Fig. 14　Particle size distribution of phosphate ore under different grinding conditions

表5　浮选试验结果

Tab. 5　Flotation test results

磨矿方式	调整剂	磨矿细度−75 μm / %	产品名称	γ / %	ω(P_2O_5) / %	ε(P_2O_5) / %	ω(MgO) / %	ε(MgO) / %
开路磨矿	H_2SO_4	72.4	精矿	68.29	31.88	93.08	1.57	13.81
			尾矿	31.71	5.11	6.92	21.11	86.19
			原矿	100.00	23.39	100.00	7.77	100.00
		86.5	精矿	69.34	30.84	93.23	2.03	17.84
			尾矿	30.66	5.07	6.77	21.15	82.16
			原矿	100.00	22.94	100.00	7.89	100.00
	H_3PO_4	72.4	精矿	68.54	31.97	94.30	1.27	11.30
			尾矿	31.46	4.21	5.70	21.72	88.70
			原矿	100.00	23.24	100.00	7.70	100.00
		86.5	精矿	71.09	31.77	95.54	1.91	17.43
			尾矿	28.91	3.64	4.46	22.25	82.57
			原矿	100.00	23.64	100.00	7.79	100.00
闭路磨矿	H_2SO_4	63.9	精矿	64.64	31.99	91.49	1.29	10.18
			尾矿	35.36	5.44	8.51	20.80	89.82
			原矿	100.00	22.60	100.00	8.19	100.00
		71.6	精矿	64.90	32.61	91.87	1.07	8.68
			尾矿	35.10	5.33	8.13	20.82	91.32
			原矿	100.00	23.04	100.00	8.00	100.00

均高于开路磨矿。当磨矿细度为-75 μm占63.9%时，磷精矿P_2O_5含量为31.99%，P_2O_5回收率为91.49%，MgO含量为1.29%，MgO脱除率为89.82%，此时磷精矿P_2O_5含量和MgO脱除率也均高于开路磨矿。因此，实际生产过程中，如何在磨矿过程中增加矿物单体解离度的同时降低白云石等易泥化矿物的过磨，对提高磷精矿P_2O_5含量和P_2O_5回收率以及MgO脱除率具有重要意义。

6 结 论

（1）中低品位钙镁质磷矿石主要包括块状和条带状构造，显微镜下可见胶态隐晶质、鲕粒砂屑和包裹结构。矿石中主要有用矿物为胶状磷灰石集合体及少量微晶状和柱状磷灰石，脉石矿物主要为白云石和少量石英。磷灰石和白云石分别占63.47%和26.70%。矿石中P_2O_5含量为22.70%，几乎全部赋存于磷灰石中；需要脱除的主要杂质MgO含量为7.22%，主要分布在白云石中，少量分布在硅酸盐矿物中。磷灰石单矿物中P_2O_5和CO_2含量分别为38.00%和1.90%，为低碳氟磷灰石。矿石中磷灰石和白云石嵌布粒度较细，磷灰石多以镶嵌、包裹等形式与白云石、石英紧密共生，属于极不等粒嵌布，导致磨矿过程中难以实现单体解离，对MgO的脱除和P_2O_5的回收影响较大。

（2）当磷矿石磨矿细度-75μm大于85%时，球磨和棒磨后矿石中磷灰石单体解离度均接近50%，白云石单体解离度明显高于磷灰石，但矿石中仍有约30%的白云石和50%的磷灰石未解离，且-10 μm细泥含量均较高。矿石中磷灰石和白云石单体解离度越高，泥化程度越大，且白云石泥化程度明显大于磷灰石。相近磨矿细度下，棒磨导致的白云石泥化程度比球磨更显著。通过磨矿调控磷矿石中矿物单体解离度和泥化程度的平衡关系，有利于磷灰石和白云石浮选分离。

（3）磷矿石中磷灰石和白云石嵌布粒度较细，矿物之间紧密连生，需要细磨才能使磷灰石和白云石单体解离，但脉石矿物白云石在磨矿过程中易泥化，体系中过多细泥会降低磷灰石和白云石浮选选择性，在保证矿物单体解离的基础上，磨矿细度就不宜过大。通过闭路磨矿及时分出合格粒级颗粒，在一定程度上减少了钙镁质磷矿石磨矿产品中细粒级含量，浮选磷精矿P_2O_5含量和MgO脱除率均得到改善。在实际生成过程中，采用合适的磨矿方式、磨矿细度及流程结构，通过磨矿调控磷矿石中矿物单体解离度和泥化程度的平衡关系，对提高磷精矿P_2O_5含量和P_2O_5回收率以及MgO脱除率具有重要意义。

参考文献

[1] 周娜，胡锦刚，池汝安，等.复合菌分解低品位磷矿研究[J].武汉工程大学学报，2023，45(5)：536-542.

[2] 张亚明，李文超，王海军.我国磷矿资源开发利用现状[J].化工矿物与加工，2020，49(6)：43-46.

[3] US Geological Survey，U.S. Department of the Interior. Mineral commodity summaries 2025[R].(2025-01-31)[2025-06-06].https://www.usgs.gov/publications/mineral-commodity-summaries-2025.

[4] 张覃，李显波，卯松，等.分子模拟在磷矿浮选研究中的应用进展[J].矿业科学学报，2023，8(1)：102-114.

[5] 中华人民共和国自然资源部.2022年全国矿产资源储量统计表[R].北京：自然资源部，2023.

[6] 张汉泉，周峰，许鑫，等.中国磷矿开发利用现状[J].武汉工程大学学报，2020，42(2)：159-164.

[7] YE J J，WANG X C，LI X B，et al. Effect of dispersants on dispersion stability of collophane and quartz fines in aqueous suspensions[J]. Journal of Dispersion Science and Technology，2018，39(11)：1655-1663.

[8] HUANG X F，ZHANG Q. Interaction behavior between coarse and fine particles in the reverse flotation of fluorapatite and dolomite[J]. Langmuir，2023，39(36)：12931-12943.

[9] ZENG M Y，YANG B Q，GUAN Z W，et al. The selective adsorption of xanthan gum on dolomite and its implication in the flotation separation of dolomite from apatite[J]. Applied Surface Science，2021，551：149301.

[10] 黄子杰，孙伟，高志勇.磨矿对矿物表面性质和浮选行为的影响[J].中国有色金属学报，2019，29(11)：2671-2680.

[11] SANTANA R C，DUARTE C R，ATAÍDE C H，et al. Flotation selectivity of phosphate ore：effects of particle size and reagent concentration[J]. Separation Science and Technology，2011，46(9)：1511-1518.

[12] 黄志良.磷灰石矿物材料[M].北京：化学工业出版社，2008.

[13] 刘魁梧.成岩作用中磷灰石矿物的演变[J].地质学报，1989(4)：310-323，385-386.

[14] CHEN K Q，YIN W Z. Investigation of liberation properties and mineral fracture mechanisms of iron ores with different mineral grain sizes at different grinding degrees[J]. Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review，2024，45(5)：397-406.

本文编辑：张 瑞