

文章编号:1674-2869(2017)06-0622-07

# 华南磷块岩地质构造及其力学性能的对比研究

潘 登<sup>1,2</sup>, 夏元友<sup>1\*</sup>, 张电吉<sup>2\*</sup>, 罗惠华<sup>2</sup>, 吝曼卿<sup>2</sup>, 柴修伟<sup>2</sup>

1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070;

2. 武汉工程大学资源与土木工程学院, 湖北 武汉 430074

**摘 要:**为掌握不同地域的磷块岩蕴藏地层的构造特点、高品位富矿分布、脉石结构以及力学性质之间的相互作用机理. 文章对我国中南北磷矿和西南贵州磷矿进行对比研究. 根据两矿区的地勘资料, 同时结合电镜扫描、声波透射试验、破碎筛分等检测途径, 从磷块岩的地层分布、构造类型、矿石结构、完整性及破碎后的颗粒级配等方面逐一分析, 结果显示: 首先西南片区磷块岩的震旦纪临海地理位置导致该区域矿体  $P_2O_5$  平均含量高, 富矿储量大且共生矿物种类多, 但岩体更为破碎. 其次宏观上岩体内部裂隙等弱面控制着磷块岩岩体的稳定性, 而在细观层面, 晶间结合力是矿石力学性质的控制因素.

**关键词:** 矿区地质; 矿石结构; 力学性质; 瓦屋矿段; 马路坪矿段

中图分类号: P554 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2017.06.017

## Comparative Study on Geological Structure and Mechanical Feature of Phosphorite in South China

PAN Deng<sup>1,2</sup>, XIA Yuanyou<sup>1\*</sup>, ZHANG Dianji<sup>2\*</sup>, LUO Huihua<sup>2</sup>, LIN Manqing<sup>2</sup>, CHAI Xiuwei<sup>2</sup>

1. Civil Engineering and Architecture Institute, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Resources and Civil Engineering Institute, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract:** To grasp the interaction mechanism of the structural characteristics of phosphorus block in different regions, a comparative study on distribution of high-grade ore, gangue structure and mechanical properties for different phosphate ores from Hubei and Guizhou was carried out. According to geological survey data of two mining areas, the stratigraphic distribution, tectonic type, ore structure, integrity and granular gradation of phosphate rock were analyzed systematically by the electron microscopy, the acoustic transmission test and the crushing screening. As the results shown, the sepecial coastal geography in Sinian Period results in the phosphate ore with a large reserves in the southwest area containing a high content of  $P_2O_5$ , although it contains many kinds of paragenic ores so as to be easily broken. Furthermore, the stability of the rock is controlled by the internal fissure at macro-level, but the inter crystal force is the controlling factor for the mineral mechanical property at micro-level.

**Keywords:** ore deposit geology; ore structure; ore composition; Hubei phosphate ore; Guizhou phosphate ore

收稿日期: 2017-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(51474159, 51504167)

作者简介: 潘 登, 博士研究生. E-mail: 179813945@qq.com

\*通信作者: 夏元友, 博士, 教授. E-mail: 447233146@qq.com

张电吉, 博士, 教授. E-mail: dianjizhang@wit.edu.cn

引文格式: 潘登, 夏元友, 张电吉, 等. 华南磷块岩地质构造及其力学性能的对比研究[J]. 武汉工程大学学报, 2017, 39(6): 622-628.

PAN D, XIA Y Y, ZHANG D J, et al. Comparative study on geological structure and mechanical feature of phosphorite in south China[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39(6): 622-628.

我国南部各磷块岩矿区远古时期的地理位置及成矿环境及后期的地质运动导致了磷矿蕴藏、分布、品位、力学性质等方面各具特点. 目前学术界普遍认同浅海古生物繁衍消亡沉积的成矿模式. 认为磷块岩分布、矿石强度等岩石学特征受到了来自藻类等生物有机质的聚磷作用、生物富集和环境变化的影响<sup>[1-2]</sup>; 部分学者还从生物化学反应的角度揭示了磷灰石化合物形成、矿化结晶原理与过程<sup>[3-4]</sup>. 所以对于磷矿的形成因素及分类已有了较全面的探讨, 但各地域的磷块岩分布、构造特点以及力学性质存在明显差异, 导致其巷道掘进、采场支护、矿石粉碎分级等方面不尽相同, 应该深入研究其中的作用机理.

## 1 研究方案

为了掌握不同区不同类型域磷块与其力学性

质之间的内在联系, 文章选取我国中南海北高岚镇瓦屋矿段和西南贵州金钟镇马路坪矿段作为研究对象. 方案如下: (1) 依据两地震旦纪时期的古地理位置和地质构造信息, 分析磷矿富集成岩的过程及后期地质运动导致矿体蕴藏环境的改变. (2) 采用电子显微镜 SEM 测定各类磷块岩晶体嵌布粒度及方式、裂面破碎形貌. (3) 通过应力-应变试验、波速测试和矿物粉碎级配试验, 探讨分析不同地区磷块岩受力变形规律、完整性及晶间结合力的强度机理.

## 2 矿区地质

### 2.1 矿区远古地形

通过中国古地理图集查询所选矿段的对应成矿时期的空间位置. 图 1 为中国华南地区早震旦纪古地理图.

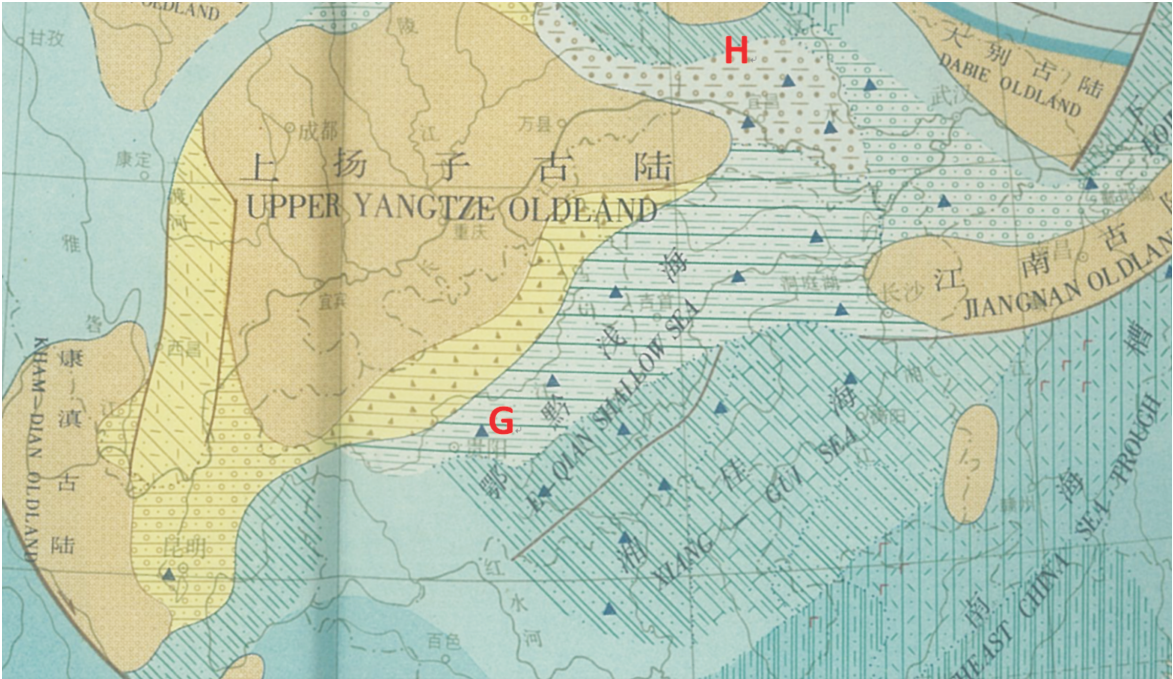


图 1 中国华南地区早震旦纪古地理图

Fig. 1 The paleogeographic map of South China in early sinian period

通过图 1 得知, 在距今 8 亿年~15 亿年前的元古代震旦纪时期, 我国大部分地区还处于海平面以下, 其中包括现今的中南湖北和西南贵州地区. 中南湖北矿区位于由大别古陆、江南古陆和上扬子古陆合围的浅海中心地带<sup>[5]</sup>, 如图 1 中字母 H 的位置, 属内陆浅海, 水动力条件较差, 外部极端天气较难对其形成影响, 适合条带型矿石的沉积矿化; 西南贵州矿区位于上扬子古陆大陆架南部, 通过鄂黔浅海地区与中南湖北矿区相连, 如图 1 中字母 G 的位置, 在其西南部的织金和东北部的开阳

均赋存大型磷块岩矿产, 其矿床的平面分布与沿上扬子古陆东南沿岸浅海走向相吻合. 作为沿海地区直接面对古特提斯海(古特提斯海是该时期我国古大陆南方的大洋). 由洋流搬运作用而连续供应的藻类养分, 在此大规模富集<sup>[6]</sup>, 从而为含磷生物的繁衍生息提供稳定的食物基础, 长时期生物遗体沉积、集聚、矿化形成磷块岩. 同时期古生物通过鄂黔浅海向内陆迁徙扩展到矿物养分稍低中南地区, 这就揭示了以瓦屋矿段为代表的中南湖北磷块岩储量及品位较低的原因. 但毫无屏障

的地理位置使震旦纪的西南贵州地区更易遭受超强风暴潮等海洋性极端天气的袭击,巨浪及裹挟的砂石对浅海海床上岩化不久的矿石形成了强烈冲击,冲击作用破坏了脆弱的沉积岩,使其开裂、粒化,混合. 冲击强度由上至下逐渐降低,使矿岩颗粒粒径不一. 贵州矿石表现陆表海泥砂质组合和海陆交互含磷灰质粗碎屑组合结构形式.

2.2 磷块岩地层分布

根据出露地表的岩层剖面及探矿资料所显示的新形象,将两地区磷块岩地层按由近至远的顺序整理形成磷块岩地层信息表,如表 1 所示.

表 1 磷块岩地层信息		
Tab. 1 Stratum information of phosphorite		
地层名称 stratigraphic name	中南瓦屋矿段 Wawu ore blocks in South Central China	西南马路坪矿段 Maluping ore blocks in Southwest China
寒武系下统 水井沱组	岩层底部偶见厚度 0 m ~ 0.1 m 低品位含磷白云石	未见含磷地层
震旦系上统 灯影组	上部灰色薄层状细晶白云岩,层理结构,底部灰黑色炭质泥岩含 0.15 m 致密块状磷块岩	灰色中厚层细晶白云岩稳定,底部为矿体直接顶板浅灰层状含锰白云岩,平均厚度 1 m
		1.碎屑柱灰白色白云质磷块岩,见动物胚胎化石,平均厚度 15 m 2.灰黑色含磷白云岩,现岩溶遗迹,平均厚度为 1.5 m <sup>[7-8]</sup> 3.黑色球形白云质磷块岩和黑色泥晶质块状磷块岩,平均厚度 16.5 m <sup>[9-10]</sup> 4.灰绿色细至中粒石英砂岩,远古海床地形特点,平均厚度 9.4 m <sup>[12]</sup>
震旦系下统 陡山沱组	下部为含磷富矿矿床 Ph1 <sup>1</sup> ~ Ph1 <sup>3</sup> ;脉石为白云质条带、块状、泥质条带,厚度 3.1 m~10.5 m,平均品位 25.78%,品位较稳定 <sup>[11]</sup>	

以上含磷地层信息比较显示,位于我国中南和西南地区磷矿床的底层分布顺序几乎完全吻合,主要及高品位磷矿层的地质年代均为震旦系陡山沱组,且都以碳酸盐矿物为顶板岩体,硅酸盐矿物为底板岩体. 成矿年代距今 6 亿~8 亿年,当时中国大陆处于向上抬升的稳定期,符合学者们对于古生物类型聚磷的推理. 但中南矿区成矿过程更长,横跨震旦系上统灯影组,持续至寒武系下统水井沱组,应有其它途径的藻类微生物食物来源作为聚磷的基础条件,且矿岩的条带状层理普片而清晰,所以该地区磷矿集聚沉积条件简单而富有规律. 西南矿区矿床的各分层呈现多样化,首先

含磷岩层厚度大,品位更高,见动物胚胎化石,推测该地区优越的滨海地形促进生物繁衍进化过程,以及更早期的含磷矿物的规模性富集. 另一方面,远古岩层中的岩溶遗迹和特殊的球形磷块岩构造,呈现了该地区成矿后期海平面反复涨退和强力冲刷的极端外力侵蚀结果.

2.3 矿岩构造比较分析

通过对选取矿段周边地貌的实地踏勘,采集岩石标本和向矿山所属地质调查部门取得的地理资料等途径,汇总形成矿段地质构造对比表,如表 2 所示.

表 2 矿段地质构造对比		
Tab. 2 Contrast of geological structure of ore block area		
地质信息 geological information	中南瓦屋矿段 Wawu ore blocks in South Central China	西南马路坪矿段 Maluping ore blocks in Southwest China
矿层倾角	3°~7°	15° ~ 43°
矿层埋深	212 m ~ 645 m	15 m ~ 781 m
峰谷落差区间	240 m ~ 510 m	330 m ~ 850 m
断层数量与类型	9,正断为主	16,正逆个半

两矿段地形均为海拔较高的山区,矿层分布受断层影响,都存在断层与褶皱,是受长时期板块运动挤压的影响所致,但各具特点. 我国中南部含磷矿层埋藏较深,水平走向较稳定,大型起伏少见,矿体及围岩主要受竖直方向应力作用,固结岩化程度高,岩体完整性更好. 更多的断层数量出现在西南地域的矿区,且该地域岩层水平不连续,走向不完全一致,断距和倾角明显增多,局部矿层直立反转,且高低落差是中南矿区的 1.5 倍,地质构造复杂多变. 所以,虽然同形成于震旦纪的华南磷矿区,但西南矿区成矿后,由板块运动挤压造成的横向应力水平更高,这会导致岩层中的矿石形成较多的结构缺陷.

3 矿物结构微观分析

磷块岩在强大地应力的长期压密作用过程中矿化形成了晶体构造,不同强度压密作用和矿物组成导致晶格生长方式及细观结构各异,其细观结构对于矿石构造乃至岩体的力学性质至关重要. 选取两矿段的主要矿物磷灰石,通过电子显微设备呈现其各自裂面的微观形貌,观测结果如图 2 所示.

图 2 是湖北瓦屋与贵州马路坪磷灰石电镜扫描 SEM 结果,图 2(a) 显示了湖北地区磷灰石断裂面微观晶体排列形貌,晶团粒度较为均匀,排列整



齐、紧凑. 晶体间无明显空隙裂缝存在,具有较规则的六方晶系特征;而图2(b)显示的是贵州马路坪矿段磷灰石断面,图2(b)左下部分胶磷矿颗粒属于大粒径晶格,具有规则微晶形貌,磷灰石晶体表面经常夹杂有石英、长石、黏土类脉石矿物晶体及碳酸盐类矿物等小粒径脉石,多种矿物晶体相互无序混合镶嵌,使磷灰石晶格的衍生种类增多,空间晶体间的结合键能,复杂多变,低能级晶界构成的弱面网大幅降低了矿石的强度和岩体的稳定性.

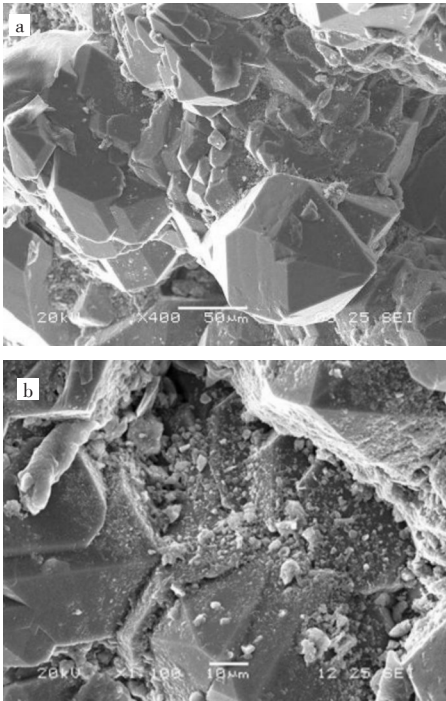


图2 磷块岩SEM示意图(a)瓦屋磷灰石(b)马路坪磷灰石  
Fig. 2 SEM images of phosphorite  
(a)Apatite in Wawu; (b)Apatite in Maluping

4 矿石力学性能测试分析

4.1 应力-应变试验

岩石的应力-应变试验就是通过材料试验机在对标准圆柱体岩石试件进行轴向压缩时记录岩石在该受力方向上的应变值,模拟岩体的的受力变形过程,根据应力-应变曲线求得矿石的变形模量.为掌握矿层走向与其力学性能的关系,试验前在矿层3个空间方向钻取磷块岩芯样(将与矿层走向定为X方向,矿层倾向定为Y方向,竖直向定为Z方向),后加工成直径50 mm,高度100 mm圆柱体试件.试验结果如图3所示.

应力-应变测试结果显示,瓦屋矿段磷块岩试件的极限抗压强度均值为174.6 MPa,其承载能力是马路坪矿段磷块岩的2.2倍,如图3(a)所示.由测试曲线弹性阶段的斜率计算得到的磷块岩变形

模量均值,瓦屋磷块岩为84.3 GPa,马路坪矿段磷块岩为29.4 GPa,如图3(b)所示.可知同等荷载作用下西南矿区的磷块岩变形值是中南矿区的2.8倍,表现出更高的塑性.

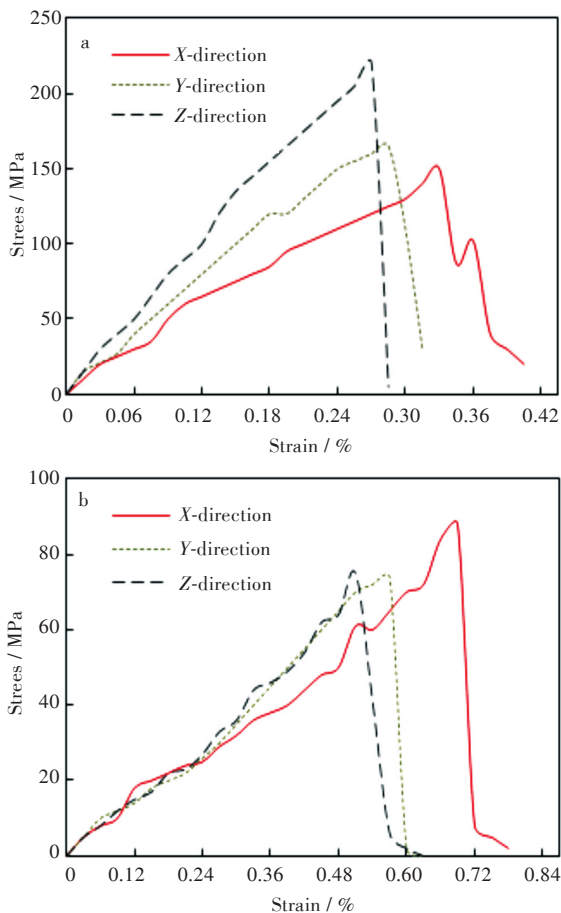


图3 磷块岩应力应变曲线  
(a)瓦屋磷块岩(b)马路坪磷块岩  
Fig. 3 Strss-strain curves of phosphorite  
(a) Phosphorus in Wawu; (b) Phosphorus in Maluping

矿层空间走向与其强度的对应关系:瓦屋磷块岩测试结果显示,两个水平方向的强度都接近150 MPa,但竖直方向的极值达到了224.1 MPa,反映出作为近乎水平分布的中南地区磷块岩矿层,竖直方向的重力为其控制应力,水平向应力较低,矿体在长期稳定的巨大重力下固结、岩化、结晶程度高,晶体排列整齐而紧密,虽其中磷灰石条带存在地震作用产生的平行裂缝,但方向都与重力方向重合,且都被白云石条带阻断隔离,形成了水平向约束,削弱了竖向裂缝对于该方向承载力的影响.马路坪磷块岩3个方向的极限强度都较接近,体现出因板块运动挤压造成的大角度倾斜矿层的构造应力环境.这导致在最大主应力方向和最小主应力方向上,都存在角度30°~60°间的矿层接触面,其中结合程度最低的就形成了滑裂面,加上远

古时期该地区的地层因外力作用而破碎,各种矿物颗粒的无序混杂,都严重降低了以上两个方向磷块岩的强度.

4.2 波速试验

岩体在具有明显动载作用的工况下,超出了理想状态下推定的静力学原理和方程的适用范围<sup>[13]</sup>. 比如在矿山法掘进中的爆破冲击以及地震作用等情况下,需要采取岩体动力学方法研究. 岩体弹性力学的拉梅运动方程,准确描述了岩石密度、纵横波速度、动弹性模量和动泊松比之间的定量关系. 且我国现行的《工程岩体质量分级》、《公路工程地质勘察规范》、《水利水电工程地质勘察规范》等国家现行行业标准中都以岩石纵波波速作为评定岩体完整性的重要依据<sup>[14-16]</sup>. 所以采用波速试验对湖北和贵州地区磷块岩的完整性进行比较研究.

声波仪型号 RSM-SY5、平面换能器的频率为 100 kHz,测试分为室内岩块波速和现场岩体波速两种情况进行,试件编号中“H”代表中南湖北地区试件,“G”代表西南贵州地区试件,“K”代表岩块,“T”代表岩体. 完整性系数等于岩体波速的平方除以岩块波速的平方. 磷块岩声波测试结果如表 3 所示.

表 3 磷块岩声波测试结果  
Tab. 3 Acoustic wave test of phosphorite

试件 编号 specimen number	含水 状态 moisture state	测点间距 station spacing / mm	声时 sound transit-time / μs	波速 longitudinal wavevelocity / (km/s)	岩体完整 性系数 rock-mass integrity index
HK-01	干燥	100.24	21.7	4.62	0.69
HT-01	干燥	200.68	52.4	3.83	
HK-02	干燥	100.18	20.3	4.93	0.72
HT-02	干燥	200.12	47.9	4.18	
HK-03	干燥	101.32	19.4	5.22	0.65
HT-03	干燥	199.78	47.4	4.21	
GK-01	干燥	99.86	25.6	3.90	0.47
GT-01	干燥	200.84	75.3	2.67	
GK-02	干燥	100.08	26.1	3.83	0.43
GT-02	干燥	201.14	79.8	2.52	
GK-03	干燥	99.94	28.5	3.51	0.49
GT-03	干燥	200.68	81.9	2.45	

波的传播理论中最重要的一条是:机械波在均质同相的介质里传播速度是恒定的,但测试结果显示同一采样点的同种类磷块岩的岩块波速明显高于岩体波速,这是因为在岩块中极少存在阻挡机械波传播的裂隙等力学缺陷,其传递路径几乎是直线的,相反在岩体中机械波发射点与接收点之间的直线路径上存在较多裂隙,波得绕开这些裂隙向前传递,其路线是非直线型的,也就是说波速计算中虽然用相同的外部测点间距作为分子,但岩体中机械波路径更长,其分母即传递时间更多,所以波速相对减小. 也就是岩体中裂隙等内部弱面的数量是决定其完整性的重要因素. 据此,表 3 所反映的测试结果显示,湖北地区磷块岩波速为贵州地区 1.3 倍,完整性系数为 1.5 倍. 证明,作为影响磷块岩岩体力学性质的内部裂隙,西南地区矿体更多,更为发育.

4.3 矿物晶体结合力——粒度分布

破碎是磷矿选矿的第一道工序. 矿石矿物的晶间结合能直接关系到该工艺能源机械消耗. 文章采取相同破碎条件下磷块岩各矿物晶团的粒径分布与变化,建立能耗与矿物晶体间结合力强度等级之间的联系. 测试分两个部分:1) 确定关键粒径破碎前后各矿物组分变化,如表 4 所示;2) 不同地区磷块岩破碎后颗粒级配,其测试结果如表 5 所示.

首先取 300 g 经初碎后中间粒径为 2 cm 混合磷块岩作为试样,放入高速万能粉碎机进行定时粉碎 45 s,用孔径为 0.08 mm 标准筛对碎后磷块岩粉末进行机械筛分,通过全化学分析方法测定破碎前后原矿和筛上物矿物的组分种类及质量占比. 构成岩石的矿物在同等破碎能的做功下,因为分子间结合力的不同,而产生的解离效果亦各不相同.

从表 4 可以看出,矿物中的重要组分  $P_2O_5$  占比从 25.01% 增加到 40.06%,而质量分数占比明显降低的为硅质白云岩等脉石矿物,说明同等破碎耗能条件下,磷酸盐矿物比硅酸盐矿物更难破碎,其晶体尺寸和晶间结合力更大,也就是条带型磷块岩中的磷灰石组分强度高.

表4 破碎筛分前后矿物组分变化  
Tab. 4 The mineral composition changes before  
and after the crushing sieve %

试样状态 specimen status	组分含量 component of content						
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O
块样(碎前)	25.21	7.04	35.86	25.17	2.05	3.81	0.98
颗粒(碎后粒径 >0.08 mm)	40.06	2.89	26.37	19.74	1.53	2.09	0.51

表5 粉碎后颗粒级配  
Tab. 5 Grain composition after crushing g

矿石所在 矿段 ore areas	粒级质量 fraction mass							
	<0.074	<0.15	<0.315	<0.63	<1.25	<2.5	<5	<10
瓦屋	24.88	39.14	67.22	101.71	115.93	152.42	180.07	195.44
马路坪	56.21	78.90	101.31	130.18	156.27	180.66	196.79	196.79

第二步,为比较不同结构矿石的晶间结合力大小,分别抽取瓦屋和马路坪矿段工业品位为28%的富矿矿石各200 g进行45 s破碎试验,之后分别称取每级孔径标准筛筛上物的质量进行粒径分析,结果如表5所示。

由表5两地矿石样品破碎后的级配结果可以发现,测试数据显示孔径小于2.5 mm的各级粒径矿石的累计质量西南马路坪矿段矿石都较大,特别在0.15 mm~1.25 mm的小粒径区段,其各级质量达到瓦屋矿段的1.5到2倍。说明相同等级破碎强度,相同破碎耗时,西南地区磷块岩粒化更完全,也就是说要达到相同粉碎粒径级别,该地区矿石的耗能要减少50%,可以推测其磷灰石与其它矿物晶体间的晶间结合力较小、磷块岩岩石的强度较低。

5 结 语

综上所述,得出以下结论:

- 1)地质资料对比分析结果明确显示,湖北片区磷块岩埋藏地层相对稳定,断层和褶皱等地质构造较少,条带型沉积界限明显而均匀,矿石结构简单,应是震旦纪较为封闭的成矿环境所致,也就是说远古时期的湖北中西部地区属三面环山的内海浅滩地形,使其中的沉积物免于遭受同时期贵州滨海地形来至远古海洋强烈风暴潮冲刷和搬运作用,从而经过数亿年的持续堆积静态沉积固结,所以含磷矿物石化程度更高。
- 2)应力-应变测试结果显示西南地区磷块岩受力后变形较大,承载力低,应是其内存在较多空间

弱面所致。破碎筛分试验结果显示磷灰石晶间结合力明显强于其主要脉石矿物白云石,是指在完整密实的条件下,磷灰石的硬度高于白云石等脉石矿物。从矿石品位角度看,贵州地区磷块岩P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量高于湖北地区,理论上强度应更高。但达到同等粉碎粒径耗能总体低于湖北磷块岩,且力学性质随矿石种类不同而各异,所以矿物晶间结合力及品位并不是决定磷块岩强度的唯一因素。声波试验结果说明,我国西南片区的磷块岩中裂隙节理程度较高,完整性低,导致岩体强度降低的力学缺陷更多。总之宏观上裂隙等力学缺陷是影响磷块岩岩体强度及稳定性的主要因素,例如锚杆锚固段应主要设置于白云岩内;细观来看,晶间结合力的控制作用更强,磷灰石具有更大的晶格。比如磨矿,同等条件磷灰石耗能更多,据此机械选矿中通过试验确定最优粒径,进行破碎筛分,达到降能增效的目的。

参考文献:

[1] 刘魁梧,陈其英. 磷块岩的胶结作用[J]. 地质科学, 1994,29(1):62-69.  
LIU K W, CHEN Q Y. The cementation of phosphorus block rocks [J]. Journal of Geology, 1994, 29 (1) : 62-69.

[2] 单满生. 震旦系陡山沱组磷块岩的成岩作用和成岩环境[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 1987, 17(2): 169-176.  
SHAN M S. The diagenesis and diagenetic environment of the phosphate rock in Doushantuo [J]. Jilin University Journal (Earth science) , 1987, 17 (2) : 169-176.

[3] 高峰. 新元古代陡山沱期瓮安生物群的埋藏[D]. 南京:中国科学院南京地质古生物研究所,2002.

[4] 梁天佑,常安之,张民堂,等. 细晶磷灰岩结构特征及成因机理的研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 1984,14(3):35-43.  
LIANG T Y, CHANG A Z, ZHANG M T, et al. Study on the structure characteristics and genetic mechanism of fine crystalline phosphorus [J]. Jilin University Journal (Earth Science), 1984, 14(3) :35-43.

[5] 中国古地理图集[D]. 北京:地图出版社,1985.

[6] BATYPNN F H. 现代磷块岩的生物形态生成物[J]. 朱佛宏,译. 海洋地质动态,2007,23(8):25-26.  
BATYPNN F H. The biological form products of modern phosphorus block rocks [J]. ZHU F H, translated. Marine Geology Letters, 2007, 23(8) :25-26.

[7] 吴凯,马东升,潘家永. 贵州瓮安磷矿陡山沱组地层元素地球化学特征[J]. 东华理工学院学报, 2006,

- 29(2):108-114.
- WU K, MA D S, PAN J Y. Geochemical characteristics of strata elements in the tuotuo formation in Weng'an phosphate deposit in guizhou province [J]. Journal of East China Institute of Technology, 2006, 29 (2) : 108-114.
- [8] 丁亚龙, 谢宏. 贵州瓮安灯影组磷块岩元素地球化学特征[J]. 中国矿业, 2015, 24(8): 84-89.
- DING Y L, XIE H. Research into the geochemical characteristics of phosphorites of Dengying formation in the area of Weng'an Guizhou [J]. China Mining Magazine, 2015, 24(8): 84-89.
- [9] 张伟, 杨瑞东, 毛铁, 等. 瓮安埃迪卡拉系灯影组叠层石磷块岩形成环境及成矿机制[J]. 高校地质学报, 2015, 21(2): 186-195.
- ZHANG W, YANG R D, MAO T, et al. Sedimentary environment and mineralization mechanism of the Stromatolitic Phosphorite in the Ediacaran Dengying Formation [J]. Geological Journal of China Universities, 2015, 21(2): 186-195.
- [10] 密文天, 范昱. 贵州瓮安磷矿岩石学及沉积序列研究[J]. 中国矿业, 2012, 21(2): 51-54.
- MI W T, FAN Y. Petrology and sedimentary sequence of Weng'an phosphate rock in Guizhou [J]. China Mining Magazine, 2012, 21(2): 51-54.
- [11] 张电吉, 周春梅, 梅婷婷, 等. 磷块岩地下开采受力破坏机理分析研究[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(3): 69-71.
- ZHANG D J, ZHOU C M, MEI T T, et al. Analysis and research on the failure mechanism of underground mining of phosphorus block rock [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2011, 33(3): 69-71.
- [12] 郭庆军, 杨卫东, 刘丛强. 贵州瓮安生物群和磷矿形成的沉积地球化学研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 2(3): 202-207.
- GUO Q J, YANG W D, LIU C Q. Sedimentary geochemical study of Weng'an biota and phosphate deposits in Guizhou province [J]. Mineral rock geochemical bulletin, 2003, 2(3): 202-207.
- [13] 沈明荣, 陈建峰. 岩体力学[D]. 上海: 同济大学出版社, 2010.
- [14] 中华人民共和国水利部. 工程岩体分级标准: GB/T50218-2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [15] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司. 公路工程地质勘察规范: JTG C20-2011.[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [16] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程地质勘察规范: GB 50487-2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.

本文编辑: 陈小平