含水率对普朗铜矿自然崩落法覆盖层散体抗剪强度影响研究

文义明',牛向东',文瑶2,程涌13,聂琪1,卢萍1

1. 昆明冶金高等专科学校 冶金与矿业学院, 云南 昆明 650033;

2. 昆明理工大学公共安全与应急管理学院,云南昆明 650093;

3. 云南大学 地球科学学院,云南省高校关键矿产成矿学重点实验室,云南 昆明 650500

中图分类号:TD853.36 文献标识码:A 文章编号:1001-0076(2024)04-0093-09 DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.04.011

摘要 覆盖层的物料特性是自然崩落法能否顺利进行的重要因素,普朗铜矿自然崩落法的覆盖层为高原冰碛物散体,其抗剪强度参数与含水率密切相关。以高海拔环境下的冰碛物为研究对象,采用散体直剪实验方法,获得不同含水率条件下的高原冰碛物散体抗剪强度参数,探索含水率对高原冰碛物散体抗剪强度参数的规律关系。研究结果表明:高原冰碛物散体物质的 黏聚力和内摩擦角均随着含水率的增加而减小,黏聚力与含水率之间呈现较强的对数关系,而内摩擦角与含水率之间呈现较强的指数关系;根据冰碛物散体抗剪强度参数随含水率的变化程度,黏聚力对含水率的变化较为敏感,而内摩擦角对含水率的 变化敏感性较低,说明黏聚力对含水率的敏感性要强于内摩擦角,含水率对高原冰碛物散体抗剪强度的影响主要是通过黏聚 力变化来体现的。研究成果可为自然崩落法高原冰碛物覆盖层研究提供一定的理论依据。

关键词 自然崩落法;含水率;冰碛物散体;抗剪强度;黏聚力;内摩擦角

引言

自然崩落法是一种利用自然应力和重力在覆盖 层下实现矿石破碎和崩落的采矿方法。该采矿方法 随着矿石的不断采出,将会引起地表的移动变形和破 坏,最终形成一定范围的塌陷坑,使地表第四系松散 颗粒物质进入塌陷坑内,成为矿山井下泥石流的潜在 物源。矿山雨季期间,一般降雨周期长且降雨强度大, 大量的雨水与松散颗粒物质混合形成具有一定能量 的浆体,将会和矿石放出的同时一起放出,最终形成 具有较强破坏力的矿山泥石流事故^[13]。由于矿山井 下泥石流的破坏力和泥石流量的规模密切相关,而泥 石流量的规模又由地表覆盖层散体物源的剪切强度 决定,因此,为防止或者减小矿山井下泥石流发生的 概率及规模,需要开展自然崩落法含水率对地表覆盖 层散体物质剪切强度的影响研究。

普朗铜矿自然崩落法的覆盖层为高原冰碛物散 体,高原冰碛物是一种区域性的特殊散体物质,是高

海拔地区集聚在地表的松散颗粒物质,其具有粒度差 异悬殊、颗粒分选性差、颗粒排列无序等特性14%。高 原冰碛物广义上属于一种散体颗粒结构物质,其在不 同的含水率条件下表现出的抗剪强度特性不同,当前 国内外学者对散体颗粒物质的抗剪强度参数与含水 率间的关系规律研究取得了一些成果^[79]。Xiaoyang Wang 等¹⁰ 研究了含水率及干密度对华南花岗岩丘陵 地区的散体抗剪强度参数影响,分析结果表明黏聚力 随含水率的增加先增加后减小,而内摩擦角主要受含 水率的影响,其随含水率的增大而减小;黄达等人 开展了不同含水率、粗糙度条件下的土石混合体-岩 石界面室内大型直剪实验,认为土石混合体的抗剪强 度受含水率、粗糙度、法向应力的综合影响,且含水 率的增加会显著降低混合体的黏聚力,而内摩擦角则 变化不大;李苗等人四分析了初始含水率对水泥土抗 剪强度的影响,研究结果表明固化土的抗剪强度随着 初始含水率的增加呈现出先增加后降低的趋势;郭丰 涛!!!通过开展不同含水率条件下三门峡黄土残余剪

收稿日期:2024-08-09

基金项目:云南省科技厅科技计划项目(202401AT070047);云南省教育厅基金(2022J1304);昆明冶金高等专科学校科研基金(2022xjy23) 作者简介:文义明(1986年—),副教授,主要从事矿山岩石力学及采矿方法理论研究,E-mail:290605575@qq.com。 通信作者:牛向东(1986—),博士,主要从事矿山岩石力学及采矿方法理论研究,E-mail:1194846856@qq.com。

实验研究,发现黏聚力随着含水率的增大呈下降的趋 势,但内摩擦角下降趋势不是很大,有的反而会上升; 陶首仲等[4]以垂丝海棠为例,通过研究发现含水率对 根-土石复合体的黏聚力影响较大,在含水率为25% 时取得临界峰值,但含水率对根-土石复合体的内摩 擦角影响较小; Wang 等15 开展了不同含水率对黄土 力学性质的实验研究,认为随着含水率的增加,黄土 样品的抗压强度、抗拉强度、黏聚力和内摩擦角等力 学特性的降低量之间存在明显的线性关系; Daniel Batista Santos 等^[16] 通过对非饱和土壤进行剪切强度实 验研究,认为季节性水分变化对土壤的岩土结构安全 性影响较大,并探讨了多种模型来预测非饱和土壤在 不同含水率条件下的剪切强度变化规律;李骅锦等 通过现场调查研究发现,冰碛物具有极强的水敏性 和易崩解性,且其抗剪强度参数随其饱和度的增加而 降低。

分析上述学者的研究成果可知,虽然目前学者获 得了含水率对散体物质抗剪强度的影响规律,但其研 究对象主要是常见的土壤、黄土、土石混合物等松散 岩土颗粒物质,而对于高海拔环境下的冰碛物的抗剪 强度研究较少^[1821]。为此,本文以普朗铜矿自然崩落法 覆盖层散体(高海拔环境下的冰碛物物质)为研究对 象,基于散体直剪实验方法,获得不同含水率条件下 的高原冰碛物散体抗剪强度参数,探索高原冰碛物散 体的黏聚力和内摩擦角与含水率之间的规律关系,为 高原冰碛物散体覆盖层条件下自然崩落法研究,主要 是不同含水率下覆盖层控制管理提供一定的理论依据。

1 研究对象物理特性

1.1 高原冰碛物矿物成分

研究对象为普朗铜矿自然崩落法覆盖层散体即 高原冰碛物散体,其海拔范围 3 400~4 500 m,实验样 品取自地表表土层,高原冰碛物样品的矿物成分组成 见表 1。

表 1 矿区冰碛物样品的矿物成分

 Table 1
 Mineral composition of moraine samples from the mine

矿物名称	石英	绿泥石	钾长石	斜长石	云母	闪石
含量/%	44.2	20.8	14.2	12.5	5.3	3.0

1.2 高原冰碛物粒径组成

冰碛覆盖层是我国云贵藏高海拔地区特有的冰 川沉积地层,冰碛物散体是指冰川搬运和堆积的石块 及碎屑颗粒物质,其与常规土相比具有以下特殊性^[22-3]: (1)由松散颗粒物质组成;(2)颗粒粒径离散性大; (3)颗粒间随机无序排列;(4)无成层现象;(5)绝大部 分棱角明显,见图 1。采用筛分法获得高原冰碛物散 体颗粒级配粒径组成,见表 2。



图1 高原冰碛物散体物质现场图

Fig. 1 Field map of bulk material from plateau moraines

表 2 矿区冰碛物样品的级配粒径组成

 Table 2
 Gradation size composition of moraine samples from the mining area

粒径/mm	>23	23~20	20~10	10~5	5~2.5	2.5~1.25	1.25~0.63	< 0.63
含量/%	12.8	1.5	8.3	8.9	11.8	13.3	12.2	31.2

2 高原冰碛物散体直剪实验

2.1 散体物质直剪实验原理

依据《土工实验方法标准(GB/T 50123—2019)》, 散体物质直剪实验原理如下:将实验物料装入剪切盒, 对剪切盒施加垂直压力固结,再对剪切盒施加水平推 力进行剪切散体物质,得到散体物质剪切破坏时的抗 剪强度,最后对不同垂直压力下的抗剪强度进行数据 处理,即可获得散体物质的抗剪强度参数黏聚力 *c* 和 内摩擦角 φ, 见图 2~图 4。



图 2 应变控制式直剪仪 Fig. 2 Strain-controlled straight shear

2.2 散体物质直剪实验物料制备及方案

以相对密度 0.9 对应的填土密度进行室内重塑土 样的制备,严格按照标准 GB/T 50123—2019 对制备好 的土样分别各开展 10% 天然含水率状态、13% 含水 率状态和 16% 饱和状态下的剪切实验,实验方案设计



图 3 室内直接剪切实验原理(a—剪切实验原理; b—剪应力τ—剪切位移 s 曲线; c—剪应力τ—垂直应力σ曲线) Fig. 3 Schematic diagram of indoor direct shear experiment

图 4 DHJ30 型室内大型直接剪切实验过程

Fig. 4 Process of indoor large-scale direct shear test of DHJ30 type

见表 3。不同含水率状态的冰碛物散体实验土样的制备过程:首先利用烘干法对现场取样散体进行天然含水率测试,以获得天然含水率(10%);再对天然土样持续少量加水,使其达到饱和状态,再利用烘干法对饱和状态下的土样含水率进行测定,又可获得饱和状态下的含水率(16%);13%含水率状态的土样可根据烘干后的土样具体质量来适当添加水获得。

表 3 高原冰碛物散体实验方案 **Table 3** Plateau moraine bulk test programme

		· · · · · · · ·	0	
物料类型	物料编号	含水率	实验条件	垂直荷载/kPa
天然混合料	ZJ1	10%	天然剪切	200 400
半饱和混合料	ZJ2	13%	13%含水率	200、400、 600、800
饱和混合料	ZJ3	16%	饱和剪切	

2.3 不同含水率的散体物质直剪实验

2.3.1 10% 天然含水率散体直剪实验

对制备好的 ZJ1 散体物料开展天然条件下(含水率 10%)的直接剪切实验,1 组实验开展 4 个土样,垂直荷载按照 200 kPa、400 kPa、600 kPa、800 kPa 施加。实验后,绘制 ZJ1 散体物料的剪切应力-剪切位移关

系曲线,见图5。

由图 5 可知, ZJ1 散体物料剪应力-剪切位移曲线 呈弱软化特征,存在较为明显的峰值剪切应力。即散 体物料随着剪切位移的累积,剪应力迅速增高,且达 到峰值应力时,随着剪切位移持续累积,散体物料承 受的剪切应力缓慢下降,直至散体物料剪切应变达到 15%剪切破坏。实验过程中,各垂直荷载对应土样的 剪应力峰值为 129 kPa、269 kPa、401 kPa、486 kPa。

2.3.2 13% 含水率散体直剪实验

对制备好的 ZJ2 散体物料开展 13% 含水率条件 下的剪切实验, 与 ZJ1 散体物料类似, ZJ2 散体物料的 剪切应力-剪切位移关系曲线见图 6。

由图 6 可知, ZJ2 散体物料的剪应力-剪切位移曲 线也呈现弱软化特征,存在较为明显的峰值剪切应力。 实验过程中,各垂直荷载对应土样的剪应力峰值分别 为 100 kPa、202 kPa、326 kPa、422 kPa。

2.3.3 16% 饱和含水率散体直剪实验

对制备好的 ZJ3 散体物料开展饱水(含水率 16%) 条件下的剪切实验,与 ZJ1 和 ZJ2 散体物料类似, ZJ3 散体物料的剪切应力-剪切位移关系曲线见图 7。

由图 7 可知, ZJ3 散体混合物料的剪应力-剪切位 移曲线呈弱硬化特征,未见明显的峰值剪切应力。即 散体物料随着剪切位移的累积,剪应力迅速增高,前 期土样剪应力增幅速率较大,剪切后期剪应力增长较

为缓慢,直至散体物料剪切应变达到 15%,散体物料 剪切破坏对应的剪应力分别为 76 kPa、164 kPa、 251 kPa、316 kPa。

3 含水率对高原冰碛物散体抗剪强度影响分析

3.1 散体抗剪强度取值原则

岩土体抗剪强度参数求取一般按照实验规程测定,根据实验测得的数据绘制强度曲线,然后在曲线 上求出黏聚力 *c* 和内摩擦角 *q*,见图 8 和图 9。

抗剪强度取值的正确与否影响实验计算结果的 准确性,更加关系到具体工程安全和投资等。依据岩 土力学原理,进行土体直剪实验的过程中,存在三个 剪切强度值(见图9),分别是屈服强度(A对应的 τ 值)、抗剪(断)强度(峰值强度即 B 对应的 τ 值)和残 余强度(C对应的τ值)。屈服强度通常在峰值应力 的 2/3 处,一旦应力达到屈服强度,表示从此刻开始, 土体进入塑性阶段,岩土体内的微裂隙开始扩展并将 最终形成贯通的破坏面;而"爬坡强度"则是在破坏 面形成后岩土体继续滑移、剪切时由于破坏面的凹凸 不平产生的。当剪切应力达到屈服强度时,土体仅仅 是出现微裂隙的发展、贯通,只有当剪切应力达到 "爬坡强度"时,岩土体才真正地进入到了滑移、破 坏阶段。因此,"爬坡强度"比"屈服强度"更能说 明土体的变形、破坏情况,在求解抗剪强度指标时 "爬坡强度"计算结果也理应更为合理。为此,本次直

图 8 抗剪强度曲线 Fig. 8 Shear strength curve

A-屈服极限强度; B-峰值强度; C-残余强度

图9 剪应力-剪切位移曲线

Fig. 9 Shear stress-shear displacement curve

接剪切实验选取"爬坡强度"值作为抗剪强度值。

3.2 高原冰碛物散体抗剪强度参数取值

对实验数据采用式(1)计算得出散体物料对应的 正应力与剪应力,用最小二乘法计算得到散体物料的 抗剪强度指标 c(黏聚力)和 q(内摩擦角)。

$$\tau = \frac{P}{A}; \tau = \frac{Q}{A} \tag{(1)}$$

式中: σ—剪切面上的正应力, kPa; *P*—剪切面上的总 法向荷载, kN; τ—剪切面上的剪应力, kPa; *Q*—剪切面 上的总剪切荷载, kN; *A*—剪切面的面积, m²。

依据式(1)计算获得散体物料的抗剪强度指标, 见表 4。各组实验散体物料对应的抗剪强度曲线,见 图 10。

通过直接剪切实验测定,对应不同状态下的混合 物料抗剪强度参数取值见表 5。

3.3 含水率对冰碛物散体抗剪强度参数影响分析

根据表4的高原冰碛物散体物料抗剪强度参数 值,得到了高原冰碛物散体物质的黏聚力和内摩擦角 与含水率之间的变化规律,分别见图11和图12。 表 4 高原冰碛物散体物料抗剪强度指标参数

物料编号	编号	正应力/kPa	剪切应力/kPa	实际含水率/%
ZJ1	1#	200	102	9.65
	2#	400	186	10.11
	3#	600	268	9.07
	4#	800	338	10.32
ZJ2	1#	200	79	13.67
	2#	400	164	12.39
	3#	600	223	13.58
	4#	800	282	12.93
ZJ3	1#	200	67	16.89
	2#	400	122	15.98
	3#	600	166	16.57
	4#	800	232	16.32

(a、b—物料ZJ1 散体直剪实验抗剪强度曲线; c、d—物料ZJ2 散体直剪实验抗剪强度曲线; e、f—物料ZJ3 散体直剪实验抗剪强度曲线)

图 10 高原冰碛物散体直剪实验抗剪强度曲线

Fig. 10 Shear strength curves of plateau moraine bulk straight shear test

表 5 高原冰碛物散体物料抗剪强度参数值 Table 5 Parameter values of shear strength of bulk materials from plateau moraines

勘休米 刑	亚均今水 亥/0/	抗剪强度参数		
取件关型	千均百小平//0	黏聚力c/kPa	内摩擦角φ/(°)	
天然散体物料	10	26	21.5	
半饱和散体物料	13	20	18.4	
饱和散体物料	16	12	15.0	

由图 11 可以看出,高原冰碛物散体物质的黏聚 力随着含水率增加而减小,且两者呈现较强的对数关 系,即 c = -26.671lnw+87.404,相关性系数 $R^2 = 0.975$ 。 由图 12 可以看出,高原冰碛物散体物质的内摩擦角 也随着含水率增加而缓慢减小,且两者呈现较强的指 数关系,即 $\varphi = 36.831e^{-0.054w}$,相关性系数 $R^2 = 0.993$ 。

图 11 高原冰碛物散体黏聚力与含水率间的变化规律 Fig. 11 The change law between cohesion and moisture content of Plateau Moraine

通过对比分析图 11 和图 12 可以明显发现,高原 冰碛物散体物质的黏聚力与含水率关系曲线的变化 斜率较大,而内摩擦角与含水率关系曲线的变化斜率 较小,表明黏聚力对含水率的变化较为敏感,而内摩 擦角对含水率的变化敏感性较低。由于黏聚力对含 水率的敏感性要强于内摩擦角,说明含水率对高原冰 碛物散体抗剪强度的影响主要是通过黏聚力变化来 体现的。

4 结论

本文以普朗铜矿自然崩落法覆盖层散体高海拔 环境下的冰碛物为研究对象,基于散体直剪实验方法, 获得不同含水率条件下的高原冰碛物散体抗剪强度 参数,探索了高原冰碛物散体的黏聚力和内摩擦角与 含水率之间的规律关系,得到以下主要结论:

(1)高原冰碛物散体在 10% 天然含水率和 13% 含水率时,其剪应力-剪切位移曲线均呈现弱软化特征,存在较为明显的峰值剪切应力;而 16% 饱和含水 率时,其剪应力-剪切位移曲线呈现弱硬化特征,未见 明显的峰值剪切应力。

(2)采用散体直剪实验方法,获得不同含水率条件下的高原冰碛物散体抗剪强度参数,其中黏聚力与含水率之间呈现较强的对数关系,即c = -26.671lnw+87.404,相关性系数 $R^2 = 0.975$;而内摩擦角与含水率之间呈现较强的指数关系,即 $\varphi = 36.831e^{-0.054w}$,相关性系数 $R^2 = 0.993$ 。

(3)高原冰碛物散体物质的黏聚力和内摩擦角均 随着含水率的增加而减小,但黏聚力与含水率之间的 变化率较大,而内摩擦角与含水率之间的变化率较小, 表明高原冰碛物散体的黏聚力对含水率的敏感性要 强于内摩擦角,含水率对高原冰碛物散体抗剪强度的 影响主要是通过黏聚力变化来体现的。

参考文献:

- [1] NIU X D, HOU K P,BAO G T, et al. Study on formation mechanism of mud-inclusion-type underground debris flows using natural caving method[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 4324-4324.
- [2] NIU X D, ZHE Y L, SUN H F, et al. Study on the effect of ore-drawing shear factor on underground debris flow in the Block Caving Method[J]. Water, 2023, 15(20).
- [3] QIN X S, YANG X C, LIANG Z H, et al. Study on the effect of the undercut area on the movement law of overburden rock layers in the Block Caving Method[J]. Applied Sciences, 2024, 14(11). DOI: 10.3390/APP14114704.
- [4] 张延广,方小敏,毛子强,等. 青藏高原古里雅冰帽冰碛和冰水沉 积物粒度特征及其意义[J]. 冰川冻土, 2021, 43(3): 701-713. ZHANG Y G, FANG X M, MAO Z Q, et al. Grain-size characteristics of tills and glaciofluvial deposits in the Guliya ice cap, Tibetan Plateau and its implication[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(3): 701-713.
- [5] 史书婷, 王金艺, 郭芪恒, 等. 天津蓟县晚元古代冰碛岩的发现[J]. 沉积学报, 2019, 3(6): 1181-1192.
 SHI S T, WANG J Y, GUO Q H, et al. Discovery of tillite in the late proterozoic at Jixian County of Tianjin, North China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 3(6): 1181-1192.
- [6] TOMI P L. LIISA N. Quantifying climate changes of the Common Era for Finland[J]. Climate Dynamics, 2017, 49(7): 2557–2567. DOI: 10.1007/s00382–016–3468–x.
- WANG P, Y Z Y, WANG Z Y. Micromechanical investigation of particle-size effect of granular materials in Biaxial Test with the role of particle breakage[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2022, 148(1).
 DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0002039.
- [8] Azéma Emilien, Cantor David, Preechawuttipong Itthichai. Independence of shear strength with particle size dispersity still valid in polyhedral particle assemblies [J]. EPJ Web of Conferences, 2021, 249.

DOI: 10.1051/EPJCONF/202124906009.

- [9] Sergey Shabaev, Nikita Martel, Artemy Shtark, et al. Improving the method for determining the granular media strength performance by oblique shear test[J]. E3S Web of Conferences, 2020, 174. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401064.
- [10] WANG X Y, QIN X X, TAN J H, et al. Effect of the moisture content and dry density on the shear strength parameters of collapsing wall in hilly granite areas of South China[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2024, 12(3): 697–713. DOI: 10.1016/J.ISWCR. 2023.09.006.
- [11] 黄达,郑毅,罗世林,等. 含水率对土石混合体-岩石界面剪切力 学特性影响规律的研究[J/OL]. 工程地质学报, 1-9[2024-08-20]. https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2022-0593.
 HUANG D, ZHENG Y, LUO S L, et al. Study on the effect of water content on shear mechanical properties of soil-rock mixture interface [J/OL]. Journal of Engineering Geology, 1-9[2024-08-20]. https:// doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2022-0593.
- [12] 李苗,李文照,毛昱,等.初始含水量和水泥掺入比对水泥土抗剪强度的影响研究[J].科学技术创新,2024(14):171-174.
 LI M, LI W Z, MAO Y, et al. Study on the influence of initial water content and cement mixing ratio on the shear strength of cement-soil[J]. Scientific and Technological Innovation, 2024(14): 171-174.
- [13] 郭丰涛.不同干密度和不同含水率条件下三门峡黄土残余剪试 验研究[J].河南科技, 2024, 51(11): 97-105.
 GUO F T. Residual shear test of loess in sanmenxia with different dry density and water content[J]. Henan Science and Technology, 2024, 51(11): 97-105.
- [14] 陶首仲,周花玉,张卓超,等.含水率对根-土石复合体抗剪强度 影响的试验研究——以垂丝海棠为例[J].四川农业大学学报, 2024,42(3):613-619.
 TAO S Z, ZHOU H Yu, ZHANG Z C, et al. Experimental study on the

influence of water content on the shear strength of Root–Soil–Rock composite——A case study of malus halliana[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2024, 42(3): 613–619.

[15] WANG Y Q, CHEN Y Q, HE Y S, et al. Experimental study of loess mechanical properties with different water content[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2024, 28(6): 2210-2220. DOI: 10.1007/ S12205-024-1381-0.

- [16] Daniel Batista Santos, Patrícia Figuereido de Sousa, André Luís Brasil Cavalcante. Analytical modeling of unsaturated soil shear strength during water infiltration for different initial void ratios[J]. Sustainability, 2024, 16(4). DOI: 10.3390/SU16041394.
- [17] 李骅锦, 冯文凯, 许强, 等. 四川理县小歧村冰碛物角砾土抗剪强 度特性研究[J]. 人民长江, 2015, 46(12): 37-41.
 LI H J, FENG W K, XU Q, et al. Study on shear strength properties of moraine breccia soil at Xiaoqi Village of Lixian County[J]. Yangtze River, 2015, 46(12): 37-41.
- [18] Hailemariam Henok, Wuttke Frank. A laboratory study on the shear strength behavior of two till deposits from northern germany[J]. Energies, 2021, 14(6). DOI: 10.3390/EN14061692.
- [19] LIU Y F, USHEV E R., JARDINE R J., Anisotropic stiffness and shear strength characteristics of a stiff glacial till[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(12). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943–5606.0002387.
- [20] CANTOR D, OVALLE C. Sample size effects on the critical state shear strength of granular materials with varied gradation and the role of column-like local structures [J]. Géotechnique, 2023: 1–12. DOI: 10. 1680/JGEOT.23.00032.
- [21] NIU W Q, ZHENG H, YUAN C J, et al. Shear characteristics of granular materials with different friction coefficients based on ring shear test[J]. Granular Matter, 2024, 26(2). DOI: 10.1007/ S10035-024-01398-3.
- [22] 张应平,牛向东,刘关锋,等.普朗铜矿地表冰碛物径流分选试验 研究[J]. 现代矿业, 2023, 39(4): 167-170.
 ZHANG Y P, NIU X D, LIU G F, et al. Experimental study on surface moraine runoff separation in Pulang Copper Mine[J]. Modern Mining, 2023, 39(4): 167-170.
- [23] 刘关锋,牛向东,张应平,等.雨强和坡度对地表冰碛物径流分选 特性研究[J].有色金属(矿山部分),2023,75(1):68-72.
 LIU G F, NIU X D, ZHANG Y, et al. Study on the sorting characteristics of surface moraine runoff by rain intensity and slope[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2023, 75(1):68-72.

Study on the Effect of Moisture Content on the Shear Strength of the Overburden Covered by the Block Caving Method at Pulang Copper Mine

WEN Yiming¹, NIU Xiangdong¹, WEN Yao², CHENG Yong^{1,3}, NIE Qi¹, LU Ping¹

1. Faculty of Metallurgy and Mining Engineering, Kunming Metallurgy College, Kunming 650033, Yunnan, China;

Faculty of Public Security and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;
 Key Laboratory of Critical Minerals Metallogeny in Universities of Yunnan Province, School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China

Abstract: The material characteristics of the overburden layer is an important factor for the success of the natural caving method. The overburden of the natural caving mining method in Plan copper mine is a granular body of plateau moraine, whose shear strength parameters are closely related to moisture content. Based on the direct shear test method, the shear strength parameters of moraine at high altitude were obtained under different water content conditions, the relationship between moisture content and shear strength parameters of moraine debris was also discussed. The results were as follows: the cohesion and internal friction angle of plateau moraine particles decreased with the increase of moisture content. There was a strong logarithmic relationship between cohesion and moisture content, and an exponential relationship between internal friction angle and moisture content. Based on the law of variation between shear strength parameters and water content of moraine, cohesion was more sensitive to the change of water content, while internal friction angle was less sensitive to the change of water content. The results showed that the sensitivity of cohesion to water content was stronger than that of internal friction angle. The effect of moisture content on the shear strength of moraine debris was mainly reflected by the change of cohesion. The research results in this paper can provide some theoretical basis for the study of glacial till cover layers in high–altitude areas.

Keywords: sublevel caving method; moisture content; moraine debris; shear strength; cohesion; internal friction angle

引用格式:文义明,牛向东,文瑶,程涌,聂琪,卢萍.含水率对普朗铜矿自然崩落法覆盖层散体抗剪强度影响研究[J].矿产保护与利用,2024, 44(4):93-101.

WEN Yiming, NIU Xiangdong, WEN Yao, CHENG Yong, NIE Qi, LU Ping. Study on the effect of moisture content on the shear strength of the overburden covered by the block caving method at pulang copper mine[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(4): 93–101.

投稿网址: http://kcbhyly.xml-journal.net

E-mail: kcbh@chinajoumal.net.cn

作者简介:

文义明, 男, 副教授, 主要从事岩石力学、智慧矿山等方面的研究工作。发表专业相关论 文 28 篇(13 篇 A 类), 发明专利、实用新型、软件著作 23 件, 主编教材 3 部, 副主编教材 5 部。 参与国家级、省级三年创新发展行动计划建设项目 2 项, 获得云南省教学能力比赛一等奖 1 项。2021年担任矿山智能开采技术专业简介、教学标准修(制)订行业工作组组长, 制定了 矿山智能开采技术专业简介、专业标准等并通过教育部评审。2023年主持坦桑尼亚国家金 属矿产开采技术员 4-6 级职业标准及教学开发, 顺利完成了认证。