

不同含水率黄土废弃物对露天矿排土场 边坡稳定性影响研究

杨永祥

中国神华能源股份有限公司哈尔乌素露天煤矿 010300

摘要: 为了研究哈尔乌素露天矿排土场稳定性的变化规律,对哈尔乌素露天矿排土场不同含水率的黄土废弃物进行抗剪试验得到其力学参数,根据测得的抗剪强度参数运用 Slide 模拟软件进行边坡稳定性计算,得到不同含水率下黄土废弃物排土场边坡的变化规律。在同一含水率下,垂直压力的增大对黄土的抗剪强度产生了显著的影响。随着垂直压力的增加,黄土的抗剪强度呈现出线性增长的趋势。这一现象表明,在含水率不变的情况下,垂直压力是促进黄土抗剪强度增长的重要因素。另一方面,当考虑同一垂直压力下黄土抗剪强度的变化时,我们发现随着含水率的增加,抗剪强度表现出整体下降的趋势。这表明,在垂直压力不变的情况下,含水率的增加会降低黄土的抗剪强度。内摩擦角以幂函数形式降低。通过对不同含水率下黄土废弃物边坡的模拟研究,为黄土边坡的稳定性提供了技术支持,为矿区的安全运营提供重要保障。

关键词: 含水率, 边坡稳定性系数, 黄土边坡, 模型试验。

1 引言

露天煤矿排土场边坡失稳的原因众多,而水是造成排土场边坡失稳的重要因素^[1],水对排土场的影响主要表现在地表水及地下水的渗入,使土体吸水饱和和容重增加,整体强度降低,从而增大边坡下滑力、降低抗滑力^[2-3],以至于边坡的稳定性系数降低。内蒙古露天矿广泛分布第四纪黄土层,多数露天矿排土场为黄土基底排土场,如阴湾排土场、黑岱沟排土场、伊敏内排土场、贺斯格乌拉排土场等均为典型的黄土基底排土场,以上露天矿排土场都曾因为水的影响造成滑坡事件的发生,对矿区的经济与当地的生态都造成了巨大的损失^[4]。进一步揭示黄土废弃物不同含水率对排土场边坡稳定性的影响机理,并提出合理的防治水措施,对类似露天煤矿地表水及地下水的防治具有一定的参考价值。

乔东亮^[5]根据魏家峁露天煤矿的水文地质条件对外排土场进行优化分析并加强其防排水设施,将外排土场的边坡稳定性系数提升至 1.22,并对矿区进行边坡优化。针对平朔露天矿水文地质条件的差异性,韩进^[6]通过对平朔露天矿排土场不同含水率的黄土废弃物进行抗剪试验,得到废弃黄土废弃物的平衡含水量。王俊等^[7]通过进行水渗黄土层的地质模型试验,发现随着黄土基底含水量的增加会直接导致边坡的破坏失稳。李驰^[8]通过建立模型试验并分析黄土泥岩层的滑移机制,证明锚杆挡土墙可以有效抑制黄土层的滑移趋势。孙庆山^[9]对黑岱沟黄土基底边坡建立地质模型,并通过 FLAC3D 软件揭示了排土场废弃物内部的破坏机理,确定了黑岱沟黄土基底排土场为排球内部滑动与沿基底弱面滑动。张永贵^[10]通过 FLAC3D 软件对魏家峁露天煤矿的排土场边坡进行模拟,确定了排土场与工作帮的稳定破坏模式。陈殿勇等^[11]在解决排土场水土流失问题方面,提出了一系列有效提高排土场稳定性的措施。刘向峰等^[12]深入研究黑岱沟露天矿排土场西部变形区边坡变形破坏模式,并基于数值模拟计算结果,提出了针对排土场西部变形区边坡的治理措施。

本文通过研究哈尔乌素露天矿排土场不同含水率下黄土废弃物的力学特性的变化规律,得到黄土基底排土场中不同含水率状态下黄土废弃物的抗剪强度参数,根据得到的参数通过 Slide 软件进行模拟,通过模拟结果得到哈尔乌素露天矿排土场的安全稳定性系数,依据安全稳定性系数对排土场的稳定性进行评价分析,进一步揭示了不同含水率黄土废弃物下哈尔乌素露天矿排土场的稳定性变化规律,为哈尔乌素露天矿排土场的稳定性与防治水措施提供技术支持。

2 工程概况

哈尔乌素露天煤矿是国家“十一五”重点建设煤矿之一,矿区总面积 57.7243 km²,查明煤炭资源储量 16.72 亿吨。煤矿现采区为首采区,目前首采区内采煤工作线长度 2 km,剥离工作线长度 2.0~2.3 km,已完全实现内排,现边坡有内排、外排、采场南北端帮、工作帮边坡。哈尔乌素露天煤矿外排土场位于首采区拉沟位置的西北侧,黑岱沟的中上游。哈尔乌素外排土场自 2016 年已排弃到界,排土场标高为 1275 m,平盘宽度为 20 m,最终边坡角 21°,已完成覆土绿化。

矿区位于鄂尔多斯黄土高原,多为黄土覆盖,由于风蚀以及水流侵蚀原因,形成由 V 型沟谷与树枝状冲沟为主的复杂地貌。矿区整体呈南高北低走势,海拔标高在 970m~1225m,起伏较大。黄土高原地貌,植被稀少。因受后期流水作用,冲沟纵横交错,沟谷十分发育,以向源侵蚀为主,地面与沟谷坡度大。黄河为矿区主要地表水,其他地表水皆为黄河支流且多数为季节性河流。哈尔乌素露天矿区属半干旱地区,属于大陆性气候,气候特点为冬季寒冷,夏季炎热,降水量较小,蒸发量较大,降水多集中在 7、8、9 三个月内。

3 试验方案

3.1 试验仪器



图 1 试验仪器及试样

本次直剪试验选用应变控制式直剪仪(四联剪),试验设定压

力分别为：100kPa、200kPa、300kPa、400kPa。本试验推进轴推进方式为无级调速，推进速率为8mm/min，每5秒采集一次数据。

3.2 试样制备及试验流程

本次直剪试验黄土取自哈尔乌素露天矿排土场边坡，由前期黄土的含水率试验可得，哈尔乌素露天矿排土场边坡黄土的含水率为18.91%。将黄土进行破碎处理，将破碎后的黄土置于烘干箱中进行烘干处理，根据试验要求设定不同黄土含水率，分别为14%、16%、18.91%（天然含水率）、20%、22%（此为饱和状态含水率）。将烘干后的黄土制成标准试样（A=30cm²，h=2cm），利用环刀将试样进行刮平处理。将标准试样按照设定含水率进行喷水处理，并使用保鲜膜进行24h保湿处理，防止其水分流失。

将制备好的黄土试样置于应变控制式直剪仪中，并在仪器中放置透水石以及滤纸。对黄土试样分别施加的100kPa、200kPa、300kPa、400kPa压力，并将推进速率设置为8mm/min，试验时间为200±10s。

4 不同含水率下黄土物理力学性质分析

在对比试验前后土样的变化时，可以明显观察到，试验前的土样整体上显得较为密实，其结构紧密，外观呈现出一种较为均匀的质地。然而，当对这种土样进行剪切破坏后，高含水率的土样会产生较大的剪切位移，显示出一种不易开裂的特性，这表明它具有良好的塑性破坏特性。

另一方面，对于低含水率的土样来说，剪切破坏后它们很容易开裂破碎，呈现出脆性破坏特性。这种特性的表现形式使得低含水率的土样在受到外力作用时更容易产生断裂，而高含水率的土样则能更好地保持其整体性。

抗剪强度计算公式：

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

$$\sigma = p/A \quad (2)$$

$$\tau = Q/A \quad (3)$$

式中： σ 为正应力， τ 为剪应力，P 为垂直载荷，Q 为剪切载荷，A 为试样剪切面积，c 为土的粘聚力，kPa； φ 为土的内摩擦角，°。

在图4中，我们将同一含水率下4个垂直压力对应的抗剪强度进行了拟合。这些数据点形成了一系列直线，这些直线的倾角代表了不同含水率下土样的内摩擦角。通过观察图4，我们可以发现，随着含水率的增加，内摩擦角逐渐减小。这表明，随着土体中水分含量的增加，土体内部的摩擦力降低，从而影响了土体的抗剪强度。

根据图表信息，可以得出以下结论：

在相同的含水率条件下，随着垂直压力的增加，黄土废弃物的抗剪强度呈现出直线增长的态势。这表明，垂直压力是影响黄土废弃物抗剪强度的重要因素之一，随着压力的增加，抗剪强度逐渐增强。

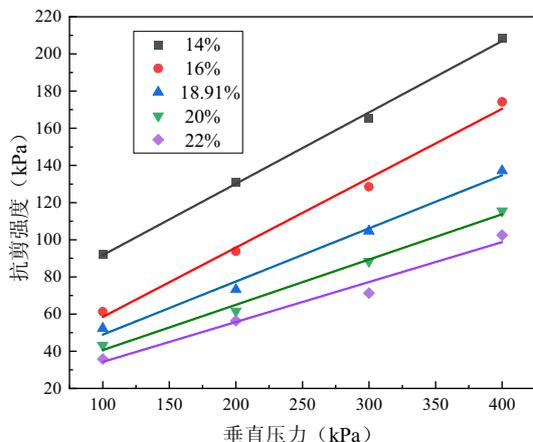


图2 不同垂直压力下黄土抗剪强度

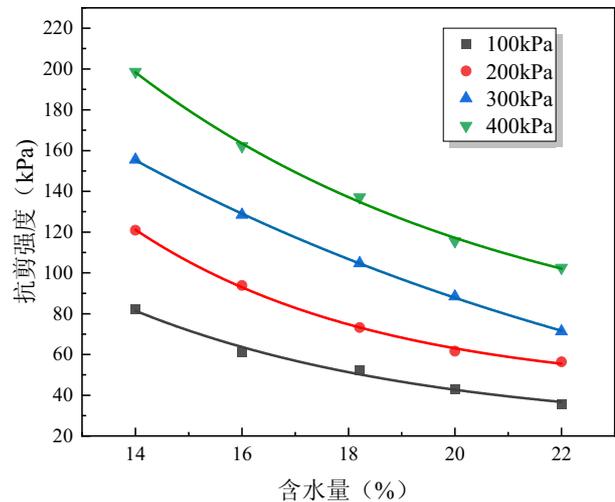


图3 不同含水率下黄土抗剪强度

而在相同的垂直压力条件下，随着含水率的增加，黄土废弃物的抗剪强度逐渐降低，整体强度下降。这意味着，含水率也是影响黄土废弃物抗剪强度的重要因素之一，高含水率会降低抗剪强度。

为了进一步探究黄土抗剪强度与含水率的关系，绘制坐标图，如图5所示，横坐标为含水率，纵坐标为抗剪强度。如图中能够发现，黄土遇水后剪切强度明显弱化，含水率增加导致抗剪强度值骤降。在相同垂直压力下，抗剪强度随含水率先大幅降低，然后逐渐趋于稳定值。

4.1 抗剪强度参数随含水率变化

根据表2-6分别绘制了不同含水率下粘聚力和内摩擦角变化曲线图6。发现当含水率从14%增加到22%时，粘聚力从43.3kPa下降到12.8kPa，下降了70.4%；内摩擦角从21.0°下降到12.1°，下降了42.4%，这表明含水率的增加，会导致黄土的粘聚力敏感度大于内摩擦角。

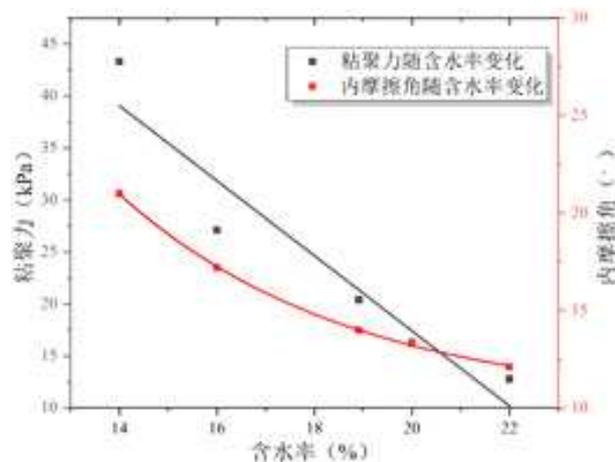


图4 不同含水率下粘聚力变化曲线图

黄土含水率增加，粘聚力线性降低，内摩擦角幂函数降低。微观角度，黄土含水率通过改变颗粒内部胶结结构影响抗剪强度参数。随着含水率增加，桥梁强度和稳定性降低，导致抗剪强度参数降低。宏观角度，黄土具有湿陷性，水分影响工程性质，降低边坡稳定性。湿陷性可能导致边坡变形破坏，带来风险。设计和施工过程中需考虑黄土含水率和工程性质以确保安全性和稳定性。

5 不同含水率对黄土边坡稳定性影响分析

以哈尔乌素露天矿外排土场为研究背景，应用极限平衡法，借助Slide软件进行边坡稳定性的数值模拟，进一步探讨含水率变化对边坡稳定性的影响。

5.1 数值模型的建立

采用 Slide 边坡分析软件来模拟不同含水率下外排土场边坡的稳定性。根据露天矿矿区概况,数值模拟模型设计标高 1280m,黄土排弃物高度 96m,最终帮坡角 20°。边坡模拟采用弹塑性本构模型,各向同性材料,模型后缘和底部为固定边界。该模型在左右两边和底部采用了严格的位移约束,确保模型在各个方向的移动受到限制。为了模拟这一物理现象,采用了 Mohr-Coulomb 强度准则。关于地层的起伏变化,特别是黄土层的形态,是根据露天矿所提供的详细地质勘查的钻探报告来确定的。这些报告提供了地层分布、岩石类型、土壤性质等关键信息,为我们的模型提供了真实可靠的数据。表 2-6 列出了模拟所采用的各岩土层的物理力学参数,包括弹性模量、泊松比、内聚力等关键指标,这些参数为模型的精确模拟提供了基础。

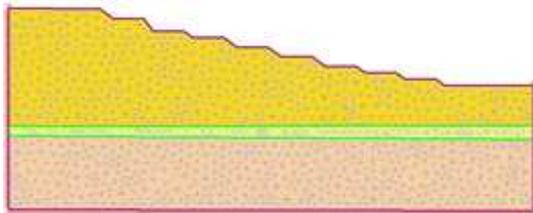


图 5 外排土场边坡 P₁₋₄ 剖面工程地质模型图

5.2 计算结果分析

通过调整黄土层的力学参数,模拟了含水率改变对边坡的影响。根据直剪试验获得的黄土层物理力学参数,我们模拟了黄土排弃物含水率为 14%、16%、18.91%、20%、22%时排土场边坡的状态。结果生成了边坡安全稳定性系数随含水率变化的曲线图(如图 6 所示)。在此基础上,深入分析了位移场、最大剪应变、安全系数随着含水率的变化而产生的变化规律。此外,我们还研究了含水率变动下黄土排土场的滑坡模式。

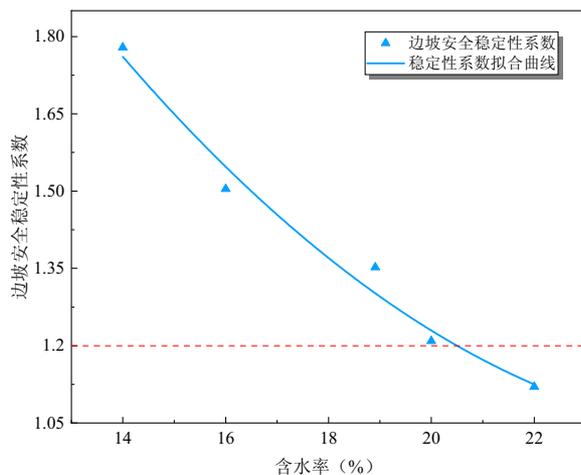


图 6 边坡安全稳定性系数随含水率变化曲线图

不同含水率下,非饱和土边坡稳定性差异大,随着含水率增加,稳定性降低。边坡由深层滑移向浅层滑移,16%含水率后,浅层滑移趋势显著。安全系数变化趋势明显,14%含水率时安全系数最大为 1.779,22%含水率时安全系数最小为 1.120,两者相差接近 0.6 倍。因此,按饱和土强度理论设计非饱和土边坡不保守,需要研究非饱和土强度理论来优化工程设计。

对于井工开采影响范围以外的外排土场边坡,所有剖面在固结下沉及弱面作用下,其边坡沿黄土层和风化泥岩层呈现圆弧形滑移破坏模式,主要体现为排弃物内部的相对滑动及坡脚位置的剪切滑移破坏,且滑坡后缘在排土场中为圆弧形,其滑动面是由软弱夹层

面和切层部分的圆弧面组成的复合滑面。对于井工开采影响范围内的外排土场边坡,边坡受井工开采的影响主要表现为整体沉降变形,水平位移指向采空区方向。

5.3 露天矿排土场边坡防护建议

1) 工程防护

针对排土场沉降变形所产生的裂缝,采用填埋和密实处理方法进行修复。根据排土场地形变化修筑排水导引渠,在易受冲刷的边坡坡面修筑排水和行人的双用通道,并在坡面进行高密度绿化。由于矿区年降雨总量相对较小,但雨季降雨比较集中,降雨会对边坡的稳定性造成危害,因此在雨季应加强排水处理并提高巡视次数,及时处理雨水形成的冲沟,防止雨水对边坡进一步冲蚀。需要持续关注外排土场边坡受采动影响的区域和范围,并及时对地表进行治理。

2) 监测

针对采动影响区布置包括地表 GNSS、深部位移和大量程裂缝监测监测在内的边坡立体化监测手段,并辅助降雨和温湿度等环境监测,实时监控边坡体在采动、强降雨和冻融循环下的全周期变形破坏情况。

6 结论

不同含水率的黄土直剪试验表明,黄土的粘聚力随含水率增加而线性降低,内摩擦角随含水率增加以幂函数形式降低。数值模拟结果表明,随着黄土排弃物含水率的增加,边坡位移值增大,滑面形状发生变化。当含水率高于 20%时,边坡不满足安全要求。

根据数值模拟结果,对黄土排土场边坡提出以下防护建议:及时填埋、密实处理裂缝;加强防排水处理和监测;处理雨水冲沟;加强边坡变形监测和统计分析;稳定后进行地表治理。

参考文献:

- [1]吕春娟,白中科,秦俊梅,等.黄土区大型排土场岩土侵蚀特征研究——以平朔矿区排土场为例[J].水土保持研究,2006(04):233-236.
- [2]王东,张岩,李广贺,等.黄土沟壑基底排土场滑坡的空间演化机制[J].煤炭科学技术,2023,51(03):77-84.
- [3]常银联.湿陷性黄土地基排土场稳定性分析[J].露天采矿技术,2022,37(02):29-32.
- [4]李芳玮,王东.厚层黄土基底排土场边坡稳定性研究[J].煤矿安全,2022,53(07):221-226.
- [5]乔东亮,张永贵,商启蒙,等.露天煤矿外排土场边坡滑移治理[J].露天采矿技术,2021,36(01):93-95.
- [6]韩进,张东华.黄土含水量对排土场稳定性的影响[J].露天采矿技术,2019,34(01):13-16.
- [7]王俊,孙书伟,陈冲.饱水黄土基底排土场地质力学模型试验研究[J].煤炭学报,2014,39(05):861-867.
- [8]李驰,杨柳,乌力吉那顺,等.黄土泥岩接触地带界面滑移的工程防护模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S2):3923-3929.
- [9]孙庆山.基于 FLAC3D 的黄土基底排土场边坡破坏机理研究[J].采矿技术,2011,11(04):60-61.
- [10]张永贵.基于 FLAC~(3D) 软件的魏家崓露天煤矿边坡稳定性破坏模式分析[J].露天采矿技术,2019,34(04):55-58.
- [11]陈殿贺,贺振伟.安家岭露天矿排土场稳定性分析及工程治理[J].露天采矿技术,2001(01):25-27.
- [12]刘向峰,朱剑锋,王振伟.黑岱沟露天矿排土场西部变形区滑坡控制[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2011,30(03):361-364.