

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

# 安太堡露天煤矿排土场基底黄土的微结构演化 与弱层的形成机理

陈敏

(阜新矿业学院, 辽宁)



本文根据安太堡露天煤矿排土场基底黄土的粘土矿物组成和微结构及其在分级荷载下微结构变化的研究, 论述了排土场基底黄土内弱层的形成机理, 提出弱层是在上覆排土压力下由于黄土的微结构变化而形成的演化弱层。并指出弱层的形成是导致排土场失稳滑坡的主要控制因素。这种弱层在新排土场设计时期并不存在, 极具隐蔽性。但在设计时必须考虑在排土增至一定高度后, 弱层的形成对排土场稳定性的影响, 否则必将会存在重大滑坡隐患。

**关键词** 微结构 黄土 排土场 演化弱层 边坡稳定性

## 1 前言

安太堡露天煤矿位于山西省朔县, 现有南排和西排2个排土场。其基底由第四纪黄土组成。黄土剖面自上而下为: 褐黄色粉土层组, 厚7—15m; 棕黄色粉质粉土层组, 厚10—20m; 棕红色粉土层组, 厚15—40m。南排土场在排弃高度135m, 尚未达到设计参数时发生了特大规模灾害性滑坡。滑坡破坏了排土场附近的公路及工业广场的部分设施, 严重威胁广场内重要设施的安全, 影响了生产的正常进行。

经勘察, 南排滑坡的滑面主要位于排土场基底黄土内部, 沿棕红粘土顶面附近分布。西排土场现排弃高度180m, 已查明在其基底黄土内也已出现严重缩径现象, 其缩径部位也主要位于粉土、粉质粉土与棕红粘土顶部的界面附近。经力学试验, 西排缩径段黄土内聚力( $C$ )平均为0.048MPa, 范围为0.007—0.094MPa; 内摩擦角( $\varphi$ )平均为15.75°, 范围为4.76°—24.91°。经对南排土场进行滑坡反分析计算, 得出滑面力学强度 $C=0.03\text{MPa}$ ,  $\varphi=7^\circ$ 。而其它部位粉质粘土和粘土的力学强度 $C$ 为0.0568—0.1097MPa,  $\varphi$ 为22.5°—25.6°<sup>①</sup>。以上数据表明, 在南排和西排土场基底黄土内有重要的软弱层形成, 其力学强度远远小于其它部位正常黄土。该矿现正计划在紧邻西排土场北部建立一新排土场。经对新排土场基底勘察, 并未在黄土层内发现有弱层存在。但当排土堆积到一定程度后能否有弱层形成, 直接关系到新排土场的设计参数选择和稳定性评价, 这就提出了弱层的形成机理和形成条件问题。为此我们对该区各排土场基底各类黄土进行了粘土矿物成分, 和扫描电镜下显微结构及在分级荷载下的微结构演化研究, 以探讨在上覆荷载压力下黄土微结构的变化及其对土体工程地质性质的影响及弱层的形成条

① 王建国等. 平朔安太堡露天煤矿外排土场稳定性研究. 煤炭科学研究总院抚顺分院(科研报告). 1995.  
本文1995年7月收到, 8月改回, 刘淑春编辑。

件和形成机理,指导排土场设计和稳定性评价,为确定评价的力学参数提供依据。

该矿这一滑坡事件及黄土层内弱层的发现,对在软弱基础之上构筑排土场的设计、稳定性情况分析等方面均提出新的问题。说明原设计在未进行排土场基底勘查条件下,只对排弃废料作“坡脚圆”分析,并未考虑排土场基底稳定性问题是不完善的。近年来,我国兴建的大型露天煤矿大多分布于西部和东北部黄土高原与丘陵地区,因此排土场的稳定性问题将会日益突出。

## 2 黄土的粘土矿物组成

采用原石油工业部 1987 年部颁标准(SY5163—87)即修正的 Schultzy 法对排土场基底黄土进行了粘土矿物的 X 射线定量衍射分析,该方法能确定和定量计算出蒙皂石、伊利石/蒙皂石混层粘土、高岭石、绿泥石的相对含量,还能确定混层粘土的膨胀层比例。分析结果表明,本区黄土中的粘土矿物均以伊利石/蒙皂石混层粘土为主,含量达 47%—79%,多在 60%—75%,平均 65.33%。其中的膨胀层比例变化于 48%—60%,平均 54.11%。其次为伊利石,含量 16%—30%,平均 21.11%。有少量蛭石和高岭石。蒙皂石则未有显示。总体来看,本区黄土中粘土矿物以强亲水性的伊利石/蒙皂石混层粘土为主,这些矿物在遇水情况下具有较强的吸附水分子于颗粒表面的能力,形成较厚的水化膜,使土体抗剪强度大幅度降低,使其具有较强的可塑性和塑性变形能力。

## 3 黄土的微结构特征及其在分级荷载下的变化特点

### 3.1 研究方法

扫描电镜微结构研究样品系采用勘察施工的钻孔岩芯的原状土在原湿度情况下制成各级固结样品。经不同荷载压力固结稳定后将样品取出,在室温下阴干成风干土样。固结压力根据排土场情况设置为 0.1MPa, 0.4MPa, 0.8MPa 和 1.6MPa。分级固结样品均取自未经排土压实的新排土场,以研究黄土在排土压实过程中的微结构变化及其对土体性质的影响。西排土场原状土样品的埋藏深度为 70—80m,大体相当于 1.4—1.7MPa。南排土场原状土样品埋深 60—80m,大体相当于 1.2—1.7MPa 压力。扫描电镜样品共计 20 个。

扫描电镜下,黄土的微结构特征变化较大。在不同视域内,颗粒的类型、大小、排列方式、分选性、堆积紧密程度以及胶结物特征、孔隙特征均有一定变化。为了能更好地反映试样微结构的总体面貌,我们在观察过程中对各级荷载样品随机选取 10—12 个视域对微结构特征进行目估含量统计。这种统计方法虽然精度不高,但能较好地反映微结构的总体面貌及变化特点,不致因局部现象而掩盖整体。需说明的是,由于  $<1\mu\text{m}$  的微小孔隙不易观察,在孔隙含量估计中考虑较少,故孔隙度估计值偏低,这种现象在粘土样品中较为明显。

### 3.2 各类黄土的微结构特征及其在分级荷载下的变化

对于我国黄土高原黄土的微结构已有较多学者进行了研究<sup>[1-3]</sup>。本文对黄土微结构的类型及孔隙类型的划分主要参照雷义祥<sup>[2]</sup>的划分方案,各类黄土的微结构特征综述如下:

**棕红粘土** 本区各种压实状态的棕红粘土样品主要有两种微结构类型,一种为小型集粒镶嵌胶结结构;另一种为大型集粒支架-镶嵌结构。

(1)小型集粒镶嵌胶结结构:颗粒主要为压扁的椭球形粘土集粒,大小多在 10—40 $\mu\text{m}$ 。在新排土场、西排土场和南排土场土样中均有出现。在新排土场原状土、0.1MPa, 0.4 MPa 土样中,集粒已紧密镶嵌排列,个别集粒被压扁和压裂破碎。粘土质胶结物呈集片状杂乱排列,其间

发育较多的小孔,并含6%—7%大、中型孔隙,孔隙度为17%—21%。

在荷载压力相当于1.2—1.7MPa的西排土场和南排土场的原状土样中,也出现上述结构。但集粒已被明显压密。粒间粘土质胶结物呈紧密面-面定向排列连接,胶结物间孔隙主要为小孔和微孔,大中型孔隙极少,连通性差,孔隙度14%—15%。此外还出现较多的近三角形不规则形态的小集粒镶嵌结构,有些局部呈现出不是很明显的半圆形态,应为粘土质团状集粒破碎产物。

由上述特征不难看出,本区小型集粒镶嵌胶结结构的原始结构的压密和破坏作用主要发生在埋藏期,是在上覆黄土地层的压实下完成的。此时孔隙性还较强,含大量小孔,尚有大孔和中孔。经排土的进一步压实,其变形向两个方向发展,一是塑性变形为主,颗粒和胶结物进一步被压密;另一方向是集粒被压碎,形成小型不规则状集粒镶嵌胶结结构。变形的结果是孔隙性变差,大、中孔隙大量减少(图1a)。

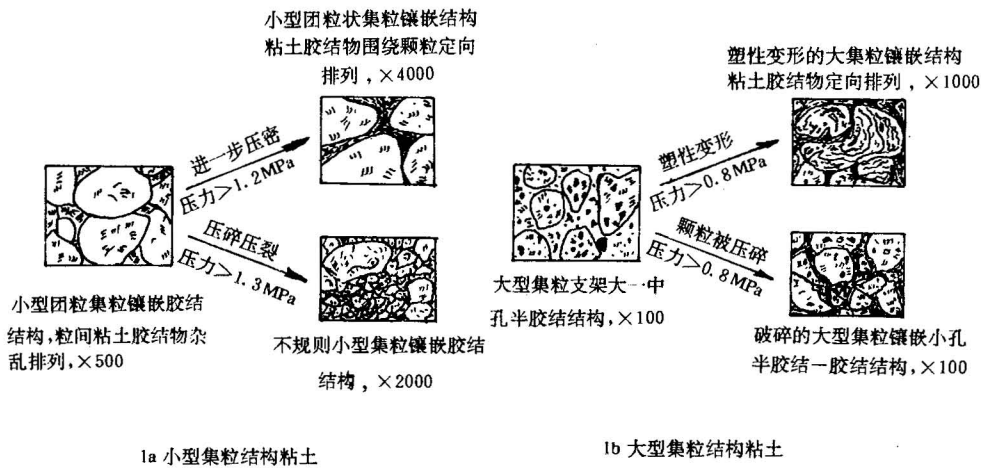


图1 棕红粘土的微结构演化示意图

Fig. 1 Sketch map showing the microtexture evolution of red-brown clay loess

(2)大型集粒支架-镶嵌结构:出现于新排土场0.8MPa和1.6MPa样品以及南排土场、西排土场基底黄土土样中。在结构上最明显的特征就是以大型粘土集粒为主,其粒度多为100—400 $\mu\text{m}$ ,形态多为不规则椭球状。在与上覆土层荷载比较接近的新排土场0.8MPa土样中,集粒主要呈颗粒支架,粒间被粉砂和粘土充填,排列松散,含有大量的粒间孔隙和胶结物孔隙。孔隙较大,以大、中型孔隙为主,分别为2.5%和12.70%,小孔隙为11.70%。孔隙连通好,总孔隙度达28%以上。

在压力为1.6MPa土样以及经排土压实的西排土场及南排土场土样中,集粒则被显著地压密、变形和破碎,呈紧密的镶嵌排列。粒间充填的粉砂质和粘土质胶结物也大多呈紧密镶嵌状,大、中型孔隙明显变少,分别为1.4%和6.3%,仅在镶嵌空间局部孤立出现,以小孔和微孔为主,连通性差,孔隙度较低,占18%—20%。

上述特征表明,大型集粒结构的粘土在压力作用下微结构变化极为显著。其原始状态为支架大孔-中孔结构。在上覆黄土的压实下仍保持为颗粒支架状态,集粒变形不明显。大型集粒的主要变形和破坏压力在0.8—1.6MPa范围内。变形方式主要为塑性变形,形成各种变形集

粒。也有相当一部分集粒被压碎。在颗粒堆积方式上也由原来的集粒支架变成紧密镶嵌排列。变形的结果,导致孔隙显著变小,连通性变差,孔隙度降低(图 1b)。这种结构变化在固结曲线上也表现得非常明显,在压力为 0.8—1.6MPa 范围内,变形量明显增大,也证明其主要变形和破坏压力在此范围。

**褐黄粉土** 褐黄粉土颗粒类型以粉砂为主,占土体积的 45%—60%,多为 20—50 $\mu\text{m}$  的粉砂级颗粒,大多磨蚀圆化,较小颗粒主要为棱角一次棱角状。在不同荷载条件下,褐黄粉土的微结构有两种主要类型,一种为粉砂支架大孔结构,主要出现在压力小于 0.8MPa 的样品中;另一种为粉砂镶嵌中孔结构,出现在压力大于 0.8MPa 的样品中。

(1)粉砂支架大孔结构:该类结构在荷载较低的原状土、0.1MPa,0.4MPa 样品中广泛发育,是其最主要的微结构类型。骨架颗粒主要是一些较大的粉砂,多在 40 $\mu\text{m}$  以上。而较小的粉砂则趋于和粘土、钙质等物质聚集在一起形成较大的似凝块体,具有一定的支撑作用,形态不规则,但局部常具半球状或似球状外貌,可能是原始粉砂粘土质似球状集粒破碎产物。似凝块体粒度较大,多在 100—300 $\mu\text{m}$ ,它们与粉砂一起构成骨架,松散堆积,因此粒间孔隙变化很大,主要为大孔隙,连通性好,孔隙度高达 26%—30%。骨架颗粒之间粘土质胶结物少,主要附着于颗粒表面。此外,在颗粒表面含有少量钙质胶结物,偶尔也出现在颗粒接触部位,但含量较少,一般不足 2%。

(2)粉砂镶嵌中孔结构:主要出现在压力>0.8MPa 以上的粉土样中,是其主要结构类型,尤以压力大于 1.6MPa 的样品中最为突出。其特征为粉砂颗粒大小混杂,呈紧密的镶嵌堆积,孔隙形态以狭长缝隙状为主,多为中孔,孔隙间尚有一定的连通,孔隙度 21%—25%。粒间粘土质胶结物较多,且多呈凝块状粘附在细粉砂质颗粒之上,甚至断口处出现锯齿状。而在低荷载样品中出现较多的粉砂粘土质似凝块体则很少。这些特征表明,细粉砂级颗粒及粘土胶结物的出现可能是前述大型凝块体进一步压碎所致。

由上可见,本区褐黄粉土在压力作用下表现出明显的压密,其实质是由粉砂支架大孔结构转变为粉砂镶嵌中孔结构,转化压力主要在 0.4—0.8MPa 之间。微结构转变的结果是使颗粒接触强度增高,粘结程度增强,孔隙度减少。但孔隙性和连通性仍然较好。

**棕黄粉质粘土** 棕黄粉质粘土在电镜下出现明显的微纹层状构造,主要由粉砂质粒度变化和钙质胶结物的纹层状富集造成。其微结构类型主要为粉砂支架中孔半胶结结构。粉砂多为 10—40 $\mu\text{m}$  的较细粒级为主,含量在 40%—50%。粘土集粒较少,在 10% 以下,多为 6%—9%。与褐黄粉土相比,其粘土质胶结物明显增多,大多在 15% 以上,多以单体粘土片或微小片状聚集体杂乱松散分布在贫钙微层内的颗粒孔隙之中。钙质胶结物较多是粉质粘土的最大特点,含量在 4%—5%,主要分布在颗粒之间的接触部位,并常常呈微层状富集,在颗粒之间形成桥状连接,构成典型的接触式钙质胶结。在从埋藏深度在 37m 左右的新排土场原状土直至固结压力为 1.6MPa 的各样品中,乃至埋藏深度在 70—80m 范围内的西排土场、南排土场样品中,这种接触式胶结结构均未发生明显改变,仍为吻合状接触,表明这种结构强度较高,在压力作用下难被破坏。因此,在较大压力下仍能保持良好的中型孔隙和孔隙连通性,孔隙度为 22%—35%。

#### 4 土体结构变化及弱层形成机理

上述各类黄土的微结构在压力作用下的差异演化必将造成黄土的物理、力学性质的重大

改变,从而使土体的结构发生变化。而这些变化又会造成水文等地质条件的改变,进一步促进黄土的物理、力学性质发生改变,最终导致土体内弱层的形成。

当上覆压力小于 0.8MPa 时,土体内粉土将产生较大的压实变形。变形结果是形成粉砂镶嵌中孔半胶结结构,其中含有较多的中孔孔隙,且孔隙连通性较好,其导水性虽有降低,但仍可视为透水层。棕红粘土中的大型集粒支架中孔结构尚未破坏,孔隙性较好,有一定的渗透能力。该区地貌为黄土塬丘地形,大气降雨集中,多以暴雨形式出现,有利于形成地表径流,对地下水补给较差,仅有少量进入基底黄土层内。由于黄土此时孔隙性尚好,加之周围冲沟发育,有些已深入基岩,所以地下水能够缓慢排泄。在新排土场各钻孔中均未见地下水位,各类黄土含水量、饱和度均较低,抗剪强度较高,无弱层发育。

但是,当压力超过 0.8MPa 时,黄土中的棕红粘土的微结构将发生重大改变。改变的结果使粘土的大型集粒支架大-中孔结构转变成小孔镶嵌结构,使孔隙度降低,孔隙显著变小。因此粘土层的渗透性显著降低,可视为相对隔水层。受压实变形的影响,粘土质隔水层顶面向下弯曲。在此弯曲界面影响下,由地表渗入的地下水易在隔水层之上的粉土层中逐渐聚集,形成充水带。西排土场各钻孔在粉质粘土、粉土层底部与棕红粘土界面附近普遍见有地下水位,南排土场各钻孔在滑面以上也见有高度为 2 m 左右的地下水位,说明充水带确实存在。在上部充水带的影响下,地下水不断向界面(隔水层顶面)以下的粘土层润透,致使大量粘土矿物水化变软,抗剪强度大幅度降低,形成软弱层,造成缩径现象(图 2)。

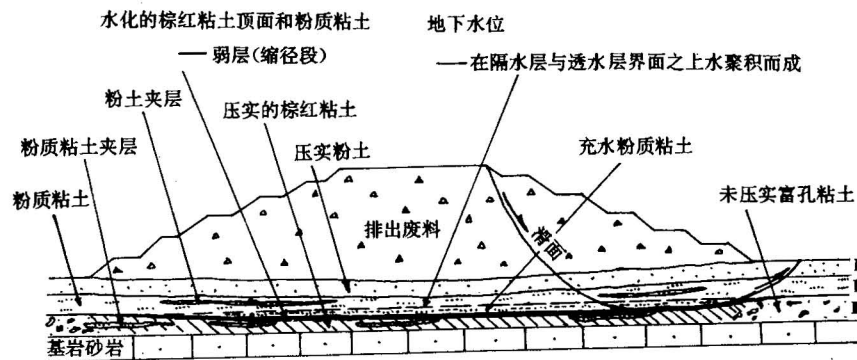


图 2 安太堡露天煤矿排土场基底黄土在排土压实下弱层的形成机理示意图

Fig. 2 Sketch map showing the forming mechanism of the weak interbed in the base loess of the discharged material stack field of Antaibao Opencut Coal Mine

I. 粉土层组; II. 粉质粘土层组; III. 棕红粘土层组  
I. Silt loess; II. silty clay loess; III. red-brown clay loess

上述分析表明,本区排土场基底黄土在上覆排土压力下的微结构变化,尤其是棕红粘土的微结构变化是导致黄土层内弱层形成的关键因素。对南排土场边坡稳定性计算机模拟表明,如不考虑弱面,则南排土场基底黄土内仅有孤立的塑变区出现,尚未贯通,不会发生滑坡。但考虑弱面的力学特点,采用弱面的力学参数进行模拟,则塑变区明显贯通,贯通区与滑面形态一致,边坡处于不稳定状态。可见土体内弱层的形成是导致边坡失稳滑坡的主要控制因素。

## 5 结束语

根据排土场基底黄土粘土矿物组成和微结构及其在分级荷载下微结构变化研究,得出本

区排土场基底黄土中的弱层是由上覆排土压实形成的演化弱层。这种弱层在未堆积排土之前尚不存在,极具隐蔽性。但在排土场设计和稳定性评价中,必须考虑在排土增至一定高度后弱层的形成对排土场稳定性的重要影响,将弱层的力学参数与其它部位的正常黄土区分使用,否则必将存在重大滑坡隐患。弱层的形成条件可通过分级荷载下微结构研究和物理力学实验相结合的办法分析确定。

根据弱层研究后确定的力学参数进行设计和稳定性评价才能保证排土场稳定与安全。

### 参 考 文 献

- 1 雷义祥. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性. 中国科学 B 辑, 1987, (12): 1309—1318.
- 2 雷义祥. 黄土显微结构类型与物理力学性质关系. 地质学报, 1989, 63(2): 182—191.
- 3 高国瑞. 中国黄土微结构. 科学通报, 1980, 25(20): 945—948.

## MICROTEXTURE EVOLUTION OF THE DISCHARGED-MATERIAL STACK FIELD BASE LOESS OF ANTAIBAO OPENCUT COAL MINE AND THE FORMING MECHANISM OF THE WEAK INTERBED IN THE LOESS

Chen Min

(Fuxin Institute of Mining and Technology, Fuxin, Liaoning)

### Abstract

The formative mechanism of weak interbeds within the discharge material stack field base loess of the Antaibao Opencut Coal Mine is discussed in this paper, based on studies of clay minerals, microtextures and microtexture evolution under different load pressures. The research demonstrates that the weak interbeds are a kind of evolution ones formed by microtexture changes of the base loess under the load pressure of the overlying discharge materials, and constitute the controlling factor of the discharge material stack field landslides. They do not exist and cannot be detected during the time of designing a new discharge field. But their influence on the stability of the discharge field slope must be considered in order to avoid the danger of landslides.

**Key words:** microtexture, loess, discharge material stack field, evolution weak interbed, slope stability

### 作 者 简 介

陈 敏, 生于 1960 年 9 月。1982 年毕业于阜新矿业学院煤田地质勘查专业, 1988 年于中国地质大学(北京)获硕士学位。现任阜新矿业学院资源系副教授, 主要从事煤田地质、工程地质、沉积学等方面研究。通讯处: 辽宁省阜新市中华路 47 号阜新矿业学院资源系, 邮政编码: 123000。