

文章编号: 1000-7598(2009)03-0855-04

# 土石混合体渗透性现场试坑试验研究

徐 扬<sup>1,2</sup>, 高 谦<sup>1</sup>, 李 欣<sup>1</sup>, 李俊华<sup>3</sup>, 贾云喜<sup>3</sup>

(1. 北京科技大学, 北京 100083; 2. 中冶北方工程技术有限公司, 鞍山 114002; 3. 唐钢滦县司家营铁矿有限责任公司, 滦县 063701)

**摘 要:** 针对唐钢司家营铁矿Ⅲ采场露天转井下开采回填废石设计研究工程要求, 在该矿区Ⅲ采场附近进行了大尺度现场渗透试验。开挖3个大尺寸试坑, 在各试坑中分层回填不同粒径范围及厚度的废石(土)进行试坑注水试验; 测定回填土石混合体的近似渗透系数, 测试土石混合体的粒径组成, 并计算出各坑土石混合体的平均粒径和非均匀度。试验研究发现, 回填土石混合体的渗透系数分别随平均粒径与非均匀度的增大而增大。降低回填废石(土)的平均粒径和非均匀度可以有效降低回填废石层的渗透性。

**关 键 词:** 土石混和体; 渗透系数; 现场渗透试验; 平均粒径; 非均匀度

**中图分类号:** TU 413

**文献标识码:** A

## In-situ experimental study of permeability of rock and soil aggregates

XU Yang<sup>1,2</sup>, GAO Qian<sup>1</sup>, LI Xin<sup>1</sup>, LI Jun-hua<sup>3</sup>, JIA Yun-xi<sup>3</sup>

(1. Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 2. Northern Engineering & Technology Corporation, MCC, Anshan 114002, China; 3. Sijaying Iron Mine Company of Tangshan Iron and Steel Group Company, Luanxian 063701, China)

**Abstract:** In order to meet the engineering requirements of the design of backfilling waste rock, which will be implemented during surface mining to underground in the pit III of Sijaying iron mine, a large size in-situ permeability test in the test-pit near the pit III is performed. Digging three large size test-pits, an injection test is performed in each test-pit with different ranges of particle sizes and layer thicknesses. The permeability coefficients are measured, the size composition of rock and soil aggregates(RSA) is tested; and the mean particle diameter and the heterogeneous degree are figured out. Through the research, the permeability coefficient of RSA increases with the increase of mean particle diameter and the heterogeneous degree respectively. Accordingly, decreasing mean particle diameter and heterogeneous degree can decrease permeability of waste rock effectively.

**Key words:** rock and soil aggregates; permeability coefficient; in-situ permeability test; mean particle diameter; heterogeneous degree

## 1 引 言

唐钢滦县司家营铁矿位于唐山滦县城南, 为国内特大型矿山之一。该矿Ⅲ采场位于勘测线 S6~N4, 采场露天开采到-42 m 时即将转入地下开采, 采矿方法为“无底柱分段崩落法”, 并采用废石回填露天坑的方法来处理废石。

露天坑回填废石不仅可以减少废石占用良田面积, 而且回填的废石层可以减少露天坑汇水渗入采场量, 降低井下排水量。回填废石(土)层的渗透性, 一方面决定露天坑汇水向井下采场的渗水量, 是井下采场排水设计的重要依据; 另一方面关系到是否会发生井下泥石流(俗称跑黄泥)的安全事故。

因此, 合理准确地预测不同粒径级配回填废石的渗透性, 确定合理的渗透系数, 对于井下排水设计和井下安全生产是至关重要的。

废石主要是以砾石、块石与砂土、黏土为主的土体与块石的混合物。这种材料既不同于一般的均质土体, 又不同于一般的碎裂岩体, 是一种介于均质土体和碎裂岩体之间的特殊工程地质材料<sup>[1]</sup>。出于其物质组成和结构上的特征, 李晓等将其命名为“土石混合体”<sup>[2-3]</sup>。土石混合体属于典型的非均质多孔介质, 其渗透系数是由高渗透性的砾石的渗透系数和低渗透性的土体的渗透系数复合而成的。土的渗透系数可以通过室内渗透试验由达西定律计算得出, 然而土石混合体的渗透系数却难以确定<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2007-07-26

第一作者简介: 徐扬, 男, 1981年生, 主要从事结构设计工作。

因此,进行大尺度现场渗透试验,研究和揭示回填废石在不同粒径组成、厚度情况下的渗透规律显得尤为必要,对预测露天坑回填后渗入井下水量,研究地表排水措施及井下防排水设计具有一定的实际意义。

## 2 土石混合体渗透性试验

### 2.1 试验仪器

依照《土工试验规程》(SL237-1999)<sup>[5]</sup>,试坑注水法采用的现场试验装置如图1和图2所示。

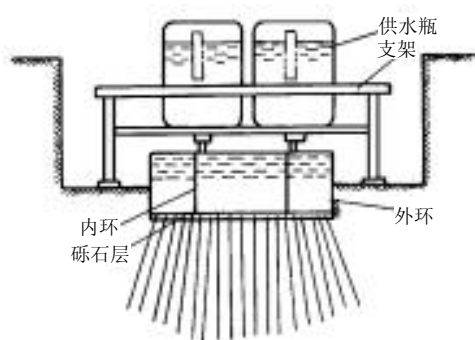


图1 试坑注水法试验装置示意图

Fig.1 Sketch map of in-situ permeability tester



图2 试坑注水法试验装置图

Fig.2 In-situ permeability tester

### 2.2 试验步骤

#### (1) 试坑开挖

在III采场附近开挖3个试坑,试坑编号依次为1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>。每个试坑规格为长×宽×深=8 m×8 m×6 m,图3所示为3<sup>#</sup>试坑。

#### (2) 试坑回填

在排土场及采场附近地区选取不同粒径范围的废石(土),分3层回填到试坑中。因废石层颗粒组成也是影响放矿损失贫化的重要因素,所以为兼顾降低放矿损失贫化而采取分层回填的方式。将粒径最大的废石置于底层,粒径范围由坑底到坑顶逐渐缩小。图4和图5为3<sup>#</sup>试坑回填整平后的底层废

石(土)及回填完毕的3<sup>#</sup>试坑。废石(土)的粒径范围及厚度的选取如表1所示。



图3 3<sup>#</sup>现场试坑图

Fig.3 No.3 test pit



图4 3<sup>#</sup>现场试坑回填后的底层废石(土)

Fig.4 The bottom of backfilled waste rock layer of No.3 test pit



图5 回填完毕的3<sup>#</sup>现场试坑图

Fig.5 Backfilled No.3 test pit

表1 废石粒径及厚度的选取

Table 1 Selection of particle sizes and layer thicknesses of waste rocks

| 位置  | 粒径<br>/ mm | 试坑回填厚度/ m      |                |                |
|-----|------------|----------------|----------------|----------------|
|     |            | 1 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> | 3 <sup>#</sup> |
| 顶层  | <100       | 1.5            | 2.5            | 2.0            |
| 中间层 | 100~500    | 2.0            | 1.5            | 2.5            |
| 底层  | 500~1 000  | 2.5            | 2.0            | 1.5            |

### (3) 开挖试验区、安放试验装置

按照《土工试验规程》(SL 237-1999), 在填好的试坑上按预定深度开挖一面积  $1.0\text{ m} \times 1.5\text{ m}$  的小试坑, 并在其内安放试验装置。

### (4) 注水及观测

注水并记录渗水开始时间及供水瓶的水位和水温。经测定, 3 个试坑在渗水 1 h 后都基本达到了渗流稳定, 开始测记一定时间内流出水量。在 2<sup>#</sup>坑的注水试验过程中, 因其渗流相对较缓慢, 所以适当延长了测记流量的时间。

## 2.3 渗透系数近似计算方法

按《土工试验规程》(SL 237-1999) 提供的公式近似计算渗透系数:

$$k_T = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (2)$$

式中:  $k_T$  为渗透系数( $\text{cm/s}$ );  $Q$  为渗透流量( $\text{cm}^3/\text{s}$ );  $A$  为内环面积( $\approx 400\text{ cm}^2$ );  $k_{20}$  为水温为  $20^\circ\text{C}$  时的渗透系数( $\text{cm/s}$ );  $\eta_T$ 、 $\eta_{20}$  分别为  $T^\circ\text{C}$  和  $20^\circ\text{C}$  时水的动力黏滞系数( $\text{kPa} \cdot \text{s}$ )。

## 3 试验结果与分析

注水试验结果列于表 2 中。

郭庆国<sup>[6]</sup>曾提出, 将粗粒土按渗透系数的不同, 将渗透系数  $K > i \times 10^{-4}\text{ cm/s}$  的粗粒土划为无黏性粗粒土, 将渗透系数  $K < i \times 10^{-4}\text{ cm/s}$  的粗粒土划为黏性粗粒土。由表 2 可知, 回填的土石混合体的渗

透系数较大, 接近无黏性粗粒土的渗透性。在松散程度相近的情况下, 由于 3 个试坑中土石混合体的粒径组成、厚度的不同, 渗透系数表现出较大差异。如 1<sup>#</sup>试坑与 2<sup>#</sup>试坑的渗透系数相差一个数量级左右。在分层回填试坑过程中, 进行现场实测, 获取了土石混合体粒径组成, 并计算出各坑土体的平均粒径  $d_{dj}$  与非均匀度  $K_b$ , 计算公式如下:

$$d_{dj} = \frac{\sum u_i d_{pi}}{u_i} \quad (3)$$

$$K_b = \frac{\sigma}{d_{dj}} \times 100\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum (d_{pi} - d_{dj})^2 u_i}{\sum u_i}}}{d_{dj}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $K_b$  为粒径不均匀度(%);  $\sigma$  为粒径尺寸的标准离差( $\text{mm}$ );  $d_{dj}$  为不同等级废石块的平均粒径( $\text{mm}$ );  $d_{pi}$  为某一粒级的平均直径( $\text{mm}$ );  $u_i$  为相应某一粒级所占重量百分比(%)。

表 3 为 3 个试坑土石混合体的平均粒径、非均匀度及渗透系数。通过线性拟合, 建立平均粒径与渗透系数及非均匀度与渗透系数的关系, 如图 6 和图 7 所示。从图中可以看出, 渗透系数分别随平均粒径与非均匀度的增大而增大, 基本呈线性关系。因而, 回填废石(土)的粒度越小、非均匀度越小, 渗透系数也越小。从降低露天坑汇水渗入井下渗流量的角度考虑, 合理控制回填废石(土)的粒径组成, 降低平均粒径与非均匀度, 可有效降低回填废石层的渗透性。

表 2 试坑注水试验结果  
Table 2 The results of permeability tests

| 试坑<br>编号            | 测量时间 |       | 时间间隔  | 渗入水量  | 水的渗透流量  |          | 近似渗透系数                    | 水温为 20℃ 时的渗透系数                       | 平均渗透系数                    |
|---------------------|------|-------|-------|-------|---------|----------|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
|                     | / h  | / min | / min | / l   | l / min | ml / s   | / 10 <sup>-4</sup> (cm/s) | / 10 <sup>-4</sup> (cm/s)            | / 10 <sup>-4</sup> (cm/s) |
|                     |      |       | (1)   | (2)   | (3)     | (4)      | (5)                       | (6)                                  | (7)                       |
| 1 <sup>#</sup><br>坑 | 17   | 0     |       |       | (2)/(1) | 16.7×(3) | (4)/A                     | (5)×η <sub>T</sub> / η <sub>20</sub> | Σ6/n                      |
|                     | 17   | 20    | 20    | 0.775 | 0.038 8 | 0.647 1  | 16.2                      | 19.3                                 |                           |
|                     | 17   | 40    | 20    | 0.845 | 0.042 3 | 0.705 6  | 17.6                      | 21.1                                 |                           |
|                     | 18   | 0     | 20    | 0.820 | 0.041 0 | 0.684 7  | 17.1                      | 20.4                                 | 20.8                      |
|                     | 18   | 20    | 20    | 0.865 | 0.043 3 | 0.722 3  | 18.1                      | 21.6                                 |                           |
|                     | 18   | 40    | 20    | 0.860 | 0.043 0 | 0.718 1  | 18.0                      | 21.4                                 |                           |
| 2 <sup>#</sup><br>坑 | 9    | 20    |       |       |         |          |                           |                                      |                           |
|                     | 10   | 20    | 60    | 0.190 | 0.003 2 | 0.052 9  | 1.322 1                   | 1.71                                 |                           |
|                     | 11   | 40    | 80    | 0.200 | 0.002 5 | 0.041 8  | 1.043 8                   | 1.35                                 | 1.56                      |
|                     | 12   | 20    | 40    | 0.120 | 0.003 0 | 0.050 1  | 1.252 5                   | 1.62                                 |                           |
| 3 <sup>#</sup><br>坑 | 13   | 20    | 60    | 0.170 | 0.002 8 | 0.047 3  | 1.182 9                   | 1.53                                 |                           |
|                     | 13   | 55    |       |       |         |          |                           |                                      |                           |
|                     | 14   | 15    | 20    | 0.225 | 0.011 3 | 0.187 9  | 4.70                      | 6.09                                 |                           |
|                     | 14   | 35    | 20    | 0.285 | 0.014 3 | 0.238 0  | 5.95                      | 7.72                                 | 7.22                      |
|                     | 15   | 00    | 25    | 0.345 | 0.013 8 | 0.230 5  | 5.76                      | 7.47                                 |                           |
|                     | 15   | 35    | 35    | 0.490 | 0.014 0 | 0.233 8  | 5.85                      | 7.58                                 |                           |

表 3 现场实测土石混合体粒径组成及平均粒径与非均匀度

Table 3 The in-situ particle sizes test and the mean particle diameters and heterogeneous degrees of RSA

| 粒径尺寸/mm           | 0~100 | 100~200 | 200~300 | 300~400 | 400~600 | 600~1000 | 平均粒径      | 非均匀度  | 渗透系数                       |
|-------------------|-------|---------|---------|---------|---------|----------|-----------|-------|----------------------------|
| 平均尺寸/mm           | 50    | 150     | 250     | 350     | 500     | 800      | $d_d$ /mm | $K_b$ | $/k \times 10^{-4}$ (cm/s) |
| 1 <sup>#</sup> 试坑 | 11 %  | 25 %    | 16 %    | 18 %    | 12 %    | 18 %     | 350       | 0.70  | 20.8                       |
| 2 <sup>#</sup> 试坑 | 15 %  | 11 %    | 17 %    | 27 %    | 22 %    | 8 %      | 335       | 0.60  | 1.56                       |
| 3 <sup>#</sup> 试坑 | 12 %  | 14 %    | 24 %    | 20 %    | 18 %    | 12 %     | 343       | 0.63  | 7.22                       |

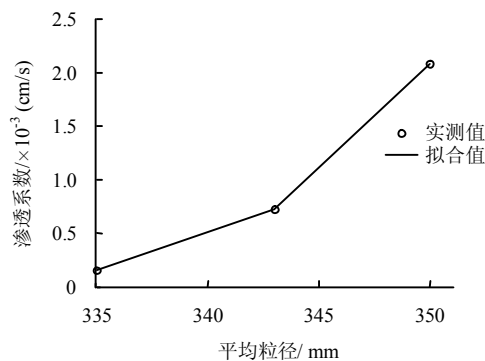


图 6 平均粒径与渗透关系拟合曲线图  
Fig.6 Fitting curve of mean particle diameter and permeability coefficient

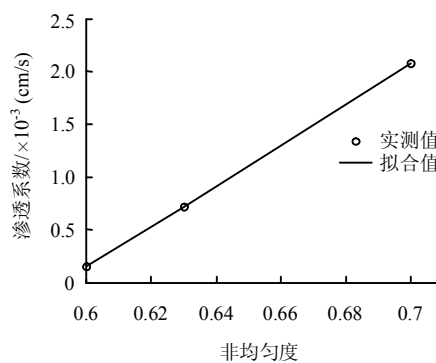


图 7 非均匀度与渗透系数拟合曲线图  
Fig.7 Fitting curve of heterogeneous degree and permeability coefficient

## 4 结 论

(1) 由于土石混合体中含有的块石的粒径通常较大, 所以其渗透系数无法通过传统的室内渗透试验准确测定。现场试坑注水试验虽然耗时、费力、成本高及易受季节影响, 但试验结果已包含了土石混合体的结构及分布因素的影响, 较为准确。

(2) 通过模拟回填露天坑, 进行现场注水试验测定土石混合体的近似渗透系数, 建立了土石混合体颗粒平均粒径、非均匀度与渗透系数的关系, 从中发现回填废石(土)的渗透系数分别随平均粒径与非均匀度的增大而增大。因此, 合理控制回填废石(土)的粒径组成, 降低平均粒径与非均匀度, 可有效降低回填废石层的渗透性。

## 参 考 文 献

[1] 廖秋林, 李晓, 郝钊, 等. 土石混合体研究现状与研究展望[J]. 工程地质学报, 2006, 14(06): 800—808.  
LIAO Qiu-lin, LI Xiao, HAO Zhao, et al. Current status and future trends of studies on rock and soil aggregates(RSA)[J]. *Journal of Engineering Geology*,

2006, 14(6): 800—808.

[2] LI Xiao, LIAO Qiu-lin, HE Lian-ming. In-situ tests and stochastic structural model of rock and soil aggregate in the Three Gorges Reservoir area[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(3): 494.  
[3] 殷越平. 长江三峡库区移民迁建新址重大地质灾害及防治研究[M]. 北京: 地质出版社, 2004.  
[4] 周中, 傅鹤林, 刘宝琛, 等. 土石混合体渗透性能的试验研究[J]. 湖南大学学报, 2006, 33(6): 25—28.  
ZHOU Zhong, FU He-lin, LIU Bao-chen, et al. Experimental study of the permeability of soil-rock-mixture[J]. *Journal of Hunan University*, 2006, 33(6): 25—28.  
[5] SL237—1999 中华人民共和国行业标准土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.  
[6] 郭庆国. 无黏性粗粒土工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999.