

铁道标准设计

Railway Standard Design

ISSN 1004-2954, CN 11-2987/U

## 《铁道标准设计》网络首发论文

题目: 基于回归正交试验的高地应力 TBM 隧道变形影响因素敏感性研究  
作者: 任道远, 高新强, 马泽骋, 樊浩博, 朱正国  
DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.202210090004  
收稿日期: 2022-10-09  
网络首发日期: 2023-04-14  
引用格式: 任道远, 高新强, 马泽骋, 樊浩博, 朱正国. 基于回归正交试验的高地应力 TBM 隧道变形影响因素敏感性研究[J/OL]. 铁道标准设计. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202210090004>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 基于回归正交试验的高地应力 TBM 隧道变形影响因素敏感性研究

任道远<sup>1,2</sup>, 高新强<sup>1,2,3,4</sup>, 马泽骋<sup>1,2</sup>, 樊浩博<sup>2</sup>, 朱正国<sup>2,4</sup>

(1. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学土木工程学院, 石家庄 050043; 3. 河北省交通工程结构力学行为演变与控制重点实验室, 石家庄 050043; 4. 河北省金属矿山安全高效开采技术创新中心, 石家庄 050043)

**摘要：**依托某国家重点铁路工程隧道穿越高地应力 TBM 施工段, 通过精细化三维数值模拟与回归正交试验相结合, 运用多元线性回归的方法对试验结果进行研究, 分析不同支护因素的敏感性并判明其对控制围岩变形起到的利弊作用, 同时得到该试验的一次回归方程, 为结构优化提供快速计算公式, 以此来调整参数, 优化支护结构。一次回归正交试验选取短锚杆长度、长锚杆长度、钢拱架间距、锚杆环向和纵向间距、喷混凝土等级与地应力水平作为研究影响因素, 采用  $L_8(2^7)$  正交表, 不考虑交互作用进行回归正交试验, 计算常数项与各偏回归项系数, 建立回归方程, 对试验结果进行方差分析与失拟性检验。检验结果表明: 因素地应力水平  $F$  值大于  $F_{0.001}$ , 地应力水平对围岩变形起到决定性影响, 短锚杆长度、钢拱架间距与锚杆纵向间距的  $F$  值均大于  $F_{0.025}$ , 其均对控制围岩变形有显著影响; 所建立的回归方程显著, 失拟性检验不显著, 回归方程具有较好的拟合程度。在设计施工时首先应考虑采取措施释放地应力, 其次在选取支护参数时应将短锚杆长度、钢拱架间距与锚杆纵向间距纳入重点考虑内容。

**关键词：**高地应力隧道; 回归正交试验; 三维数值分析; 多元一次回归方程; 敏感性研究; 多重联合支护; 失拟性检验

中图分类号: U 459.1; U455 文献标识码: A DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.202210090004

## Study on Influencing Factors of Surrounding Rock deformation of TBM Tunnel With High Ground Stress Based on Regression Orthogonal Test

REN Daoyuan<sup>1,2</sup>, GAO Xinqiang<sup>1,2,3,4</sup>, MA Zecheng<sup>1,2</sup>, FAN Haobo<sup>2</sup>, ZHU Zhengguo<sup>2,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. Hebei Key Laboratory of Mechanics Behavior Evolution and Control of Transport Engineering Structures, Shijiazhuang 050043, China; 4. Hebei Technology and Innovation Center on Safe and Efficient Mining of Metal Mine, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** This paper relies on a national key railway project crossing the high ground stress TBM construction section. Through the combination of refining three-dimensional numerical simulation and regression orthogonal design experiment, the results are analyzed by multiple linear regression method. The sensitivity of different supporting factors is studied, their advantages and disadvantages in controlling surrounding rock deformation are identified. At the same time, multiple linear regression equation of the experiment is obtained, which provides a fast calculation formula for structural optimization, so as to adjust the support parameters

and optimizing the structure. In linear regression orthogonal experiment, the length of short anchor bolt, the length of long anchor bolt, the longitudinal spacing of steel arch, the circumferential and longitudinal spacing of anchor bolt, and the shotcrete grade and ground stress level were selected as the influencing factors. Regression orthogonal design experiment with  $L_8(2^7)$  orthogonal table without considering interaction effect. The constant term and coefficients of partial regression term were calculated, and the multiple linear regression

收稿日期: 2022-10-09; 修回日期: 2022-12-06

基金项目: 中国铁建股份有限公司科技重大专项 (2019-A05); 石家庄铁道大学研究生创新资助项目 (YC2022017)

作者简介: 任道远 (1997—), 男, 2023 年毕业于石家庄铁道大学, 工学硕士, 主要从事隧道围岩稳定机理研究工作, E-mail: rendaoyuan27@163.com。

通信作者: 高新强 (1970—), 男, 教授, 博士生导师, 2005 年毕业于西南交通大学桥梁与隧道工程专业, 工学博士, 主要从事隧道围岩稳定机理研究工作, E-mail: gxqgaixinqiang@163.com。

equation was established, and the results were analyzed by analysis of variance and testing lose effectiveness of fit. The results show that the  $F$  value of ground stress is greater than  $F_{0.001}$ , and the ground stress has a decisive influence on the deformation of the surrounding rock. The  $F$  values of the length of short anchor bolt, the longitudinal spacing of the anchor bolt and steel arch are all greater than  $F_{0.025}$ , which have a significant impact on controlling the deformation of the surrounding rock. The established regression equation is significant, the lack of fit test is not significant, so the regression equation has a good degree of fitting. Therefore, measures should be taken to release ground stress in design and construction first, and then the length of short anchor bolt, the spacing of steel arch and the longitudinal spacing of anchor bolt should be taken into account when selecting support parameters.

**Key words:** high ground stress tunnel; regression orthogonal experiment; three-dimensional numerical simulation; multiple linear regression equation; sensitivity study; multiple combined support; testing lose effectiveness of fit

## 引言

TBM 施工相较于钻爆法具有施工速度快、对围岩扰动小等优点, TBM<sup>[1]</sup>在隧道建设中发挥着不可替代的重要作用。陈桥等分析了某高原铁路隧道 TBM 掘进段不同二次衬砌内径分布情况和二次衬砌多样性给 TBM 同步衬砌施工带来的不利影响, 提出减少衬砌断面种类并采用具有变径功能的衬砌台车的解决方案<sup>[2]</sup>。方星桦<sup>[3]</sup>等通过 FLAC<sup>3D</sup> 软件研究敞开式 TBM 在层状岩体隧道施工时的围岩变形规律。张兵<sup>[4]</sup>、唐志强<sup>[5]</sup>等分析 TBM 在城市轨道交通浅埋隧道中的应用, 通过数值模拟, 研究敞开式 TBM 施工隧道的围岩变形情况。靳宝成<sup>[6]</sup>针对断层破碎带、节理密集带等特殊地层, 提出设置辅助坑道来提前施工, 然后 TBM 步进通过的方案。秦银平<sup>[7]</sup>等研究在复杂地质条件下 TBM 卡机脱困技术, 提高 TBM 在复杂地质条件下的适用性。孙明社<sup>[8]</sup>等通过二次回归正交试验研究隧道工程非概率可靠度问题。姜博龙<sup>[9]</sup>等基于带隙理论和正交分析理论, 优化地铁目标频段隔振排桩设计与选型。苏永华<sup>[10]</sup>等通过岩石基本参数等 7 个因素设计的回归正交试验, 建立考虑多个因素的开挖面位移释放系数拟合公式。LI<sup>[11]</sup>、WEI<sup>[12]</sup>、王立新<sup>[13]</sup>、徐旭<sup>[14]</sup>等通过正交试验与数值模拟相结合, 总结影响浅埋隧道地层变形因素的主次关系, 得出深开挖中的各个参数对多层支撑深开挖变形的影响程度和各个参数的灵敏度。

针对敞开式 TBM 的研究主要是围绕层状、围岩破碎等复杂地质条件下的 TBM 施工及支护等方面, 利用回归正交试验大多采用围岩力学参数等作为影响因素研究围岩变形, 而采用一次回归正交设计试验将支护参数与地应力水平作为影响因素对埋深超过 1km 的高地应力敞开式 TBM 隧道围岩变形研究还很少见。

## 1 工程概况

### 1.1 工程背景

依托隧道长 32.655km, 最大埋深约 1600m, 隧道高差大于 1000m。线路纵坡为单面下坡。TBM 施工段中 1 号斜井工区采用 TBM 施工段长 10.907km, 顺坡施工, 隧道穿越岩性主要为片麻岩夹片岩、糜棱岩; 2 号斜井工区采用 TBM 施工段长 10.09km, 反坡施工, 隧道岩性主要为片麻岩夹片岩、糜棱岩、灰岩、砂岩、凝灰岩、砂岩夹砾岩。不良地质段中 I 型大变形<sup>[15]</sup>长度 3090m, 占比约 9%。以 2 号斜井工区 TBM 穿越高地应力段为研究对象, 该段主要为 IV 级围岩, 围岩岩石饱和抗压强度  $R_c$  平均值为 85.31MPa, 地应力为 30.1MPa, 岩石强度应力比  $R_c/\sigma_{\max}=2.83<4$ , 根据《工程岩体分级标准》<sup>[16]</sup>, 该地区隧道为极高地应力区隧道, 施工采用 TBM 为圆形断面, 开挖直径为 11m。

### 1.2 支护体系

TBM 配套锚杆钻机、钢拱架安装架等支护系统, 在围岩露出护盾后可立即施作钢拱架、锚杆、钢筋网和喷混凝土。采用超前注浆<sup>[17]</sup>小导管来控制掌子面前方围岩变形, 小导管采用复合玻璃纤维导管, 长 9m, 搭接长度 1.8m, 外插角 5°, 浆液扩散范围按 1m 计, 通过刀盘前方预留孔洞, 利用敞开式 TBM 刀盘后方锚杆钻机打入, 锚杆采用长短锚杆相结合的支护方式, 喷射混凝土分为初喷混凝土厚度 10cm 和复喷混凝土厚度 25cm 两次施工, 短锚杆与初喷混凝土在护盾脱出围岩后及时施作, 复喷混凝土与长锚杆在距离掌子面 24m 处施作。初次施作初期支护的目的在于利用喷混凝土及时封闭围岩, 防止围岩裸露时间过长失去自稳能力, 因而导致松动掉块和坍塌等灾害, 同时允许围岩变形, 释放地应力, 施作的复喷混凝土和长锚杆作为主要承担荷载的初期支护结构, 目的在于支撑围岩, 提

高支护结构稳定性。支护方案参数见表 1。

表 1 支护方案参数

超前注浆小导管	喷射混凝土		锚杆		钢拱架
	C30 高性能混凝土		短锚杆	长锚杆	
Φ42mm 玻璃纤维小导管, 长 9m, 搭接长度 1.8m, 外插角 5°, 拱顶及边墙 240° 范围施工	初喷 厚 10cm, 脱出护盾 后及时施作	复喷 厚 25cm, 距离掌子面 24 m 施工	长 3m, 间距 0.9m×1.0m (纵×环)	长 10m, 间距 0.9m×1.0m (纵×环)	全环 HW200 型钢 0.9m/榀

2 精细化三维数值模型

采用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup>, 以该隧道IV级围岩段正洞断面为基础建立精细化三维数值模型, 该段埋深在 1000~1400m, 地应力水平为 19.8~30.1MPa, 隧道采用敞开式 TMB 开挖, 每次循环 TBM 步进距离  $L=1.8\text{m}$ 。数值模型在长、宽、高 3 个方向的尺寸均为 90m, 见图 1。模拟区段隧道埋深  $h$  为 1400m 时, 模型顶面施加 29.06MPa 垂直荷载, 侧面施加 14.12MPa 水平荷载;  $h$  为 1000m 时, 模型顶面施加 19.08MPa 垂直荷载, 侧面施加 9.41MPa 水平荷载, 底面采用竖向位移约束。围岩、注浆后加固区与喷混凝土均视为连续、均质、各向同性介质, 采用 Mohr-Coulomb 屈服准则。喷混凝土与撑靴采用实体单元模拟, 锚杆采用 cable 单元模拟, 钢拱架采用 beam 单元模拟, 围岩物理力学参数见表 2, 隧道初期支护参数见表 3。

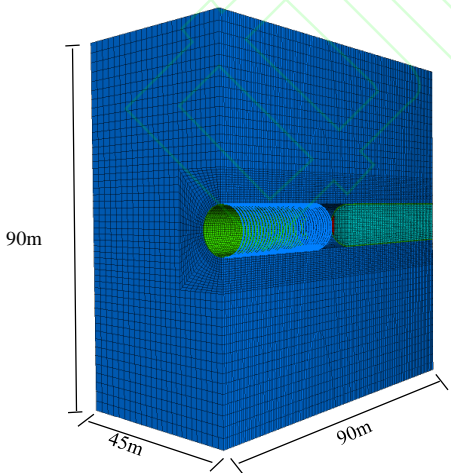
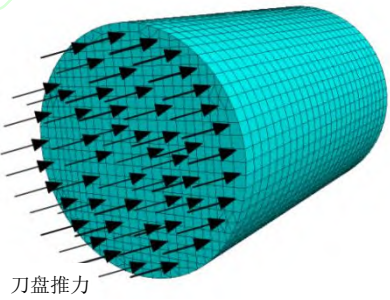
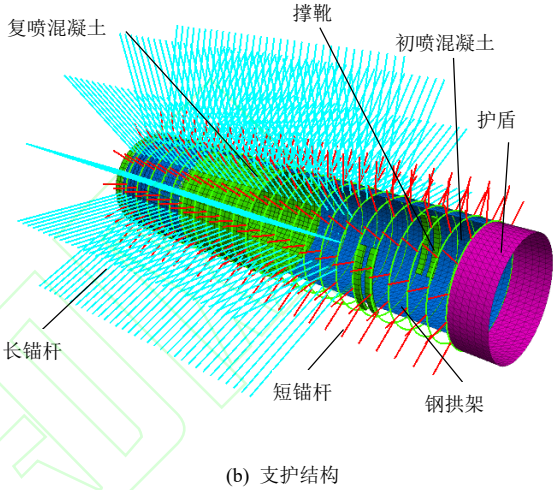


图 1 三维数值计算模型

表 2 围岩及撑靴物理力学参数

材料	容重/ ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角 / ( $^\circ$ )
IV级围岩	21.5	3.65	0.32	0.45	33
撑靴	78.5	206	0.3	—	—

表 3 隧道初期支护参数

材料	容重/ ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角/ ( $^\circ$ )
C30 喷混凝土	23.0	25.0	0.2	1.80	55.0
锚杆	78.5	206	0.3	1.67	46.0
钢拱架	78.5	206	0.3	—	—
注浆加固区	21.7	4.75	0.31	1.00	39.0



每次循环 TBM 步进距离为 1.8 m, 一步进过程分 3 次开挖, 一次开挖距离为 0.6m, 模拟开挖过程为: ①刀盘掘进时施加开挖推力, 撑靴施作水平支撑力与推进力; ②先刀盘掘进、护盾支护, 然后刀盘掘进、删除护盾结构单元, 施作短锚杆、钢拱架、初喷射混凝土, 随后撑靴单元向掘进方向平行移动 1.8m; ③距离掌子面 24m 施作长锚杆并复喷初期支护混凝土; ④循环掘进至隧道贯通。

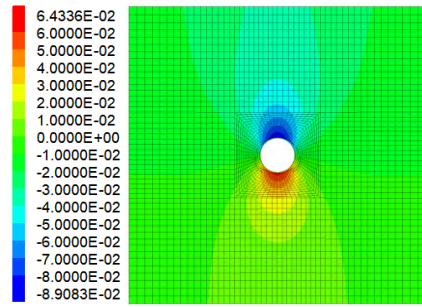
TBM 推进力主要包括: 护盾等设备与围岩的摩擦力  $F_1$ 、刀盘推力  $F_3$ 、后配套设备牵引力  $F_2$ 、主梁导轨与鞍架之间的摩擦力  $F_4$ 。TBM 推进力依照式(1)<sup>[18]</sup>计算。

$$F_t = K \times (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \quad (1)$$

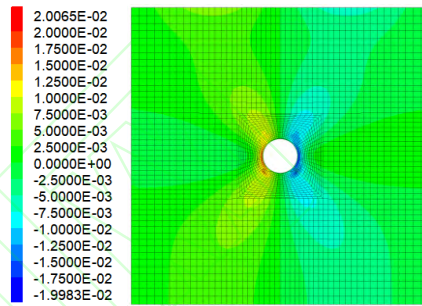
式中,  $K$  为储备系数, 取 1.2;  $F_1 = \mu_1 \times W_1 = 0.4 \times 2750 \text{ kN} = 1100 \text{ kN}$ ,  $\mu_1$  为围岩与底护盾的摩擦系数,  $W_1$  为底护盾作用在围岩上的数值压力;  $F_2 = \mu_2 \times W_2 = 0.07 \times 16000 \text{ kN} = 1120 \text{ kN}$ ,  $\mu_2$  为车轨和钢轨之间的摩擦系数,  $W_2$  为后配套系统总重;  $F_3 = F_{sc} \times N = 335.5 \text{ kN} \times 76 = 25500 \text{ kN}$ ,  $F_{sc}$  为滚刀额定承载能力,  $N$  为刀盘配置的数量;  $F_4 = \mu_i \times (Q \times k) = 0.25 \times (2150 \text{ kN} \times 0.3) = 161 \text{ kN}$ ,  $\mu_i$  为鞍架与主梁导轨之间的摩擦系数,  $Q$  为主机总重量,  $k$  为重量分配系数。经计算得  $F_t = 33457.5 \text{ kN}$ 。

模型中刀盘推力、转矩通过掌子面施加应力的方式实现模拟, 总推力按照实际掘进参数选取为 25500kN, 换算为掌子面均布荷载为 268.5kPa, 在掌子面后 10m 处预留的撑靴单元上施加垂直于边墙围岩面荷载以模拟撑靴支撑力, 平行于围岩沿隧道轴线方向的力以模拟撑靴提供给 TBM 的推进力, 支撑力按照实际参数选取为 66300kN, 撑靴上接地比压为 3MPa, 推进力按照计算取值为 16728kN。开挖一步进后, 删除上一步施加在撑靴与掌子面上的应力, 同时施加下一掘进步撑靴和掌子面位置的应力。

为减小模型边界效应对计算结果的影响, 计算完成后均取模型中间断面( $y=45\text{m}$ )作为分析断面, 竖向位移和水平位移云图如图 2 所示。可从中直接得到正交试验评价指标拱顶沉降与水平位移的数值。



(a) 竖向位移



(b) 水平位移

图 2 隧道围岩位移云图 (单位: m)

### 3 一次回归正交试验

一次回归正交试验是把正交试验设计与回归分析相结合的一种分析方法, 其利用合理的、较少的试验次数所得到的试验结果, 研究得出各试验因素与试验结果之间的经验公式, 即建立试验结果  $y$  与不同试验因素  $x_1, x_2, \dots, x_k$  之间的一次回归方程。

#### 3.1 回归正交试验设计

首先确定因素的变化范围。设因素  $x_j$  的水平变化范围是  $[x_{j1}, x_{j2}]$ , 则  $x_{j1}$  为因素  $x_j$  的下水平,  $x_{j2}$  为因素  $x_j$  的上水平,  $x_{j0}$  为因素  $x_j$  的零水平,  $x_{j0}$  按照式(2)计算。

$$x_{j0} = (x_{j1} + x_{j2}) / 2 \quad (2)$$

其次对因素及其水平进行编码。由于各因素  $x_j$  的单位与变化范围均不相同, 不同因素  $x_j$  之间无法进行比较。为避免因素  $x_j$  的单位与取值范围不同产生的影响, 对因素的各水平  $x_{ji}$  进行规范处理, 将因素各水平统一规整至  $[-1, 1]$  中。将试验结果  $y$  与因素  $x_j$  之间的回归问题转换为试验结果  $y$  与编码  $z_j$  之间的回归问题。

$z_j$  称为因素  $x_j$  的编码, 也叫规范变量, 因素  $x_j$  也被称为自然变量, 两者之间的线性变换关系式为

式(3)。其中,  $\Delta_j$  为因素的变化间距, 按照式(4)计算。

$$z_j = (x_j - x_{j0}) / \Delta_j \quad (3)$$

$$\Delta_j = (x_{j2} - x_{j1}) / 2 \quad (4)$$

因素进行线性变换的同时, 各因素水平的编码也得到确定, 因素水平编码按照式(5)转换。

$$z_{ji} = (x_{ji} - x_{j0}) / \Delta_j \quad (5)$$

经过计算发现,  $x_j$  线性变换为规范变量  $z_j$  后, 编码值上水平编码  $z_{j2}=1$ , 下水平编码  $z_{j1}=-1$ , 零水平编码  $z_{j0}=0$ 。

本试验通过综合考虑 TBM 隧道施工过程中的各种影响因素。将短锚杆长度  $x_1$ 、长锚杆长度  $x_2$ 、钢拱架纵向间距  $x_3$ 、锚杆环向间距  $x_4$ 、锚杆纵向间距  $x_5$ 、喷混凝土等级  $x_6$ 、地应力水平  $x_7$  等作为本次数值模拟试验的影响因素, 不考虑交互作用, 通过整理得到各因素水平编码见表 4。

表 4 各因素水平编码

编码 $z_j$	短锚杆长度 $x_1/\text{m}$	长锚杆长度 $x_2/\text{m}$	钢拱架纵向间 距 $x_3/\text{m}$	锚杆环向间距 $x_4/\text{m}$	锚杆纵向间距 $x_5/\text{m}$	喷混凝土等级 $x_6$	地应力水平 $x_7/\text{MPa}$
-1	3	8	0.6	0.9	0.6	C20	20
0	4	12	1.2	1.4	1.2	C25	25
1	5	16	1.8	1.9	1.8	C30	30
$\Delta_j$	1	4	0.6	0.5	0.6	5	5

各因素的水平值大小是通过工程类比法确定, 选取相近工程项目的支护参数, 且考虑各项支护参数在实际施工中的可行性。其中, 2m 长的短锚杆长度过短, 其控制效果较弱, 6m 长的短锚杆在施作时施工时间较长, 不利于快速施工, 因此选取 3m 和 5m 分别作为短锚杆长度的上下水平; 钢拱架与锚杆的纵向间距主要受 TBM 开挖步进距离影响, 一次步进至少施作一次支护, 间距过短又导致过于密集, 因此两者上水平为 1.8m, 下水平为 0.6m; C35 喷混凝土短时间内难以达到要求的抗压强度, 而规范<sup>[19]</sup>要求, 喷射混凝土的设计强度等级不应低于 C20, 因此选用 C20 与 C30 分别作为其上下水平;

长锚杆长度与锚杆环向间距主要参考相似工程; 地应力为该段隧道最大与最小埋深时的地应力水平, 分别选取为其上下水平。

结合回归正交试验设计的特点, 选择  $L_8 (2^7)$  二水平正交表进行回归正交试验设计, 在此基础上增加 3 次零水平试验<sup>[20]</sup>。将拱顶沉降和水平位移进行加权计算得到评分  $y$ , 加权计算公式按式(6)计算, 运用工程类比法, 根据相似工程中竖向与水平位移的比例,  $\alpha$  取值 0.7,  $\beta$  取值 0.3。试验设计及拱顶沉降和水平位移三维模型计算结果见表 5。

$$y = y_1 \times \alpha + y_2 \times \beta \quad (6)$$

表 5 多元一次回归正交试验设计及结果评分

试 验 号	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$	$z_6$	$z_7$	拱顶沉降 $y_1/\text{mm}$	水平位移 $y_2/\text{mm}$	评分 $y$
1	-1 ( $x_1=3\text{m}$ )	-1 ( $x_2=8\text{m}$ )	-1 ( $x_3=0.6\text{m}$ )	-1 ( $x_4=0.9\text{m}$ )	1 ( $x_5=1.8\text{m}$ )	1 (C30)	1 ( $x_7=30\text{m}$ )	91.556	22.925	70.967
2	-1	1 ( $x_2=16\text{m}$ )	1 ( $x_3=1.8\text{m}$ )	1 ( $x_4=1.9\text{m}$ )	1	1	-1 ( $x_7=20\text{m}$ )	58.101	11.492	44.118
3	1 ( $x_1=5\text{m}$ )	1	-1	-1	-1 (0.6)	1	-1	53.828	8.135	40.120
4	-1	-1	-1	1	-1	-1 (C20)	-1	57.155	10.591	43.186
5	1	-1	1	-1	1	-1	-1	58.900	12.023	44.837
6	-1	1	1	-1	-1	-1	1	92.102	22.908	71.343
7	1	1	-1	1	1	-1	1	91.702	23.244	71.165
8	1	-1	1	1	-1	1	1	90.634	21.640	69.936
9	0 ( $x_1=4\text{m}$ )	0 ( $x_2=12\text{m}$ )	0 ( $x_3=1.2\text{m}$ )	0 ( $x_4=1.4\text{m}$ )	0 ( $x_5=1.2\text{m}$ )	0 (C25)	0 ( $x_7=25\text{m}$ )	74.635	16.786	57.281
10	0	0	0	0	0	0	0	74.247	16.375	56.885
11	0	0	0	0	0	0	0	74.635	16.786	57.281

3.2 建立回归方程

不考虑交互作用的回归方程见式(7)，常数项按式(8)计算，各偏回归系数按式(9)计算。

$$y=a+b_1z_1+b_2z_2+\cdots+b_kz_k \tag{7}$$

$$a=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^ny_i=\bar{y} \tag{8}$$

$$b_j=\frac{1}{m_c}\sum_{i=1}^ny_iz_{ji} \tag{9}$$

式中， $a$  为常数项； $b_1, b_2...b_k$  为待定回归系数； $z_1, z_2...z_k$  为  $k$  个因素  $x_j$  的规范变量； $z_{ji}$  为上下水平编码； $m_c$  为二水平试验次数。

根据回归系数<sup>[21]</sup>的计算式，回归正交试验的计算过程见表 6。

表 6 回归正交试验计算

试验号	$Y/\text{mm}$	$y^2/\text{mm}^2$	$yz_1/\text{mm}$	$yz_2/\text{mm}$	$yz_3/\text{mm}$	$yz_4/\text{mm}$	$yz_5/\text{mm}$	$yz_6/\text{mm}$	$yz_7/\text{mm}$
1	70.967	5 036.255	-70.967	-70.967	-70.967	-70.967	70.967	70.967	70.967
2	44.118	1 946.394	-44.118	44.118	44.118	44.118	44.118	44.118	-44.118
3	40.12	1 609.611	40.12	40.12	-40.12	-40.12	-40.12	40.12	-40.12
4	43.186	1 864.991	-43.186	-43.186	-43.186	43.186	-43.186	-43.186	-43.186
5	44.837	2 010.322	44.837	-44.837	44.837	-44.837	44.837	-44.837	-44.837
6	71.343	5 089.888	-71.343	71.343	71.343	-71.343	-71.343	-71.343	71.343
7	71.165	5 064.436	71.165	71.165	-71.165	71.165	71.165	-71.165	71.165
8	69.936	4 890.985	69.936	-69.936	69.936	69.936	-69.936	69.936	69.936
9	57.281	3 281.068	0	0	0	0	0	0	0
10	56.885	3 235.933	0	0	0	0	0	0	0
11	57.281	3 281.068	0	0	0	0	0	0	0
总和	627.117	37 310.951	-3.557	-2.178	4.797	1.137	6.501	-5.39	111.15

表 6 中， $y$  为试验结果评分， $y^2$  为试验结果评分的平方， $yz_j$  为试验结果评分与编码的乘积，将其代入式(8)、式(9)计算出回归方程中的各项系数，其中  $n=11, m_c=8$ 。即： $a=57.01064, b_1=-0.44457, b_2=-0.27226, b_3=0.59958, b_4=0.14217, b_5=0.81268, b_6=-0.6738, b_7=13.8938$ 。则  $y$  与规范变量  $z_j$  的回归方程为

$$y=57.01064-0.44457z_1-0.27226z_2+0.59958z_3+0.14217z_4+0.81268z_5-0.6738z_6+13.8938z_7 \tag{10}$$

由方程(10)可知，回归系数值为负表示该数量性因素越大则越有利于控制围岩变形，反之为正。其影响因素的主次关系为：地应力等级  $z_7>$  锚杆纵向间距  $z_5>$  喷混凝土等级  $z_6>$  钢拱架间距  $z_3>$  短锚杆长度  $z_1>$  长锚杆长度  $z_2>$  锚杆环向间距  $z_4$ 。

3.3 方差分析

通过方差分析<sup>[22]</sup>研究各影响因素  $x_j$  对综合评分  $y$  的重要性，最终得出各影响因素的影响程度，列出各因素的显著性情况。方差分析中的总平方和、一次项偏回归平方和、回归平方和、残差平方和分别按式(11)~式(14)计算。

$$SS_T=\sum_{i=1}^n(y_i-\bar{y})^2=\sum_{i=1}^ny_i^2-\frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^ny_i\right)^2 \tag{11}$$

$$SS_j=m_cb_j^2 \tag{12}$$

$$SS_R=\sum SS_j \tag{13}$$

$$SS_e=SS_T-SS_R \tag{14}$$

其中，试验总的自由度  $df_T=n-1$ ，各个偏回归平方和的自由度  $df_j=1$ ，回归平方和自由度为  $df_R=\sum df_j$ ，残差自由度为  $df_e=df_T-df_R$ 。各个偏回归项的均方和、回归均方和与残差均方和分别按照式(15)~式(17)计算，各项的  $F$  值为  $F=MS/MS_e$ 。多元线性回归的方差分析见表 7。

$$MS_j=SS_j/df_j \tag{15}$$

$$MS_R=SS_R/df_R \tag{16}$$

$$MS_e=SS_e/df_e \tag{17}$$

表 7 多元线性回归的方差分析

差异源	平方和 SS/mm <sup>2</sup>	自由度 df/个	均方和 MS/mm <sup>2</sup>	F 值	显著性
$z_1$	1.581	1	1.581	25.923	**
$z_2$	0.593	1	0.593	9.723	*
$z_3$	2.876	1	2.876	47.154	**
$z_4$	0.162	1	0.162	2.651	不显著
$z_5$	5.284	1	5.284	86.629	**
$z_6$	3.632	1	3.632	59.550	**
$z_7$	1 544.301	1	1 544.301	25 319.946	***
$SS_R$	1 558.429	7	222.633	3 650.225	***
$SS_e$	0.183	3	0.061		
$SS_T$	1 558.612				

注: \*\*\*表示非常显著; \*\*表示较为显著; \*表示一般显著, 下表同。

查  $F$  表可知,  $F_{0.1}(1,3)=5.54$ ,  $F_{0.025}(1,3)=17.44$ ,  $F_{0.001}(1,3)=167$ ,  $F_{0.1}(7,3)=5.27$ ,  $F_{0.025}(7,3)=14.62$ ,  $F_{0.001}(7,3)=131.6$ 。由表 4 可知,  $z_4=2.651$  小于临界值  $F_{0.1}(1,3)$ , 所以不显著, 即该因素对控制围岩变形影响不大。经检验不显著的因素应归入残差<sup>[23]</sup>, 重新检验, 不显著因素并入残差后的方差分析见表 8。因素  $z_7=25319.946 > F_{0.001}(1,3)$ , 对试验指标影响非常显著, 为决定性影响因素;  $z_1=25.923 > F_{0.025}(1,3)$ ,  $z_3=47.154 > F_{0.025}(1,3)$ ,  $z_6=59.550 > F_{0.025}(1,4)$ , 对试验指标影响较为显著, 为主要影响因素;  $z_2=9.723 > F_{0.1}(1,3)$ , 对试验指标影响一般显著, 为一般影响因素。  $F_R=3 650.225 > F_{0.001}(7,3)$ , 回归方程显著。

表 8 不显著因素并入残差后的方差分析

差异源	SS/mm <sup>2</sup>	Df/个	MS/mm <sup>2</sup>	F	显著性
$z_1$	1.581	1	1.581	18.35	**
$z_2$	0.593	1	0.593	6.882	*
$z_3$	2.876	1	2.876	33.378	**
$z_5$	5.284	1	5.284	61.32	***
$z_6$	3.632	1	3.632	42.152	**
$z_7$	1 544.301	1	1 544.301	17 922.51	***
$SS_R$	1 558.429	6	259.738	3 014.411	***
$SS_e$	0.345	4	0.086		
$SS_T$	1 558.612				

其中,  $F_{0.1}(1,4)=4.54$ ,  $F_{0.025}(1,4)=12.22$ ,  $F_{0.001}(1,4)=74.14$ ,  $F_{0.1}(6,4)=4.01$ ,  $F_{0.025}(6,4)=9.20$ ,  $F_{0.001}(6,4)=50.53$ ,  $z_1$ 、 $z_3$ 、 $z_5$ 、 $z_6$  与  $z_7$  的  $F$  值均大于  $F_{0.05}(1,6)$ , 该 5 项因素仍具有显著性, 回归方程显著。

### 3.4 失拟性检验<sup>[24]</sup>

显著性分析只能说明对于计算的残差平方和而言, 各因素对试验结果的影响是否显著, 即使建

立的方程是显著的, 也只反映回归分析方程在试验点上与试验结果的拟合程度较好, 不能够说明在整个研究范围内回归方程能够与试验值有较好的拟合效果。为检验一次回归在所研究区域内部的拟合情况, 对试验进行失拟性检验。零水平试验次数  $m_0=3$ 。

重复试验误差

$$SS_{el} = \sum_{i=1}^{m_0} y_{0i}^2 - \frac{1}{m} \left( \sum_{i=1}^{m_0} y_{0i} \right)^2 = (3281.068 + 3235.933 + 3281.068) - (57.281 + 56.885 + 57.281)^2 / 3 = 0.104$$

试验误差自由度  $df_{el} = m_0 - 1 = 2$ , 失拟平方和

为残差平方和减去重复试验误差平方和

$$SS_{Lf} = SS_e - SS_{el} = 0.079, \text{ 失拟平方和自由度}$$

$$df_{Lf} = df_e - df_{el} = 1, \text{ 失拟性检验}$$

$$F_{Lf} = \frac{SS_{Lf} / df_{Lf}}{SS_{el} / df_{el}} = 1.512, F_{Lf} \text{ 小于 } F_{0.1}(1,2) = 8.53,$$

检验结果表明, 失拟不显著, 回归模型在所研究范围内具有较好的拟合程度。

### 3.5 一次线性回归方程

由以上计算, 剔除不显著影响因素, 可得新的回归方程为

$$y = 57.01064 - 0.44457z_1 - 0.27226z_2 + 0.59958z_3 + 0.81268z_5 - 0.6738z_6 + 13.8938z_7 \quad (18)$$

将  $z_1=(x_1-4)/1$ ,  $z_2=(x_2-12)/4$ ,  $z_3=(x_3-1.2)/0.6$ ,  $z_5=(x_5-1.2)/0.6$ ,  $z_6=(x_6-25)/5$ ,  $z_7=(x_7-25)/5$  代入式(18)整理可得

$$y = -0.44457x_1 - 0.06807x_2 + 0.9993x_3 + 1.35447x_5 - 0.13476x_6 + 2.77876x_7 - 9.31886 \quad (19)$$

由式(19)可知, 短锚杆长度、钢拱架间距、锚杆纵向间距、混凝土厚度与地应力大小对控制围岩变形均有影响, 且地应力大小影响最显著, 起到决



定性作用,钢拱架纵向间距、锚杆纵向间距与短锚杆长度次之。所以在进行高地应力隧道 TBM 初期支护设计时应充分考虑这四点因素的影响程度来选定参数。

#### 4 支护优化与回归方程的适用性

根据一次回归方程,在试验各因素的水平范围内,选取最佳的支护参数组合,在多种支护组合方案中,提供一套对围岩变形控制较好的支护方案,其中显著性因素选择有利于控制围岩变形的参数,非显著性因素采用中间值,即短锚杆长度为 5m、长锚杆长 16m、钢拱架间距为 0.6m、锚杆环向与纵向间距为  $1.4\text{m} \times 0.6\text{m}$ 、喷混凝土等级 C30。将以上支护参数代入回归方程(18),分别计算出地应力水平 30, 20, 10MPa 条件下的方程预测值  $y_r$ 。同时进行模型计算,得到拱顶沉降  $y_1$  与水平位移  $y_2$ ,按照式(5)计算,得到数值模拟值  $y_m$ 。回归方程预测值与数值模拟值的结果对比见表 9。

表 9 方程预测与数值模拟的结果对比

地应力水 平/MPa	数值模拟值 $y_m/\text{mm}$			回归方程预测 值 $y_r/\text{mm}$	差值 /mm
	$y_1$	$y_2$	$y_m$		
30	88.639	19.384	67.862	68.101	0.239
20	54.880	7.633	40.706	40.314	0.392
10	24.490	1.427	17.571	12.526	5.045

由表 9 可知,地应力水平在 20~30MPa 范围内的预测值与模拟值误差较小,回归方程在试验范围内适用。当地应力为 10MPa 时,预测值与模拟值误差较大,为 5.045,误差接近 40.3%,故该一次回归方程仅适用于该试验范围以内的情况。试验范围外的适用情况有待考察。

对比优化组合与试验组合的围岩位移,当地应力为 30MPa 时,拱顶沉降减少 1.95~5.64mm,水平位移减少 2.26~3.86mm;当地应力为 20MPa 时,拱顶沉降减少 1.05~4.02mm,水平位移减少 0.50~4.39mm。围岩变形情况有所改善。

#### 5 结论

(1)通过控制围岩变形主要因素的一次回归正交试验分析,采用严谨的分析方法和精细化数值模拟试验分析数据,得出一次回归线性方程。

(2)通过方差分析与失拟性检验发现所得到的回归方程具有很好的显著性,且在试验范围内

具有良好的拟合程度。同时,因素地应力水平  $F$  值大于  $F_{0.001}$ ,地应力水平对围岩变形起到决定性影响,短锚杆长度、钢拱架间距与锚杆纵向间距的  $F$  值均大于  $F_{0.025}$ ,其均对控制围岩变形有显著影响。

(3)在设计施工时首先应考虑采取措施释放地应力,例如采用扩挖刀盘加大预留变形量等。其次短锚杆长度、钢拱架间距与锚杆纵向间距对控制围岩变形具有显著作用,在选取支护参数时,应将三者的参数纳入重点考虑内容。

(4)相比于单一的模拟分析而言,通过建立 TBM 隧道围岩变形的回归数学模型,可以研究各隧道支护参数对围岩变形的影响程度,有助于建立该模型的数据函数。

(5)根据回归方程,提出支护优化方案,经过验证,围岩变形控制效果有所提高。

#### 参考文献:

- [1] 巩江峰,王伟,周俊超.截止 2021 年底中国铁路盾构及 TBM 隧道统计与分析[J].铁道标准设计, 2022, 66(3):1-5.  
GONG Jiangfeng, WANG Wei, ZHOU Junchao. Statistics and analysis of shield and TBM tunnels in China by the End of 2021[J].Railway Standard Design, 2022, 66 (3) : 1-5.
- [2] 陈桥,李志军,牛彤彤,等.高原铁路复杂地质 TBM 法隧道衬砌断面优化分析[J].隧道建设(中英文), 2022, 42 (S2) : 334-344.  
CHEN Qiao, LI Zhijun, NIU Tongtong, et al. Optimization analysis of tunnel lining section of Plateau Railway with complex geological TBM method [J]. Tunnel construction, 2022, 42 (S2) : 334-344.
- [3] 方星桦,姚捷,徐震,等.层状粉砂质泥岩地层 TBM 隧道围岩稳定性与支护方法研究[J].隧道建设(中英文), 2021, 41(S2):320-328.  
FANG Xinghua, YAO Jie, XU Zhen, et al. Stability and support methods of surrounding rocks of tunnel boring machine tunnel in layered silty mudstone strata [J].Tunnel Construction (Chinese and English),2021,41 (S2) : 320-328.
- [4] 张兵.双护盾 TBM 在城市地铁隧道中的应用研究[J].铁道标准设计, 2019, 63(10):118-123.  
ZHANG Bing. Application of double shield TBM in urban subway construction[J].Railway Standard Design, 2019,63 (10) : 118-123.
- [5] 唐志强.双护盾 TBM 在城市轨道交通中应用的关键

- 技术[J].铁道标准设计, 2016, 60(11):81-89.
- TANG Zhiqiang. Key technologies of double-shield TBM applied to urban rail transit [J].Railway Standard Design, 2016,60 (11) : 81-89.
- [6] 靳宝成.西宁至成都铁路甘青隧道 TBM 施工方案研究[J].铁道标准设计, 2020, 64(3):107-111, 117.
- JIN Baocheng. Research on TBM construction scheme of ganqing tunnel on Xining-Chengdu railway [J].Railway Standard Design, 2020, 64(3): 107-111,117.
- [7] 秦银平, 孙振川, 陈馈, 等.复杂地质条件下 TBM 卡机原因及脱困措施研究[J].铁道标准设计, 2020, 64(8):92-96, 123.
- QIN Yinping, SUN Zhenchuan, CHEN Kui, et al. Study on the cause of TBM jam and its relief measures under complex geological condition[J].Railway Standard Design, 2020,64 (8): 92-96,123.
- [8] 孙明社, 郭小红, 王梦恕, 等.基于二次正交试验的隧道非概率可靠度方法研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(S2):105-111.
- SUN Mingshe, GUO Xiaohong, WANG Mengshu, et al. Study on non-probabilistic reliability of tunnel based on quadratic orthogonal test[J]. China Civil Engineering Journal, 2017,50 ( S2 ) : 105-111.
- [9] 姜博龙.基于正交分析的地铁目标频段隔振排桩参数研究[J].铁道标准设计, 2021, 65(4):127-133.
- JIANG Bolong. Study on the parameters of periodic pile barriers for vibration isolation within target frequency range of a subway based on orthogonal analysis[J].Railway Standard Design, 2021,65(4): 127-133.
- [10] 苏永华, 孙旺, 方砚兵. 基于正交试验的隧道开挖面位移释放分析[J].湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(11):156-163.
- SU Yonghua, SUN Wang, FANG Yanbing. Analysis on displacement release of tunnel face based on orthogonal tests[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(11): 156-163.
- [11] LI Shimao , DING Zhouxiang, YANG Xuhui. Optimization Design of Tunnel Construction Scheme based on Orthogonal Numerical Simulation Test[C]// 2018 世界交通运输大会论文集. 北京: 中国公路学会, 2018: 2222-2230.
- [12] WEI Xiaohang, SUN Ze, WANG Zheng, et al. Study on the influence of surrounding rock parameters on the stability of tunnel face[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 643(1): 1-6.
- [13] 王立新, 徐硕硕, 王俊, 等.黄土地层基坑开挖对既有地铁隧道影响分析[J].科学技术与工程, 2022, 22(6):2468-2476.
- WANG Lixin, XU Shuoshuo, WANG Jun, et al. Analysis on influence of excavation of pit on existing metro tunnel in loess layer [J]. Science and Technology and Engineering, 2022,22 (6) : 2468-2476.
- [14] 徐旭, 薛彦雨, 张振雨, 等.双线盾构隧道施工沉降影响规律研究[J].工程勘察, 2022, 50(4):1-7, 15.
- XU Xu, XUE Yanyu, ZHANG Zhenyu, et al. Study on the influence law of construction settlement for double-track shield tunnel[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2022, 50 ( 4 ) : 1-7,15.
- [15] 刘晋南, 钱昊, 陈华军, 等.某高原铁路施工工期影响因素及控制措施研究[J].铁道标准设计, 2022, 66(4):97-102.
- LIU Jinnan, QIAN Hao, CHEN Huajun, et al. Studies on influencing factors and control measures of construction period of a plateau railway [J].Railway Standard Design, 2022,66 ( 4 ):97-102.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014 [S].北京: 中国计划出版社, 2014.
- [17] 田四明, 吴克非, 刘大刚, 等. 高原铁路极高地应力环境隧道主动支护设计方法研究[J].铁道学报, 2022, 44(3):39-63.
- TIAN Siming, WU Kefei, LIU Dagang, et al. Study on design method for active support for plateau railway tunnels in high energy geological environment[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(3): 39-63.
- [18] 鲁义强, 李光. 深部高应力隧道 TBM 护盾长度和推力计算方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(2):577-585.
- LU Yiqiang, LI Guang. Study on calculation method of shield length and thrust of TBM in deep high stress tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022,18 (2) : 577-585.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范:GB 50086—2015[S]北京: 中国计划出版社, 2016.
- [20] 王祖贤, 施成华, 陈刚.基于正交试验的隧道近接施工隔离桩优化设计[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(7): 1785-1791.
- WANG Zuxian, SHI Chenghua, CHEN Gang. Optimum design of isolation pile in tunnel close-spaced construction based on orthogonal test[J].Journal of Railway Science and Engineering, 2020,17(7): 1785-1791.
- [21] 焦凯, 陈晨, 李磊, 等. 基于正交试验设计的透水混

凝土关键性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(6): 1839-1844.

JIAO Kai, CHEN Chen, LI Lei, et al. Performance of pervious concrete based on orthogonal experimental design[J]. Silicate Bulletin, 2019, 38 (6) : 1839-1844.

- [22] 周伟, 郑蓉军, 汪涛, 等. 基于正交试验的溶洞对隧道稳定性影响分析[J]. 施工技术(中英文), 2021, 050(17):106-111, 129.

ZHOU Wei, ZHENG Rongjun, WANG Tao, et al. Influencing analysis of Karst cave on tunnel stability based on orthogonal test[J]. Construction Technology ( Chinese and English ), 2021,50 (17) : 106-111,129.

- [23] 王林峰, 钟宜宏, 李玲玉, 等. 基于正交试验的瓦斯隧道压入式通风优化[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(S1):170-178.

WANG Linfeng, ZHONG Yihong, LI Lingyu, et al. Optimization of forced ventilation in gas tunnel based on orthogonal test [J]. Modern Tunnelling Technology, 2021,58 (S1) : 170-178.

- [24] 贾进章, 柯丁琳, 陈怡诺. 基于正交试验—多元回归的煤矿瓦斯涌出量预测[J].安全与环境学报, 2021, 21(5): 2037-2044.

JIA, Jinzhang, KE Dinglin, CHEN Yinuo. Prediction and forecast of the coal mining gas emission based on the orthogonal test and multiple regression[J].Journal of Safety and Environment, 2021,21 (5) : 2037-2044.