

Numerical Simulation Study on Stability of Ingate in Soft Rock Layer of Tashidian Mining Area

Heng Wang^{1,2}

¹National Engineering Laboratory for Deep Shaft Construction Technology in Coal Mine, Beijing

²Beijing China Coal Mine Engineering Company Limited, Beijing

Email: wangheng8374@126.com

Received: Jul. 6th, 2018; accepted: Jul. 20th, 2018; published: Jul. 26th, 2018

Abstract

Based on the ingate of the wind shaft in Tashidian and the measured physical parameters in that soft rock layer, the ingate structure is simulated by Ansys and the forces of the surroundings and blocks are studied before and after the ingate structure is supported. The study shows that the straight wall strain falls and that the strain of the vault and spandrel rises when the ingate section and the straight wall height reduce. The largest settlement displacements of the surrounding rock are all located on the roadway top before and after supporting. The concrete blocks control the deformation of the surrounding rock very well. Continuously monitoring the stress and the strain of the ingate and taking corresponding measures make a normal state of the block structure and the safety of the shaft.

Keywords

Ingate, Soft Rock Layer, Deformation of Surrounding Rock, Concrete Block, Stability

塔什店矿区马头门稳定性数值模拟分析

王 恒^{1,2}

¹煤矿深井建设技术国家工程实验室, 北京

²北京中煤矿山工程有限公司, 北京

Email: wangheng8374@126.com

收稿日期: 2018年7月6日; 录用日期: 2018年7月20日; 发布日期: 2018年7月26日

摘 要

以塔什店风井马头门为例, 根据该软岩地层实测物理特性参数, 利用有限元软件对马头门结构进行模拟, 并对马头门结构支护前后巷道围岩及称砌受力情况进行分析。分析结果表明: 随着断面减小, 直墙高度

文章引用: 王恒. 塔什店矿区马头门稳定性数值模拟分析[J]. 土木工程, 2018, 7(4): 635-643.

DOI: 10.12677/hjce.2018.74074

降低,直墙应变呈下降的趋势,而拱顶与拱肩混凝土应变呈上升趋势;支护前后巷道周边围岩的最大沉降位移均位于巷道顶部,混凝土衬砌能够较好地控制围岩变形;实时监测马头门应力应变的变化并采取相应的措施能够确保衬砌结构的正常工作状态和井筒安全。

关键词

马头门, 软岩地层, 围岩变形, 混凝土衬砌, 稳定性

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在矿井结构中,马头门的围岩应力较为复杂,巷道开挖过程中,因马头门围岩失稳造成的冒顶、塌方事故时有发生[1][2][3][4]。我国新建的一些大、中型矿井,如古汉山煤矿风井,曲江矿井风井,潘一东煤矿风井,鲁西矿风井,李堂矿风井等,其马头门巷道在施工过程中均发生了重大事故,造成了工期延迟、资金浪费甚至人身伤亡的后果[5]-[10]。

虽然井筒及马头门部位的破坏原因和破坏形式不同,但实际上造成马头门破坏的原因主要是由结构受力复杂、高地应力、地下水、软弱岩层以及不合理的设计施工等共同作用引起的[11][12][13]。

西部含水软岩地层矿井建设期间及投产前期部分矿井出现了马头门被压垮的现象,为保证结构安全,施工过程中对马头门顶板、拱肩、侧墙及底板压力特性进行研究,研究外部地压以及在地压作用下永久支护混凝土结构受力特性[14][15]。

2. 工程概况

塔什店风井井筒-336.7~-486m段采用冻结法施工,全深冻结,井筒深度486m,井筒净直径 $\Phi 5.5$ m,井口绝对标高+1176.000m,马头门底板绝对标高+700.000m,双向,净高度5.5~3.9m,净宽度5m,每侧深度6.396m,壁厚1350~1100mm,双层钢筋砼,砼强度为C60。

2.1. 地质、水文概况

根据塔什店煤矿风井井筒及马头门揭露的岩性情况,风井马头门从累深476m穿过。揭露岩层为砂砾岩,层厚47m(436.43~484.41m),成分以砾石为主,最大砾径1~3cm,钙质胶结,硬,RQD=34.80%。

该岩组的岩性特点为岩石RQD平均为34.8%,属于软弱类岩石。岩石质量中等,岩体中等完整,巷道围岩属于弱稳定岩层。根据《煤矿井巷工程施工规范》,此处围岩属于软弱岩石,工程稳定性较差,井筒施工此段时应注意加强支护。

2.2. 马头门支护结构概况

风井马头门采用锚网喷加锚索临时支护,锚杆采用 $\Phi 45 \times 1.5$ m管缝锚杆,间排距 800×800 mm,托盘 150×150 mm钢板,厚度7mm,锚杆安装外漏长度不超过5mm;锚索采用 $\Phi 17.8 \times 5$ m树脂锚索,间排距 2.0×2.0 m,托盘 300×300 mm钢板,厚度15mm,支护顶部和腮部,锚索安装外漏长度300mm,安装完成后及时张拉;慢速m2850型锚固剂,全长锚固;金属网片 1×1 m,由 $\Phi 8$ mm盘条焊接而成,网格 100×100 mm,相邻两块网片用20#铅丝连接。马头门支护结构设计如图1所示。

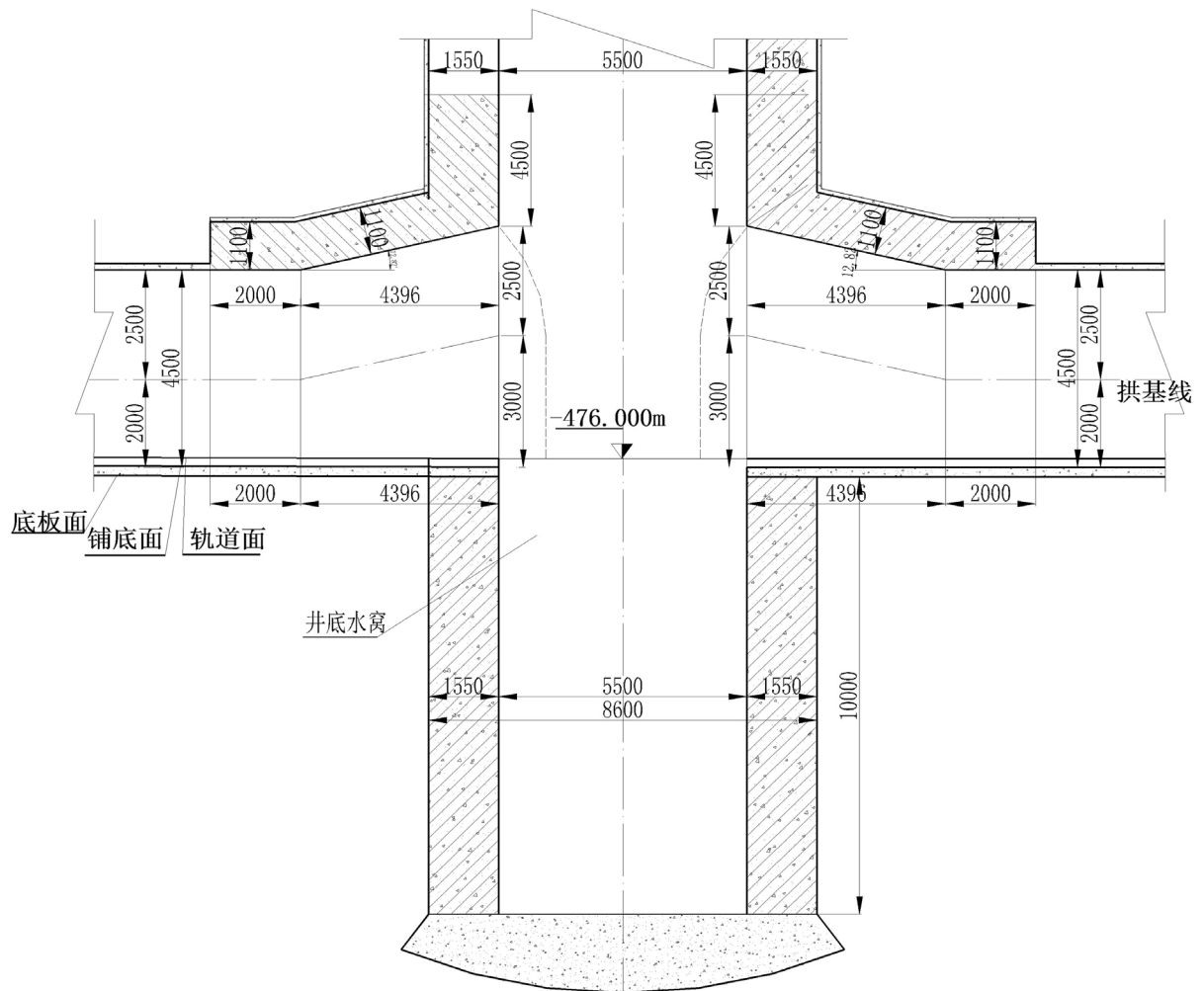


Figure 1. Design of the ingate supporting structure
图 1. 风井马头门支护结构设计

3. 马头门支护结构与围岩共同作用数值分析

为了解马头门部位支护结构与围岩的共同作用，合理的运用有限元数值运算，确保围岩的稳定性，进一步保证施工人员的安全和投产后马头门部位的正常使用。对塔什店煤矿风井马头门与围岩的共同作用进行数值分析，采用有限元分析方法，运用 ANSYS 作为计算软件，结合相应地层物理特性参数，计算支护结构与围岩应力的共同作用。

3.1. 数值计算模型建立

根据风井马头门结构设计方案，同时考虑马头门巷道开挖的影响，有限元计算模型如图 2 所示。

模型长×宽×高为 $100 \times 100 \times 90$ m，马头门结构模型的网格划分如图 2 所示。模型底面边界固定，仅限制水平方向位移。采用弹塑性本构关系，屈服满足 Mohr-Coulomb 准则。模型顶面施加荷载值为 $476 \times 25 \text{ kN/m}^3 = 11.9 \text{ MPa}$ 。

3.2. 岩石力学参数

数值模拟计算所用参数来自于实验室试验，取试验数据的 1/4~1/2，模拟参数如表 1 所示。

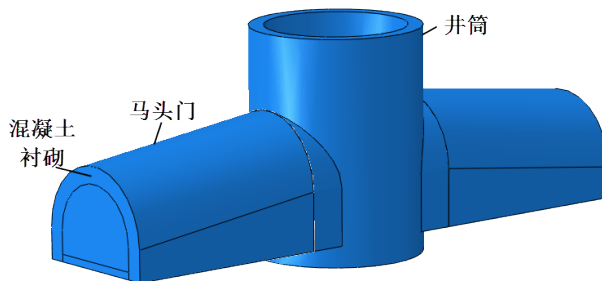


Figure 2. 3-D finite element model of the ingate
图 2. 马头门三维有限元模型

Table 1. Parameters of numerical calculation

表 1. 数值计算参数表

岩性	弹性模量 $\times 10^4$ MPa	泊松比	密度/G·cm ³	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	抗压强度 MPa
/粉砂岩	2.71	0.26	1.97	0.97	53.22	0.79	11.40
粗粒砂岩	2.62	0.23	1.94	0.33	56.50	0.23	17.51
细粒砂岩	2.00	0.26	1.99	1.23	57.06	1.00	21.33
粉砂岩	2.95	0.21	1.95	1.37	51.01	0.64	18.30
细粒砂岩	2.99	0.27	1.99	1.36	58.88	0.54	17.27
C60 混凝土	3.25	0.2	2.5			1.71	26.8

3.3. 模拟计算及分析方案

根据塔什店风井马头门地质条件，本次数值计算中，采用空单元法来模拟井筒及井底车场连接处的开挖-支护过程。

初支结构主要为锚杆、锚索及喷射混凝土。锚杆与锚索的作用为提供反力，以抑制围岩块体的脱落塌方以及加固围岩。锚固作用可以提高锚固圈岩体的粘聚力和内摩擦角，如下式所示：

$$\begin{cases} c_1 = c_0 + \eta \frac{\tau A}{ab} \\ \varphi_1 = \varphi_0 \end{cases} \quad (\text{式 1})$$

式中： c_0 ——加锚前岩体的粘聚力和内摩擦角；

c_1 ——加锚后岩体的粘聚力和内摩擦角；

τ ——锚杆的抗剪强度；

A ——锚杆截面面积；家单位；

a 、 b ——锚杆或锚索的纵、横向间距；

η ——经验系数，一般取 2~5。

本次数值计算中，对锚杆等初期支护结构的考虑，根据上式采用提高锚固圈岩体力学参数的方法实现初期支护的效果。为分析方便，对计算模型选取 A-A、B-B 2 个典型剖面进行重点分析(图 3)。采用 ANSYS 软件里面的“CT 扫描”功能实现剖面设置，观察剖面的围岩位移场、应力场及支护结构受力特性等情况。

3.4. 支护前后围岩数值计算结果及分析

1) 围岩垂直位移场分布规律

由图 4 可知：A-A 剖面支护前后的巷道周边围岩的最大沉降位移均位于顶部，其值分别为 260 mm、

25 mm；最小竖向位移位于巷道底部，其值分别为 111 mm、12.8 mm。

由图 5 可知：*B-B* 剖面支护前后的巷道周围岩的最大沉降位移仍均位于顶部，其值分别为 247 mm、23.5 mm。整体变化规律与 *A-A* 断面一致，底板位移基本不变，可见拱顶是整个马头门支护的重要位置。

2) 围岩最大主应力场分布规律

A-A、*B-B* 剖面围岩最大主应力分布规律如图 6~图 7。由图可知，并筒施工对围岩应力场分布规律有一定影响。两帮和底角位置处围岩产生了较大的压应力，巷道周围岩最大压应力支护前后分别为 29 MPa 和 19 MPa。巷道顶部围岩的压应力相对较小，因此在马头门巷道支护时，可在两帮增设支护结构改

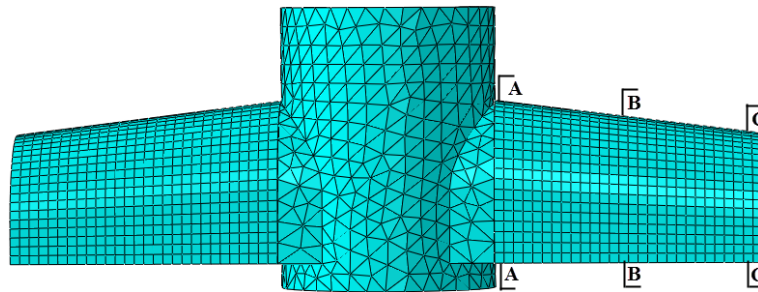


Figure 3. Front grid diagram of the ingate numerical calculation
图 3. 马头门数值计算正面网格图

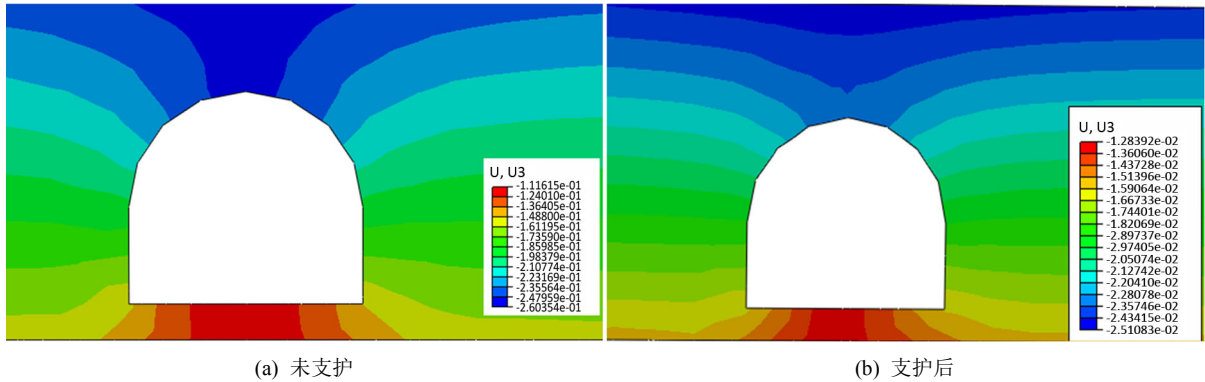


Figure 4. Vertical displacement distribution of the surrounding rock in *A-A* profile
图 4. *A-A* 剖面围岩垂直位移分布规律

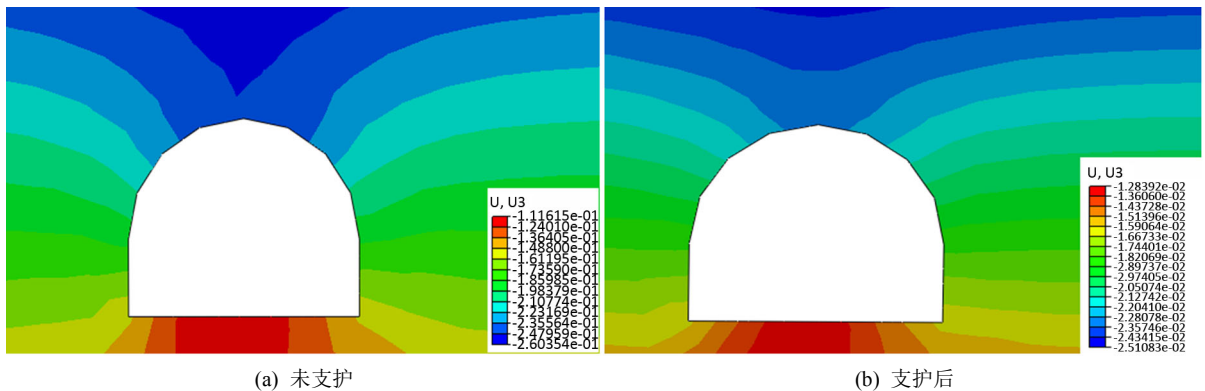


Figure 5. Vertical displacement distribution of the surrounding rock in *B-B* profile
图 5. *B-B* 剖面围岩垂直位移分布规律

善岩体受力状态，减弱应力集中现象。随着与井筒的距离不断增大，断面面积不断减小，最大主应力值呈下降的趋势。可见，二次衬砌支护能够有效改善围岩的应力场。

如图 8 所示，未支护时围岩最大压应力出现在马头门的中部，应力为 19.25 MPa，接近马头门位置处的细砂岩的抗压强度临界值，部分岩石处于塑性状态。因此应当及时施加锚杆、锚索临时支护，以加固围岩，支护后围岩帮部的应力减小为 18 MPa，衬砌内的应力较大，应力分布规律为底板受拉，帮部与顶板受压，压应力集中区域为直墙与拱脚，特别是拱脚压应力可以达到 37 MPa。由于马头门衬砌主要利用

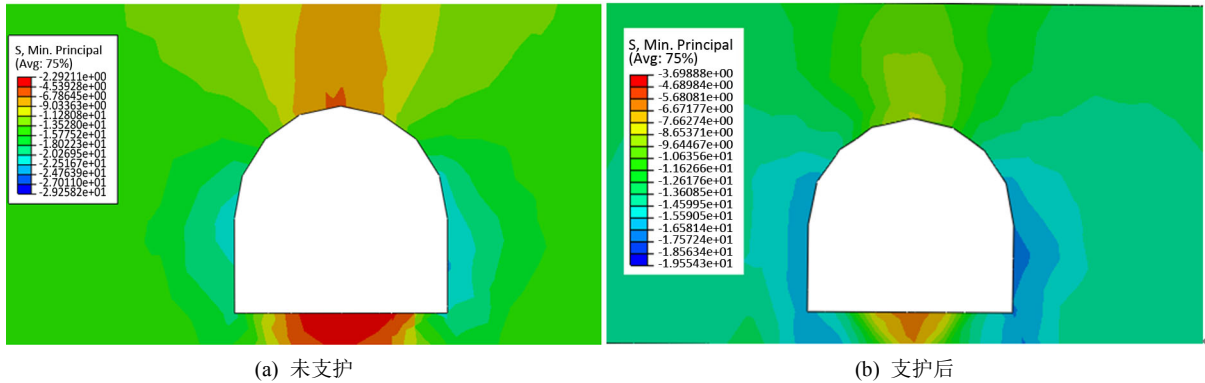


Figure 6. Maximum principal stress of the surrounding rock in A-A profile
图 6. A-A 剖面围岩最大主应力

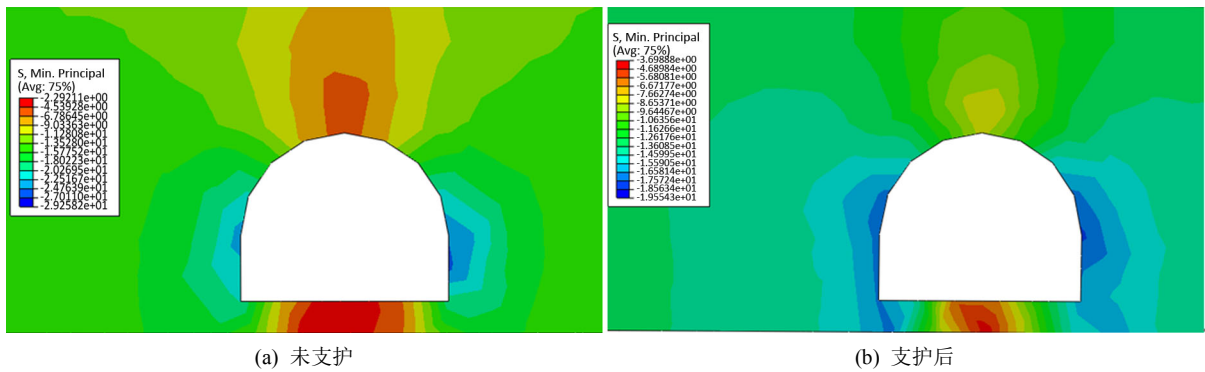


Figure 7. Maximum principal stress of the surrounding rock in B-B profile
图 7. B-B 剖面围岩最大主应力

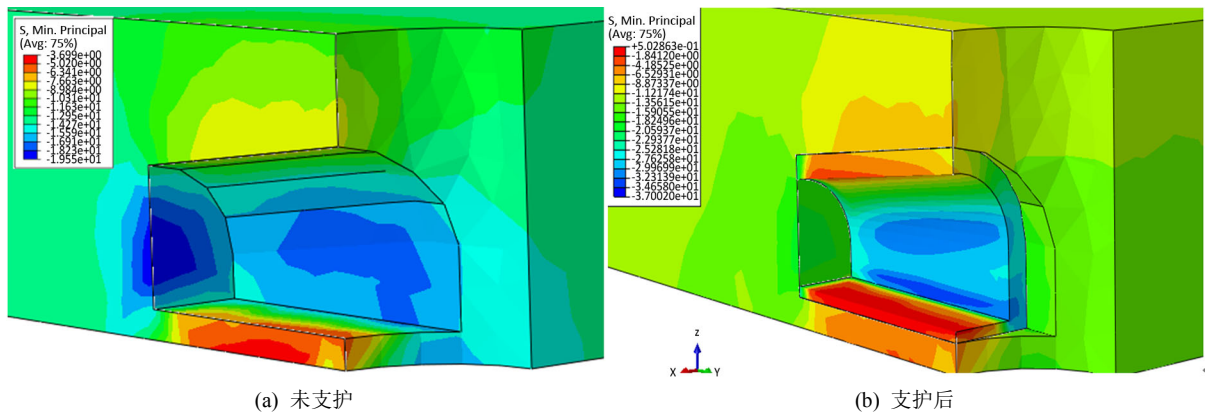


Figure 8. Maximum principal stress of the surrounding rock
图 8. 围岩最大主应力

C60 混凝土，其强度已经在拱脚达到极限，所以随着马头门服务时间增加破坏区域为拱脚、直墙。衬砌底板的大部分区域拉应力可以达到 3~5 MPa。所以应当加强马头门底板支护，采用底角切槽卸压、底板注浆等支护、卸压手段加强马头门底板的支护。

3.5. 巷道衬砌数值计算结果及分析

图 9 为 A-A、B-B 剖面马头门巷道衬砌最小、最大主应力分布规律，马头门巷道衬砌承受的拉应力较大，最大拉应力达到 4.8 MPa，位于两侧边墙的内缘处。最大压应力达到 37 MPa，位于两侧拱角处。由于围岩存在流变特性，实际施工中，二次支护要滞后于初期支护，因此混凝土衬砌的应力要小于该计算值。因此，在马头门二次支护时，可采用钢纤维混凝土以提高抗拉性能，同时增大混凝土强度等级，以提高混凝土的抗压能力，从而保证马头门结构的稳定性。

在实际工程中，受压构件往往不是立方体，而是棱柱体，所以棱柱体试件比立方体试件能更好地反映混凝土的实际抗压能力。因此本文换算 C60 混凝土轴心拉应变大于 75 时易产生裂缝，压应变大于 824 时易发生混凝土破坏。

图 10 为马头门巷道衬砌混凝土应变规律，靠近马头门的 A-A 剖面的混凝土拱顶拉应变为 13 $\mu\epsilon$ ($1 \mu\epsilon = 10^{-6}$)、拱肩为 113 $\mu\epsilon$ ，直墙为 200 $\mu\epsilon$ 。可见，位于马头门与井筒连接区域的 A-A 剖面在混凝土变形已经稳定时期混凝土衬砌应变特点为拱顶、拱肩与直墙均为拉应变，且直墙 > 拱肩 > 拱顶。直墙与拱肩已经出现了裂隙，部分区域的表层剥落。两部位衬砌结构的钢筋混凝土已经达到了极限值，需要及时进

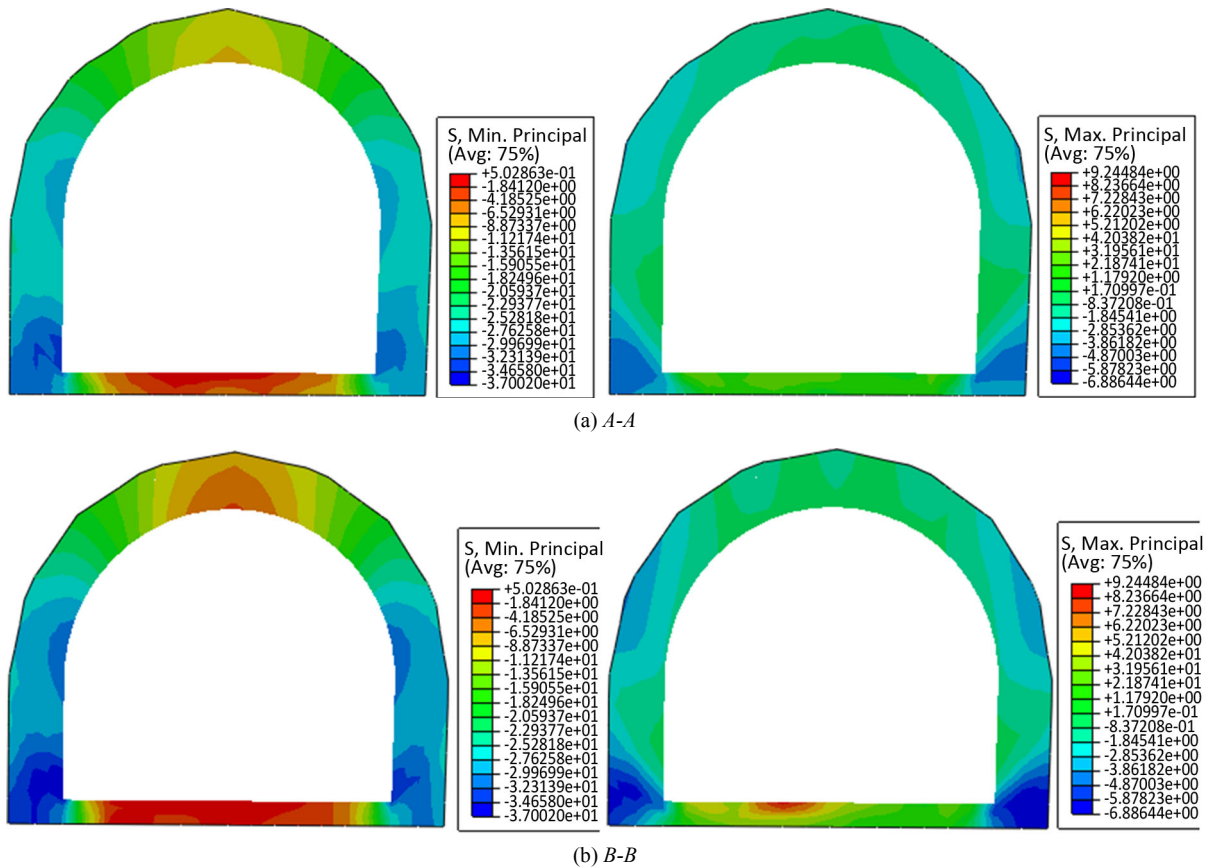


Figure 9. Distribution of the principle stress in the ingate tunnel lining
图 9. 马头门巷道衬砌主应力场分布规律

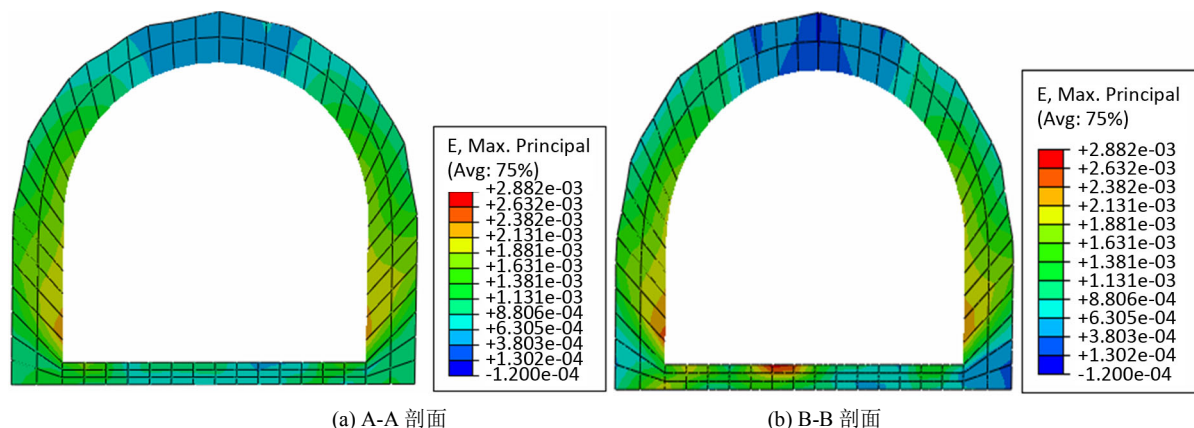


Figure 10. Strain of the concrete in the ingate tunnel lining
图 10. 马头门巷道衬砌混凝土应变

行二次加固。

B-B 剖面混凝土衬砌应变特点为拱顶为压应变, 拱肩与直墙均为拉应变。拱肩为 $113 \mu\epsilon$, 直墙为 $200 \mu\epsilon$ 。可见, 此区域内的危险点仍然位于拱肩与直墙, 拱顶一直为压应变, 故不存在开裂的风险。

4. 结论

1) 随着断面减小, 直墙高度降低, 混凝土衬砌应变分布规律不同。直墙应变呈下降的趋势, 拱顶与拱肩混凝土应变呈上升趋势。

2) 支护前后的巷道周边围岩的最大沉降均位于巷道顶部, 其值分别为 260 mm 、 25 mm , 可见混凝土衬砌能够较好地控制围岩变形, 避免了马头门巷道顶部锚杆、索由于大变形被拉断的现象。

3) 马头门巷道侧墙内缘处最大拉应力达到 4.7 MPa , 拱角处最大压应力达到 37 MPa 。为确保衬砌结构的正常工作状态和井筒安全, 应实时监测马头门应力应变的变化, 及时进行围岩二次注浆以加固围岩控制变形, 并在马头门适当补打锚索和井筒破坏段进行锚索补强加固。

参考文献

- [1] 蔡海兵, 程桦, 荣传新, 等. 复杂条件下深井马头门围岩稳定性分析及支护结构优化[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2): 298-304
- [2] 纪洪广, 邹静. 原始地应力场测量竖井马头门稳定性分析与设计优化[J]. 中国矿业, 2010, 19(5): 55-57.
- [3] 许佳佳. 深立井大断面马头门围岩稳定性数值模拟与实测分析[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- [4] 项德彬. 煤矿深立井马头门围岩稳定性分析及实验研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2015
- [5] 乔卫国, 吕言新, 林登阁, 等. 深井厚冲积层软岩马头门稳定性控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(3): 24-27.
- [6] 王晓健. 煤矿深立井马头门围岩历时稳定性及其控制技术[D]: [博士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
- [7] 姚直书, 程桦, 高业禄, 等. 复杂地质下深井马头门支护结构及应用[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(1): 69-71.
- [8] 徐雨, 陈新明, 焦华喆. 赵固二矿深井马头门符合软岩支护技术[J]. 金属矿山, 2012, 41(4): 32-35.
- [9] 张向东, 迟殿起, 梁志鹏. 红庆河副井马头门硐室围岩稳定性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016(5): 479-483.
- [10] 谢涛, 刘友军. 庙口煤矿主、副井马头门锚索群加固支护技术[J]. 中州煤炭, 2013(11): 54-56.
- [11] 邓昕, 王再举, 姚直书. 深井马头门衬砌结构内力监测及修复技术[J]. 煤矿安全, 2013, 44(10): 100-103.
- [12] 王大顺. 深井马头门围岩稳定性三维数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2009.

-
- [13] 肖长春. 深井高应力马头门支护破坏机理及防治[J]. 煤炭科技, 2011(2): 55-58.
- [14] 徐淑岐, 王雨寒. 深立井极不稳定岩层中马头门的联合修复支护技术[J]. 价值工程, 2013(15): 84-85.
- [15] 种建涛. 煤矿马头门稳定性有限元分析[C]//陕西省岩石力学与工程学会、陕西省土木建筑学会、陕西省煤炭学会. 西部矿山建设发展战略学术研讨会: 2009 年卷. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009: 4.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: hjce@hanspub.org