

南京栖霞山矿巷道支护设计研究

周小平, 徐小敏, 陈山林

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 通过有限元计算, 分析南京栖霞山矿巷道的稳定性以及巷道在不同的支护条件下的应力场和塑性区情况, 得出不同埋深时主巷道和穿脉巷道较为合理的支护方式。对于主巷道和穿脉巷道中的矿岩巷道, 采用喷射混凝土进行支护, 支护后应力发生重分布, 围岩中的应力集中明显减少并转移到混凝土喷层上。此外, 部分围岩破碎、地下水较发育处应进行喷锚支护, 而对于穿脉巷道的高丽山砂岩巷道, 也需采用喷锚支护, 部分巷道还应提前进行注浆加固。

关键词: 采矿工程; 支护设计; 应力场; 塑性区

中图分类号: TD 353

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 1 - 2656 - 07

STUDY ON ROADWAY SUPPORTING DESIGN OF QIXIASHAN MINING IN NANJING

ZHOU Xiaoping, XU Xiaomin, CHEN Shanlin

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The stress field and plastic zone of the main roadway and the branch roadway from 225 to 625 m depth below ground level of Qixiashan mining in Nanjing are studied by using finite element method(FEM). It is shown that the main roadway and the branch roadway in Qixiashan mining in Nanjing are instable. The stress field and plastic zone of the roadway are analyzed under different supporting methods. The reasonable support patterns are proposed for the main roadway and the branch roadway from 225 to 625 m depth below ground level. For the main roadway and the branch roadway constructed in the surrounding rock, the support of shotcrete is suggested. Reasonable thickness of concrete is established. In addition, anchor-guniting supporting should be applied to the branch roadway constructed in the sandstone rock. Length and pattern of anchor and thickness of concrete are determined.

Key words: mining engineering; supporting design; stress field; plastic zone

1 引言

南京栖霞山矿由于深部开采部分穿脉巷道出现冒顶、片帮等不稳定现象。为此, 该矿委托重庆大学进行稳定性分析及其支护设计。南京栖霞山矿位

于淮阳山字型构造宁镇反射弧的西翼。矿区出露地层以侏罗纪象山及泥盆统五通群分布较广; 石炭系是有利的含矿层位, 以黄龙组纯灰岩和粗晶灰岩最有利成矿, 船山组灰岩次之。矿区为低山丘陵, 地势东高西低, 中间谷底开阔, 北距长江 1.5 km, 九乡河经矿区中部汇入长江。矿区主要含水层为石

收稿日期: 2005 - 11 - 08; **修回日期:** 2005 - 12 - 06

基金项目: 国家科技攻关计划“西部开发科技行动”重大项目(2004BA901A02)

作者简介: 周小平(1970 -), 男, 博士, 1992年毕业于南方冶金学院采矿工程专业, 现任副教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: zhouxiaoping@sina.com

炭~二叠系灰岩岩溶裂隙承压含水层,富水性不均匀,严格受横向构造制约。

古生代地层及侏罗纪地层分别构成矿区的下构造层及上构造层,两者表现出不同的褶皱形式。下构造层为一地层倒转、褶皱紧密的向斜褶皱,即栖霞山复式背斜。铅锌矿床位于该背斜南翼。地层走向 EW,倾向 NW,倾角上缓下陡。上构造层是由象山群构成的舒缓背斜褶皱构造,覆盖于下构造层之上。区内断裂发育,按产状及发育的地质部位可分为 3 种类型:NE 向纵断裂,NW 向横断裂,断层不整合面。主巷道主要位于栖霞灰岩岩层中,穿脉巷道主要位于高丽山砂岩和矿岩岩层中。巷道跨度为 2.4 m,高度为 2.7 m。

2 计算参数选择

2.1 岩体弹塑性破坏准则

长期以来,许多学者^[1~10]利用有限元对巷道围岩稳定性进行分析,并对锚喷支护进行了大量研究。

有限元分析中能较好地模拟岩体力学特性的岩体弹塑性破坏准则是 Drucker-Prager 准则,该准则一方面克服了库仑准则在角点处导数不连续的问题,另一方面也很容易与库仑准则结合起来确定计算参数。

2.2 岩体参数选择

岩体力学参数见表 1,该参数在单轴压缩和三轴实验所得结果的基础上,考虑到现场岩体与所取岩样存在较大的区别,根据工程经验,乘以一定的折减系数所得。计算采用 ANSYS 商业软件。

表 1 岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock masses

岩石类别	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
灰岩	17 487	0.268	2.037	33.6
矿岩	16 647	0.223	1.615	33.6
砂岩	11 267	0.358	0.459	28.2

3 二维有限元模拟分析

二维有限元计算主要分为两个部分分别进行计算:一部分就是主运输巷道(主巷道)的计算,另一部分就是穿脉巷道的计算。其中,穿脉巷道所处的

岩层主要为矿岩,但穿脉巷道的末端处于高丽山砂岩中,其稳定性情况较差,故又将穿脉巷道的计算分为矿岩和高丽山砂岩两部分分别进行。

3.1 主巷道的计算结果分析

主巷道处的岩层主要为栖霞灰岩,其二维有限元计算区域范围取为 120 m×450 m。采用 PLANE 2 六节点等参元,单元个数为 6 604 个,节点总数为 13 386 个,地应力按垂直应力场确定。其垂直方向的地应力为 10 MPa,侧向应力为梯形分布,其最上端所施加的侧向应力为 8 MPa,最下端所施加的侧向压力为 17 MPa。

计算结果表明,埋深从 225~625 m 处,巷道周围各主要部位(包括拱顶、拐角、直墙中部、直墙底部、底板中部)的应力增幅都在 50%~150%,有些部位的应力值已经达到甚至超过了岩石的单轴抗压强度,出现了较大面积的塑性区。

从 σ_x 来看,应力集中主要出现在巷道的拐角、直墙底部和拱顶等部位,底板中部没有出现较大的拉应力,这与现场的实际情况是比较符合的。埋深从 225~625 m 处,巷道周围各点 σ_x 增幅基本为 50%~80%, σ_x 随着巷道埋深的增加而基本呈线性增长。

从 σ_y 来看,应力集中主要发生在巷道的拐角、直墙底部和直墙中部等部位,最大压应力为 49.767 MPa。埋深从 225~625 m 处,巷道周围各点 σ_y 增幅基本为 50%~90%。与 σ_x 相似, σ_y 亦随着巷道埋深的增加而基本呈线性增长。

另外,从整个模型看,其应力分布出现了分层过渡现象,随着巷道埋深的加大,巷道之间的相互影响越趋明显。从 σ_x 来看,巷道周围的应力场在拐角处和直墙底部出现共轭状的应力场分布,其影响范围可达 10~15 m。 σ_y 分布则有所不同,巷道周围应力场的影响范围基本出现在巷道的底板和拱顶处,即在竖向上对相邻巷道产生影响。

巷道周围的塑性区也出现了一定的变化规律,在埋深为 225 m 处,出现了一定范围的塑性区,大约为巷道边界周围 2 m 的范围。由于巷道的埋深相对比较浅,塑性区的塑性程度并不是很突出,因而最危险的区域集中在直墙中部到拐角的范围内(见图 1)。埋深从 275 m 处开始,其塑性化程度逐渐提高,并在埋深为 375 m 处得到了提升,但是最危险的区域仍然集中在直墙中部到拐角这一部位。随着

巷道埋深的进一步加大,塑性区的塑性程度进一步加深,其最危险区域的范围也进一步扩大,并在埋深为 525 m 处巷道的拐角处再次得到升级,最终在埋深为 625 m 处形成了塑性程度最高、范围最大的塑性区(见图 2)。

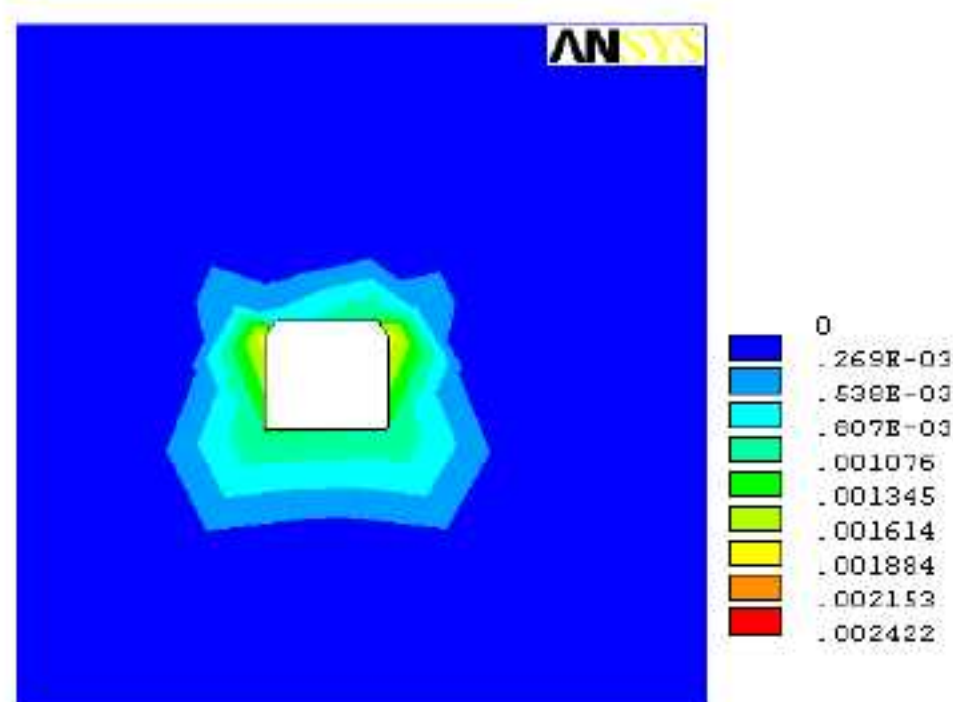


图 1 埋深为 225 m 的主巷道塑性区图

Fig.1 Plastic zone of the main roadway in 225 m depth below ground level

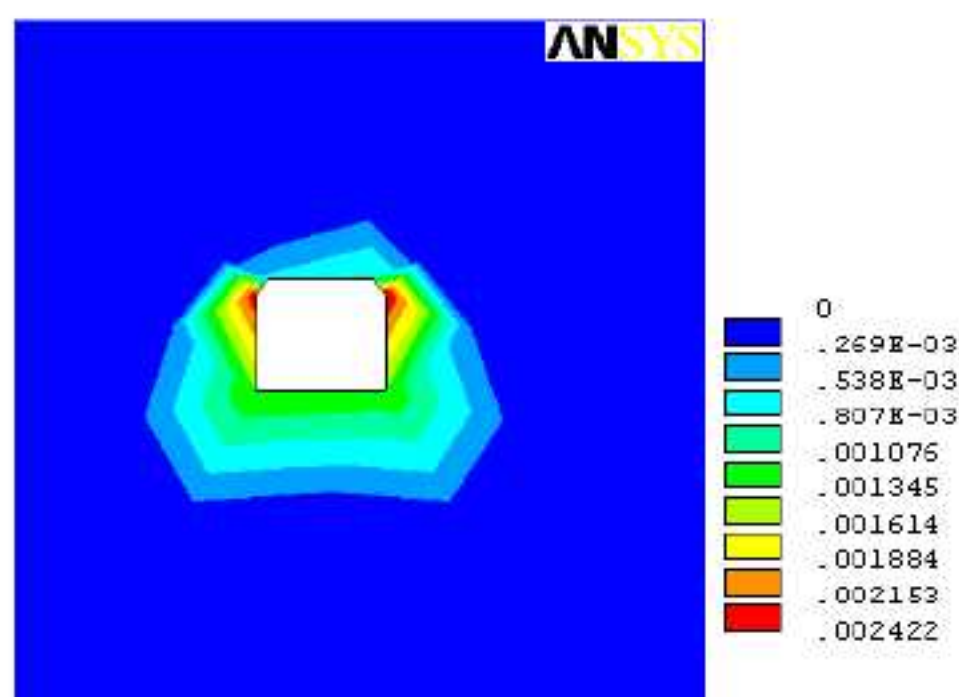


图 2 埋深为 625 m 的主巷道塑性区图

Fig.2 Plastic zone of the main roadway in 625 m depth below ground level

3.2 穿脉巷道的计算结果分析

穿脉巷道的二维有限元分析计算区域范围取为 700 m×450 m。采用 PLANE 2 六节点等参元,单元数为 28 192 个,节点总数为 56 893 个,地应力的取值和主巷道相同。

计算结果表明:埋深从 225~625 m 处,巷道周围各点(包括拱顶、拐角、直墙中部、直墙底部、底板中部)的应力增幅基本为 50%~150%,部分巷道的应力值已经达到甚至超过岩石的单轴抗压强度,出现了较大面积的塑性区。其表现出来的应力分布规律与主巷道的应力场有相似之处。

从 σ_x 来看,其应力集中的部位与主巷道基本

相同,埋深从 225~625 m 处,其增幅为 50%~100%。在矿岩巷道处的最大压应力值为 33.909 MPa,而在主巷道处的最大压应力值为 39.098 MPa,两者相差 5.189 MPa。

从 σ_y 来看,其应力集中的部位也与主巷道基本相同,埋深从 225~625 m 处,其增幅为 50%~140%。在矿岩巷道处的最大压应力值为 43.432 MPa,而主巷道处的最大压应力值为 49.767 MPa,两者相差 6.335 MPa。

另外,从整个模型看,与主巷道的应力场分布规律相同,其应力分布也出现了分层过渡现象。同时,由于巷道数量比较多,分布相对比较集中,随着巷道埋深的加大,巷道之间的相互影响更加明显。从 σ_x 来看,巷道周围的应力场则是在拐角处和直墙底部出现共轭状的应力场分布,其影响范围可达 10~15 m。同时,在部分中段,巷道之间的应力场出现了拱状分布形式。 σ_y 的分布则有所不同,巷道周围应力场的影响范围仍基本出现在巷道的底板和拱顶处。由于塑性区的分布范围与应力场的分布范围相比要小得多,其影响区域基本集中在巷道的周边范围,即巷道之间的相互作用对巷道塑性区的影响是很小的,故其表现出来的塑性区分布规律与主巷道的塑性区分布规律基本上是一致的。

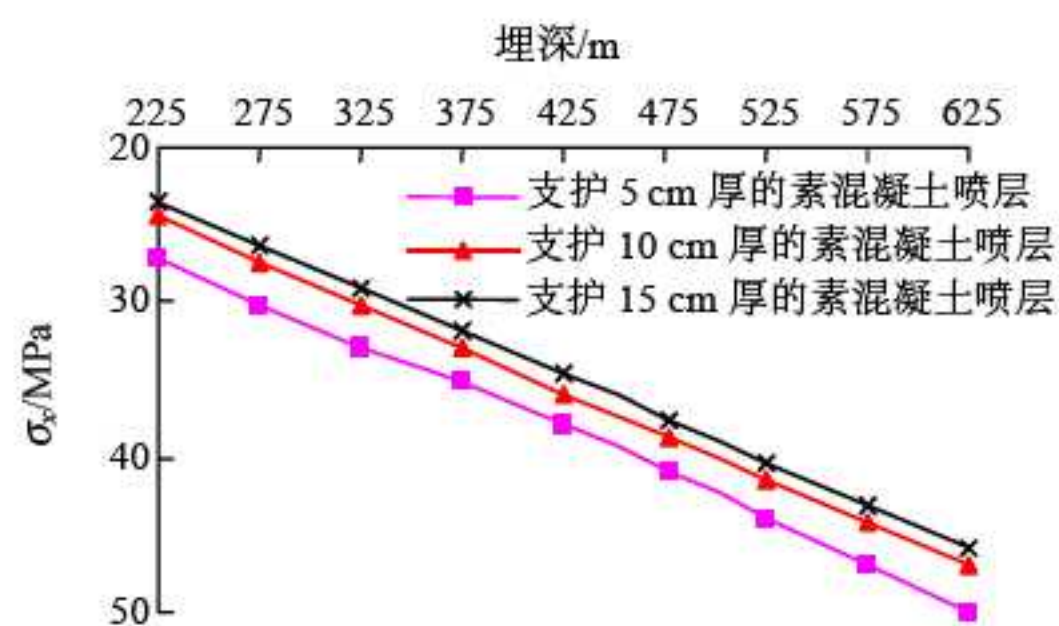
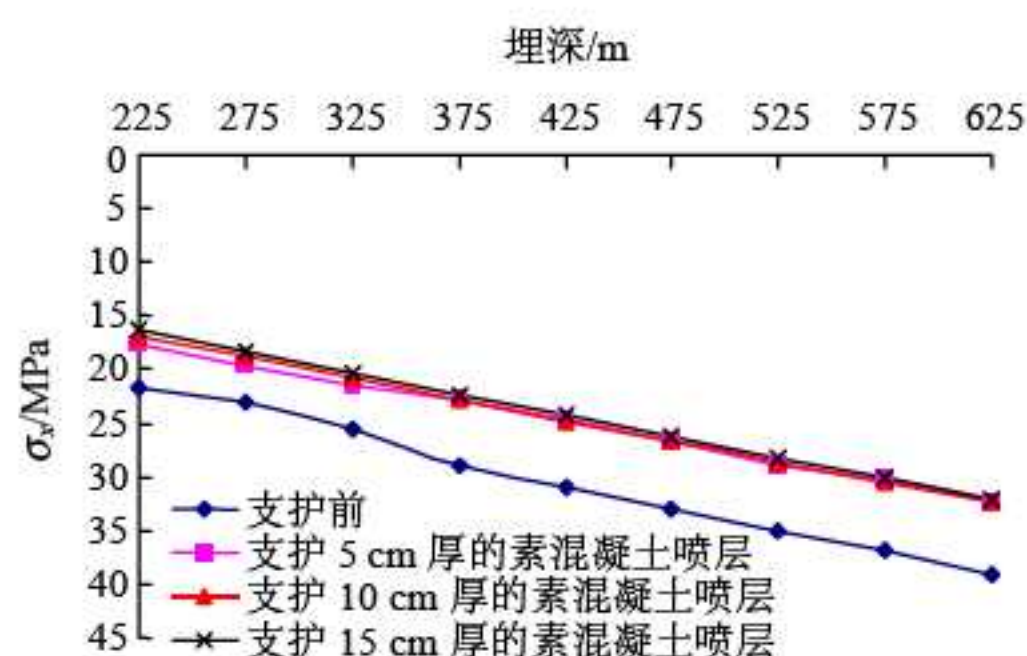
同时,对高丽山砂岩穿脉巷道的稳定性情况进行了二维有限元计算分析。通过计算可知,埋深为 225 m 的高丽山砂岩穿脉巷道出现了较大面积的塑性区,而埋深为 275 m 处的穿脉巷道,其塑性区范围发育完全;埋深从 325 m 处开始,巷道出现不稳定现象。

4 主巷道支护分析

主巷道支护形式主要采用喷素混凝土,模拟计算主要分为 5, 10 和 15 cm 厚的素混凝土喷层 3 种情况,对其支护后的位移场和应力场进行了分析比较。主巷道的支护计算区域范围为 120 m×450 m,采用 PLANE 2 六节点等参元,其单元个数为 7 654 个,节点总数为 15 396 个。混凝土强度等级为 C30,其抗压强度为 14.3 MPa,抗拉强度为 1.43 MPa。

4.1 应力场的分析

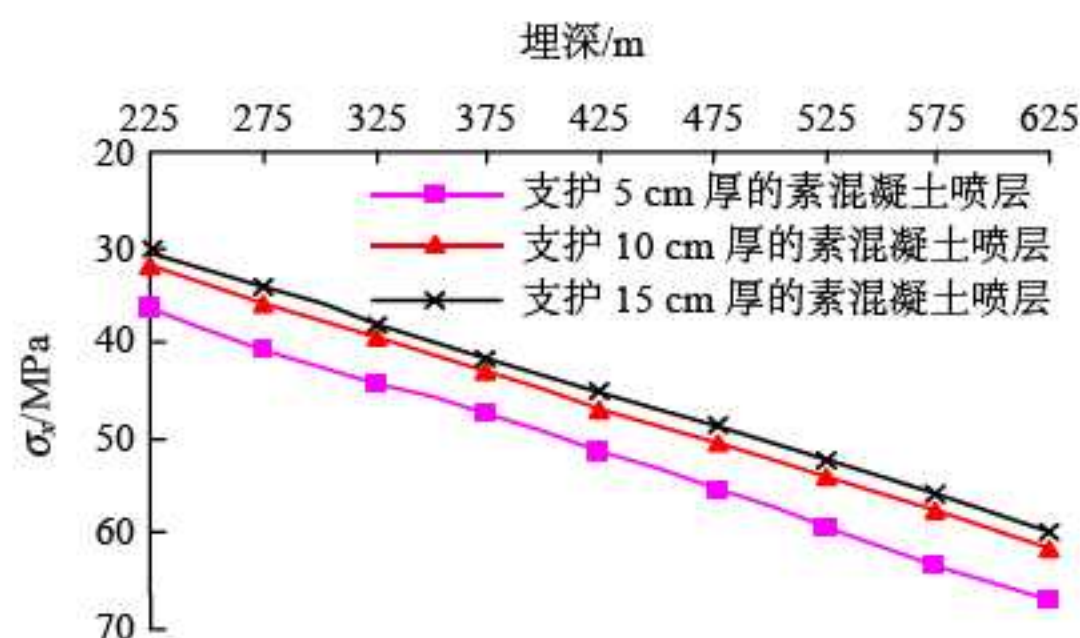
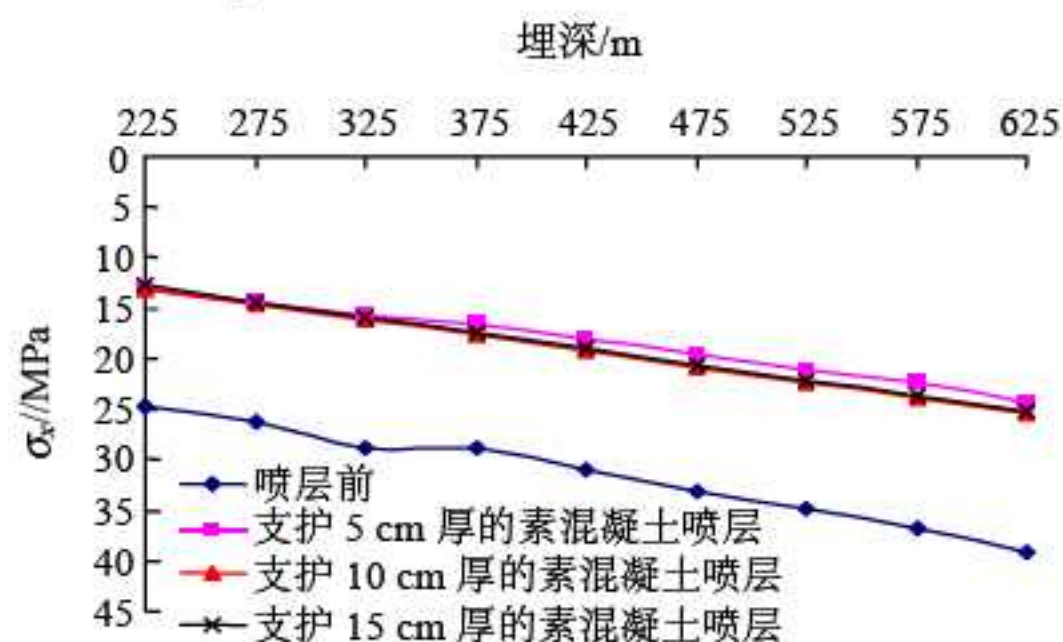
图 3, 4 分别为主巷道拱顶处喷层和围岩中的 σ_x 图。从图 3, 4 中可以看出:拱顶处的 σ_x 基本上

图3 主巷道拱顶处喷层的 σ_x 图Fig.3 Curves of σ_x on the concrete in the vault of the main roadway图4 主巷道拱顶围岩中的 σ_x 图Fig.4 Curves of σ_x on the surrounding rock in the vault of the main roadway

是随着巷道埋深的增加呈线性增长；在支护前，其应力值虽然相对较低，但是由于其分布面积比较大，造成巷道拱顶处出现较大面积的塑性区；支护后，其应力发生了重分布，主要的应力集中现象转移到了素混凝土喷层上。以埋深 625 m 的主巷道为例，支护前，围岩拱顶的压应力为 39.098 MPa，当支护 5 cm 厚的素混凝土喷层时，拱顶处喷层中的压应力为 49.945 MPa；而在巷道拱顶处的围岩中，其压应力减为 32.805 MPa，减幅为 16.1%。当支护 10 cm 厚的素混凝土喷层时，拱顶处喷层中的压应力为 47.062 MPa，与支护 5 cm 厚的素混凝土喷层时相比，减幅为 5.8%；而在主巷道拱顶处的围岩中，其压应力减为 32.300 MPa，与 5 cm 厚的素混凝土喷层时相比，减幅为 1.5%。当支护 15 cm 厚的素混凝土喷层时，拱顶处喷层中的压应力为 45.872 MPa，与支护 5 cm 厚的素混凝土喷层时相比，减幅为 8.2%；而在巷道拱顶处的围岩中，其压应力减为 32.141 MPa，与 5 cm 厚的素混凝土喷层时相比，减幅为 2.0%。所以，对巷道拱顶处 σ_x 而言，支护 5 cm 厚的素混凝土喷层，应力集中现象减少很显著，而支护

10 和 15 cm 厚的素混凝土喷层，应力集中现象减少并不明显。

图 5, 6 分别为主巷道拐角处喷层和围岩中的 σ_x 图，它们也反映了与拱顶处喷层和围岩中的 σ_x 分布类似的规律。

图5 主巷道拐角喷层处的 σ_x 图Fig.5 Curves of σ_x on the shotcrete in the corner of the main roadway图6 主巷道拐角处围岩中的 σ_x 图Fig.6 Curves of σ_x on the surrounding rock in the corner of the main roadway

拱顶处的 σ_y 基本上也是随着巷道埋深的增加呈线性增加。未施加支护时，其应力值虽然相对较低，但是由于其分布面积比较大，造成巷道拱顶处出现较大面积的塑性区。支护后，其应力发生了重分布，主要的应力集中现象转移到了素混凝土喷层中。以埋深 625 m 处的主巷道为例，支护前，拱顶存在较大的拉应力区，当支护 5 cm 厚的素混凝土时，拱顶处喷层中的压应力为 16.979 MPa；而在主巷道拱顶处的岩体中，其压应力亦为 16.979 MPa。当支护 10 cm 厚的素混凝土时，拱顶处喷层中的压应力为 13.336 MPa，与支护 5 cm 厚的素混凝土喷层时相比，减幅为 21.5%；在巷道拱顶处的岩体中，其压应力亦为 13.336 MPa；当支护 15 cm 厚的素混凝土时，拱顶处喷层中的压应力为 10.919 MPa，与支护 5 cm 厚的素混凝土喷层时相比，减幅为 35.7%；在巷道拱顶处的岩体中，其压应力亦为

10.919 MPa。

图 7, 8 分别为支护前和支护后拐角处喷层和岩体上的 σ_y 图。以埋深 625 m 处为例, 从图 7, 8 中可以看出: 支护前, 拐角处压应力为 49.767 MPa; 当支护 5 cm 厚的素混凝土时, 拐角处喷层中的压应力为 85.432 MPa; 而在巷道拐角处的岩体中, 其压应力为 34.736 MPa, 减幅为 30.2%。当支护 10 cm 厚的素混凝土时, 拐角处喷层中的压应力为 68.602 MPa, 与支护 5 cm 厚的素混凝土喷层时相比, 减幅为 19.7%; 而在巷道拐角处的岩体中, 压应力为 40.969 MPa。当支护 15 cm 厚的素混凝土时, 拐角处喷层中的压应力为 55.293 MPa, 与支护 5 cm 厚的素混凝土喷层时相比, 减幅为 35.3%; 而在巷道拐角处的岩体中, 压应力为 33.421 MPa。

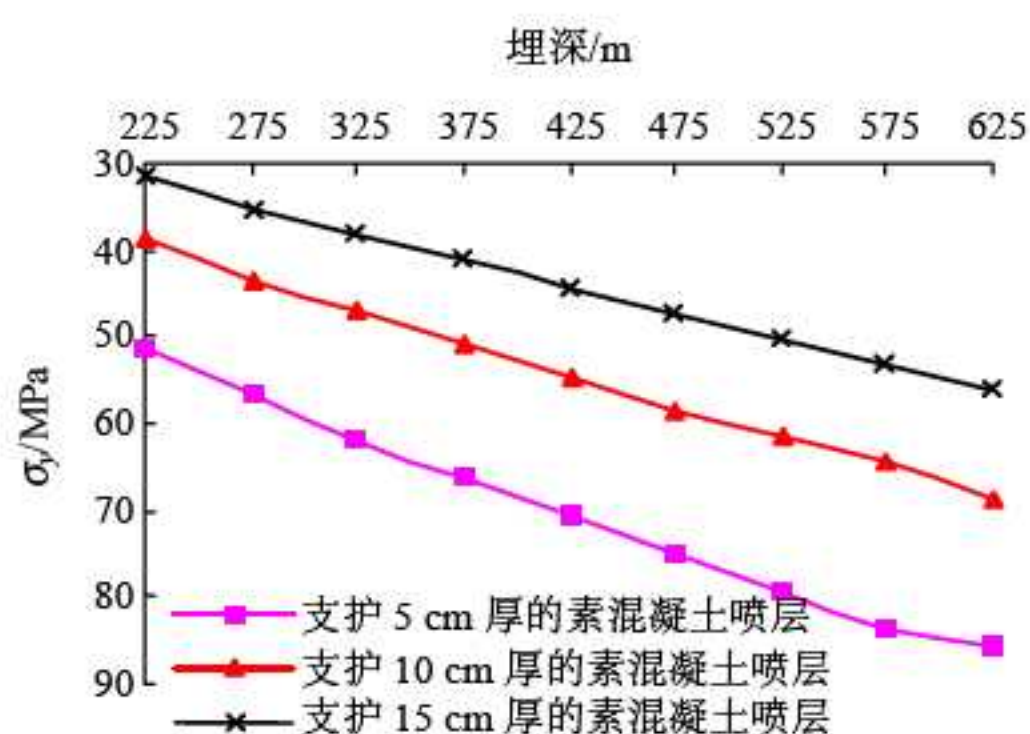


图 7 主巷道拐角处喷层上的 σ_y 图

Fig.7 Curves of σ_y on the shotcrete in the corner of the main roadway

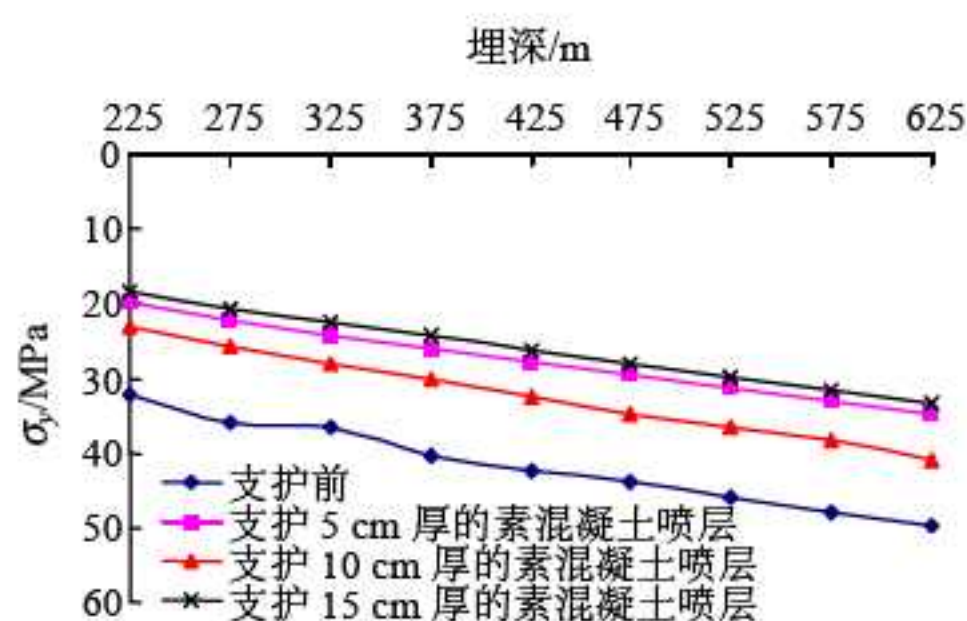


图 8 主巷道拐角处岩体上的 σ_y 图

Fig.8 Curves of σ_y on the surrounding rock in the corner of the main roadway

4.2 塑性区分析

总的来看, 随着主巷道埋深的加大, 支护后巷道周围的塑性区也随之扩大且屈服程度加重。同时, 随着支护时素混凝土喷层厚度的增加, 其塑性区也发生了变化。在埋深为 225 m 处, 当支护 5 cm 厚的

素混凝土喷层时, 其塑性区主要出现在拐角和直墙底部附近, 并且塑性区的范围比较小。当支护 10 cm 厚的素混凝土喷层时, 塑性区主要出现在拐角和直墙底部附近, 但是与支护 5 cm 厚的素混凝土喷层时相比, 其拐角处的塑性区范围减小, 直墙底部附近的屈服程度也降低, 塑性区向底板方向转移。当支护 15 cm 厚的素混凝土喷层时, 其巷道周围的塑性区主要出现在底板处。

在埋深为 375 m 处, 当支护 5 cm 厚的素混凝土喷层时, 其塑性区几乎遍布了整个巷道周围, 塑性区屈服比较严重的部位主要出现在拐角两侧和直墙底部附近; 当支护 10 cm 厚的素混凝土喷层时, 拐角上侧附近的塑性区消失, 其塑性区主要出现在拐角和直墙底部附近, 与支护 5 cm 厚的素混凝土喷层时相比, 其拐角处的塑性区范围减小, 直墙底部附近的屈服程度也降低, 塑性区向底板方向转移; 当支护 15 cm 厚的素混凝土喷层时, 塑性区沿直墙几乎均匀分布, 且塑性区主要转移到了底板处。

在埋深 625 m 处, 当支护 5 cm 厚的素混凝土喷层时, 由于巷道埋深的继续增加, 其塑性区出现在巷道周围的整个边界上, 其中直墙底部附近的塑性区屈服程度最高; 当支护 10 cm 厚的素混凝土喷层时, 塑性区主要出现直墙和底板处, 其中以直墙中部上下两侧的屈服程度最高; 当支护 15 cm 厚的素混凝土喷层时, 直墙上的塑性区几乎均匀分布, 底板处出现了一定程度的塑性区, 而拱顶处的塑性区消失。

5 穿脉巷道(矿岩巷道)的支护分析

矿岩穿脉巷道的支护形式主要采用素混凝土喷层。矿岩穿脉巷道的支护模拟计算分析主要也分为 5, 10 和 15 cm 厚的素混凝土喷层 3 种情况进行计算, 并对支护后的位移场、应力场和塑性区等进行了分析比较。穿脉巷道的支护计算区域范围为 700 m×450 m, 采用 PLANE 2 六节点等参元, 单元个数为 30 194 个, 节点总数为 65 873 个。计算后得出的规律基本与主巷道相似, 这里不再赘述。

6 高丽山砂岩穿脉巷道的支护分析

高丽山砂岩穿脉巷道的支护形式采用锚喷支

护, 模拟计算分析主要分为 1 m 锚杆和 10 cm 混凝土支护、2 m 锚杆和 10 cm 混凝土支护以及 3 m 锚杆和 10 cm 混凝土支护 3 种情况进行计算, 其中锚杆间距为 1 m, 直径为 22 mm 的 II 级钢。计算时采用杆单元单独模拟。本文对上述 3 种情况进行了支护后的应力场分析比较。

6.1 应力场分析

图 9, 10 分别为高丽山砂岩穿脉巷道拱顶处 σ_x 和 σ_y 图。从图 9 中可以看出, 锚喷支护后, 巷道拱顶处的 σ_x 随巷道埋深的增加基本呈线性增长。以埋深为 625 m 处的巷道为例分析巷道拱顶处的 σ_x 。当采用 1 m 锚杆和 10 cm 混凝土支护时, 其拱顶处的 σ_x 为 37.348 MPa; 当采用 2 m 锚杆和 10 cm 混凝土支护时其拱顶处的 σ_x 为 36.850 MPa, 较采用 1 m 锚杆支护时降低了 1.3%; 当采用 3 m 锚杆和 10 cm 混凝土支护时其拱顶处的 σ_x 为 32.726 MPa, 较采用 1 m 锚杆支护时降低了 12.4%。

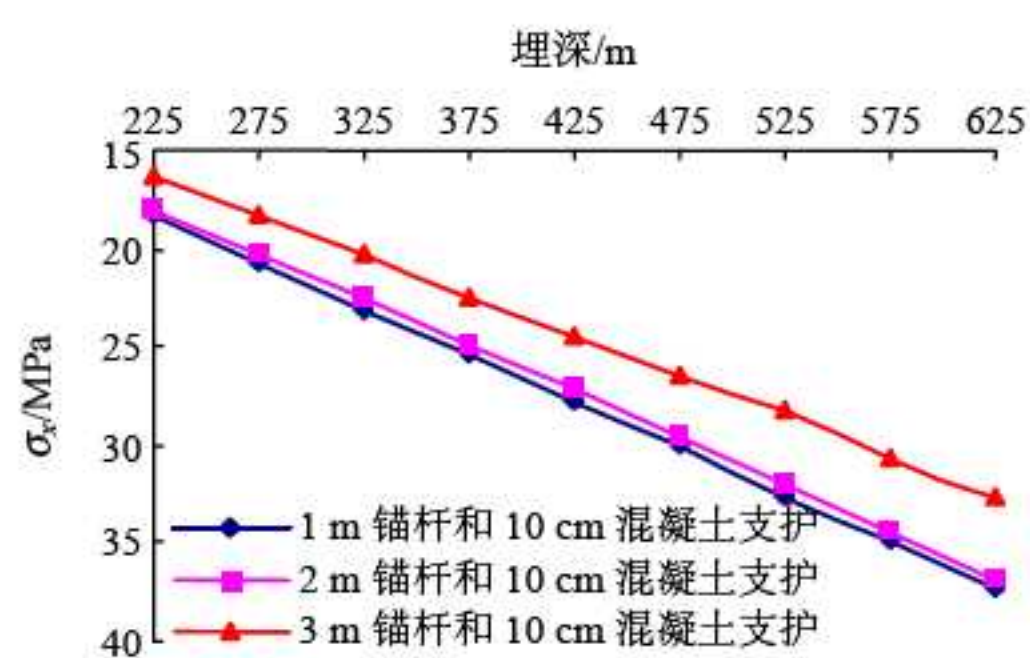


图 9 高丽山砂岩穿脉巷道拱顶处 σ_x 图

Fig.9 Curves of σ_x in the vault of the Gaolishan sandstone roadway

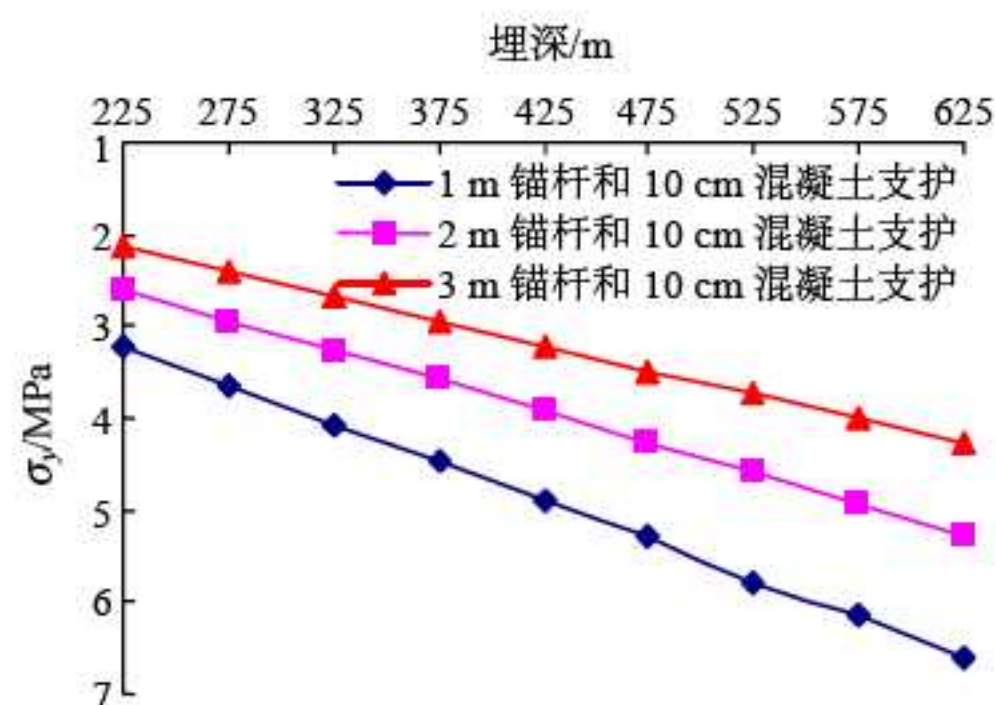


图 10 高丽山砂岩穿脉巷道拱顶处 σ_y 图

Fig.10 Curves of σ_y in the vault of the Gaolishan sandstone roadway

从图 10 中可以看出, 锚喷支护后, 巷道拱顶处的 σ_y 随巷道埋深的增加基本呈线性增长。当采用 3 m 锚杆和 10 cm 混凝土支护情况, 其 σ_y 降低最多;

其次是采用 2 m 锚杆和 10 cm 混凝土支护情况; 1 m 锚杆和 10 cm 混凝土支护情况, 其 σ_y 降低最少。

6.2 塑性区分析

从塑性区方面来看, 随着巷道埋深的加深, 支护后巷道周围的塑性区也随之扩大并屈服程度加重。同时, 随着支护时喷锚厚度的增加, 其塑性区也发生了变化。在埋深 225 m 处, 当采用 1 m 锚杆和 10 cm 混凝土支护时, 塑性区主要出现在直墙底部附近和底板处, 其塑性应变最大值出现在直墙底部; 当采用 2 m 锚杆和 10 cm 混凝土支护时, 塑性区主要亦出现在直墙底部附近和底板处, 其最大值出现在直墙底部; 当采用 3 m 锚杆和 10 cm 混凝土支护时, 塑性区主要亦出现在直墙底部附近和底板处, 其最大值出现在底板中部。在埋深 625 m 处, 当采用 1, 2 和 3 m 锚杆支护时, 塑性区主要出现在直墙底部附近和底板处, 其最大值出现在底板中部。这是由于随着巷道支护长度和厚度的加大, 其支护后的刚度提高, 而底板处并没有加强支护, 从而造成底板出现较为严重的塑性区和较大的位移, 说明支护厚度也有一个合理的范围。

7 结 论

运用有限元方法, 分析计算了巷道在不同支护条件下的位移场、应力场和塑性区的情况, 得出了不同埋深的主巷道和支巷道较为合理的支护方式。计算结果表明: 在主巷道和矿岩穿脉巷道部分, 可以采用素混凝土的支护方式, 在埋深 375 m 以上的巷道可以采用支护 5 cm 厚的素混凝土; 在埋深 375 m 以下的巷道须采用支护 10~15 cm 厚的素混凝土; 在埋深 525 m 以下巷道的某些部位如直墙底部附近与拐角等处应加强支护措施。在高丽山砂岩穿脉巷道部分, 由于其岩体的物理力学参数较低, 且存在较多的岩体裂隙、地下水等因素的影响, 故需要采用锚喷支护的方式。锚杆长度采用 3 m、喷混凝土的厚度采用 10 cm 比较合理, 且随着巷道埋深的增加, 其锚喷支护的范围也需逐步增加。同时, 在巷道交岔处、不同岩性的巷道连接处等薄弱部位也应加强其支护。另外, 由于随着巷道支护厚度的加大, 其支护后刚度提高, 而底板处并没有加强支护, 从而造成底板出现较为严重的塑性区和较大的位移, 这说明支护厚度有一个合理的范围, 故在巷

道的支护过程中需充分加以考虑。

参考文献(References):

- [1] Kilic A, Yasar E, Celik A G. Effect of grout properties on the pull-out load capacity of fully grouted rock bolt[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002, 17(4): 355 - 362.
- [2] Farmer I W. Stress distribution along a resin grouted anchor[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech., 1975, 12(3): 347 - 351.
- [3] Benmokrane B, Chennouf A, Mitri H S. Laboratory evaluation of cement-based grouts and grouted rock anchors[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech., 1995, 32(7): 633 - 642.
- [4] 庞俊勇, 郭兰波, 刘松玉. 高应力巷道局部弱支护机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2 001 - 2 004.(Pang Junyong, Guo Lanbo, Liu Songyu. Analysis of partial short-supporting effect on high stress roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 2 001 - 2 004.(in Chinese))
- [5] 王卫军, 冯 涛. 加固两帮控制深井巷道底鼓的机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 808 - 811.(Wang Weijun, Feng Tao. Study on mechanism of reinforcing sides to control floor heave of extraction opening[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 808 - 811.(in Chinese))
- [6] 陈学华, 沈海鸿, 王善勇. 巷道围岩自稳结构原理及影响因素研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2002, 21(3): 261 - 263.(Chen Xuehua, Shen Haihong, Wang Shanyong. The research on theory and influence factors of self-sustaining structure of roadway surrounding rock[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2002, 21(3): 261 - 263.(in Chinese))
- [7] 汪海滨, 高 波. 预应力锚索荷载分布机制原位实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2 113 - 2 118.(Wang Haibin, Gao Bo. Field testing study on load distribution mechanism of prestressed anchorage cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2 113 - 2 118.(in Chinese))
- [8] 王连国, 缪协兴, 董健涛, 等. 深部软岩巷道锚注支护数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 983 - 985.(Wang Liangou, Miao Xiexing, Dong Jiantao, et al. Numerical simulation research of bolt-grouting support in deep soft roadway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 983 - 985.(in Chinese))
- [9] 华心祝, 马俊枫, 许庭教. 锚杆支护巷道巷旁锚索加强支护沿空留巷围岩控制机制研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2 107 - 2 112.(Hua Xinzh, Ma Junfeng, Xu Tingjiao. Study on controlling mechanism of surrounding rocks of gob-side entry with combination of roadside reinforced cable supporting and roadway bolt supporting and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2 107 - 2 112.(in Chinese))
- [10] 王祥秋, 杨林德, 高文华. 软弱围岩蠕变损伤机制及合理支护时间的反演分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 793 - 796.(Wang Xiangqiu, Yang Linde, Gao Wenhua. Creep damage mechanism and back analysis of optimum support time for soften rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 793 - 796.(in Chinese))