斜井螺纹钢锚杆支护参数及布置方式的优化设计*

段江飞[1],杜超杰[1],温浩[1],李昊城[2],杨玉玉[2],李鹏[1],杨鑫[2]

(1.陕西涌鑫矿业有限责任公司, 陕西 榆林市 719407;
2.渭南陕煤启辰科技有限公司, 陕西 渭南市 714000)

摘要:为有效保证陕北某矿副斜井延伸段的长期稳定性,采用ABAQUS软件分析了螺纹间距、锚固长度及钻孔直径等参数对锚杆承载性能的影响,优选出合理的锚固参数,并采用FLAC3D模拟了3种间距的锚杆支护方案,通过位移量及塑性区分布情况确定出最优锚杆间距,在此基础上开展了现场试验及围岩变形监测。研究结果表明:10 mm螺纹间距与8 mm螺纹间距下的锚杆最大拉力仅相差7.9 kN,考虑生产成本因素,确定锚杆螺纹间距为10 mm;锚杆最大锚固力随锚固长度和钻孔直径的增加而增大,超过临界值后,锚固长度和钻孔直径对锚固力的影响较小,最终确定合理的锚固长度为800 mm,钻孔直径为28 mm;锚杆支护间距为1 200 mm和1 000 mm的围岩控制效果相差不大,为提高施工效率,确定锚杆间距为1 200 mm。现场实践表明,采用优化的锚固及支护参数后,锚杆平均锚固力大于150 kN,围岩表面变形量小于25 mm,能够保证巷道的稳定性,验证了锚固及支护参数的合理性。

关键词:锚杆支护;锚固参数;锚固力;布置方式;数值模拟

中图分类号:TD353^{+}.6 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)03-0156-08

Optimization Design of Support Parameters and Layout of Bebar Bolt in Inclined Shaft

DUAN Jiangfei[1], *DU Chaojie*[1], *WEN Hao*[1], *LI Haocheng*[2], *YANG Yuyu*[2], *LI Peng*[1], *YANG Xin*[2]

(1.Shaanxi Yongxin Mining Co., Ltd., Yulin, Shaanxi 719407, China;
2.Weinan Shaanxi Coal Qichen Technology Co., Ltd., Weinan, Shaanxi 714000, China)

Abstract: To effectively ensure the long-term stability of the extension section of the auxiliary inclined shaft in a mine of northern Shaanxi, ABAQUS software was used to analyze the influence of parameters such as thread spacing, anchorage length and borehole diameter on the bearing performance of the bolt, and reasonable anchorage parameters were selected. FLAC3D software was used to simulate the bolt support schemes of three kinds of spacing, and the optimal bolt spacing was determined by the displacement and plastic zone distribution. On this basis, field tests and surrounding rock deformation monitoring were carried out. The results show that the maximum tensile force of the bolt under 10 mm thread spacing is only 7.9 kN different from that under 8 mm thread spacing. Considering the production cost, the thread spacing of the bolt is determined to be 10 mm. The maximum anchorage force of the bolt increases with the increase of the anchorage length and the borehole diameter. After exceeding the critical value, the anchorage length and the borehole diameter have little effect on the anchorage force. Finally, the reasonable anchorage length is 800 mm and the borehole diameter is 28 mm. The control effect of surrounding rock with bolt support spacing of 1 200 mm and 1 000 mm is not much different. In order to improve the construction efficiency, the bolt spacing is determined to be 1 200 mm. The field practice shows that after using the optimized anchorage and support parameters, the average anchorage force of the bolt is greater than 150 kN, and the surface deformation of the surrounding rock is less than 25 mm, which can ensure the stability of the roadway and verify the rationality of the anchorage and support parameters.

Key words: Bolt support, Anchorage parameter, Anchorage force, Layout, Numerical simulation

0 引言

锚杆支护技术作为一种简单高效的巷道围岩控制技术,在煤矿井工开采工程中占据着重要地位。通过给锚杆施加预紧力,在浅部围岩形成一定范围的压应力,限制其变形破坏,并调动围岩形成主动承

* **收稿日期**:2024-04-03
作者简介:段江飞(1990—),男,陕西佳县人,工程师,主要从事矿山压力与岩层控制研究。E-mail:673759766@qq.com

载结构,提高巷道的稳定性[1-2]。

合理的杆体外形参数及锚固参数能够有效提高单根锚杆的锚固力,诸多学者对此展开了研究。荣冠等[3]对比了螺纹钢及圆钢锚杆的拉拔特性,得出螺纹对锚杆锚固性能的影响较大。刘亚鑫等[4]基于ABAQUS软件研究了锚杆不同螺纹间距下的强度,得出随着螺纹间距的减小,杆体强度增大。李东印等[5]通过ABAQUS软件模拟分析了螺纹钢锚杆拉拔过程,验证了螺纹参数对锚杆锚固的影响。而在锚杆杆体、锚固剂及围岩等参数确定后,能否实现较高锚固力的关键在于合理的锚固剂环厚及锚固长度[6-8]。研究发现,锚杆锚固长度在一定范围内增长时,可有效提高锚固强度,但超过某一阈值后,锚固力的增幅明显降低[9-11]。对于锚固剂环形厚度而言,也存在一定的临界值,胡滨等[12]通过数值模拟详细分析了锚固剂环形厚度对锚固性能的影响,得出钻孔直径与锚杆直径之差应控制在4～10 mm之间。康红普等[13]通过测试不同载荷下锚杆的轴力分布,指出钻孔直径应在大于锚杆直径的6～8 mm范围内。

在实际施工过程中,还需通过设计合理的支护参数,以使每根锚杆的压应力相互叠加,共同控制围岩变形,使其主动支护作用得到充分的发挥[14-15]。锚杆支护参数主要包括锚杆间排距,间排距过大时无法有效控制巷道围岩的变形破坏,间排距过小时不仅会增加施工成本及难度,还可能破坏围岩的完整性[16-17]。为深入探究锚杆锚固参数及支护方案等因素对其支护性能的影响,充分发挥其控制效果,本文利用ABAQUS软件建立锚杆拉伸试验模型,对螺纹钢锚杆进行了不同锚固参数的拉拔模拟研究,并以陕北某矿副斜井延伸段掘进面为工程背景,通过FLAC3D模拟方法对合理的锚杆布置(间距)进行了分析确定,最终通过现场拉拔及监测分析,对锚固参数及支护方案进行验证。

1 螺纹钢锚杆螺纹间距模拟分析

1.1 模型建立

螺纹钢锚杆的螺纹间距对其杆体的强度具有较大的影响,为探究陕北某矿副斜井支护锚杆的合理螺纹间距,通过ABAQUS有限元模拟软件,建立锚杆拉伸试验模型,杆体直径为20 mm,采用延性金属损伤模型进行赋参分析。

模型建立过程中,对杆体和螺纹模型分别进行建立,随后通过绑定约束结合在一起,便于网格划分及分析。共建立了5种拉伸模型,螺纹间距分别为0 mm(无螺纹)、8 mm、10 mm、12 mm及14 mm。

锚杆材料弹性模量为210 GPa,泊松比为0.29。锚杆塑性参数见表1[4]。锚杆断裂力学参数为:断裂应变0.3,三轴应力比0.33,应变比1.0。

表1 锚杆塑性参数

Table 1 Plastic parameters of bolt

参考点	应力/MPa	塑性应变
1	362.88	0.000
2	367.74	0.006
3	469.80	0.026
4	603.45	0.108
5	689.31	0.198
6	712.80	0.230

1.2 模拟结果分析

图1为螺纹钢锚杆拉伸断裂过程中的应力云图。

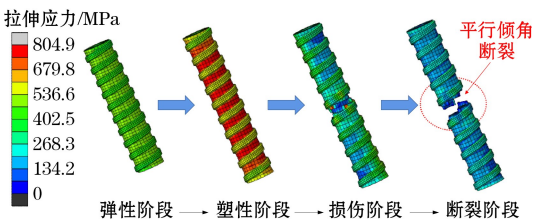


图1 螺纹钢锚杆拉伸断裂过程应力云图

Fig.1 Stress cloud diagrams of tensile fracture process of rebar bolt

由图1可知,锚杆的拉伸过程可分为4个阶段,分别为弹性阶段、塑性阶段、损伤阶段和断裂阶段。在弹性阶段和塑性阶段,杆体内的应力基本呈均匀分布,当应力达到杆体最大载荷时,杆体横向截面骤然缩小,载荷也随之快速下降,随后发生损伤并断裂。5种螺纹间距下的锚杆最终断裂形态基本一致,均平行于肋倾角断裂。

图2为不同螺纹间距锚杆拉伸过程中的拉力-位移曲线。无螺纹锚杆的拉力峰值最小,为184.5 kN,增设螺纹后,锚杆极限载荷随着螺纹间距的减小而增大。分析其原因,螺纹横肋变相增大了锚杆的横截面积,进而提升了锚杆的抗拉性能。

由图2可知,8 mm螺纹间距的锚杆抗拉性能最强,峰值拉力为202.6 kN,但其制作成本稍高;而

10 mm 螺纹间距的锚杆拉力峰值为 194.7 kN,与 8 mm 螺纹间距仅相差 7.9 kN,且生产成本低。因此,选用螺纹间距为 10 mm 的锚杆进行下一步锚固分析。

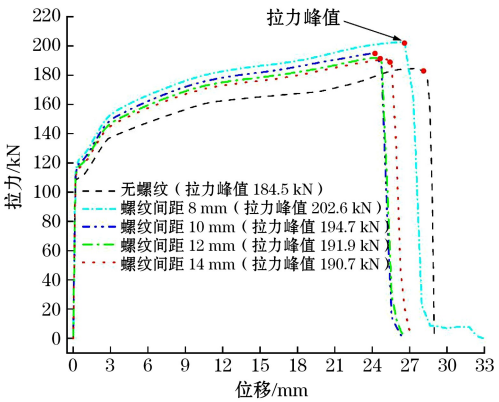


图 2 不同螺纹间距锚杆拉伸拉力-位移曲线

Fig.2 Tensile tension-displacement curves of bolts with different thread spacing

2 锚杆拉拔数值计算模型

2.1 模型建立与材料属性

采用 ABAQUS 软件建立锚杆三维拉拔模型,并设置锚杆螺纹间距为 10 mm,模型分为 3 个部分,分别为岩体试块、螺纹钢锚杆及锚固剂,其中锚固剂与螺纹钢锚杆间采用布尔运算连接,并与岩体试块装配。锚固长度分别设置为 400 mm、600 mm、800 mm 及 1 000 mm。

图 3 为 400 mm 锚固长度、24 mm 钻孔直径拉拔模型的详细建模过程。其中,岩体岩性为粉砂岩,试块为圆柱形,半径为 300 mm,高度为 600 mm,采用 D-P 损伤模型,具体参数见表 2。锚杆杆长 500 mm,前 400 mm 包含螺纹,后 100 mm 无螺纹,方便后续施加位移控制。

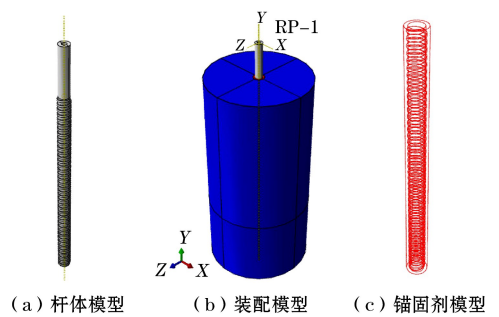


图 3 锚杆拉拔有限元模型

Fig.3 Finite element model of bolt pull-out

表 2 岩体力学参数

Table 2 Rock mechanics parameters

密度/(kg/m³)	杨氏模量/GPa	泊松比	断裂应变	破坏位移/mm	膨胀角/(°)
2 800	42.3	0.18	0.183	0.01	10

2.2 边界条件及荷载控制

岩体底部设置为固定边界,以位移控制来实现拉拔过程,具体为在锚杆外露段中心点向上偏移一定距离,建立参考点,通过耦合约束将参考点与锚杆外露段顶部自由面相连接,最后设置参考点向上位移 15 mm,进行锚杆拉拔试验。

2.3 网格划分及相互作用

采用 C3D8R 单元格对岩体及螺纹钢进行网格划分。由于锚固剂形态多变,采用 C3D4 单元格进行网格划分,如图 4 所示。

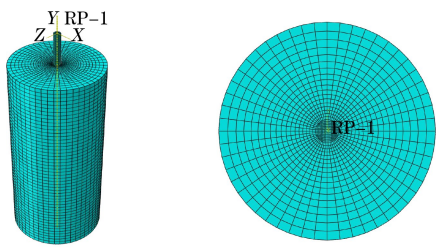


图 4 模型网格划分

Fig.4 Model grid division

设置岩体-锚固剂的相互作用时,由于岩体的刚度远超锚固剂,孔壁为主控面,锚固剂为从属面。相比于锚固剂与岩体间的位移,杆体与锚固剂间的位移非常小,因此,本模型中螺纹钢锚杆与树脂锚固剂间的接触类型为绑定约束,如图 5 所示。

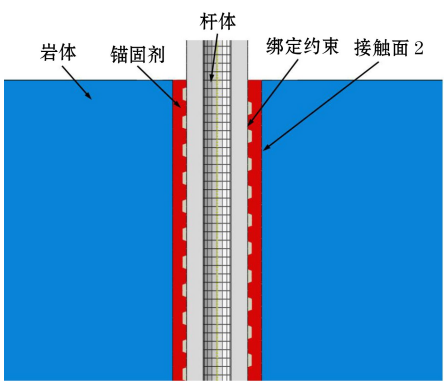


图 5 相互作用设置

Fig.5 Interaction settings

3 不同锚固长度对锚固性能的影响分析

3.1 锚杆应力分布特征

图 6 为不同锚固长度下锚杆的轴向应力分布曲

线。由图 6 可知，不同锚固长度下，锚杆的轴向应力均呈现先增高、再平稳、后降低的变化规律，锚杆轴向应力随锚固长度的增加而增大。

锚固长度为 400 mm 时，锚杆最大轴向应力为 283.9 MPa；600 mm 锚固长度下，锚杆的轴向应力峰值相较于 400 mm 时增大了 75.43%；800 mm 锚固长度下，锚杆的轴向应力峰值相较于 600 mm 时增加了约 29.59%；1 000 mm 锚固长度下，锚杆的轴向应力分布特征与 800 mm 时基本一致，轴向峰值应力仅相差 0.8 MPa。可以看出，随着锚固长度的增加，锚杆轴向应力的增幅逐渐降低。

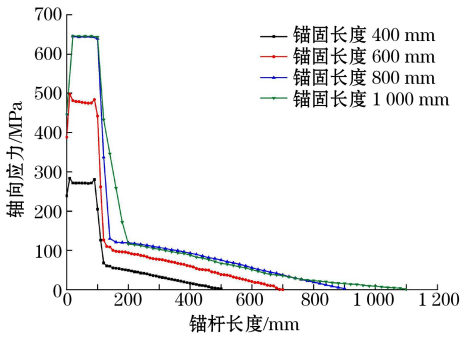


图 6　不同锚固长度下锚杆轴向应力分布曲线

Fig.6　Axial stress distribution curves of bolts under different anchorage lengths

3.2　不同锚固长度下锚杆拉拔位移-载荷曲线

图 7 为不同锚固长度下锚杆拉拔位移-载荷曲线。由图 7 可知，不同锚固长度下，锚杆的拉拔位移-载荷曲线特征具有明显差异，曲线波动是由计算时设置了缩放系数加快运算引起的，对计算结果的影响可忽略。锚固长度为 400 mm 时，锚杆的位移-载荷曲线呈单峰状，在 15 mm 的位移加载下，锚杆被拔出，锚固体的极限锚固力为 96.25 kN，相应位移为 0.26 mm；锚固长度为 600 mm 时，锚杆的位移-载荷曲线与单杆体拉断类似，锚杆同样被拔出，锚固体极限锚固力达到 150.32 kN，相比于 400 mm 锚固长度增加了 56.18%；800 mm 锚固长度下，由于在设置 15 mm 位移加载下锚固体未被拉出，因此锚杆位移-载荷曲线与 600 mm 锚固长度时不同，其极限锚固力达到了 168.91 kN，相比于 600 mm 锚固长度时增加了 12.37%；锚固长度为 1 000 mm 时，锚固体同样未被拉出，其最大锚固力为 176.4 kN，仅比 800 mm 锚固长度时增大了 4.43%，增幅较小。

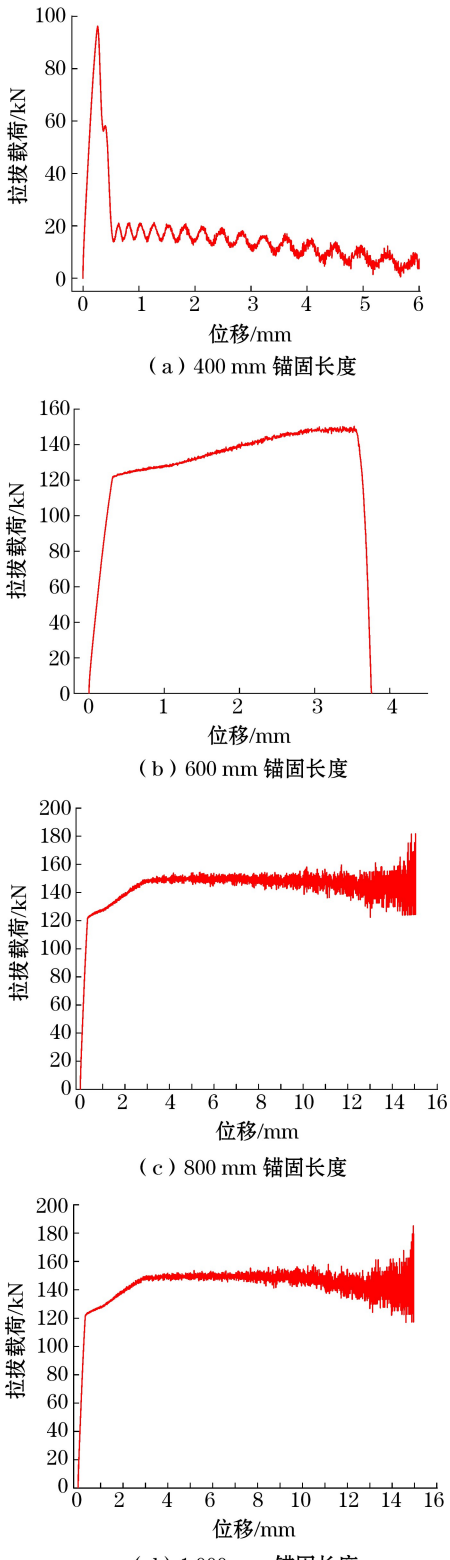


图 7　不同锚固长度下锚杆拉拔位移-载荷曲线

Fig.7　Displacement-load curves of bolt pull-out under different anchor lengths

为进一步分析，取各锚固长度下的最大锚固力进行对比，如图 8 所示。

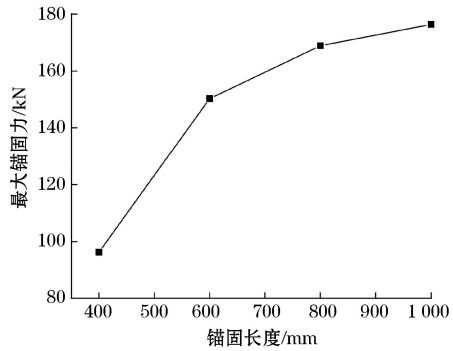


图 8 锚固长度与最大锚固力关系曲线

Fig.8 Relationship curve between anchorage length and maximum anchorage force

由图 8 可知,随着锚固长度的增加,锚固力呈非线性增大,锚固长度超过临界值后,继续增加锚固长度对锚固力的提高效果减弱。因此,确定副斜井锚杆的合理锚固长度为 800 mm。

4 不同钻孔直径对锚固性能的影响分析

为分析不同钻孔直径,即锚固层厚度对锚固体拉拔过程的影响,采用 ABAQUS 软件分别建立钻孔直径为 24 mm、28 mm 及 32 mm 的 3 种锚固体拉拔模型,设置锚固长度均为 400 mm。建立的模型剖面如图 9 所示。

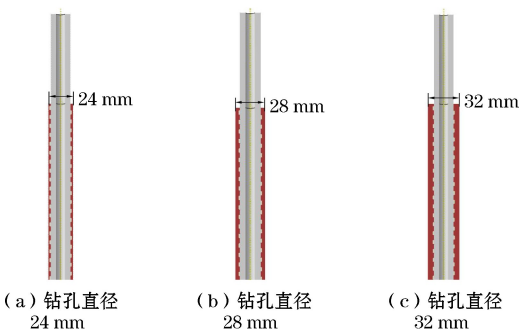


图 9 不同钻孔直径锚固体剖面

Fig.9 Anchor body profiles with different borehole diameters

4.1 不同钻孔直径下锚杆应力分布特征

提取峰值载荷时刻,不同钻孔直径下,锚杆杆体轴向应力分布曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出,随着钻孔直径的增大,锚杆轴向应力也随之增大,钻孔直径为 24 mm、28 mm、32 mm 时的锚杆最大轴向应力分别为 275.8 MPa、417.1 MPa、495.9 MPa。

锚杆轴向应力的增幅逐渐降低,28 mm 钻孔直径下,锚杆最大轴向应力相比 24 mm 时增大了 51.23%,而 32 mm 钻孔直径下,锚杆最大轴向应力相比 28 mm 时增大了 18.89%。

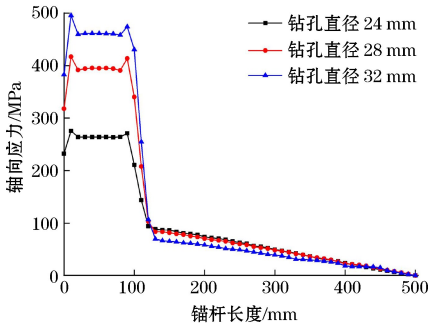


图 10 不同钻孔直径下锚杆轴向应力分布曲线

Fig.10 Axial stress distribution curves of bolts under different borehole diameters

4.2 不同钻孔直径下锚杆拉拔位移-载荷曲线

图 11 为不同钻孔直径下(24 mm、28 mm、32 mm)锚杆拉拔的位移-载荷曲线。

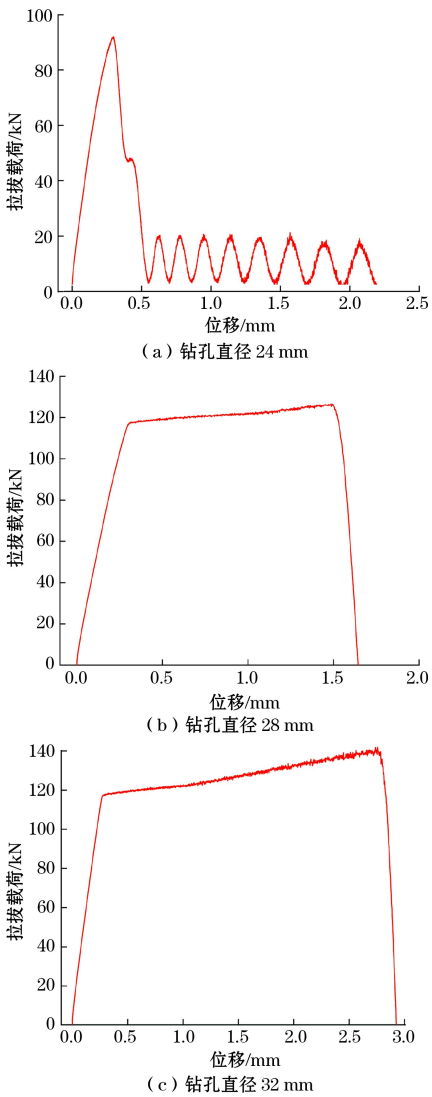


图 11 不同钻孔直径下锚杆拉拔的位移-载荷曲线

Fig.11 Displacement-load curves of bolt pull-out under different borehole diameters

由图 11 可知,钻孔直径为 24 mm 时,锚固体被拉出速度较快,其曲线呈单峰状;钻孔直径为 28 mm 和 32 mm 时,锚固体拉拔曲线与单杆体拉伸曲线类似。

图 12 为钻孔直径与极限锚固力的关系曲线。由图 12 可知,随着钻孔直径的增大,锚固体极限锚固力逐渐增大,24 mm 钻孔直径下,锚固体极限锚固力为 92.03 kN,峰值点位移为 0.3 mm;28 mm 钻孔直径下,锚固体极限锚固力为 126.62 kN,相较 24 mm 时增大了 37.59%,峰值点位移为 1.49 mm;32 mm 钻孔直径下,锚固体极限锚固力相较于 28 mm 时仅增大了 12.08%,增幅明显降低。由此可知,与锚固长度相同,钻孔直径超过临界值后,继续增大对锚固力的提升效果降低。因此,确定副斜井合理的钻孔直径为 28 mm。

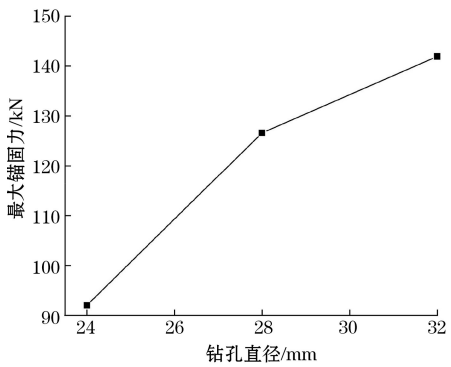


图 12 钻孔直径与极限锚固力的关系曲线

Fig.12 Relationship curve between borehole diameters and maximum anchorage force

5 支护方案优化分析

5.1 模拟方案

陕北某矿副斜井巷道支护设计为锚网索喷联合支护,锚杆规格为 Φ20 mm×2 200 mm,托盘规格为 Φ150 mm×10 mm,锚杆间排距为 1 000 mm×1 000 mm,每排 13 根;锚索选用 Φ17.8 mm×6 000 mm,托盘规格为 250 mm×250 mm×12 mm,间排距为 2 000 mm×2 000 mm,每排 2 根。

在保证巷道稳定性的基础上,为尽可能降低材料成本并提高施工效率,采用 FLAC3D 模拟软件对锚杆布置的间距进行优化。设置 3 种模拟方案,排距均为 1 000 mm,每排锚杆数量分别为 13 根、11 根和 9 根,对应间距分别为 1 000 mm、1 200 mm 和 1 400 mm。

5.2 模拟结果分析

5.2.1 围岩破坏特征分析

图 13 为副斜井巷道围岩塑性区分布特征。

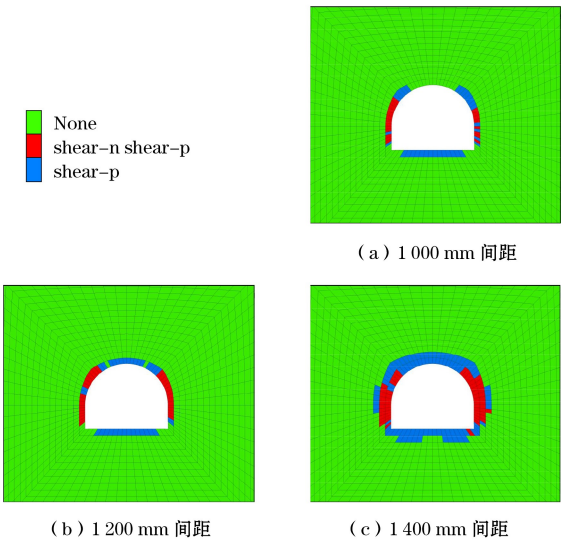


图 13 围岩塑性区分布云图

Fig.13 Distribution cloud diagrams of plastic zone of surrounding rock

由图 13 可知,增大锚杆间距使围岩的破坏范围进一步扩大。锚杆间距为 1 000 mm 时,围岩破坏深度为 0.5 m,拱顶处未出现破坏;锚杆间距为1 200 mm 时,围岩破坏深度变化不大,巷道拱顶处开始出现小范围破坏;锚杆间距增大至 1 400 mm 时,围岩平均破坏深度增大至 1.5 m。

5.2.2 围岩位移分析

图 14 为不同锚杆间距的巷道围岩位移情况。

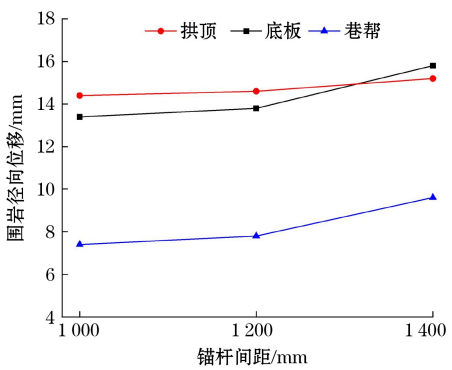


图 14 巷道围岩位移情况

Fig.14 Displacement of surrounding rock in roadway

由图 14 可知,1 000 mm 锚杆间距下,巷道拱顶处最大变形量为 14.4 mm,底板及巷帮最大变形量分别为 13.4 mm 及 7.4 mm;锚杆间距增加至 1 200 mm 时,巷道拱顶、底板及巷帮的最大变形量分别为 14.6 mm、13.8 mm 及 7.8 mm,变化不明显;而锚杆间距增至 1 400 mm 时,相比于 1 000 mm 间距,巷道拱顶、底板及巷帮的最大变形量分别增大了 5.3%、15.2%及 22.9%,围岩变形量增幅较大。

综合模拟结果可知,当锚杆排间距为 1 200 mm 时,巷道围岩变形破坏特征与 1 000 mm 间距时相差不大,能够保证巷道的稳定性。因此,为提高施工效率,确定锚杆间距为 1 200 mm,即每排布置 11 根锚杆。

6 现场实践

根据研究结果,在陕北某矿副斜井延伸段掘进面,采用螺纹间距为 10 mm 的 Φ20 mm×2 200 mm 锚杆进行支护,锚杆钻孔直径为 28 mm,锚固长度为 800 mm,支护间距为 1 200 mm,排距为 1 000 mm。

为验证锚固参数的合理性,在现场采用锚杆拉拔仪进行锚固力检测,结果显示,设计锚固参数下的锚杆平均锚固力均在 150 kN 以上,满足巷道支护需求。

为验证支护参数的合理性,对巷道围岩表面变形量进行了实时监测,结果如图 15 所示。由图 15 可知,巷道掘进 25 d 后,变形量逐渐趋于稳定,其中,拱顶、底板及巷帮的最大变形量分别为 21.7 mm、15.3 mm 及 12.9 mm,整体变形量较小,满足矿井使用需求,也验证了锚固参数及支护参数的合理性。

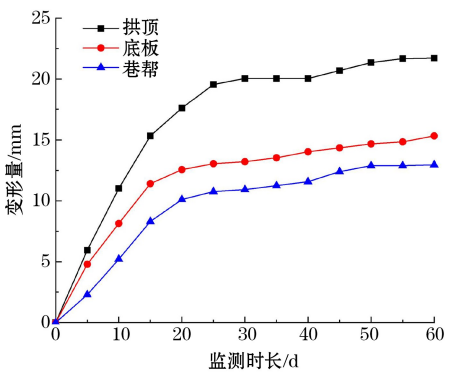


图 15 巷道围岩变形情况监测曲线

Fig.15 Monitoring curves of deformation of surrounding rock in roadway

7 结论

(1) 通过锚杆拉伸模拟试验得出,10 mm 螺纹间距锚杆的最大拉力为 194.7 kN,与 8 mm 螺纹间距仅相差 7.9 kN,且生产成本低,因此,选用螺纹间距为 10 mm 的锚杆进行下一步锚固分析。

(2) 通过三维拉拔模拟试验得出,锚固力随着锚固长度及钻孔直径的增加而增大,超过临界值后,继续增加对锚杆极限锚固力的提升效果不明显。确定锚杆合理的锚固长度为 800 mm,钻孔直径为 28 mm。

(3) 通过 FLAC3D 数值模拟软件得出,陕北某矿副斜井锚杆支护间距为 1 200 mm 时的围岩控制效果与 1 000 mm 时相差不大,为提高施工效率,确定采用 1 200 mm 的锚杆间距。

(4) 现场实践表明,锚杆平均锚固力可达到 150 kN 以上,围岩变形量在 25 mm 以下,能够保证巷道的稳定性,验证了锚固及支护参数的合理性。

参考文献(References):

[1] 康红普.我国煤矿巷道围岩控制技术发展 70 年及展望[J].岩石力学与工程学报,2021,40(1):1-30.
KANG Hongpu. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(1):1-30.

[2] 张爱卿,吴爱祥,王贻明,等.复杂破碎软岩巷道支护技术及分区分级支护体系研究[J].矿业研究与开发,2021,41(1):15-20.
ZHANG Aiqing, WU Aixiang, WANG Yiming, et al. Study on the support technology of complex broken soft rock roadway and support system of zoning and grading [J]. Mining Research and Development,2021,41(1):15-20.

[3] 荣冠,朱焕春,周创兵.螺纹钢与圆钢锚杆工作机理对比试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004(3):469-475.
RONG Guan, ZHU Huanchun, ZHOU Chuangbing. Testing study on working mechanism of fully grouted bolts of thread steel and smooth Steel[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004(3):469-475.

[4] 刘亚鑫,邢明录,刘鹏程,等.螺纹钢锚杆锚固岩石拉拔试验过程精细化数值模拟研究[J].煤矿安全,2022,53(3):66-74.
LIU Yaxin, XING Minglu, LIU Pengcheng, et al. Study on fine numerical simulation of pull-out test process of anchor rock with rebar anchor[J]. Safety in Coal Mines,2022,53(3):66-74.

[5] 李东印,王伸.螺纹钢横肋作用下锚固体应力分布与破坏规律[J].煤炭学报,2015,40(9):2026-2032.
LI Dongyin, WANG Shen. Research on load distribution and failure of fully grouted bolt under thread steel rib [J]. Journal of China Coal Society,2015,40(9):2026-2032.

[6] 陈登国,高召宁,赵光明,等.基于锚固力学效应巷道围岩稳定性分析[J].煤炭学报,2020,45(3):1009-1019.
CHEN Dengguo, GAO Zhaoning, ZHAO Guangming, et al. Stability analysis of surrounding rock under anchorage mechanics effect[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(3):1009-1019.

[7] 黄明华,赵明华,陈昌富.锚固长度对锚杆受力影响分析及其临界值计算[J].岩土力学,2018,39(11):4033-4041+4062.
HUANG Minghua, ZHAO Minghua, CHEN Changfu. Influence of anchorage length on stress in bolt and its critical value calculation[J].Rock and Soil Mechanics,2018,39(11):4033-4041+4062.

[8] 王洪涛,王琦,王富奇,等.不同锚固长度下巷道锚杆力学效应分析及应用[J].煤炭学报,2015,40(3):509-515.

WANG Hongtao, WANG Qi, WANG Fuqi, et al. Mechanical effect analysis of bolts in roadway under different anchoring lengths and its application[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(3):509-515.

[9] 林健,杨景贺,韩国强,等.不同杆体外形树脂锚杆锚固与安设性能对比试验研究[J].煤炭学报,2015,40(2):286-292.
LIN Jian, YANG Jinghe, HAN Guoqiang, et al. Comparable test on anchoring and setting performance of resin bolts with different rod shapes[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(2):286-292.

[10] 车纳,王华宁,蒋明镜,等.岩石锚杆锚固段拉拔破坏机理离散元分析[J].地下空间与工程学报,2018,14(增刊2):716-724.
CHE Na, WANG Huaning, JIANG Mingjing, et al. Mechanism investigation of rock bolt failure in anchorage segment under pullout via DEM[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2018,14(Suppl.2):716-724.

[11] 孙克国,许炜萍,黄谦,等.预应力锚杆拉拔力学特性及临界锚固长度研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(3):653-669.
SUN Keguo, XU Weiping, HUANG Qian, et al. Study on pull-out mechanical characteristics and critical anchorage length of prestressed anchor bolts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(3):653-669.

[12] 胡滨,林健,姜鹏飞.锚固剂环形厚度对树脂锚杆锚固性能影响的研究[J].煤矿开采,2011,16(4):20-22.
HU Bin, LIN Jian, JIANG Pengfei. Influence of ring thickness of anchored agent on anchored quality of resin anchored bolt[J]. Coal Mining Technology,2011,16(4):20-22.

[13] 康红普,崔千里,胡滨,等.树脂锚杆锚固性能及影响因素分析[J].煤炭学报,2014,39(1):1-10.
KANG Hongpu, CUI Qianli, HU Bin, et al. Analysis on anchorage performances and affecting factors of resin bolts[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(1):1-10.

[14] 范东林,王巍.大采高工作面回风巷道支护参数优化研究[J].中国安全科学学报,2022,32(增刊2):166-171.
FAN Donglin, WANG Wei. Study on support parameter optimization of mining roadway in working face with large mining height[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(Suppl.2):166-171.

[15] 陈才贤,陈磊,黄智强.高海拔软破大断面巷道支护设计及参数优选研究[J].矿业研究与开发,2022,42(10):88-94.
CHEN Caixian, CHEN Lei, HUANG Zhiqiang. Study on support design and parameter optimization of broken soft large-section roadway at high altitude[J]. Mining Research and Development,2022,42(10):88-94.

[16] 杜帅,康天合,张智敏.复合顶板中锚固力扩散模型及其支护参数优化研究[J].矿业研究与开发,2021,41(11):112-117.
DU Shuai, KANG Tianhe, ZHANG Zhimin. Diffusion model of anchoring force and support parameters optimization in composite roof[J]. Mining Research and Development,2021,41(11):112-117.

[17] 李臣,辛德林,乔博阳.采动巷道矿压显现及其支护参数优化研究[J].煤炭技术,2023,42(6):52-56.
LI Chen, XIN Delin, QIAO Boyang. Study on strata behaviors and support parameter optimization of mining roadway[J]. Coal Technology,2023,42(6):52-56.