

# 全长锚固锚杆在回采巷道层状顶板的工作特性

陆庭侃<sup>1</sup>, 戴耀辉<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学 能源学院, 河南 焦作 454000; 2. 陕西铜川矿务局, 陕西 铜川 727000)

**摘要:** 以应变锚杆为工具, 对全长树脂锚固锚杆的最大锚固力及位置、锚固力沿锚杆长度的分布特征以及锚杆的最大弯矩等参数在巷道开挖阶段、开挖后、回采前及回采过程中进行全面的观测, 以研究全长树脂锚杆在不同采矿阶段的工作特征。根据观测结果发现, 在巷道掘进阶段, 锚杆的工作特征主要受到由于巷道开挖后引起的应力重新分布的影响, 应力重新分布后锚杆的工作特征与围岩的蠕变特征相一致, 锚固力变化非常有限。在回采过程中, 锚杆锚固力随工作面的推进而增加, 当工作面推进距离锚杆 1 m 时, 锚固力发生明显衰减, 这表明连接锚杆与围岩的锚固剂已经发生破坏, 导致锚杆不再对围岩移动起约束作用。另外, 通过比较回采前后最大锚固力的变化, 发现动荷载条件下的锚杆锚固力比静荷载条件下提高 36%。根据对锚杆弯矩的观测可知, 最大的弯矩发生在 2 种不同岩层的结合部, 弯矩的大小取决于巷道顶板横向滑移的大小, 回采前后弯矩增量最高达 54%。由此可知, 全长锚固锚杆对层状顶板具有 2 种主要的支护功能: 第一, 阻止不同水平的岩层垂直变形; 第二, 提供剪切阻力以阻止巷道顶板层间的相对横向变形。

**关键词:** 岩石力学; 锚杆; 顶板稳定性; 采区巷道

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)增 1 - 3329 - 07

## PERFORMANCE OF FULLY ENCAPSULATED RESIN ROCK BOLT IN LAMINATED ROOF STRATA OF LONGWALL ROADWAY

LU Tingkan<sup>1</sup>, DAI Yaohui<sup>2</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;

2. Tongchuan Coal Mining Administration, Tongchuan, Shaanxi 727000, China)

**Abstract:** The strain gauge instrumented bolts have been installed on the roof strata of a longwall roadway to evaluate the performance of a fully encapsulated bolt, in terms of the axial load, its distribution along the length of the bolt, and the bending moment of the bolt in different mining activities. The results indicate that during the heading development, the performance of roof bolts is dominated by the stress redistribution. After the stress settles, the load of the bolt varies with the time-dependent characteristics of the surrounding rock mass. During the longwall extraction, the load on the bolts increases with the face approaching; and degradation of bolt load can be detected, when the face is close to the bolt; it indicates that the bolt is no longer able to provide its full function – to prevent the deformation of roof strata, due to failure of grouting material. It is found that the maximum axial load and bending moment on the bolt are increased 36% and 54% before and after extraction respectively; it is clearly indicated the different effects of static and dynamic loading conditions. It is also noted that the maximum bending moment is mainly located in the interface of different roof layers, which intends to move horizontally. The fully encapsulated bolt demonstrates two basic functions for reinforcing layered roof; firstly, preventing vertical

**收稿日期:** 2009 - 04 - 20; **修回日期:** 2009 - 05 - 13

**作者简介:** 陆庭侃(1959 -), 男, 2001 年于澳大利亚新南威尔士大学获博士学位, 现任外籍特聘教授, 主要从事巷道支护和瓦斯抽放方面的教学与研究工作。E-mail: tklu@hpu.edu.cn

movement of roof layers in different horizons; and secondly, providing shear resistance to prevent lateral movement between the roof layers.

**Key words:** rock mechanics; rock bolt; roof stability; roadway

## 1 引言

现代采矿中, 锚杆支护是采区巷道中确保工作人员安全、防止岩层冒落的重要手段之一。与传统支护手段相比较, 锚杆具有积极调动岩石内部强度的优点, 因此锚杆支护受到了比其他传统支护方法更广泛的重视和研究。一般情况下, 影响全长锚固锚杆支护效果的因素主要有 3 个方面: 第一, 锚杆杆体的物理力学特性; 第二, 锚固剂的物理力学特性; 第三, 岩石和锚固剂形成的界面的物理力学性质。无预应力的全长锚固锚杆的支护功能取决于围岩的变形特征, 轴向荷载来自于顶板垂直方向的变形和各岩层之间不协调变形所导致的离层; 而弯矩则是水平方向的变形引起的各岩层间的相对滑移。因此, 全面和深刻地理解全长锚固锚杆在掘进阶段、掘进后、回采前及回采阶段等各采矿阶段中的工作特征, 其中包括: 锚杆的最大轴向拉力、沿锚杆长度荷载的分布特征以及锚杆上的弯矩等, 是准确采用锚杆支护技术和确保巷道稳定性的关键。

## 2 锚杆观测技术

回采巷道顶板稳定性是确保煤矿正常生产不受影响的基础<sup>[1]</sup>, 锚杆支护作为回采巷道的主要支护手段, 到目前为止, 已经有许多的锚杆支护设计方法, 包括经验数据库<sup>[2, 3]</sup>, 分析模型方法<sup>[4]</sup>, 以及数值模拟方法<sup>[5]</sup>等, 但这些方法很少被真正应用于煤矿支护设计中, 原因之一就是这些方法无法直接和真实的反映锚杆支护的工作特征, 而观测方法是一种能够直接反映锚杆支护效果的有效手段, 其观测结果为后续的设计提供了极其有价值的意义, 因此, 观测技术正在得到不断更新和广泛应用。

本文研究工作通过使用应变锚杆(strain gauge instrumented bolt)观测锚杆的工作特性, 包括锚杆的最大荷载、沿锚杆全长的荷载分布及锚杆的最大弯矩等参数。

应变锚杆是由普通螺纹钢锚杆杆体和镶嵌在杆体两边并相互对称的应变片组成(见图 1)。该研究使

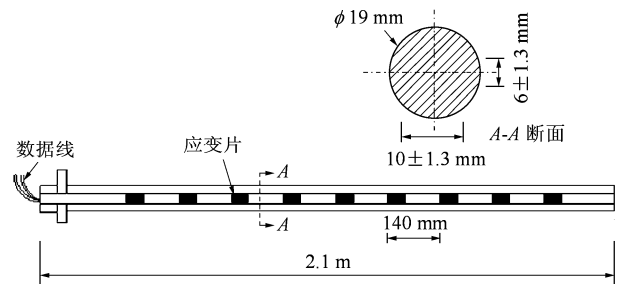


图 1 应变锚杆

Fig.1 Strain gauge instrumented bolt

用的应变锚杆长度为 2.1 m, 沿锚杆长度方向分布 9 对, 共 18 个应变片, 用来观测锚杆上的轴向荷载和弯矩。应力/应变通过连接在每个应变片上的线路将信号传输到读数器上, 从而获得应变和应力数据。

根据应变锚杆的工作原理, 由安装在锚杆两边的应变片测得轴向应变, 进而求得锚杆上的轴向力可表示<sup>[6]</sup>为

$$P = E_b A_b \epsilon \quad (1)$$

式中:  $E_b$  为锚杆弹性模量,  $A_b$  为锚杆杆体横截面积。

## 3 观测现场的地质特征

实施观测的矿井位于澳大利亚悉尼以南 100 km, 区内有一向南延伸的主要断层及数条方向不同的小断层, 顶板裂隙方向多变, 巷道埋深平均 500 m。由于地质构造所造成的顶板结构性不连续和多种岩层顶板的特性, 使巷道变形过大, 影响正常的生产。图 2 给出了巷道顶板地质条件的详细说明, 从地质特点可以看出, 巷道顶板的主要岩石类型依次为泥岩, 砂岩和煤<sup>[7]</sup>。

由于煤、泥岩和砂岩是顶板主要的岩石类型, 因此对这 3 种岩石进行了一系列力学性能试验, 包括弹性模量, 单轴抗压强度, 非直接抗拉强度, 黏聚力和内摩擦角, 剪切强度以及在不同侧压下的多轴抗压强度, 顶板主要岩石的力学参数<sup>[8]</sup>如表 1 所示。

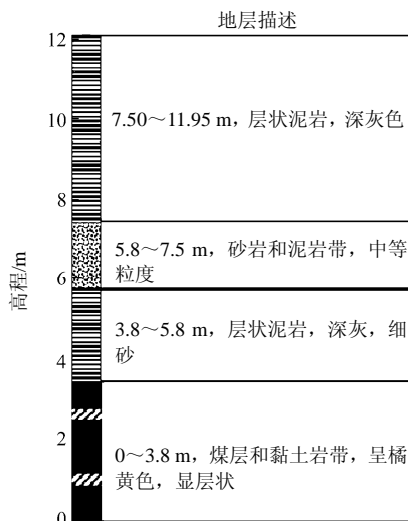


图 2 采区巷道顶板地质柱状图

Fig.2 Roof lithology of longwall heading

表 1 顶板主要岩石的力学参数<sup>[8]</sup>

Table 1 Mechanical parameters of major roof rocks<sup>[8]</sup>

岩石类型	单轴抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa
煤	43	3.0	4.0	22	3.0
砂岩	49	6.0	5.0	46	5.2
泥岩	82	6.0	4.5	38	5.0

另外通过现场实地观察发现, 巷道内水量较大, 针对这一特点, 进行了巷道顶板岩石对水的敏感性的测试。试验结果表明当泥岩的含水量达到最大值时, 其单轴抗压强度衰减可达 74%, 表 2 给出了顶板主要岩石在水的影响下的物理变化<sup>[9]</sup>。根据试验, 原始状态下的岩石可被划分为中或高强度岩石, 但如果考虑水和裂隙的影响, 巷道顶板岩层可被确定为软弱破碎岩层。

表 2 岩石自然含水量及水对煤、泥岩、砂岩结构的影响<sup>[9]</sup>

Table 2 Water content and effects of water on structure integrity of coal, mudstone and sandstone<sup>[9]</sup>

岩石类别	含水量/%	岩石受水的影响描述
泥岩	4.0	沿试件长度方向水平裂隙逐渐显现、增加。由于泥岩间黏结材料的流失, 试件的完整性被破坏, 从而导致在水平方向无剪切阻力
砂岩	3.0	膨胀, 离层, 部分潮解成砂, 在水平和垂直方向均没有强度。由于遇水砂化, 部分岩样变得非常软弱, 无法用手拿起
煤	3.5	体积无变化, 裂隙出现, 并以水平方向为主

## 4 观测方案及结果

### 4.1 观测方案

为了确定全长锚固锚杆的工作特征, 在巷道同一断面的顶板和巷帮共安装 8 根应变锚杆, 其中顶板 6 根, 巷帮各一根(见图 3), 锚杆采用直径 19 mm 的螺纹钢, 长度 2 m, 安装在顶部煤层中, 以观测顶板锚杆在不同采矿阶段, 即掘进、回采阶段(动荷载)、掘进之后回采之前(静荷载)的工作特征, 包括: (1) 锚杆上的最大轴向荷载及位置; (2) 锚固力沿锚杆全长的分布特征; (3) 锚杆上的最大弯矩及位置; (4) 不同采矿阶段对锚杆锚固力的影响特征。

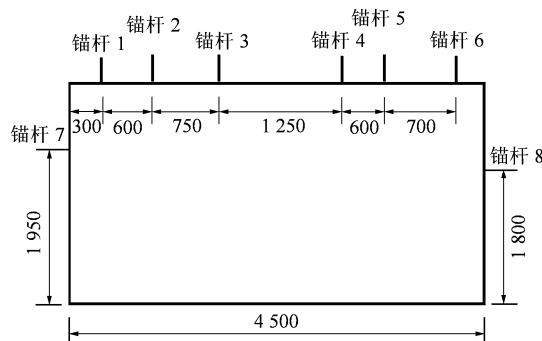


图 3 锚杆支护及观测设置(单位: mm)

Fig.3 Bolt reinforcement and monitoring setup(unit: mm)

### 4.2 观测结果

锚杆上的最大轴向荷载: 锚杆、锚固剂和岩石系统中力的传递通常被描述为岩石与锚固剂之间及锚固剂和锚杆之间的剪切强度, 这一强度通常用锚杆的轴向荷载来表示, 它是最直接的描述锚杆工作特征的参数之一。根据应变锚杆的工作原理, 锚杆的轴向荷载是通过沿锚杆全长分布的应变片测得应变, 并进行转换而获得的。由于应变片的位置是已知的, 因此, 观测数据不但能够确定锚杆上的最大轴向荷载, 而且能够确定与其相对应的位置, 以及所对应的顶板地质特征。

根据观测数据可知, 回采前, 顶板锚杆的最小荷载为 91 kN, 最大荷载为 227 kN, 回采后最小荷载为 210 kN, 最大荷载为 256 kN。表 3 给出了回采前后锚杆轴向荷载及位置。

图 4 所表示的为回采前后顶板锚杆锚固力。根据观测所获得的数据发现: 回采前, 每根锚杆上的锚固力因安装在顶板上位置的不同而不同。从图 4 中可以看出, 除锚杆 1 外, 其他锚杆的锚固力都与

表3 回采前后锚杆轴向荷载及位置

Table 3 Axial load and position on bolts before and after extraction

锚杆编号	回采前最大荷载/kN	回采前平均荷载/kN	位置/m	回采后最大荷载/kN	回采后平均荷载/kN	位置/m
1	224.7	135.7	1.225	224.4	200.2	1.425
2	90.8	65.1	1.725	220.6	200.6	1.125
3	114.1	76.4	1.525	210.8	177.5	1.425
4	129.9	77.3	1.425	209.6	183.2	1.425
5	201.4	174.4	1.825	217.4	208.9	1.225
6	226.7	140.4	0.825	256.4	236.0	1.525

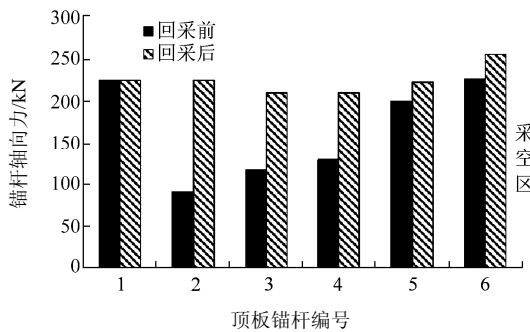


图4 回采前后顶板锚杆锚固力

Fig.4 Axial loads of bolts before and after extraction

靠近前一个采空区的距离成反比，即距离越小，锚杆锚固力越大。这说明在回采前，相邻采空区的应力作用对锚杆锚固力产生明显的影响。

另一方面，在回采之后，每根锚杆所承担的荷载相对接近(见图4)，这是因为在这一阶段，由于回采产生的前置应力主导着巷道顶板的应力状态和变形特征，此外，相对于巷道跨度，回采应力的影响范围已经完全涵盖了全部巷道顶板，因此在巷道顶板形成相对均匀分布的应力区域，从而导致巷道顶板产生相对均匀的变形，因此，在这一阶段，顶板各锚杆的最大锚固力差距较小。

从表3数据可知，顶板各锚杆的最大锚固力位置大约在顶板内1.625 m位置，根据地质资料，该区域为煤层与泥岩，是顶板岩层中最软弱的岩层位置。

全长锚固锚杆的荷载分布特征：全长锚固锚杆的荷载分布与锚杆穿过顶板岩层的物理力学性质有着十分密切的关系。当受外力作用后，不同物理力学性质的岩层产生不同的变形，从而导致沿锚杆长度上不同锚固力分布特征。

与锚杆上的最大荷载相同，轴向荷载沿锚杆全长分布特征也是描述全长锚固锚杆工作特性的一个

重要参数，它表示锚杆的锚固质量，并能够通过锚固力的大小和分布变化确定在不同采矿阶段顶板岩层移动和离层的基本特征。图5、6分别表示锚杆1在回采前后不同时间的轴向锚固力分布，从图5、6可以看出，轴向荷载随时间的变化和岩层位置的不同而变化。另外，锚杆上大多数的应变片呈现正值，这表明锚杆在其全部工作过程中主要承受张拉荷载。

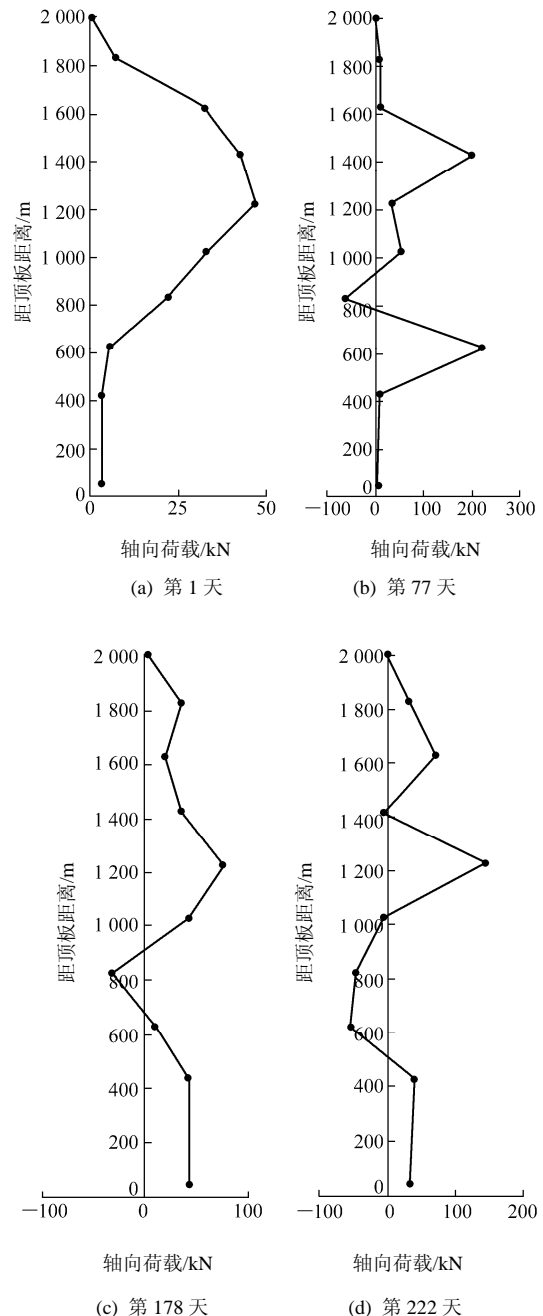


图5 锚杆轴向荷载分布

Fig.5 Axial load distribution on bolt

此外，从锚固力分布曲线可以看出，锚杆安装初期，由于岩石变形较小，各岩层变形相对协调，

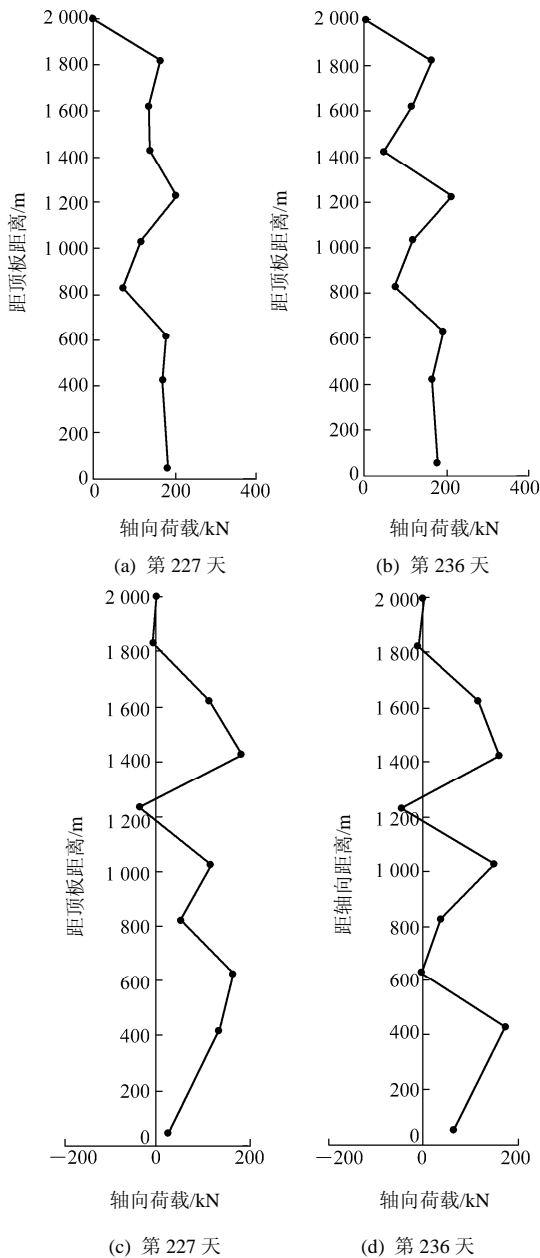


图 6 锚杆轴向荷载分布

Fig.6 Axial load distribution on bolt

故锚固力曲线变化比较平缓。随着顶板变形的加剧, 特别是各岩层变形大小不一致, 锚固力沿锚杆长度上出现多峰值分布特征, 而且这一特征随着回采的开始一直延续到锚杆破坏(见图 6(a), (b))。

尽管锚杆轴向力的分布机制比较复杂, 但是根据观测数据和现场考察发现, 主要有 3 个方面的因素影响锚杆轴向力的分布:

(1) 顶板地质结构特征: 从地质特征角度看, 当岩石性质相对均匀时, 锚杆锚固力分布呈现单峰值形状; 当岩层性质非均匀时, 受力后, 层间产生离层和不协调变形, 因此, 锚杆上出现多峰值分布特征<sup>[7]</sup>。

(2) 动荷载的影响: 由巷道掘进和回采期间产生的动荷载是另外一个有可能影响锚杆锚固力分布特征的因素。在动荷载条件下, 岩石性质相对软弱的岩层将比在静荷载条件下发生更为明显的不协调变形, 从而形成多峰值锚固力分布特征。

(3) 时间效应的影响, 在掘进之后和回采之前, 巷道处在无明显外力作用的状态, 这一阶段, 顶板的变形主要是由于泥岩层在水的作用下产生流变而导致的, 因此, 在这段时间, 最大锚固力主要分布在泥岩层和对水比较敏感的岩层中。

锚杆上的最大弯矩及位置: 表 4 给出了回采前后锚杆上的最大弯矩。这些数值的大小反映了顶板各岩层间潜在水平移动趋势。另外, 最大弯矩位置和这些位置所对应的顶板地质特征表明, 最大弯矩主要发生在顶板煤层中及煤层与泥质条带的交接面。由此可以得出结论: 顶板在回采作用下, 将在最软弱的部位发生横向移动。

表 4 回采前后锚杆上的最大弯矩

Table 4 Bending moment on bolt before and after extraction

锚杆编号	弯矩/(kN · mm)		回采前后增量/%
	回采前	回采后	
1	462	487	5
2	310	521	40
3	172	191	10
4	169	353	52
5	451	533	15
6	263	168	-68

## 5 采矿活动对锚杆锚固力的影响

回采巷道涉及的采矿活动包括 3 个阶段: (1) 巷道掘进阶段; (2) 掘进后和回采前; (3) 回采阶段。安装在回采巷道的锚杆由于不同的采矿活动表现出不同的工作特征。

掘进阶段锚杆的工作特征: 根据锚杆锚固力沿锚杆长度的分布可以看出, 锚杆在安装之后马上开始承受荷载。由于掘进后应力重新分布的影响, 锚杆锚固力在短时间内快速增加。图 7 表示掘进期间锚杆锚固力的变化。

掘进后及回采前锚杆的工作特征: 在这一阶段巷道围岩的变形以与时间有关的岩层蠕变影响为主导, 因此锚杆锚固力的变化与时间效应有着密切的关系。对锚固力而言, 时间的影响主要有以下几个

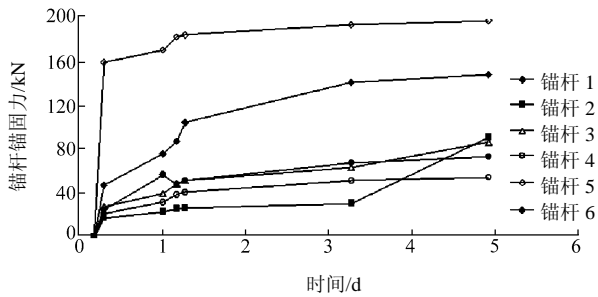


图 7 掘进期间顶板锚杆锚固力的变化

Fig.7 Variation of maximum axial load after heading development

方面<sup>[8]</sup>: (1) 由于应力方式和水压力的变化, 这些变化有时是静力作用下的, 有时是动载荷作用; (2) 由于干燥和潮湿空气的变换以及地下水的作用, 从而导致围岩物理力学性质随时间发生变化; (3) 由于不同的荷载或施工阶段对巷道产生的影响。

在全部采矿过程中, 时间效应阶段共 150 余天, 这为观测和研究锚杆在这一阶段的工作特征提供了很好的机会, 图 8 为时间效应对锚杆锚固力的影响。从图中可以看出, 当掘进阶段完成后, 锚杆锚固力的变化保持在相对小的范围内, 当这一阶段即将结束时, 可以看出锚杆锚固力有略微减小的趋势, 这说明, 由于井下环境的变换, 水对围岩的影响, 顶板岩层开始软化, 导致锚杆锚固力的衰减。

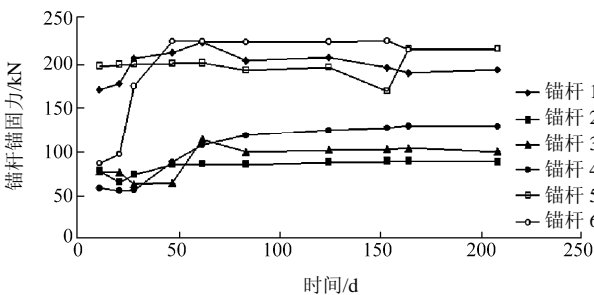


图 8 时间效应对锚杆锚固力的影响

Fig.8 Effect of time on the axial load of bolts

回采阶段锚杆的工作特征: 当回采开始后, 锚杆观测工作继续进行, 其目的是确定锚杆在动荷载条件下的工作特征。图 9 给出了回采阶段顶板和巷帮(锚杆 7 和 8)锚杆锚固力变化特征。首先, 锚杆锚固力随着工作面的推进逐渐增加, 当工作面距离观测点 50 m 时, 锚杆锚固力达到最大值, 之后的 20 m 内, 锚固力保持在这一水平, 变化不大。当工作面距离观测点 1 m 时, 锚杆锚固力发生明显衰减, 这说明, 由于顶板岩层的剧烈移动, 连接锚杆和岩石的锚固剂已经破坏, 锚杆将再无法发挥其正常的支护功能。

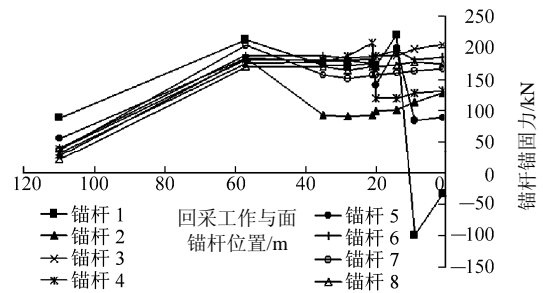


图 9 回采阶段锚杆锚固力变化特征

Fig.9 Effect of extraction on the axial load of bolts

图 10 给出了回采前后锚杆上的平均荷载。这一变化说明, 回采前, 沿锚杆长度上只有少数位置(点)达到最大锚固力, 这时, 平均锚固力相对较小。回采开始后, 由于受到回采时前置压力的影响, 锚杆全长的各个部位(点)均承受由于顶板变形而产生的荷载, 故此, 锚杆上平均锚固力明显增加。

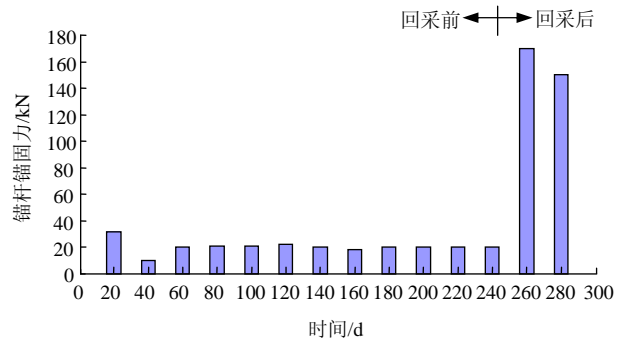


图 10 回采前后锚杆上的平均荷载(锚杆 2)

Fig.10 Variation of axial load on the bolt before and after longwall extraction(Bolt 2)

比较 3 个不同的采矿阶段, 可以看出: 掘进和回采过程中, 由于动荷载的作用, 锚杆锚固力发生明显变化; 而在掘进后和回采前这一阶段, 巷道的变形由顶板岩层蠕变性质决定, 期间, 锚固力变化十分有限, 特别在这个阶段后期, 由于岩层软化, 锚固力呈下降趋势。

## 6 结 论

由于在该研究中的锚杆被用于回采巷道中, 因此, 锚杆的工作特性受到不同的采矿活动的影响。同时, 由于锚杆的工作特征与顶板地质结构和各岩层物理力学性质密切相关, 因此, 围绕上述 2 个方面可以得出以下结论:

(1) 在掘进期间, 锚杆的工作特性主要是受到

巷道掘进所导致的应力重新分布的影响, 在这一阶段, 应力和变形发生突然变化, 导致锚杆锚固力也随之发生突变。但由于巷道掘进的影响范围相对回采阶段较小, 沿锚杆全长范围内, 只有少数几个点达到最大值, 锚杆上的平均锚固力依然相对较小(见图 10)。

(2) 当掘进引起的应力重新分布完成后, 锚杆的工作特征主要由巷道顶板岩石的蠕变性质所决定, 在回采开始前共计 150 d 内, 巷道由于受静荷载作用, 变形较小, 锚杆的锚固力变化非常有限。但从该阶段的最后时间段看, 锚杆锚固力有略微衰减的趋势, 这说明顶板岩层蠕变导致巷道岩层弱化和松弛(见图 8)。

(3) 在回采开始后, 巷道顶板受到连续向前移动变化的工作面前置应力的影响, 锚杆上平均锚固力的变化比率为 36%。这说明, 锚杆在动荷载作用下最大锚固力和平均锚固力都有非常明显的提高(见图 10)。

(4) 当工作面距离锚杆观测位置 1 m 范围内, 锚杆锚固力发生明显的衰减, 这说明, 锚杆与岩石间的锚固剂已经发生破坏, 锚杆已再无法提供阻止巷道顶板岩层移动的功能(见图 9)。

(5) 从以上几点可以看出, 锚杆工作特征与采矿各个阶段有着明显的关联, 同时也能够看出, 锚杆在不同荷载作用下具有阻止巷道顶板移动的作用。

(6) 全长锚固锚杆只有在岩层变形时其支护功能才开始显现<sup>[9]</sup>, 因此锚杆的工作特征受巷道顶板的变形特征的影响, 可以描述为: ① 当围岩无变形时, 锚杆无支护作用; ② 当围岩发生变形时, 锚杆开始支护; ③ 当围岩发生剧烈变形, 锚杆发生破坏。

(7) 通过锚杆上锚固力多峰值分布特征可知, 这是由于不同岩石力学性质的岩层不均匀变形所致, 同时也表明地质条件和顶板不连续性对锚杆工作特征的影响, 以及全长锚固锚杆的组合梁工作原理。

(8) 根据对锚杆的观测, 全长锚固锚杆主要提供 2 个基本的锚固功能: 第一, 阻止不同水平的岩层垂直变形; 第二, 提供剪切阻力用来阻止巷道顶

板层间的相对横向变形。

(9) 对于层状顶板, 就锚杆锚固机制而言, 主要取决于巷道顶板是否完整、是否有裂隙以及变形的性质<sup>[10]</sup>, 如果顶板岩层的完整性保持较好, 则全长锚固锚杆对层状顶板的支护主要通过锚杆形成复合梁; 否则, 如果顶板已经发生破坏, 则通过锚杆支护以形成岩石拱, 达到巷道稳定性的目的。

## 参考文献(References):

- [1] LAWRENCE W. A method for the design of longwall gateroad roof support[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(4): 789 - 795.
- [2] MARK C. Design of roof bolt systems[C]// *Proceedings of the Conference on New Technology for Coal Mine Roof Support*, Info Circular 9453, US National Institute for Occupational Safety and Health. [S. l.]: [s. n.], 2000: 111 - 131.
- [3] COLWELL M, HILL D, FRITH R. ALTS II-A longwall gateroad design methodology for Australian collieries[C]// *Proceedings of the 1 Australian Conference on Ground Control in Mining*. [S. l.]: [s. n.], 2003: 123 - 135.
- [4] MARM C, MOLINDA G M, DOLINAR D R. Analysis of roof bolt systems[C]// *Proceedings of the 20th International Conference on Ground Control in Mining*. [S. l.]: [s. n.], 2001: 218 - 225.
- [5] PELLIS P J N. Developments in the design of tunnels and caverns in the Triassic rocks of the Sydney region[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(5): 569 - 587.
- [6] MITRI H S. Design and development of new rockbolt load measuring device[R]. Montreal: Department of mining, metals and material engineering, McGill University, 2002.
- [7] Angus Place Colliery. Geological report[R]. Lithgow: NSW, 2000.
- [8] LU T. Geomechanical behavior of laminated roof strata and its reinforcement strategy[Ph. D. Thesis][D]. Sydney: UNSW, 2001.
- [9] SCHMIDT L C, LU T. Laboratory investigation of performance characteristics of self drilling bolts[C]// *Proceedings of VIII Australia Tunnel Conference*. Sydney: NSW, 1993: 207 - 212.
- [10] TAO Z Y, CHEN J X. Behaviour of rock bolting as tunnelling support[C]// *Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting*, Sydney: NSW, 1983: 87 - 92.