

文章编号:0253-9993(2008)08-0856-04

锚杆预紧力在巷道围岩中的力学效应

翟英达^{1,2}

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 大同煤矿集团有限责任公司 博士后科研工作站, 山西 大同 037003)

摘 要: 针对巷道围岩稳定性控制中的整体锚固结构, 分析了预应力锚杆的力学作用机理. 预应力锚杆施加于围岩之上的预紧力所产生的横向挤压作用, 是围岩形成整体锚固结构的必要条件. 基于固体力学中的 Boussinesq 研究了单根预应力锚杆作用下围岩中应力以及相应的横向挤压力的计算方法, 建立了2根预应力锚杆共同作用下二者之间横向挤压力的理论计算公式. 结果表明, 2根锚杆之间的横向挤压力与锚杆预紧力成正比, 与计算位置到锚杆安装位置的距离成反比; 预紧力产生的横向挤压力在2根锚杆正中间位置最小; 横向挤压力的大小除与围岩的泊松比有关外, 还与锚杆安装密度、有效长度等有关. 研究结果在塔山煤层巷道支护设计中得到应用.

关键词: 锚杆; 预紧力; 力学效应; 应力**中图分类号:** TD353.6 **文献标识码:** A

The mechanics effect of bolt pretension in roadway surrounding rock

ZHAI Ying-da^{1,2}

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Postdoctoral Research Station, Datong Coal Mine Group Company, Datong 037003, China)

Abstract: For the integral anchorage structure in stability controlling of roadway's surrounding rock, the mechanism of action if pretensioned bolt was analyzed. The transverse compressional effect caused by the pretensioning force which acted on surrounding rock and was loaded by pretensioned bolt was the necessary condition as integral anchorage taking shape in surrounding rock. By making use of the Boussinesq solution in solid mechanics, the calculating methods of stress and transverse compressional force caused by a single pretensioned bolt in surrounding rock were researched, and the theoretical calculating formulas of transverse compressional force caused by two pretensioned bolts and acted on the rock between these two bolts was set up. The results show that transverse compressional force between two bolts has relationship of direct proportion with pretensioning force of bolt, and have relationship of inverse change with the distance between calculating point and the installing place of bolts. The transverse compressional force at the position of right in the middle of two bolts is the minimum. The value of transverse compressional force not only related to Poisson's ratio of surrounding rock, but also is concerned in the bolt installing density and bolt effective length. The result obtained is applied to support designing of roadway in coal seam in Tashan Coal Mine.

Key words: bolt; pretensioning force; mechanics effect; stress

在地下采矿工程中, 多裂隙围岩的锚杆支护问题经常遇到, 其支护原理之一是利用锚杆安装时施加的预紧加固力, 使围岩产生横向挤压作用, 从而在围岩中形成特定的岩石承载结构, 以抵抗巷道围岩中的地压. 近几年, 康立勋等对回采巷道围岩控制理论进行了深入研究, 建立了运用锚固结构进行回采巷道围岩控制的基本理论框架. 该理论框架提出了整体锚固结构支护的全新概念, 并对整体锚固结构的不同形式进

行了探索^[1-4]. 从岩石力学的角度看, 整体锚固结构的形成依赖预应力锚杆施加在围岩上的预紧力. 因此预紧力大小的确定与整体锚固结构的形成机制密不可分.

1 锚杆预紧力的力学作用分析

合理的锚杆预紧力可以增加岩体的围压, 有效改变围岩的应力状态, 改善被锚固岩体的力学性能, 增大被锚固岩体的强度, 从而有利于保持巷道围岩的稳定^[5-9]. 能否对上述结论加以正确应用, 关键在于对锚杆预紧力作用的定量分析.

1.1 锚杆预紧力对围岩的作用机理

光弹性模拟实验结果已经证明, 单根预应力锚杆安装于弹性体中后, 可在弹性体内形成以锚杆两端为顶点的压缩区^[10]; “碎石锚固实验”证明了预应力锚杆可在岩层中产生横向挤压加固作用. 定义锚杆的预紧力为 P , 从机理上看, 正是 P 的存在, 使岩层在锚杆安装方向上受到压缩应力 σ_1 的作用, 产生压缩区; 在 σ_1 作用下, 岩体在垂直锚杆安装方向上产生横向扩张变形, 这种横向扩张变形受横向岩体的约束作用进而导致横向挤压应力 σ_2 的产生 (图 1),

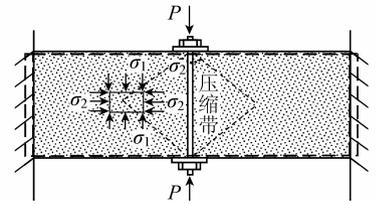


图 1 预应力锚杆作用机理

Fig. 1 Pretensioned bolt mechanism

在这种横向挤压应力作用之下, 岩体内所有与横向挤压力作用方向不平行的节理面、裂隙面在锚杆安装方向上的摩擦力将增大, 从而导致在该方向上围岩承载能力以及自身稳定性的提高. 从拱效应或锚固结构的角度分析, 由锚杆预紧力导致的岩体横向挤压作用力的存在, 是巷道围岩中锚固结构形成的必要条件, 要研究围岩中的锚固结构, 首先要研究单根预应力锚杆安装后在岩体中形成的应力场.

1.2 单根锚杆的预紧力在围岩中产生的应力以及横向挤压力分析

有学者在 20 世纪 80 年代曾对锚杆锚固力在围岩中形成的应力场进行过研究^[11-12], 其研究结论限于巷道围岩处于整体、连续状态的情形. 对破碎围岩或巷道围岩中松动圈以内的岩体, 由于高密度节理、裂隙的存在, 该范围内的岩石与松动圈以外岩体的联系减弱, 其研究所得结论不再适用.

岩体在单根锚杆的预紧力 P 作用下的力学近似计算模型如图 2 所示, 锚杆对被锚固岩层的作用近似等效于图中的 2 个集中力 P . 定义锚杆的有效段长度为 L_2 , 则锚固结构的厚度与 L_2 相当. 单根锚杆对岩层的作用问题相当于厚 L_2 的无限大弹性体在上下边界受对称集中力 P 的作用.

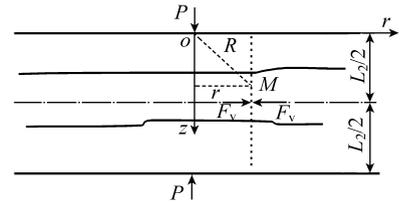


图 2 单根锚杆作用的应力计算模型

Fig. 2 Stress calculation model acted by a single bolt

对弹性理论中 Boussinesq 问题解的进一步研究^[13]表明, 作用在半无限大空间体边界上 $b \times b$ 方形区域上的均布载荷 q 对半无限大空间体 z 方向的影响随距载荷作用区

域距离的增加而急剧减小, q 的影响范围主要在距离其作用区域 $4b$ 以内. 照此规律, 对实际工作状态下的锚杆而言, 锚杆通过托板以及锚固段对岩层的直接作用区域一般在 $(15 \sim 20) \text{ cm} \times (15 \sim 20) \text{ cm}$, 因此锚杆预紧力 P 的显著影响深度约为 $60 \sim 80 \text{ cm}$, 就巷道支护所用锚杆而言, 其有效长度一般在 1.6 m 以上 (顶板锚杆长度在 2.0 m 以上), 根据 St. Venant 原理, 可以用 Boussinesq 问题的解近似描述图 2 中集中力在厚度 $L_2/2$ 范围内引起的应力分布. 定义柱坐标系的原点为上部集中力 P 的作用点, 柱向坐标为 z , 以垂直岩层的延展方向向下为正, 径向坐标为 r , 环向坐标为 θ , 则单根锚杆作用下锚固结构中 $0 \leq z \leq L_2/2$ 与 $L_2/2 \leq z \leq L_2$ 区域的应力是对称的.

鉴于上述分析, 以下只研究 $0 \leq z \leq L_2/2$ 区域内的应力. 在图 2 所示柱坐标下, $0 \leq z \leq L_2/2$ 范围内 z 方向的正应力为 $\sigma_z = -3Pz^3 / (2\pi R^5)$, 式中的负号表示应力为压应力; $R = \sqrt{r^2 + z^2}$, 如图 2 所示, 为计算位置到原点的距离. 由于煤层中节理、裂隙的存在, P 引起的剪应力可以忽略, 根据广义 Hook 定律, 与 σ_z

对应的水平方向的挤压应力分别为沿径向作用的正应力 σ_r 和沿环向作用的正应力 σ_θ ，它们的计算公式为 $\sigma_r = \sigma_\theta = \frac{\nu}{1-\nu} \frac{3Pz^3}{2\pi R^2}$ ，其中 ν 为被锚固岩体的泊松比。

整体锚固结构是靠锚杆预紧力引起的横向挤压作用形成的，该横向挤压作用可以用锚固结构横截面上的挤压力来描述。定义单根预应力锚杆作用下与锚杆水平距离为 r 的垂直截面上的总挤压力为 F_v ， F_v 与 r 之间的关系曲线如图 3 所示，则有

$$F_v = \frac{\nu P}{(1-\nu)\pi} \left[\frac{L_2^2}{4} \left(r^2 + \frac{L_2^2}{4} \right)^{-3/2} - \left(r^2 + \frac{L_2^2}{4} \right)^{-1/2} + r^{-1} \right]. \quad (1)$$

1.3 2 根锚杆的预紧力对岩层的联合作用

根据叠加原理，可以确定 2 根并排安装的锚杆之间横向挤压力的大小。假设 2 根锚杆之间的距离为 a ，则利用式 (1) 可得 2 根预应力锚杆联合作用下锚杆间的横向挤压力为

$$T = \frac{\nu P}{(1-\nu)\pi} \left[\frac{L_2^2}{4} \left(r^2 + \frac{L_2^2}{4} \right)^{-3/2} - \left(r^2 + \frac{L_2^2}{4} \right)^{-1/2} + r^{-1} + \frac{L_2^2}{4} \left((a-r)^2 + \frac{L_2^2}{4} \right)^{-3/2} - \left((a-r)^2 + \frac{L_2^2}{4} \right)^{-1/2} + (a-r)^{-1} \right],$$

其中， $0 < r < a$ 。显然， T 的分布曲线是关于 $r = a/2$ 对称的，且当 $r = a/2$ 时 T 为最小值，即

$$T_{\min} = \frac{4\nu P}{(1-\nu)\pi} \left[L_2^2 (a^2 + L_2^2)^{-3/2} - (a^2 + L_2^2)^{-1/2} + a^{-1} \right]. \quad (2)$$

2 研究结果分析与应用

对锚杆预紧力的横向挤压效应进行理论分析时，把锚杆对围岩的作用简化为一对集中力，这种简化比较适合以端头锚固方式安装的锚杆。对于全长锚固的锚杆，锚杆体对围岩的作用力应当是平行锚杆安装孔孔壁的一组分布力，由于这组力的分布情况较复杂，目前难以用解析的方法进行深入研究^[14-15]。但作为一种近似研究，前面所得结论除在锚杆杆体周围一定范围内存在误差外，远离锚杆安装位置时比较合理。

锚杆预紧力在围岩中形成的横向挤压效果控制着锚固范围内岩体的稳定程度以及承载能力，从安全的角度看，把式 (2) 计算得到的 T_{\min} 作为衡量横向挤压力是否够大的指标是合理的，只有 T_{\min} 满足了稳定性控制的需求，锚杆和被锚固岩层才能形成具有一定承载能力的承载结构并发挥其对围岩的控制作用。因此，研究锚固结构稳定性的关键，就是解决如何根据工程实际中的承载要求确定形成稳定的锚固结构所需的 T_{\min} ，以及为产生该 T_{\min} 所需要的锚杆布置密度（由 a 的大小来控制）和预紧力（由 P 的大小控制）。

从单根锚杆预紧力形成的挤压力分布规律看，挤压力随距锚杆的距离增加而衰减，当锚杆间距由 L_2 减小为 $0.8L_2$ 时，2 根锚杆中间位置叠加后的挤压力由 $0.4PL_2^{-1}$ 增加为 $0.6PL_2^{-1}$ ；当锚杆间距为 $0.5L_2$ 时，2 根锚杆中间位置的挤压力约为 $1.06PL_2^{-1}$ 。可见，控制锚杆间距可有效提高锚杆间的横向挤压力。

塔山煤矿煤层巷道围岩泊松比为 0.32，内聚力为 7.57 MPa，内摩擦角为 23.87°，二维裂隙度为 0.457。对煤层巷道进行支护设计时使用的横向挤压力计算公式为 $T_{\min} = 0.6P \left[L_2^2 (a^2 + L_2^2)^{-3/2} - (a^2 + L_2^2)^{-1/2} + a^{-1} \right]$ 。如果设计时锚杆间距选择 $a = 0.5L_2$ ，则预应力锚杆的预紧力与相应的横向挤压力之间关系为 $T_{\min} = 1.3326 PL_2^{-1}$ 。

塔山煤矿 1070 辅助运输巷道设计跨度为 6.6 m，高 3.97 m。顶板锚杆有效长度 $L_2 = 2.1$ m，布置间距 $a = 0.9$ m，为构成能安全承受 1.5 MPa 地压的整体锚固结构，顶板锚杆的预紧力需 68.99 ~ 73.42 MPa。

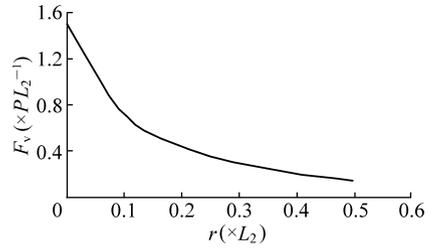


图 3 单根锚杆横向挤压力与距锚杆距离的关系曲线
Fig. 3 Relationship curve of transverse compression force with distance to bolt as only one bolt

工程实践表明, 照此参数加固的巷道是稳定的.

3 结 论

锚杆预紧力在围岩中会产生横向挤压效应, 这是整体锚固承载结构形成的必要条件. 该效应可以通过锚杆附近围岩中垂直锚杆安装方向的应力或挤压力来描述. 锚杆之间的横向挤压力与锚杆预紧力成正比, 与计算位置到锚杆安装位置的距离成反比关系; 横向挤压力的大小除与围岩的泊松比有关外, 还与锚杆安装密度、锚杆有效长度等有关. 锚杆预紧力在围岩中产生的横向挤压力在2根锚杆的正中间位置最小.

参考文献:

- [1] 杨双锁. 回采巷道围岩控制理论及锚固结构支护原理 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004: 119-175.
Yang Shuang suo. Study on the control theory of gate roadway surrounding rock and the support principle of the bolting structure [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2004: 119-175.
- [2] 张百胜, 杨双锁, 康立勋. 全煤巷道拱形整体锚固结构模拟研究 [J]. 山西煤炭, 2001, 21 (3): 19-22.
Zhang Baisheng, Yang Shuang suo, Kang Lixun. Research on anchorage structure of complete arch in mining roadway in coal seam [J]. Shanxi Coal, 2001, 21 (3): 19-22.
- [3] 康立勋, 杨双锁. 拱形整体锚固结构稳定性相似模拟研究 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2002, 34 (5): 540-543.
Kang Lixun, Yang Shuang suo. Similarity simulation research on stability of anchorage structure of complete arch [J]. Ground Pressure and Strata Control, 2002, 34 (5): 540-543.
- [4] 翟英达. 回采巷道外错布置的理论与实践 [J]. 太原理工大学学报, 2006, 37 (3): 420-422.
Zhai Yingda. The theory and practice of outward staggered entries arranging in stoping [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37 (3): 420-422.
- [5] Rota M. A methodology for seismic vulnerability of masonry arch bridge walls [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2005, 9 (2): 331-353.
- [6] 许兴亮. 预应力锚杆加固围岩的力学机制研究 [J]. 江苏煤炭, 2004 (2): 38-39.
Xu Xingliang. Research on the mechanism of pre-stressed bolt in surrounding rock strengthening [J]. Jiangsu Coal, 2004 (2): 38-39.
- [7] 杨家录. 锚固系统应力传递机理理论及应用研究 [J]. 工程地质学报, 1995, 15 (2): 182-187.
Yang Jialu. Study on the theory and application of stress transmitting mechanism of bolting system [J]. Journal of Engineering Geology, 1995, 15 (2): 182-187.
- [8] 陈东印. 预应力锚杆在煤矿中的应用前景 [J]. 山东煤炭, 2005 (2): 60-62.
Chen Dongyin. The foreground of pre-stressed bolt applying in coal mines [J]. Shandong Coal, 2005 (2): 60-62.
- [9] 贾俊峰. 煤巷片帮类型及锚固机理研究 [J]. 太原理工大学学报, 2005, 36 (1): 93-95.
Jia Junfeng. Study on the failure style and Its control method of soft ribs [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2005, 36 (1): 93-95.
- [10] 薛顺勋, 聂光国, 姜光杰, 等. 软岩巷道支护技术指南 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002: 22-28.
Xue Shunxun, Nie Guangguo, Jiang Guangjie, et al. Support technology guidebook of soft wall tunnel [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2002: 22-28.
- [11] 李锡润, 林韵梅, 郑雨天. 锚杆支护机理的探讨 [J]. 东北工学院学报, 1981 (4): 21-32.
Li Xirun, Lin Yunmei, Zheng Yutian. An analysis of the mechanism of pin timbering [J]. Journal of Northeastern University, 1981 (4): 21-32.
- [12] Josef Malik, Ostrava. Mathematical modelling of rock bolt systems II [J]. Applications of Mathematics, 2000, 45 (3): 177-203.
- [13] 铃木音彦. 工程土力学计算实例 [M]. 唐业清, 吴庆荪, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1982: 405-413.
- [14] Cemal Biron, Ergin Arioglu. Design of support in mines [M]. New York: John Wiley & sons Press, 1992: 35-41.
- [15] Hurt K. New developments in rock bolting [J]. Colliery Guardian, 1994 (7): 133-138.