

高预紧力锚杆力学模型分析

段书武, 吴志刚

(煤炭科学研究总院 开采设计研究分院, 北京 100013)

[摘 要] 提出巷道支护中锚杆的力学模型, 指出不同控制预紧力方式对锚杆力学模型的影响。

[关键词] 锚杆; 力学模型; 扭矩

[中图分类号] TD353.6 [文献标识码] A [文章编号] 1006-6225 (2009) 02-0056-02

Mechanics Model Analysis of Anchor Bolt with High Pre-tightening Force

DUAN Shu-wu WU Zhi-gang

(Coal Mining and Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Mechanics model of anchor bolt for roadway supporting is put forward and influence of different controlling manners of pre-tightening force on mechanics model are analyzed in this paper.

Key words: anchor bolt; mechanics model; torque

随着我国煤矿开采深度和广度的发展, 对巷道支护技术提出了更新更高的要求。煤矿锚杆支护由原来的木锚杆、圆钢锚杆、普通螺纹钢锚杆向着高强度、高刚度、高可靠性的强力、高预应力锚杆支护体系发展^[1]。随着锚杆支护技术在松软、破碎以及深部高应力巷道中的推广和应用, 人们逐步认识到提高锚杆预紧力是实现锚杆高强度、高刚度、高可靠性和低密度的一种有效手段。

锚杆预紧力的施加方法主要有 2 种:

(1) 直接法 主要是液压拉伸得到锚杆预紧力, 使用专门的中空千斤顶拉伸锚杆到预定的轴向力, 然后拧紧螺母, 卸载千斤顶得到预紧力;

(2) 间接法 通过给螺母施加较大的扭矩, 锚杆获得较大的轴向力。

间接法主要有如下几种形式:

(1) 感觉法 操作者通过扳手拧紧螺母, 依靠操作者的感觉和经验控制扭矩的大小, 该方法误差在 40% 左右;

(2) 力矩法 用测力扳手或定力扳手施加预紧力, 一般认为误差有 25%。若表面有涂层, 支撑面、螺纹质量较好, 力矩扳手示值准确, 则误差显著减少;

(3) 常规方法 采用锚杆钻机配合专用套筒直接拧紧锚杆螺母。该方法是目前国内外普遍采用的最常规的锚杆预紧方法;

(4) 专用工具法 使用风动扳手或液压扳手(冲击式), 得到合理的预紧力;

(5) 组合法 一般指锚杆(锚索)钻机和扭

矩倍增器组合拧紧螺母, 扭矩值受到锚杆钻机的性能和倍增器的系数影响, 误差较大。

5 种方法中后面 3 种是锚杆支护常用施加预紧力的方法。液压拉伸法精度较高, 施工工艺较复杂, 不适合大规模锚杆预紧。常规法一般只能施加 60~150 N·m 扭矩, 不能满足目前高预紧力的要求。专用工具法和组合法精度较低, 施工工艺简单, 施工速度快, 是煤矿锚杆支护施加高预紧力的主要方法。

1 扭矩对锚杆的影响

通常拧紧螺母所需要力矩 T 为螺纹摩擦力矩 T_1 和支撑面摩擦力矩 T_2 之和, 计算螺母拧紧力矩的计算公式为^[2]:

$$T = T_1 + T_2 = \frac{F}{2} d_t \tan(\lambda + \rho_v) + \frac{1}{2} F f d_m = \frac{F}{2} [d_t \tan(\lambda + \rho_v) + f d_m] \quad (1)$$

式中, F 为轴向力; d_t 为螺纹中径; λ 为螺纹升角; ρ_v 为螺纹当量摩擦角; d_m 为螺母支撑面平均直径; f 为螺母支撑面摩擦系数。

$$T \approx F d \left(\frac{1}{2} \frac{d_t}{d} \tan \lambda + \frac{1}{2} \frac{d_t}{d} \tan \rho_v + \frac{1}{2} f \frac{d_m}{d} \right) = K F d \quad (2)$$

$$K = \frac{1}{2} \frac{d_t}{d} \tan \lambda + \frac{1}{2} \frac{d_t}{d} \tan \rho_v + \frac{1}{2} f \frac{d_m}{d} \quad (3)$$

由公式 3 可知 K 值与 λ 、 ρ_v 、 d_m/d 、 f 、 d_t/d 有关; 取 $d_t/d=0.92$ (d 为螺纹外径), $\lambda=2.5^\circ$, $\rho_v=9.83^\circ$, $d_m/d=1.3$, $f=0.15$; 可近似认为:

[收稿日期] 2008-11-17

[作者简介] 段书武 (1973-), 男, 河南唐河人, 硕士, 工程师, 主要从事巷道工程技术及管理。

$$T \approx Fd \left(\frac{1}{2} \frac{d_e}{d} \tan \lambda + \frac{1}{2} \frac{d_e}{d} \tan \rho_v + \frac{1}{2} f \frac{d_m}{d} \right) = Fd (0.0121 + 0.0797 + 0.0975) \quad (4)$$

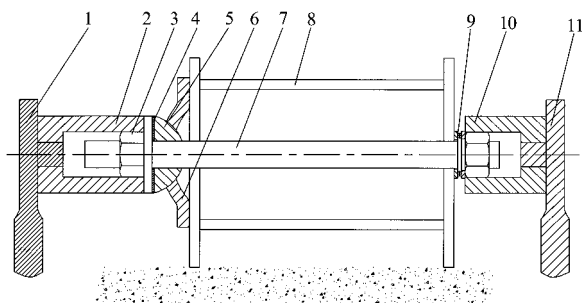
由公式 (4) 可知, 拧紧螺母的力矩由 3 部分组成, 第 1 部分由升角产生, 用于产生预紧力使螺栓伸长, 占 6.4%; 第 2 部分为螺纹副摩擦, 占 42.1%; 第 3 部分为支撑面摩擦, 占 51.5%。

锚杆支护设计中, 一般在螺母和支撑面之间垫聚四氟乙烯、1010 尼龙、改性 1010 尼龙, 以及高密度聚乙烯等各种减磨垫片。钢和塑料的摩擦系数 f 为 0.09~0.1, 而钢和钢的摩擦系数 f 为 0.15。根据公式 (2), 取 f 为 0.1, 可以得出:

$$T \approx Fd \left(\frac{1}{2} \frac{d_e}{d} \tan \lambda + \frac{1}{2} \frac{d_e}{d} \tan \rho_v + \frac{1}{2} f \frac{d_m}{d} \right) = Fd (0.0121 + 0.0797 + 0.065) \quad (5)$$

由公式 (5) 可知, 巷道锚杆支护拧紧螺母的扭矩与一般的螺母预紧不同, 相同的扭矩可以产生较大的预紧力, 拧紧螺母的扭矩同样由 3 部分组成, 不过是 3 部分分配比例不一样。第 1 部分由升角产生, 用于产生预紧力使螺栓伸长, 占 7.7%; 第 2 部分为螺纹副摩擦, 占 50.8%; 第 3 部分为支撑面摩擦, 占 41.5%。

为验证巷道锚杆支护拧紧螺母的扭矩分配比例和减磨垫片的作用, 设计了简单试验台, 如图 1。



1—指针式扭矩扳手；2—套筒；3—螺母；4—1010 尼龙；

5—球垫；6—锚杆托盘；7—锚杆；8—架体；

9—推力轴承；10—套筒；11—预置式扭矩扳手

图 1 力矩试验台

锚杆 ($\phi 25\text{mm}$) 左端滚丝, 右端车丝, 左端用指针式扭矩扳手 (简称主动扳手) 给螺母施加扭矩, 螺母和球垫间有 1010 尼龙作减磨垫片。右端螺母和架体之间增加一个推力轴承, 可认为右端螺母和架体的摩擦力为零 (与左端比较), 右端预置式扭矩扳手 (简称被动扳手, 固定不动) 通过套筒和螺母连接。左端指针式扭矩扳手连续施加扭矩, 分析扭矩各组成部分之间的关系, 主要是支撑面摩擦产生的扭矩。右端预置式扭矩扳手可以设定

一个固定扭矩值, 本次试验分别设定 $200\text{N} \cdot \text{m}$ 和 $300\text{N} \cdot \text{m}$, 当主动扳手施加 $300\text{N} \cdot \text{m}$ 扭矩时, 被动扳手产生 $200\text{N} \cdot \text{m}$ 扭矩; 主动扳手施加 $500\text{N} \cdot \text{m}$ 扭矩时, 被动扳手产生 $300\text{N} \cdot \text{m}$ 扭矩。简单试验表明, 支撑面摩擦产生的扭矩占主动扭矩的 40% 左右。

2 锚杆力学模型分析

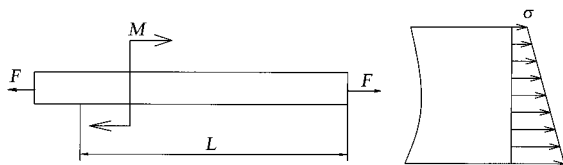
通常煤矿使用左旋无纵筋高强度杆体进行巷道支护, 因其截面形状较复杂, 将锚杆简化为圆形截面。可以近似认为:

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 \quad W_x = \frac{\pi d^3}{16} \quad (6)$$

式中, A 为测力锚杆截面积; W_x 为抗扭截面系数。

2.1 拉弯组合模型

液压拉伸法给锚杆施加一定的预紧力, 考虑巷道围岩不平整, 锚杆和托盘、球垫、螺母之间不可能垂直。锚杆的变形是拉弯组合变形, 危险点一般在上下端面。如图 2 所示。



F —轴向力; M —弯矩; L —长度

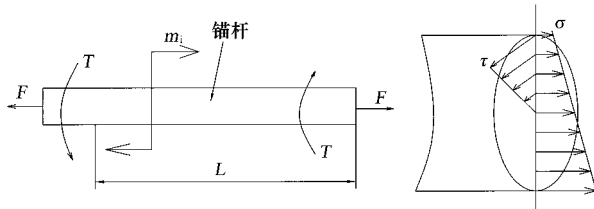
图 2 锚杆拉弯组合变形

$$\sigma_{\max} = \frac{F}{A} + \frac{M}{W} \quad M = \sum_{i=1}^n m_i \quad (7)$$

式中, m_i 指截面一侧第 i 个力 (或力偶) 对计算截面中性轴之矩; F 为锚杆的轴向力; A 为测力锚杆截面积。

2.2 拉扭弯组合模型

通过施加扭矩的方法锚杆获得预定的预紧力, 螺母和托盘之间有 1010 尼龙减磨垫片, 考虑巷道围岩不平整, 锚杆和托盘、球垫、螺母之间不可能垂直。锚杆的变形是拉扭弯组合变形。图 3 所示。



F —轴向力; T —扭矩; m_i —弯矩; L —长度

图 3 锚杆拉扭弯组合变形

(下转 22 页)

(5) 扩棚时, 必须随扩采进度, 往煤仓内填放木料 ($\phi 160\text{mm} \times 2000\text{mm}$), 所填放木料应有两个平行的平面, 所填木料的作用是随扩棚向前扩展, 作为支护时单体液压支柱底座, 沿倾斜方向铺设, 为确保所铺设木料在煤仓内的整体效果, 所铺填木料必须连在一起;

(6) 所铺木料上方, 必须沿倾向铺一层工字钢, 铺放间距为 0.5m , 铺设高度应在煤层底板 0.16m 以下, 其长度以煤仓直径和弧长而定。根据煤仓实际直径 (6m), 倾向为椭圆结构最大长度约 7m , 所铺工字钢应大于煤仓直径 0.5m ;

(7) 工字钢铺好后, 在其上面再铺设一层双面有平行面 $\phi 160\text{mm} \times 2000\text{mm}$ 的木料, 此层木料铺好后应与底板平齐;

(8) 当扩采的进度达到 2.3m 时, 在最下层木料上所打的单体液压支柱, 应随进度调整到最上层木料上。由于最上层与最下层有 260mm 的高差, 开始扩棚 (煤仓内) 所用单体液压支柱应采用 DZ25 型, 以确保支护高度和强度。单体液压支柱由最下层向最上层进行调整时, 须采取先打后撤的方法进行, 调整时单体液压支柱更换为 DZ22 型;

(9) 最上一层的木料铺好后, 同样用将木料连在一起, 保证此层木料具有较好的整体性;

(10) 随着推进, 扩帮工作应分三个阶段进行, 每次约 2.3m (走向), 以确保顶板和底板的稳定性;

(11) 煤仓直径 6m , 铺设的工字钢最大铺设长度应大于 6m , 具体长度应以煤仓的实际长度为准。煤仓直径倾斜尺寸约为 7m , 工字钢最大铺设

长度应为 8m ;

(12) 煤仓外沿露出后, 应采用手镐和大锤进行处理, 使外沿与底板平齐, 严禁用采煤机和爆破的方式处理煤仓外沿的混凝土;

(13) 移架时, 应少降快移, 一步到位, 严禁大起大落重复移架, 造成顶板破碎, 而降低支架的初撑力。过煤仓移架要与煤仓以上的移架工作协调一致, 严防出现支架前后错差较大和底板起伏不平。除煤仓上、下 10m 范围内, 采高控制在 1.9m , 其余采高必须严格控制在 2m 。

煤仓揭露, 露出料石和混凝土, 通过人工破碎仓壁后发现仓内工字钢梁柱较多且布置不均, 多数工字钢梁柱露出长度不超过 500mm , 其余全部埋在深处, 处理这些工字钢梁柱难度较大, 严重制约着正常的推进。当流煤道暴露后推进速度更慢, 流煤道与水平面的夹角为 60° , 其内的溜煤槽在工作面暴露有 7 节, 每节溜煤槽长 1m 、宽 1m 、高 0.3m , 重约 125kg 。每节槽之间均用螺栓和钢丝绳连接, 必须将这 7 节溜煤槽完全分开逐节拆除方能进行推进。支架完全离开煤仓上沿, 过煤仓工作顺利完成。

5 结束语

几年来, 结合工作面具体情况, 因地制宜, 采取有效措施, 排除、解决影响生产的各种因素, 使工作面走向正规作业循环。在实际操作中总结了很多值得推广的经验和技术, 也为大倾角综放工艺的改进提供了可靠的科学依据。

[责任编辑: 张银亮]

(上接 57 页)

由于锚杆材料为塑性材料, 锚杆的上下端面应力最大, 根据第四强度理论, 测力锚杆非锚固端的应力 $\sigma_{\max}$ 为:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau^2} = \sqrt{\sigma_1^2 + 3\left(\frac{T}{W_z}\right)^2} \quad (8)$$

式中, σ_1 为拉弯应力; τ 为剪切应力。

$$\sigma_1 = \frac{F}{A} + \frac{M}{W_z} \quad (9)$$

3 结论与展望

(1) 施加预紧力的方式不同, 锚杆杆体力学模型不同。液压拉伸法预紧, 锚杆为拉弯的组合变形; 拧紧螺母的方式, 锚杆的力学模型为拉扭弯组合变形。

(2) 扭矩对锚杆产生较大的影响, 准确认识扭矩和锚杆轴向应力的关系是一项重要的工作。

(3) 液压拉伸法可以获得较大的轴向力, 但是施工工艺复杂, 不适合巷道支护的大规模锚杆预紧; 通过拧紧螺母获得较大的轴向力, 操作简单、快捷, 但由于扭矩的存在改变了锚杆的受力状态, 锚杆的最大应力约为拉伸应力的 $1.3 \sim 1.5$ 倍。

[参考文献]

- [1] 康红普. 高强度锚杆支护技术的发展与应用 [J]. 煤炭科学技术, 2000, 28 (2): 1-3.
- [2] 范明建, 蔡嘉芳. 锚杆预紧扭矩与轴向力对应关系的研究及应用 [A]. 煤炭科学研究总院北京开采所. 地下开采现代技术理论与实践新进展 [C]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007.

[责任编辑: 林 健]