

[文章编号] 1004-0609(2001)01-0153-04

大直径深孔凿岩钻孔偏斜的机理及其控制方案^①

吴万荣¹, 魏建华¹, 张永顺¹, 杨襄璧²

(1. 浙江大学机械电子控制工程研究所, 杭州 310027; 2. 中南大学机电工程学院, 长沙 410083)

[摘 要] 通过对钻孔偏斜的影响因素及力学特征的分析, 建立了钻头偏载的力学模型, 从而揭示了凿岩过程钻孔偏斜的机理, 提出了控制钻孔偏斜的推进力控制方案。试验结果表明, 该控制方案能够随钻孔过程中孔内钻杆质量的变化及孔内因素的变化, 自动改变推进器的推进力, 从而有效地控制钻孔偏斜。

[关键词] 大直径深孔凿岩; 钻孔偏斜; 钻头轴压力; 推进力控制

[中图分类号] TD 421

[文献标识码] A

以高效、低耗为主要特点的大直径深孔采矿法能否成功地应用, 其关键在于能否严格控制钻孔偏斜。该采矿方法所用钻孔设备主要是高气压的潜孔钻机, 钻凿炮孔直径为 165 mm, 多为下向垂直孔, 钻孔深度一般为 30~50 m, 钻孔偏斜率要求小于 1%, 但从我国的大直径深孔凿岩实践来看, 仅有 20%~30% 的钻孔偏斜率在 1% 以内, 30%~50% 钻孔的偏斜率在 1%~2% 范围内, 还有相当一部分钻孔的偏斜率超过 2%^[1]。钻孔偏斜过大, 不仅造成炮孔底部间距过大或过小, 影响爆破效率, 使大块率上升, 而且采场边界不易控制, 导致回采率低、贫化率上升, 也限制了钻孔深度, 制约了采准费用的进一步降低。

1 钻孔偏斜的影响因素

导致钻孔偏斜的因素是多方面的, 但除钻机本身的制造水平和钻机定位的准确性外, 其客观因素主要是钻头轴压力、岩体构造和岩石性质的变化(下称孔内因素)。由于潜孔钻机一般钻孔较深, 钻孔过程中必须多次接杆, 钻杆质量不断变化, 钻头轴压力也发生变化。实践证明, 轴压力过大, 会造成钻头回转不平稳, 钻头产生飘移, 使钻孔发生偏斜。在钻孔过程中, 钻头接触的孔底岩石的结构和性质具有复杂多变性。当钻头前端工作面同时接触到不同性质的岩石时, 会使其受力不均匀, 其合力的作用线与钻头轴线不重合, 导致钻头发生偏载。由于孔内因素的变化具有随机性、无规律性, 所以要对其进行有效控制, 必须揭示钻孔偏斜的机理。

2 钻孔偏斜的机理

2.1 钻头对孔底的轴压力

潜孔钻机钻孔过程中推进器的推进力为

$$F_t = p_t A_t - p_{tb} A_t \quad (1)$$

式中 F_t —推进器的有效推进力; p_t , p_{tb} —推进器的推进压力、背压力; A_t —推进器油压有效作用面积。

钻头对孔底的轴压力包括推进器的作用力、钻具及推进器移动部件重量, 即

$$F_d = F_t + m_1 g + n m_2 g \quad (2)$$

式中 F_d —钻头对孔底的轴压力; m_1 —推进器、冲击器、钻头等移动部件质量; m_2 —单根钻杆质量; n —孔内钻杆数。

在钻孔过程中, 若不对推进器的推进力进行控制, 则钻头轴压力将随钻孔深度增加、孔内钻杆数增多、钻杆质量的增大而增大。

2.2 钻头偏载的力学模型

当钻头通过某种地质结构的岩层时, 其前端的工作面同时接触到不同硬度的岩石, 因而受力不均匀, 其合力的作用线和钻头轴线不重合, 钻头发生偏载。导致钻头偏载的岩层即所谓的诱偏岩层, 常见的有软硬岩层互层、裂隙、溶洞、砾石层等, 但在大直径深孔凿岩作业中经常遇到的只有软硬岩层互层和裂隙。如果把裂隙看做一种硬度为零的软岩, 那么裂隙的界面也是一种软硬互层面; 在钻凿矿柱边界孔时, 钻头所进入的边界区, 也可看做是软硬互层面。因此, 在大直径深孔凿岩作业中, 主

① [基金项目] [收稿日期] 2000-03-23; [修订日期] 2000-07-10

[作者简介] 吴万荣(1965-), 男, 副教授, 博士。

要的诱偏岩层是软硬岩层互层^[2]。为了揭示钻头偏载引起钻孔偏斜的力学规律,本文作者对钻头从空间进入硬岩的情形进行分析,其力学模型及受力简图如图 1 所示,由力学平移原理有

$$M_1 = F_z \cdot R \quad (3)$$

$$M_2 = (N \cos \alpha + F_s \sin \alpha) R \quad (4)$$

式中 R —钻头半径; M_1 —岩面对钻头边齿的回转阻力矩; M_2 —钻具系的弯矩; F_z , F_s , N —岩面对钻头边齿的回转阻力、下滑阻力、支承力; α —岩面倾角。当 F_s 为滑动磨擦力时,有

$$F_s = f \cdot N$$

式中 f —磨擦系数。由于

$$N \sin \alpha + F_s \cos \alpha = F_1 + m_1 g + n m_2 g = F_d \quad (5)$$

故

$$M_2 = F_d \cdot R \quad (6)$$

则钻头齿面中心在 yOz 面上的位移和转角:

$$\Delta y = \left[\frac{L_z^3 (f \cos \alpha - \sin \alpha)}{3EI (f \sin \alpha + \cos \alpha)} + \frac{RL_z^2}{2EI} \right] \cdot F_d \quad (7)$$

$$\theta_{yOz} = \left[\frac{L_z^2 (f \cos \alpha - \sin \alpha)}{2EI (f \sin \alpha + \cos \alpha)} + \frac{RL_z}{EI} \right] \cdot F_d \quad (8)$$

式中 L_z , EI —钻具系的长度、抗弯刚度。

$$\text{令 } \mu = \frac{f \cos \alpha - \sin \alpha}{f \sin \alpha + \cos \alpha}$$

$$\text{则 } \frac{\partial \mu}{\partial \alpha} = - \frac{(1+f^2) \sec^2 \alpha}{(f \cdot \tan \alpha + 1)^2}, \quad \frac{\partial \mu}{\partial \alpha} < 0.$$

故 α 角越大, Δy 和 θ_{yOz} 就越大, 因此钻具系弯曲就越严重。

在均质岩层中钻进, 岩面对钻头边齿的回转阻力 F_z 在钻头径向方向能趋于平衡, 而在诱偏岩层中钻进时, 由图 1 可知, F_z 与岩面倾角有关。由式 (3) 得:

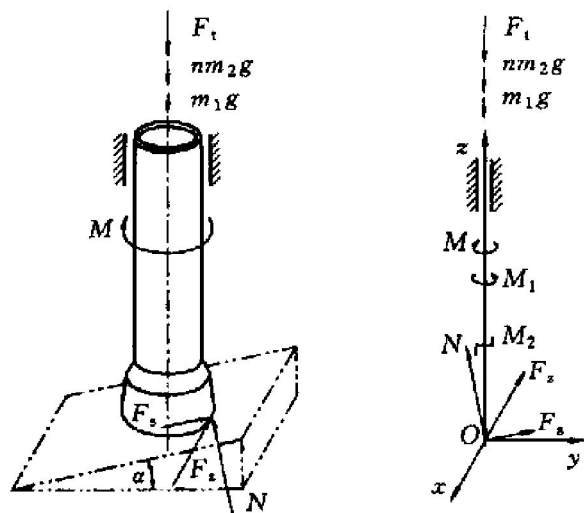


图 1 钻头偏载钻具系的力学模型及受力简图

Fig. 1 Mechanical model and force diagram of simplified drill set under offset load

$$F_z = \frac{M_1}{R} \quad (9)$$

而岩面对钻头边齿的回转阻力矩 M_1 与钻头轴压力及岩石性质有关, 可表示为

$$M_1 = f(\Psi, F_d) \quad (10)$$

式中 Ψ —岩石性质对回转阻力的影响因素。

不考虑岩石性质的影响, 回转阻力矩 M_1 与钻头轴压力的关系^[3]可用下式表示:

$$M_1 = k F_d^n \quad (11)$$

式中 k —比例系数; n —指数, $n > 0$ 。

则 F_z 引起钻头在 xOy 面上的位移和转角:

$$\Delta x = \frac{k F_d^n L_z^3}{3EI} \quad (12)$$

$$\theta_{xOy} = \frac{k F_d^n L_z^2}{2EI} \quad (13)$$

可见, 在诱偏岩层中钻进时, 钻头偏转引起钻孔发生偏斜是客观存在的。从式 (7), (8), (12) 和 (13) 可知, F_d 越大, 钻头偏转可能性也越大, 所以在诱偏岩层中钻进, 要控制钻孔偏斜, 主要应控制钻头轴压力, 即推进器的推进力, 以小推进力穿越诱偏岩层区。

3 钻孔偏斜控制方案的原理与结构

从上述分析可知, 随着孔内钻杆数的增加以及孔内因素的变化, 应对钻头轴压力进行实时控制才能有效地控制钻孔偏斜。综观现有潜孔钻机推进力的控制方案, 即使代表先进技术水平的潜孔钻机如 Simba261, GD-60 潜孔钻机^[4~6], 也仅是采用人工实时调节推进力或采用恒轴压力的方法来控制钻机推进力, 显然对孔内因素变化引起的钻孔偏斜无法进行控制。

从钻孔过程钻头受到的回转阻力特征来看, 随着孔内钻杆数增多和钻杆质量增大, 钻头轴压力和回转阻力也随之增大; 在诱偏岩层中钻进时, 由式 (7), (8), (12) 和 (13) 可知, 钻头发生偏转会导致钻头切割岩石的回转半径和回转阻力增大, 钻具与孔壁的磨擦阻力也随之增大。上述情况反映到液压系统中的表现是回转压力的变化, 因而可以利用回转压力来控制推进器的推进力, 从而控制钻头轴压力。

作者提出的推进力控制方案结构如图 2 所示。推进器即推进油缸 6 的推进力由推进压力控制阀 1 的出口压力和推进背压阀 4 的背压力决定, 推进压力控制阀 1 的出口压力决定于推进压力和回转压

力。当孔内钻杆数增加, 钻头轴压力增大或钻头进入诱偏岩层层面时, 钻头回转阻力增大, 回转压力升高使推进控制阀 1 的出口压力降低, 进而使钻头轴压力减小, 钻孔偏斜的可能性也相应减小, 即以较小的推进力或钻头轴压力穿越诱偏岩层。当钻头进入松软岩层时, 钻头回转阻力矩减小, 回转压力降低, 通过推进力控制系统使推进力增大, 加大凿孔速度, 提高凿孔效率。

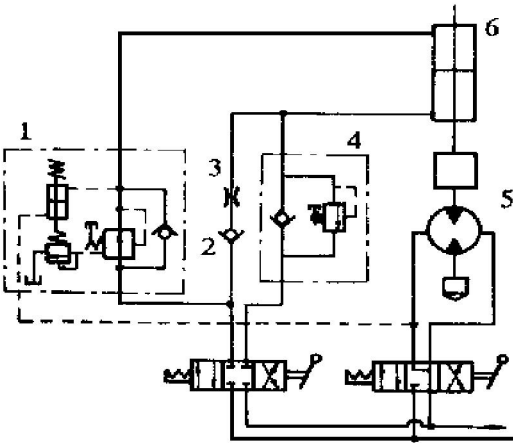


图 2 控制系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of control system

- 1—Pressure valve of feeding force; 2—One way valve;
3—Throttle valve; 4—Back-pressure valve;
5—Motor; 6—Feeding cylinder

4 控制系统的试验

控制系统试验, 主要考察推进器的推进力随钻孔过程中钻杆数变化及孔内因素变化的反映特性, 以及其对钻机钻孔质量的影响。由于该控制系统工作对象的特殊性, 所以作者直接将研制的推进控制系统应用在 QZL-165 型大直径潜孔钻机上^[7]。现场试验时, 在推进油缸的进出油口、回转马达的进、出油口分别安装压力表和带数显的压力传感器, 测量在钻孔工作过程中各处压力的变化情况。

试验在广西铜坑锡矿三个采场进行, 每个采场均测试了多个炮孔在钻孔过程中的有关数据。图 3 所示为根据其中一个炮孔钻孔过程的有关数据绘制成的曲线, p_z 和 p_T 为回转压力和推进压力, F_d 和 F_T 为折算的钻头轴压力和推进器的推进力, 虚线表示均质岩层恒轴压力理论仿真曲线。

从图 3 中曲线可知, 推进器的推进压力能随钻孔深度的增加、钻杆数增加、钻杆质量加大而自动减小, 使钻头对孔底的轴压力在钻孔过程中近似恒定。曲线 F_d 和 F_T 的波动反映了钻孔过程中推进

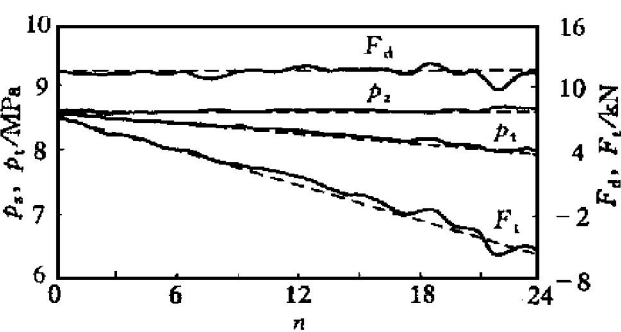


图 3 钻孔过程中 p_z , p_T , F_T , F_d 的变化曲线

Fig. 3 Diagram for fluctuation of parameters p_z , p_T , F_T , F_d in process of rock-drilling

力及钻头轴压力随孔内岩石性质的变化而自适应变化的特性。

图 4 所示为根据钻孔对比试验测试的钻孔偏斜结果^[8]所绘制的曲线。试验在铜坑锡矿 455 水平某矿柱上进行, 应用该控制系统的 QZL-165 型钻机钻凿 y 方向的 1~ 6 号孔, 瑞典 Simba261 钻机钻凿 y 方向的 7~ 12 号孔。从试验结果来看, 两台钻机的钻孔速度相近, 但从图 4 可知其钻孔偏斜率有明显差别, Simba261 钻机偏斜率最大的炮孔达 4.82%, 还有两个炮孔(图中“*”所示)因偏斜过大, 使钻机卡钻而无法继续钻进。矿柱边壁孔是钻孔偏斜最难控制的一种炮孔, 这充分说明, 该控制方案能够有效地控制钻孔偏。

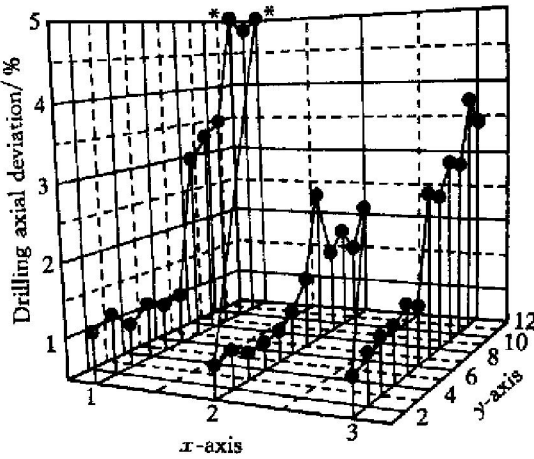


图 4 钻孔偏斜测试结果

Fig. 4 Measurement results of drilling axial deviation

4 结论

- 1) 大直径深孔凿岩引起钻孔偏斜的因素尽管十分复杂, 但其客观因素主要是钻头轴压力和钻孔过程中岩体构造及岩石性质的变化。
- 2) 通过对钻孔偏斜机理的分析可知, 大直径

深孔凿岩要有效地控制钻孔偏斜,关键在于对钻机推进器的推进力进行有效的控制,使钻头轴压力在钻孔过程中保持近似恒定值,同时,随孔内因素的变化能够自适应变化。

3) 实践表明,作者提出的推进力控制方案,不仅能使潜孔钻机在钻孔过程中随孔深增加和钻杆质量增大而自动减小推进器的推进力,而且能随孔内因素的变化而自动改变钻头轴压力,从而有效的控制钻孔偏斜。

[REFERENCES]

- [1] CAI You-mei(蔡友梅). 三十年来地下深孔凿岩设备的发展概况 [J]. Quarterly of CIMR(长沙矿山研究院季刊). 1984, 3(4): 15- 19.
- [2] WANG Yi(王毅). 钻孔偏斜的分析与控制 [J]. Mining R & D (矿山研究与开发). 1993, 13(3): 45- 51.
- [3] CHEN Yu-fang(陈玉凡) and ZHU Xiang(朱祥). Design of Drilling Machinery(钻孔机械设计) [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1987, 6. 105- 121.
- [4] LI Zheng(李政) and SUN Zai-dong(孙再东). 钻机凿岩偏斜的控制技术 [J]. Mining R & D (矿山研究与开发), 1998, 18(10): 34- 37.
- [5] Kelly J. Development of the automatic GD-60 drill [J]. CIM Bulletin, 1987(7): 68- 72.
- [6] XU Xue-min(徐学明). CMM2 与 CD360 型高风压潜孔钻机 [J]. Mine Machinery(矿山机械), 1990(4): 28 - 31.
- [7] WU Wan-rong(吴万荣), YANG Xiang-bi(杨襄璧) and HU Jun-ping(胡均平). QZL-165 型潜孔钻机的研制 [J]. Nonferrous Metals•Mine(有色金属•矿山), 1998 (1): 22- 25.
- [8] YANG Xiang-bi(杨襄璧), WU Wan-rong(吴万荣) and HU Jun-ping(胡均平). 地下大直径潜孔钻机工作参数优化的试验研究 [J]. Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tool(凿岩机械气动工具), 1998(4): 45- 49.

Drilling axial deviation mechanism and its control program for large-diameter blasthole rock-drilling

WU Wan-rong¹, WEI Jian-hua¹, ZHANG Yong-shun¹, YANG Xiang-bi²

(1. The Institute of Mechatronic Control Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, P. R. China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, P. R. China)

[Abstract] According to the analysis of the affecting factor and mechanics performance for drilling axial deviation, the mechanical model was set up for the drill bit under offset load, thus the drilling axial deviation mechanism in the process of rock-drilling was revealed, the feeding force control program was proposed for controlling drilling axial deviation. The experiment results show that the control program can make the feeding force of the propulsion change automatically with the rods weight and rock properties. So the drilling axial deviation can be effectively controlled.

[Key words] large-diameter blasthole rock-drilling; drilling axial deviation; drill bit axial force; feeding force control

(编辑 何学锋)