

DOI: 10.11779/CJGE201411016

钻屑扭矩法测定煤体应力与煤体强度研究

朱丽媛, 李忠华, 徐连满

(辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 通过对钻孔过程中钻杆扭矩及钻屑推力的力学分析, 理论上给出了利用钻杆扭矩及钻屑推力判断煤体应力、煤体强度的可行性, 提出通过测试钻孔过程中的钻杆扭矩和钻屑推进力来判断煤矿冲击地压危险性的方法。利用自行设计的扭矩-推力测试装置, 对预制煤体相似材料试件进行了不同煤体应力、不同煤体强度和不同推进速度条件下的钻孔试验。研究结果表明: ①单一因素影响下, 钻杆扭矩与煤体所受应力存在线性递增关系, 钻屑推力与煤体应力呈近似线性递减关系, 且钻杆扭矩变化规律与煤体应力及钻屑量具有较好的一致性。②钻杆扭矩和钻屑推力均与煤体强度呈线性递增关系。③同种煤岩体材料, 相同压力条件下, 钻进速度越快, 钻屑扭矩越大, 反之, 钻屑扭矩越小。研究结果可为煤矿动力灾害的预测预报提供参考依据。

关键词: 钻杆扭矩; 钻屑推力; 冲击地压

中图分类号: TU452; TD324

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)11-2096-07

作者简介: 朱丽媛(1988-), 女, 博士研究生, 主要从事矿山灾害力学方面的研究。E-mail: 13841814583@163.com。

Measuring stress and strength of coal by drilling cutting torque method

ZHU Li-yuan, LI Zhong-hua, XU Lian-man

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: The feasibility of judging the stress and strength of coal by drilling pipe torque and drilling thrust is given through mechanical analysis during the drilling process. On this basis, the way to judge the risk of rock burst by testing drilling pipe torque and drilling thrust is put forward. The drilling experiments on the prefabricated similar coal specimens are performed under different stresses and strengths of coal and advance speeds. A torque-thrust testing device is designed for these tests. The results show that: (1) Under the influence of a single factor, the drilling pipe torque linearly increases with the stress of coal, while the drilling thrust reduces linearly with the stress of coal. The variation rules of drilling pipe are consistent with those of the stress of coal and drilling volume. (2) Both the drilling pipe torque and the drilling thrust linearly increase with the increasing strength of coal. (3) For the same coal and rock materials under the same pressure, the faster the drilling speed, the larger the drilling cutting torque, and vice versa. The results are important for the forecast of dynamic disasters in coal mines.

Key words: drilling pipe torque; drilling thrust; rock burst

0 引言

随着煤矿开采深度逐渐加深, 冲击地压发生的频率和强度也逐渐增大, 冲击地压预测预报技术的研究已显得十分紧迫^[1-3]。钻屑法是一种应用广泛的煤矿冲击地压预测方法, 已具有一套较为成熟的测试技术, 其具有能同时预测多项因素且简便易行等优点^[4-7]。但应用钻屑法对冲击地压实施的监测是不连续的, 容易导致信息遗漏, 这是钻屑法的突出缺点。对于软弱煤层及煤体应力超过强度破碎时, 钻孔过程中产生的钻屑量将超过极限值, 从而无法利用钻屑量判断煤体应力^[8]。此外, 钻屑量与煤体强度无关, 无法利用钻屑法判断煤体强度进而进行冲击地压的预测预报。

钻屑扭矩法是通过测试钻孔过程中钻机对钻杆输

出扭矩及推进力的大小和变化规律, 来反映煤体应力、煤体强度的大小及该区域冲击危险性的一种预测方法。钻屑扭矩法包括钻杆扭矩 M_p 、钻屑推力 F_p 两项测试指标。钻杆扭矩指以恒定的速度推进钻孔时钻机作用于钻杆上的扭矩, 钻屑推力指钻机对钻杆的推力。通过钻屑扭矩法可以了解煤体应力和煤体强度的大小及变化规律, 以判定冲击地压危险程度, 弥补了钻屑法的不足。钻屑扭矩指标可以与钻屑量指标在同一钻孔进行, 使一孔多用, 达到多指标预测的目的, 是一种很有发展的冲击地压预测预报方法。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB226803); 国家自然科学基金项目(51174107)

收稿日期: 2014-03-20

本文利用自行设计的扭矩-推力测试装置分别对大尺寸煤样相似材料试件在不同煤体应力、不同煤体强度、不同钻进速度下进行了钻屑扭矩测试试验, 重点研究了单一因素影响下煤体应力、煤体强度与钻屑扭矩的关系, 同时分析了推进速度对钻屑扭矩的影响, 研究成果对冲击地压预测预报的理论研究和生产实践具有一定的指导意义。

1 钻屑扭矩理论基础

使用煤电钻向煤体中打钻时, 钻杆的高速转动带动煤屑沿着麻花钻杆的螺旋槽向孔外排出。钻孔过程中, 钻杆除了受到钻机作用给钻杆的扭矩和推力外, 还受到钻头作用力和排屑阻力^[9-10]。当排屑阻力急剧增大时, 排粉速度减小, 钻杆表现出向里的冲力, 由此会产生吸钻现象。因此, 计算钻杆扭矩和钻屑推力, 首先要对钻孔过程中的钻头作用力和钻杆的排屑力进行计算。

1.1 钻头作用力的计算

钻头破煤过程中切削刀具受到钻杆作用的推进力 F_n 与切屑力 F_m , 煤岩对它的抗切削阻力 F_1 , 抗切入阻力 F_2 和摩擦阻力 F_3 ^[11-14], 另外, 钻头侧表面还受到孔壁作用的压力 p_0 和摩擦力矩 M_1 。切削刀具受力如图 1 所示, 钻头受力如图 2 所示。

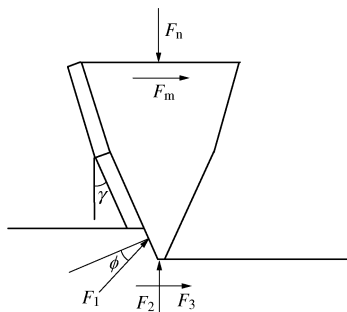


图 1 切削刀具受力图

Fig. 1 Forces acting on cutting tool

抗切削阻力 F_1 与刀具对煤岩剪切体的作用力 P_1 相对应, 根据赵伏军等^[15]的推导, 有

$$F_1 = P_1 = \frac{cbh \cos \varphi}{\cos(\gamma + \phi + \varphi + \psi) \cos \psi}, \quad (1)$$

式中, h 为切割深度, b 为切削刀刃宽, c 为黏聚力, φ 为内摩擦角。

F_2 为刀刃对煤岩正压力, 与刀刃对煤岩正压力 P_c 相对应

$$F_2 = P_c = \sigma_b S', \quad (2)$$

式中, σ_b 为岩石抗压强度, S' 为切削刀具与岩石接触面积。

设刀刃与煤岩的摩擦系数为 μ_1 , 则 $F_3 = \mu_1 F_2$ 。令孔壁煤体与钻头表面的摩擦系数为 μ_2 , 则

$$M_1 = \mu_2 \int_s p_0 \cdot R ds = \mu_2 p_0 \cdot R s, \quad (3)$$

式中, R 为钻头半径, s 为钻头一个刀具侧面与孔壁接触面积。因为钻头有 2 个切削刀具, 故钻头平衡方程为

$$\left. \begin{aligned} F_n &= 2F_1 \sin(\gamma + \phi) + 2F_2, \\ M_n &= 2F_1 \cos(\gamma + \phi) \cdot R' + 2\mu_1 F_2 \cdot R' + 2M_1, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, R' 为钻头所受等效集中力至钻头中轴线距离。将式 (1) ~ (3) 代入式 (4) 中, 得钻头作用力、作用扭矩计算公式:

$$\left. \begin{aligned} F_n &= 2 \frac{cbh \cos \varphi}{\cos(\gamma + \phi + \varphi + \psi) \cos \psi} \sin(\gamma + \phi) + 2\sigma_b S', \\ M_n &= 2 \frac{cbh \cos \varphi}{\cos(\gamma + \phi + \varphi + \psi) \cos \psi} \cos(\gamma + \phi) \cdot R' + \\ &\quad 2\mu_1 \sigma_b S' \cdot R' + 2\mu_2 p_0 \cdot R s. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

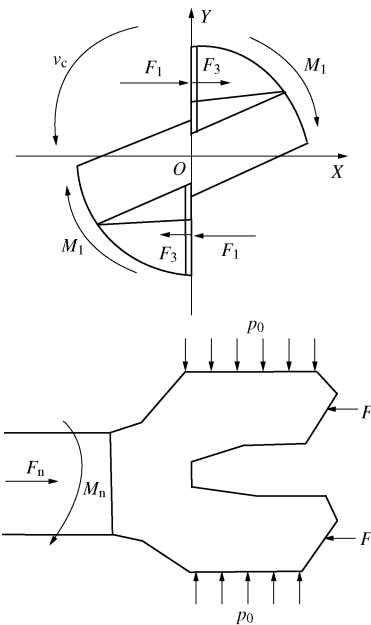


图 2 钻头受力模型图

Fig. 2 External forces acting on drilling bit

1.2 排屑力的计算

(1) 钻孔过程中煤屑单元受力分析

周志雄等^[16]建立了刀具及微钻头螺旋槽的数学模型, 王昕等^[17]针对分离型振动钻削产生不连续切屑建立了包含排屑力和切削力的钻削力模型。借鉴文献 [16, 17] 的思路, 取钻杆螺旋槽中的钻屑单元进行受力分析, 其所受外力如图 3 所示。分别建立钻杆坐标系 $oxyz$ (整体坐标系) 和煤屑单元坐标系 $o'uvw$ (局部坐标系) 来分析钻孔过程中排屑力的变化情况, 两

坐标系关系如图 4 所示。

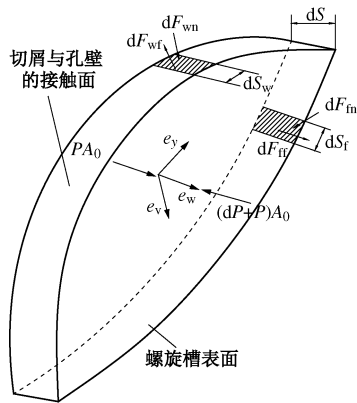


图 3 煤屑单元受力模型

Fig. 3 External forces acting on coal dust element

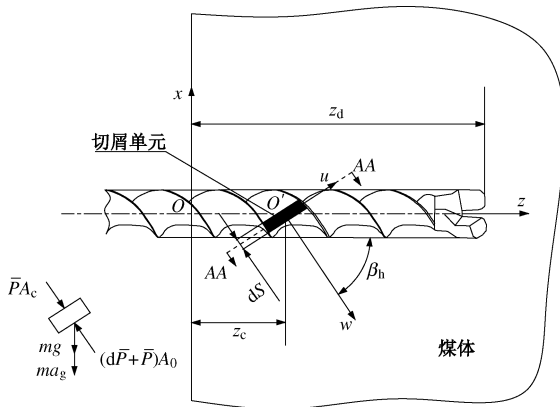


图 4 钻杆坐标系与煤屑单元坐标系

Fig. 4 Coordinate system of drilling pipe and coal dust element

煤屑单元的重力和惯性力忽略不计, 可得到煤屑单元在 oz 方向平衡方程^[17]:

$$\bar{P}A_0(\vec{e}_w \cdot \vec{k}) - (d\bar{P} + \bar{P})A_0(\vec{e}_w \cdot \vec{k}) + \int d\vec{F}_{fr} \cdot \vec{k} + \int d\vec{F}_{fn} \cdot \vec{k} = 0 \quad (6)$$

式中, $\bar{P}A_0$ 表示不同孔深处的排屑力的分布, 其中 A_0 表示麻花钻杆螺旋槽在煤屑坐标系 $o'uv$ 平面内的截面积, 为一固定常数, $d\vec{F}_{fr}$ 表示螺旋槽作用在煤屑底部的摩擦力, $d\vec{F}_{fn}$ 表示螺旋槽作用在煤屑底部的法向力。

(2) 侧向分布压力

钻杆旋转排屑过程中, 在孔壁对煤屑单元摩擦力和螺旋槽法向排屑力的共同作用下, 煤屑单元产生侧向分布压力 L 。假设在 uv 面内, 侧向分布压力只沿着 u 方向变化, 如图 5 所示, 煤屑单元在 u 方向平衡方程为^[17]

$$L\Delta v dS - (dL + L)\Delta dS + dF_{wf} \cdot \vec{e}_u = 0 \quad (7)$$

煤屑单元侧面面积微分单元 $dS_w dS$ 上的作用力为 $LdS_w dS$, 则作用于其上的法向分力 F_{wn} 为孔周围煤体对钻杆的正压力 p_0 和侧向分布压力 L 叠加而成, 其表

达式为

$$d\vec{F}_{wf} = \mu_4 \cdot d\vec{F}_{wn} = \mu_4 (LdS_w \cdot dS \cdot \vec{e}_\theta + p_0 dS_w \cdot dS \cdot \vec{e}_\theta) \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (7) 中, 经计算可求出侧向分布压力:

$$L(u) = (k\bar{P} + p_0)\alpha e^{u_4 f(u)} - p_0 \quad (9)$$

式中, p_0 为钻孔周围煤体对钻杆的正压力, u 坐标的变化区间是 $[u_a, u_b]$, 取决于钻杆的几何参数, μ_4 为煤屑和孔壁煤体间的摩擦系数, k 为取决于钻杆的几何参数与钻进速度的系数, $\alpha = \frac{(u_b - u_a)}{\int_{u_a}^{u_b} e^{u_4 f(u)} du}$ 。

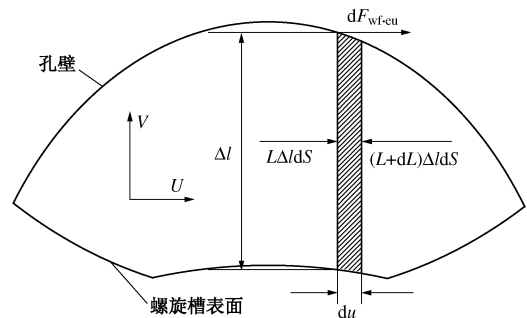


图 5 煤屑单元侧向受力图

Fig. 5 Lateral stresses acting on coal dust element

(3) 平均法向分布压力

煤屑底部受到螺旋槽作用的法向力 $d\vec{F}_{fn}$ 和摩擦力 $d\vec{F}_{fr}$ 分别可表示为^[17]

$$d\vec{F}_{fn} = LdS_f dS \cdot \vec{e}_{fn} \quad (10)$$

$$d\vec{F}_{fr} = \mu_3 |d\vec{F}_{fn}| \cdot \vec{e}_{fr} = \mu_3 LdS_f dS \cdot \vec{e}_{fr} \quad (11)$$

式中, μ_3 为煤屑和排屑槽间的摩擦系数。

将式 (10)、(11) 用不同孔深处切屑上的平均法向分布压力 \bar{P} 和深度 z_c 表示为

$$d\vec{F}_{fn} = [(k\bar{P} + p_0)Ae^{u_4 f(u)} - p_0] dS_f \cdot \vec{e}_{fn} dz_c / \cos \beta_h \quad (12)$$

$$d\vec{F}_{fr} = \mu_3 [(k\bar{P} + p_0)Ae^{u_4 f(u)} - p_0] dS_f \cdot \vec{e}_{fr} dz_c / \cos \beta_h \quad (13)$$

将式 (12)、(13) 代入到力的平衡式 (6) 中并整理得

$$\bar{P} = e^{\int_0^{z_c} \frac{kAE}{A_0} B(z_c) d\eta} \cdot \int_0^{z_c} p_0(z_c) \frac{E}{A_0} [AB(z_c) - C(z_c)] e^{-\int_0^{z_c} \frac{kAE}{A_0} B(z_c) d\eta} d\eta \quad (14)$$

(4) 钻杆排屑力和排屑扭矩的计算

设钻杆钻进的深度为 z_d , 则沿钻杆轴线方向的排屑力可表示为^[17]

$$\vec{F}_z(z_d) = 2\bar{P}(z_d)A_0 \cdot \vec{e}_w \cdot \vec{k} \quad (15)$$

将式 (14) 代入式 (15) 中, 经整理, 得到沿钻杆轴

线方向的排屑力为

$$F_z(z_d) = 2A_0 \cos \beta_h e^{\int_0^{z_d} \frac{k\alpha\delta}{A_0} \beta(z_c) d\eta} \int_0^{z_d} p_0(z_c) \cdot \frac{\gamma}{A_0} [\alpha\beta(z_c) - \chi(z_c) e^{-\int_0^{z_d} \frac{k\alpha\delta}{A_0} \beta(z_c) d\eta}] dz_c \quad (16)$$

钻杆钻进过程中, 排屑扭矩方程为^[17]

$$M_z(z_d) = (\vec{r}_c(z_d) \times \vec{F}_w(z_d)) \cdot \vec{k} + \int_0^{z_d} dM_w(z_c), \quad (17)$$

式中, \vec{r}_c 表示煤屑单元中心的位置矢量, $\vec{r}_c = R'\vec{e}_r$ 。

将式 (16) 代入到式 (17) 中, 整理得

$$M_z(z_d) = \bar{P}(z_d) A_0 \lambda + \psi \int_0^{z_d} p_0(z_c) \gamma dz_c + \psi \int_0^{z_d} k\bar{P} \gamma dz_c, \quad (18)$$

式中, $\lambda(z_d) = A_0 R' \sin \beta_h$, $\psi = \frac{\mu_4 AR}{\cos \beta_h}$, $\gamma(z_c) =$

$$\int e^{u_4 f(u)} dS_w。$$

1.3 钻杆扭矩与钻屑推力计算

在使用煤电钻及麻花钻杆向煤体中打钻的过程中, 钻杆主要受到煤电钻作用给钻杆的推进力 F_p 、扭矩 M_p ; 钻头作用在钻杆上的力 F_n 、扭矩 M_n ; 钻屑作用给钻杆的排屑力 F_z 、排屑扭矩 M_z 。本文中所研究的钻杆扭矩和钻屑推力是指煤电钻作用给钻杆的扭矩 M_p 和推力 F_p , 钻杆受力示意图见图 6。

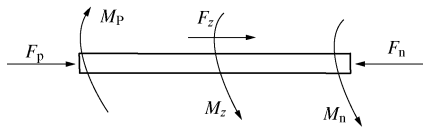


图 6 钻杆受力图

Fig. 6 External forces acting on drilling rod

钻杆受力平衡方程为

$$\left. \begin{aligned} F_p &= F_n - F_z, \\ M_p &= M_n + M_z. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

将式 (5)、(16)、(18) 代入式 (19) 中即得到钻机对钻杆的推进力 F_p 和钻杆力矩 M_p 。为了便于分析煤体应力、煤体强度、钻进速度对钻屑扭矩的影响, 将推进力 F_p 和钻杆力矩 M_p 简化为

$$\left. \begin{aligned} F_p &= A_1 b h + 2\sigma_b S' - B_1 \bar{P}, \\ M_p &= A_2 b R' h + \sigma_b B_2 + p_0 B_3 + \bar{P}(z_d) K(z_d) + \\ &\quad G \int_0^{z_d} p_0(z_c) H dz_c + G \int_0^{z_d} k \bar{P} H dz_c. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中 $A_1 = 2 \frac{c \cos \phi}{\cos(\gamma + \phi + \psi) \cos \psi} \sin(\gamma + \phi)$, $A_2 =$

$2 \frac{c \cos \phi}{\cos(\gamma + \phi + \psi) \cos \psi} \cos(\gamma + \phi)$, 均随着煤岩强度

的增加而增大; b 为切削刀刃宽; h 为切割深度, 随着推进速度的增加而增大; S' 为切削刀具与煤岩接触面

积, $B_2 = 2\mu_1 S' R'$, $B_3 = 2\mu_2 R s_2$, 均与钻头的几何参数相关; σ_b 为岩石抗压强度; $B_1 = 2A_0 \cos \beta_h$, 与钻杆的几何参数相关, K, G, H 也与钻杆几何参数有关; \bar{P} 为排屑力, 随着煤体所受应力的增大而增大。

根据以上计算结果可知, 在钻进设备参数不变的情况下, 钻孔过程中钻屑扭矩受到煤体应力、煤体强度、钻进速度等因素的影响。其中钻杆扭矩与煤体应力、煤体强度、钻进速度均呈正相关关系; 钻进推力与煤体强度和钻进速度呈正相关关系, 与煤体应力呈负相关关系。因此, 在钻进速度保持不变的条件下, 利用钻屑扭矩判断煤体应力和煤体强度进而预测冲击地压是可行的, 值得深入研究。

2 试验介绍

2.1 试验系统

试验系统主要包括钻孔设备、压力加载装置、扭矩-推力测试装置、数据采集与记录系统及其他辅助装置, 实物图如图 7 所示。钻孔设备包括 1.2 kW 手持式煤电钻、 $\phi 42$ 空心麻花钻杆、钻头; 压力加载装置采用液压式压力试验机; 扭矩-推力测试装置由课题组自主研发, 是试验系统的核心装置, 其特点是在煤电钻的输出端内安装扭矩传感器和推力传感器, 传感器采用自制电阻应变式传感器, 可实现钻杆扭矩及钻进推力的实时连续测定。选用 YJZ-8/16 型智能数字应变仪进行数据采集记录并将结果显示在计算机上。



图 7 试验系统实物图

Fig. 7 Test system

2.2 试验试件

试验模型采用自制煤体相似材料试件, 以水泥、石膏、沙子、水, 按照相似材料强度配合比表, 选取相应抗压强度的配合比值, 按比例称量各种材料, 搅拌均匀后置于 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 的铸钢模具中, 将试块置于震动台上震动至浆体均匀, 在标准条件下养护 4 周后进行试验。共制作 10 个试件, #1~#3 试件用于钻屑扭矩与煤体应力关系的试验, #4~#7 试件用于钻屑扭矩与煤体强度关系的试验, #8~#10

试件用于钻进速度对钻杆扭矩影响的试验。单个试件如图 8 所示。



图 8 制备的试件

Fig. 8 Photo of specimen

2.3 试验方法

试验时, 按如下步骤进行: ①将试件放置在试验机试验台上, 为使试件受力均匀, 在试件上表面放一块 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 钢板, 并在钢板上放置垫块; ②为保持煤电钻的匀速推进并减轻钻杆的抖动。将手持式煤电钻安装在自制支架上, 并在支架导轨上安装刻度尺; ③检查系统中各仪器状态, 调节试验机相关参数; ④数据采集与记录系统同步采集并自动记录试验数据, 开启试验机按试验条件对试件进行加载, 配合秒表控制电钻按指定的推进速度进行钻孔; ⑤孔结束后停止数据采集, 然后关闭压力机。

3 试验结果与分析

3.1 钻屑扭矩与煤体应力的关系

保持钻进速度为 0.22 m/min 的条件下, 分别对试件加载 2000 kN (煤体应力为 8.0 MPa), 2500 kN (煤体应力为 10.0 MPa)、 3000 kN (煤体应力为 12.0 MPa)。钻进时间为 120 s , 钻孔深度为 440 mm 。钻孔同时收集钻屑, 钻孔结束后对钻屑量进行称量。

图 9 给出了钻屑量、钻屑扭矩与煤体应力关系的曲线图。由图 9 (a)、(b) 可知, 钻杆扭矩与钻屑量随着煤体应力的增大具有相同的变化趋势, 且都与煤体应力近似呈线性关系。对图中曲线进行拟合, 分别得到钻屑量、钻杆扭矩与煤体应力的线性拟合关系:

$$G_0 = 0.1175\sigma + 0.3654 \quad (R^2 = 0.998) \quad (21)$$

式中, G_0 为钻屑量, σ 为煤体应力。

$$M = 0.4718\sigma - 8.1545 \quad (R^2 = 0.9872) \quad (22)$$

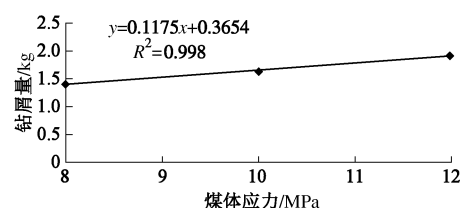
式中, M 为钻杆扭矩, σ 为煤体应力。

图 9 (c) 给出了钻进推力与煤体应力关系的曲线图。由图 9 (c) 可知, 相同条件下, 煤体应力越大, 钻屑推力越小, 采用近似线性关系可以较好地反映钻

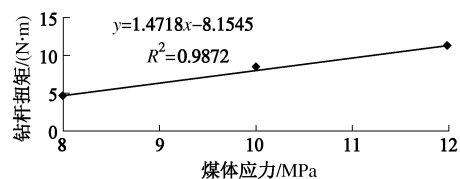
屑推力和煤体应力的关系:

$$F = -2.1405\sigma + 49.24 \quad (R^2 = 0.9448) \quad (23)$$

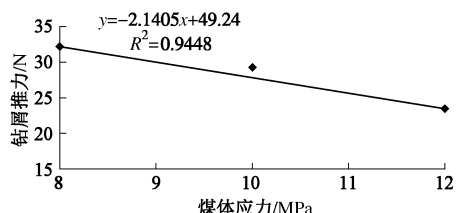
式中, F 为钻屑推力, 为煤体应力。



(a) 钻屑量与煤体应力关系曲线



(b) 钻杆扭矩与煤体应力关系曲线



(c) 钻屑推力与煤体应力关系曲线

图 9 钻屑量、钻屑扭矩与煤体应力关系图

Fig. 9 Relationship among drilling cutting quantity, drilling cutting torque and stress of coal

3.2 钻屑扭矩与煤体强度的关系

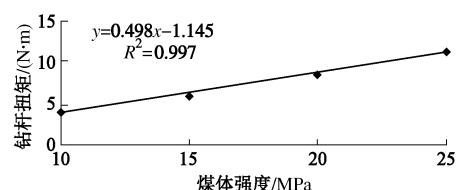
在保持钻进速度为 0.40 m/min 的条件下, 分别对抗压强度为 $10, 15, 20, 25\text{ MPa}$ 的 4 个试件施加 2500 kN 的压力, 使煤体应力为 10.0 MPa 。钻进时间为 60 s , 钻孔深度为 400 mm 。

钻屑扭矩与煤体强度的关系如图 10 所示, 从图 10 中可以看出, 在煤体应力和钻进速度相同的条件下, 钻屑扭矩随着煤体强度的增加而增大。根据钻屑扭矩测试结果, 分别以钻屑扭矩、煤体强度为纵横坐标进行拟合回归分析。分析表明, 钻屑扭矩随煤体强度的增加呈线性增加, 相关性良好, 二者关系曲线为

$$M = 0.498\sigma_c - 1.145 \quad (R^2 = 0.997) \quad (24)$$

$$F = 0.823\sigma_c + 12.675 \quad (R^2 = 0.979) \quad (25)$$

式中, M 为钻杆扭矩, σ_c 为煤体强度, F 为钻屑推力, σ_c 为煤体强度。



(a) 钻杆扭矩与煤体强度关系图

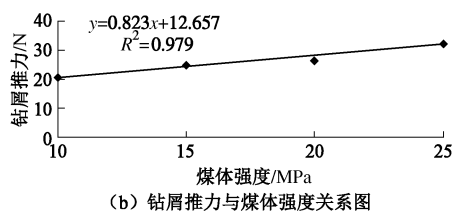


图 10 钻屑扭矩与煤体强度关系曲线图

Fig. 10 Relationship between drilling cutting torque and strength of coal

3.3 钻进速度对钻杆扭矩的影响

对试件施加 2500 kN 的压力, 相应的煤体应力为 10.0 MPa。使用煤电钻按照 0.3, 0.2, 0.15 m/min 3 个不同的推进速度分别进行钻屑试验, 钻孔深度均为 480 mm。

钻屑扭矩的变化规律见图 11, 可以看出, 钻进速度对钻杆扭矩影响很大。不同推进速度条件下, 钻进相同孔深时, 用时不等, 钻杆扭矩和钻屑推力也不同。同种煤岩体材料, 相同压力条件下, 钻进速度越快, 钻杆扭矩和钻屑推力越大, 反之, 钻杆扭矩和钻屑推力越小。

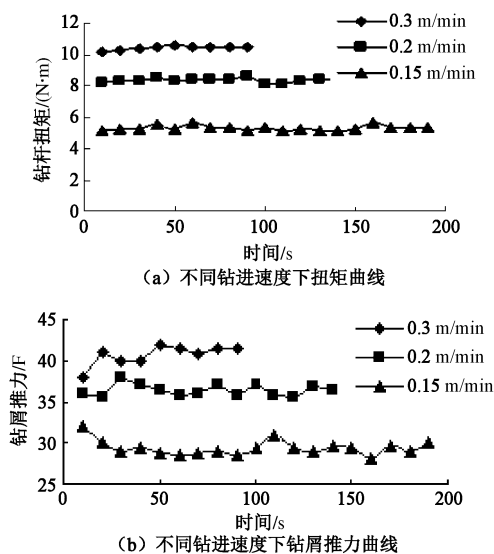


图 11 不同钻进速度下钻屑扭矩曲线图

Fig. 11 Curves of drilling pipe torque under different speeds

4 结 论

在对钻屑扭矩进行理论分析的基础上, 采用自行设计的扭矩-推力测试装置对大尺寸煤样相似材料试件进行了不同煤体法向应力、不同煤体强度、不同钻进速度下的扭矩-推力测试试验, 重点研究了单一因素影响下煤体应力、煤体强度与钻杆扭矩、钻屑推力的关系, 同时分析了推进速度对钻屑扭矩的影响, 研究成果对冲击地压预测预报的理论研究和生产实践具有一定的指导意义。得到以下 3 点主要结论。

(1) 建立钻屑扭矩力学模型, 揭示钻屑扭矩与煤体应力、煤体强度、钻进速度有关, 钻屑扭矩能够反应煤体应力、煤体强度的大小和变化规律, 因此可用钻屑扭矩法来测试煤体应力、煤体强度的大小和变化规律, 进而进行冲击地压等煤岩动力灾害危险性预测。

(2) 一系列钻屑扭矩试验结果表明, 钻杆扭矩随煤体应力的增加而大致呈线性增加趋势, 钻屑推力随煤体应力的增大而大致呈线性减小趋势; 钻杆扭矩和钻屑推力均与煤体强度呈线性递增关系; 钻孔过程中, 钻进速度对钻杆扭矩有较大影响, 同种煤岩体材料, 相同压力条件下, 若推进速度快, 则钻杆扭矩偏大, 反之钻杆扭矩偏小。钻屑扭矩试验结果与理论分析的预测结果一致。

(3) 目前关于钻杆扭矩法的研究尚不十分完善, 为使测定更加可靠, 在今后的研究中尚需对测试装置和方法作进一步改进, 使其成为一种更加简便、准确度更高的预测冲击地压技术手段。

参考文献:

- [1] 潘一山. 冲击地压发生和破坏过程研究[D]. 北京: 清华大学, 1999. (PAN Yi-shan. Study on rock burst initiation and failure propagation[D]. Beijing: Tsinghua University, 1999. (in Chinese))
- [2] 齐庆新, 窦林名. 冲击地压理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008. (QI Qing-xin, DOU Lin-ming. Theory and technology of rock burst[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2008. (in Chinese))
- [3] 卫修君, 林柏泉. 煤岩瓦斯动力灾害发生机理及综合治理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (WEI Xiu-jun, LIN Bo-quan. Occurrence mechanism of coal, rock, gas dynamic disasters and comprehensive treatment technology[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [4] 曲效成, 姜福兴, 于正兴, 等. 基于当量钻屑法的冲击地压监测预警技术研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2343 - 2351. (QU Xiao-cheng, JIANG Fu-xing, YU Zheng-xing, et al. Rock burst monitoring and precaution technology based on equivalent drilling research and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2343 - 2351. (in Chinese))
- [5] 潘一山. 钻屑法预测指标的理论研究[J]. 阜新矿业学院学报, 1985(增刊): 25. (PAN Yi-shan. Theoretical study on forecast indexes of method of drilling bits[J]. Journal of Fuxin Mining Institute, 1985(S0): 25. (in Chinese))
- [6] 陈 锋, 潘一山, 李忠华, 等. 利用钻屑法对卸压钻孔措施效果的分析评价[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 266

- 270. (CHEN Feng, PAN Yi-shan, LI Zhong-hua, et al. Analysis and evaluation of effects of borehole pressure relief measures by drilling cutting method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 266 - 270. (in Chinese))
- [7] 杨光宇, 姜福兴, 王存文. 大采深厚表土复杂空间结构孤岛工作面冲击地压防治技术研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(1): 189 - 194. (YANG Guang-yu, JIANG Fu-xing, WANG Cun-wen. Prevention and control technology of mine pressure bumping of coal mining face in seam island based on deep mining and thick topsoil of complex spatial structure of overlying strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(1): 189 - 194. (in Chinese))
- [8] 潘一山, 徐连满. 钻屑温度法预测冲击地压的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **32**(12): 2228 - 2232. (PAN Yi-shan, XU Lian-man. Experimental investigation on temperature of drilling cuttings to predict rock burst[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **32**(12): 2228 - 2232. (in Chinese))
- [9] MELLINGER J C, OZDOGANLAR O B, DEVOR R E, et al. Modeling chip-evacuation forces and prediction of chip-clogging in drilling[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, ASME, 2002, **124**: 605 - 613.
- [10] MELLINGER J C, OZDOGANLAR O B, DEVOR R E. Modeling chip-evacuation forces in drilling for various flute geometries[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, ASME, 2003, **125**: 405 - 415.
- [11] 徐小荷, 余 静. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984. (XU Xiao-he, YU Jing. Rock fragmentation[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984. (in Chinese))
- [12] 赵金昌. 高温高压条件下冲击一切削钻孔破岩实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010. (ZHAO Jin-chang. Experimental research on rock breaking by impacting-cutting drilling under high-temperature and high-pressure condition[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [13] 陈仕茂. 难切削加工材料螺旋铣孔切削动力学及其试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2009. (CHEN Shi-mao. Dynamics and experiment research of hole making process by helical milling on difficult machining materials[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese))
- [14] 张壮志, 吕晋英. 采用弹性理论分析切削具的应力[J]. 煤矿机电, 1997(4): 16 - 18. (ZHANG Zhuang-zhi, LÜ Jin-ying. Measurement and control of the jet flotation column[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 1997(4): 16 - 18. (in Chinese))
- [15] 赵伏军. 动静载荷耦合作用下岩石破碎理论及试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004. (ZHAO Fu-jun. Theoretical and experimental research on rock fragmentation under coupling dynamic and static loads[D]. Changsha: Central South University, 2004. (in Chinese))
- [16] 周志雄, 袁建军, 林 丞. 微钻头螺旋槽的数学模型及其 CAD 方法[J]. 中国机械工程, 2000, **11**(11): 1284 - 1289. (ZHOU Zhi-xiong, YUAN Jian-jun, LIN Cheng. Mathematical model and its CAD approach for flute machining of micro-drill[J]. China mechanical engineering, 2000, **11**(11): 1284 - 1289. (in Chinese))
- [17] 王 昕. 振动钻削新钻削力模型及定、变参数振动钻削的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004. (WANG Xin. Study on new drilling force model of vibration drilling and vibration drilling with invariable parameter and variable parameter[D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese))