

# 裂隙煤体渗流力学特性试验研究

罗世林, 万文, 赵延林, 唐劲舟

(湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;  
湖南科技大学 煤矿安全开采技术 湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 煤体裂隙的存在会严重影响其渗流特性. 基于裂隙中的水流运动规律, 通过施加平行于裂隙面和垂直于裂隙面 2 种应力不同方向来研究不同荷载方向和大小对含裂隙煤体渗流特性的影响. 试验结果表明: (1) 当应力方向垂直于裂隙面即时, 试样渗透系数会随着应力的增大而减少, 且加载初期下降速率较快, 之后下降速率逐渐减少, 渗透系数与法向有效应力呈负指数关系. (2) 当应力方向平行裂隙面时, 由于试样的有效水力裂隙宽增大, 阻碍流体流过的能力降低, 因此渗透系数会相应的增大, 且渗透系数与侧向有效应力呈指数关系. 在试验的基础上利用专业绘图软件绘图并对 2 类数据拟合所建立的负指数和指数关系式能很好的反应渗透系数与有效应力的关系.

**关键词:** 岩石力学; 含裂隙煤体; 渗透系数; 渗流试验

**中图分类号:** TD315      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2016)01-0011-06

## Experimental study on permeability of fractured coal

LUO Shilin, WAN Wen, ZHAO Yanlin, TANG Jinzhou

(School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
Hunan Provincial Key Laboratory of Safety Mining and Technique of Coal Mine, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** The presence of coal fractures will seriously affect its seepage characteristics. This paper, based on flow law of fracture water, studies the influence of loading direction and size on fractured coal seepage law by two kinds of axial and lateral loading. Results show that: (1) When applying an axial stress, the specimen permeability coefficient will decrease with the increase of stress, at loading initial the rate of decline is faster, then gradually reduce the rate of decline. The relationship between the permeability coefficient and axial effective stress is negative exponential; (2) When the lateral stress is applied, due to the effective hydraulic aperture of the sample increases, the ability to hinder fluid flows is reduced. Therefore, correspondingly increases of the permeability coefficient, the relationship between permeability coefficient and lateral effective stress is exponentially. On the basis of the experiment, negative exponential and exponential relationship can be a good response relationship between permeability coefficient and effective stress which are established by using professional graphics software to fitting two types of data.

**Key words:** rock mechanics; fractured coal; permeability coefficient; seepage test

随着煤矿开采深度不断增加, 各类煤矿灾害的发生频率也在逐渐增加, 其中突水便是煤矿重大灾害之一. 防范和遏制煤矿重大突水事故历来是各类煤矿企业煤矿安全监察部门、煤炭生产管理部门、各级政府管理机构落实安全生产责任做好隐患排查工作的重中之重<sup>[1]</sup>. 众多研究表明: 煤层厚度、渗流特性、边界压力等是决定矿井突水的关键因素, 因此研究不同应力条件下煤体所表现出来的的渗流特性具有十分重要的科学意义和工程参考价值.

收稿日期: 2015-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274097, 51174088); 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ2067); 湖南省教育厅资助项目(13A020)

通信作者: 万文(1968-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 教授, 研究方向: 岩石力学. E-mail: wanwen68@163.com

在研究裂隙煤岩体渗透特性方面,国内外众多学者专家做了大量研究.常宗旭<sup>[2]</sup>研究了裂隙渗透系数与三轴应力的耦合关系,认为侧向应力对裂隙渗透系数的影响规律类似于法向应力,即渗透系数与应力呈指数函数关系;曾亿山<sup>[3]</sup>等通过室内试验研究了不同侧向应力和加载条件下裂隙流量的变化规律,并提出了相应的经验公式,其结果表明裂隙流量随法向应力的增加而减少,随侧向应力的增加而增加;赵阳升<sup>[4]</sup>给出了三轴应力作用下裂隙渗透系数的经验公式,指出裂隙渗透系数与法向应力和侧向应力均呈负相关关系;于洪丹<sup>[5]</sup>通过一系列裂隙岩石的三轴应力作用下的渗流试验给出了加、卸载情况下岩石渗透率与有效围压的关系式.但是上述研究工作均未考虑渗透压对岩石裂隙宽度变化的影响,因此本文在上述研究工作的基础上利用高精度试验仪器,通过对含裂隙煤体进行一系列的不同法向和侧向压力下的加载试验研究,揭示了煤体渗透性在不同荷载以及不同加载方向下的变化规律,并根据试验结果,建立了加载过程中含裂隙煤体的渗透特性与应力的关系.

## 1 试验设计

### 1.1 试件制取

在河南新安煤矿 15110 工作面取得原煤试样,煤体强度低,抗拉强度 0.07 MPa,抗压强度 0.54 MPa,脆性大、裂隙发育,天然孔隙比为 0.82,孔隙率为 0.45.为防止原煤与空气中的氧气接触而变质,故将从工作面取得的原煤试样用保鲜膜包裹,同时根据煤块的产状确定煤样的节理方向及裂隙节理平面(见图 1).其中线条所标出的平面即为裂隙平面.试样体积为 10 000 cm<sup>3</sup>,质量为 12.990 kg.

由于煤岩承载能力低、脆性较大、结构易破碎等特点因此无法直接在轴压作用下进行原煤的渗透试验研究,同时也不利于加工成标准试件,导致实验难以进行.又因酚醛树脂具有一定的抗拉(41 MPa)及抗压强度(59 MPa),且试样成形后酚醛树脂表现为透明色,故采用酚醛树脂包裹原煤的方法能有效的解决原煤受力易崩解的特点,同时便于观察试验过程中水的渗流情况(见图 2),且包裹前浸湿煤样 3 h 以上,排除试验中试样吸水误差,再进行测定渗透系数的试验.

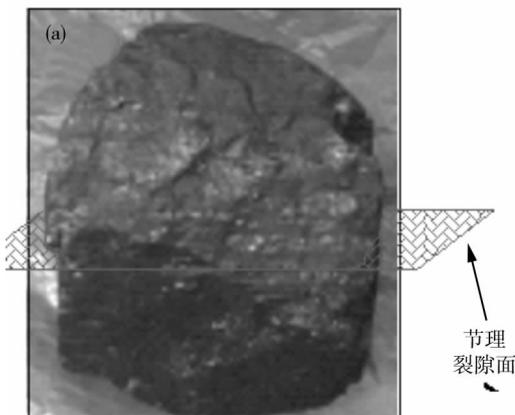


图 1 原煤试样

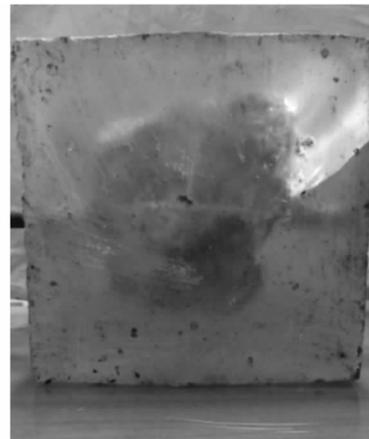


图 2 标准试样

### 1.2 试验方法

将原煤试样加工研制成功尺寸为 20 cm × 20 cm × 20 cm 的标准试样 2 组,每组试样个数为 3 个,编号分别为 M01, M02, M03, M04, M05, M06,利用高精度多功能 RYL-600 剪切流变仪对含裂隙煤样进行渗流试验,对同一编号试件,在不同应力梯度下测定 3 组值进行平均.该仪器测控精度为 ±2%,围压分辨率为 0.1 kPa,传感器的量程范围为 0 ~ 5 mm,径向为 0 ~ 3 mm,分辨精度为 0.000 1 mm.保持室温为 20 °C 左右,制定 2 种试验方案对含裂隙煤体进行渗透特性试验研究.

1) 应力方向垂直于裂隙平面(见图 3),其大小分别为  $\sigma_1 = 1, 2, 3$  MPa,侧向压力  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ,在平行裂隙面方向一侧施加进水压力  $P$ ,其大小分别为  $P = 0.5, 1.0, 1.2, 1.5$  MPa,同时利用高精度皂泡流量计对试样另一侧进行出水量的测量,待出水流量稳定后,统计透水量.测量完成后重复上述加载步骤,进行下一荷载作用下的透水量的量测.



图 3 垂直加载

2) 应力方向平行于裂隙平面,其大小分别为  $\sigma_2 = 1, 2, 3$  MPa, 法向应力  $\sigma_1$  和侧向应力  $\sigma_3$  均为 0, 其余与方案一保持一致。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 渗流理论

目前,在描述裂隙介质中的流动定律方面,单一裂缝水力学模型在裂隙渗流研究中运用得最为广泛,由 Tsang(1987)年提出来的沟槽流模型定性地描述了裂隙过流能力与裂隙宽度之间的关系,称其为立方定律,其渗流方程可以写为

$$Q = K_f A J = K_f A \frac{\Delta H}{\Delta L} = \frac{g d^3}{12v} A \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (1)$$

式中,  $Q$ : 单位时间流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $v$ : 运动粘度 ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $v = u/\rho$ ;  $u$ : 水的动力粘度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ) (20 °C 时水的动力粘度为  $1.005 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ );  $\rho$ : 液体密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $g$ : 重力加速度 ( $g = 9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ );  $J$ : 水力梯度;  $\Delta L$ : 渗流路径长度 (m), 该试验中取值为 20 cm;  $\Delta H$ : 试样两端水头 (m);  $A$ : 渗透截面积 ( $\text{m}^2$ ), 该试验中取值为  $500 \text{ cm}^2$ ;  $d$ : 裂隙宽度 (m)。

立方定律是基于光滑平行板的层流态推导所得,但是在实际情况下,绝对光滑、平直的理想裂隙是不存在的,天然裂隙面的开度在空间上往往表现为小范围的不平整或者大范围的起伏,裂隙宽度  $d$  是沿程变化的,因此立方定律在此的适用范围受到限制。但是根据流量等效的方法,且引入等效水力隙宽  $d_h$  的概念,将立方定律中的几何平均隙宽  $d$  等效为等效水力隙宽  $d_h$  便可解决上述困难。等效水力隙宽  $d_h$  为试验所得裂隙渗流量代入立方定律反求得到的裂隙宽度。式(1)可以改写为

$$Q = K_f A J = K_f A \frac{\Delta H}{\Delta L} = \frac{g d_h^3}{12v} A \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (2)$$

通过试验反求得到含裂隙煤体试样的等效水力隙宽为

$$d_h = \left( \frac{12 Q u \Delta L}{\Delta H A g \rho} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

在试验过程中对同一煤样单位时间流量与水压的关系进行了测量,两者之间近似呈现线性关系(见图4),拟合相关系数为 0.904 2,且经过计算知其雷诺系数  $Re < 2100$ , 因此可认为试验符合达西定律。根据 Darcy 定律计算含裂隙试样渗透率公式为

$$k = \frac{Q u \Delta L}{A \Delta H} \quad (4)$$

将式(1)代入式(4),可得渗透系数  $K_f$  ( $k = \rho g K_f / u$ ) 与等效水力隙宽  $d_h$  的关系为

$$K_f = \frac{d_h^3}{12} u = \frac{Q u^2 \Delta L}{\Delta H A g \rho} \quad (5)$$

### 2.2 加载试验数据分析

上述 2 个试验方案试验结果见表 1

表 1 渗流试验结果

应力方向	试样编号	应力/MPa	流量/(mL/min)			
			0.5 MPa	1.0 MPa	1.2 MPa	1.5 MPa
垂直于 裂隙面	M01	1	4.2	5.9	7.7	12.2
	M02	2	3.7	4.9	6.2	9.3
	M03	3	3.0	4.1	4.9	7.0
平行于 裂隙面	M04	1	6.8	9.3	13.0	18.0
	M05	2	7.7	8.5	15.3	22.0
	M06	3	9.0	13.0	19.0	31.0

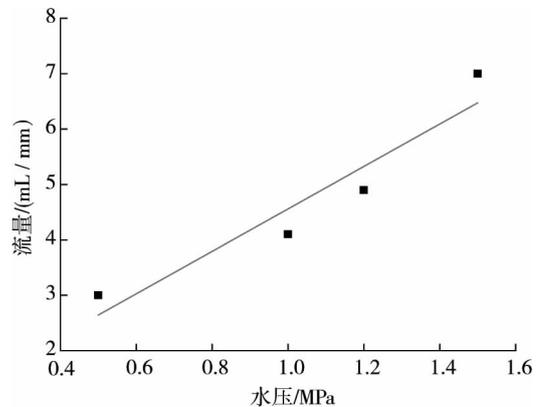


图 4 轴向压力 3 MPa 下水压 - 流量关系曲线图

从表 1 可以看出当应力大小不变(应力方向垂直于裂隙面),渗透压增加时,试样在单位时间的渗水

量增加,这是因为随着渗透压的增加,压力梯度会相应增加,从而导致裂隙的渗流速度增加.当渗透压不变时,试样在单位时间的渗水量会随着荷载的增加而降低,这是因为随着荷载的增加,裂隙面会发生复杂的弹塑性变形,其中个别凸起被压碎,并且在挤压的过程中,裂隙宽度会减少,上、下裂隙表面的接触面积会增加,导致裂隙渗透系数减少.其中渗透压为 1.5 MPa 应力为 1 MPa 时的渗流量是渗透压为 0.5 MPa 应力为 3 MPa 的渗流量的 4 倍.

当应力方向平行于裂隙面的时候,无论是应力或者渗透压的增加都会使得渗流量相应增大,这是因为试样在在侧向挤压的过程中会发生膨胀变形,裂隙与裂隙之间会贯通连接,形成贯通裂隙,渗流通道也相应增加.当试样发生膨胀变形后裂隙宽度会相应增加,阻碍流体通过的能力会减弱.

为进一步说明渗透系数与应力的关系,且由于本试验中煤样被树脂包裹,试验过程中作用在煤样上的应力将会一定程度上小于实际施加的荷载,因此将试验数据进行进一步处理,本文引入由 Robinson, Handin<sup>[6]</sup> 等人在研究岩石的有效应力时提出的适用于岩石的有效应力公式:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - ap\delta_{ij} \quad (6)$$

式中,  $a$ : 等效孔隙压系数,取决于岩石的孔隙、裂隙发育程度,此处取 0.54;  $p$ : 渗透压;  $\delta_{ij}$ : Kroneker 符号,此处取值为 1.

图 5 和图 6 分别给出了不同加载方向的有效应力 - 等效水力宽度及不用有效应力 - 渗透系数变化曲线.

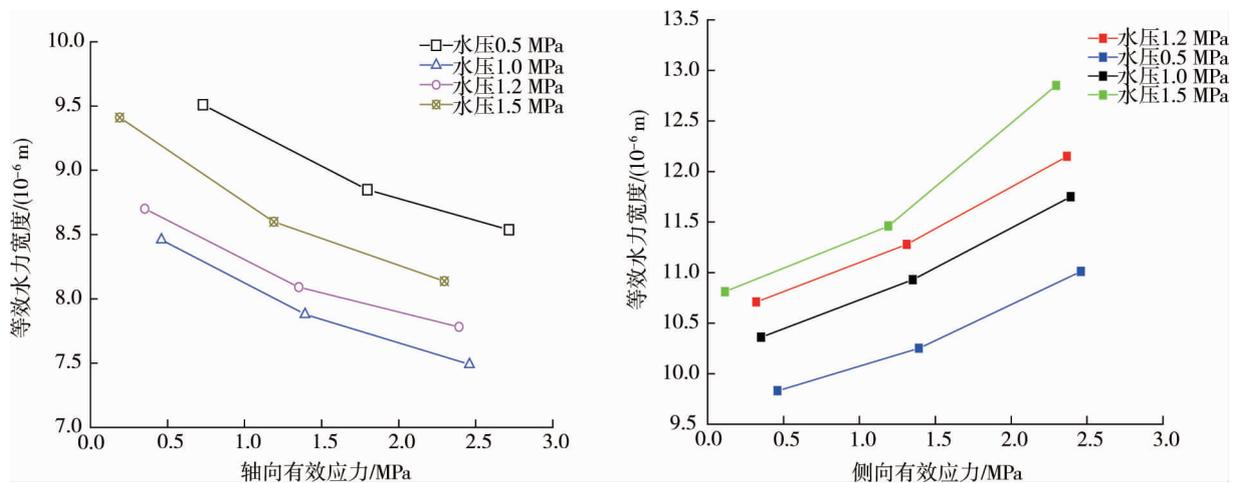


图 5 有效应力 - 等效隙宽变化曲线

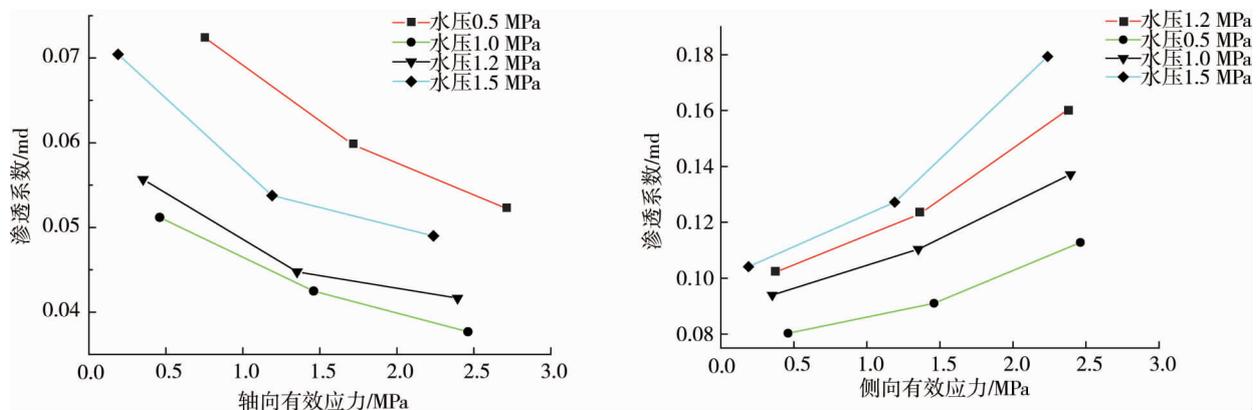


图 6 有效应力 - 渗透系数变化曲线

由试验曲线可以看到:裂隙煤样的等效水力宽度以及渗透系数会随着荷载的变化而变化.当荷载方向平行裂隙平面时,试样的等效隙宽会随着荷载的增大而增大,这是因为试样受到侧向挤压时,试样在轴向方向产生拉伸变形,试样裂隙表面上相互接触的面积越来越小,其相互作用力也逐渐减少,裂隙与裂隙之间贯通连接,渗流通道相应增加;同时水压在一定程度上也会使试样产生轴向膨胀变形而造成裂隙宽度增加.

当试样受到轴向荷载时,试样的等效水力宽度和渗透系数总体上会随着荷载的增大而减少,因为在荷载作用下试样的俩裂隙面会发生复杂的弹塑性变形,在这个过程中裂隙面上个别凸起接触面被压碎,裂隙面的接触面积增大,在一定意义上裂隙的“刚度”逐渐增大,抵抗变形的能力越强,等效水力宽度逐渐缓慢减少,试样的渗透系数也缓慢降低;但是实际上试样不仅受到应力场的影响,同时还受到渗流场的影响,轴向应力使得裂隙宽度减少,水压使得试样膨胀变形,增大裂隙宽度,正是由于在渗流场和应力场的耦合作用下出现低渗透压的情况下其等效水力隙宽反而较大的现象。

由式(5)可知渗透系数与等效水力隙宽呈三次函数关系,故其变化趋势与等效水力隙宽一致。

### 3 渗透系数的流固耦合方程

通过直接试验法测量渗透系数,国内外众多学者曾试图用不同函数形式来描述裂隙岩石的渗透系数与应力的关系:

1) 郑少河<sup>[6]</sup>等提出了幂函数关系:

$$K = K_0 \sigma_n^{-\alpha}. \quad (7)$$

2) Louis C<sup>[7]</sup>提出了指数函数关系:

$$K = K_0 + a\sigma_n + b\sigma_n^2 + \dots \quad (8)$$

式中,  $K$ : 裂隙岩石渗透系数;  $K_0$ : 初始渗透系数;  $\sigma_n$ : 法向应力;  $a, b, \alpha$ : 待定参数。

上述关系式均未涉及渗透系数与孔隙水压的关系,而在实际情况下渗透系数与裂隙所受到的应力与孔隙水压有着密切关系. 刘才华<sup>[8]</sup>等的研究工作也证明了孔隙水压的存在对含裂隙岩石渗透率具有重要影响. J B Walsh<sup>[9]</sup>从应力角度对单一裂隙的渗透规律做了较为详细的研究,其研究表明式(9)成立:

$$K \propto (\sigma_n - \xi p_f)^{-1}. \quad (9)$$

式中,  $p_f$ : 裂隙中的孔隙水压力;  $\xi$ : 裂隙中的连通系数。

考虑到渗透系数与应力以及孔隙水压密切相关,且有效应力又与渗透系数存在明显函数关系,因此本文采用有效应力和渗透系数来进行含裂隙煤样渗透性的分析. 仿照式(7)和式(9)并结合赵阳升<sup>[6]</sup>提出的煤样渗透系数与体积应力和孔隙压按指数规律拟合所获得的渗透系数公式,渗透系数和有效应力的关系可以近似用指数关系来描述:

$$K = a \exp(-b\sigma'_c). \quad (10)$$

式中,  $a, b$ : 拟合常数;  $K$ : 渗透系数,单位 md(毫达西);  $\sigma'_c$ : 应力大小,单位 MPa;  $a$ : 等效孔隙压系数,此处取值为 0.54;  $p$ : 水压,单位 MPa。

按照式(10)对2种不同加载方向下渗透系数与有效应力的关系进行拟合分析,其拟合曲线如图7所示,关系式分别如下:

1) 当施加的应力方向为垂直于裂隙面时,  $K = 0.0718 \exp(-0.2311\sigma'_c)$ , 如图7(a)所示,且拟合相关系数为 0.9264。

2) 当施加的应力方向为平行于裂隙面时,  $K = 0.7778 \exp(-0.2748\sigma'_c)$ , 如图7(b)所示,且拟合相关系数为 0.9093。

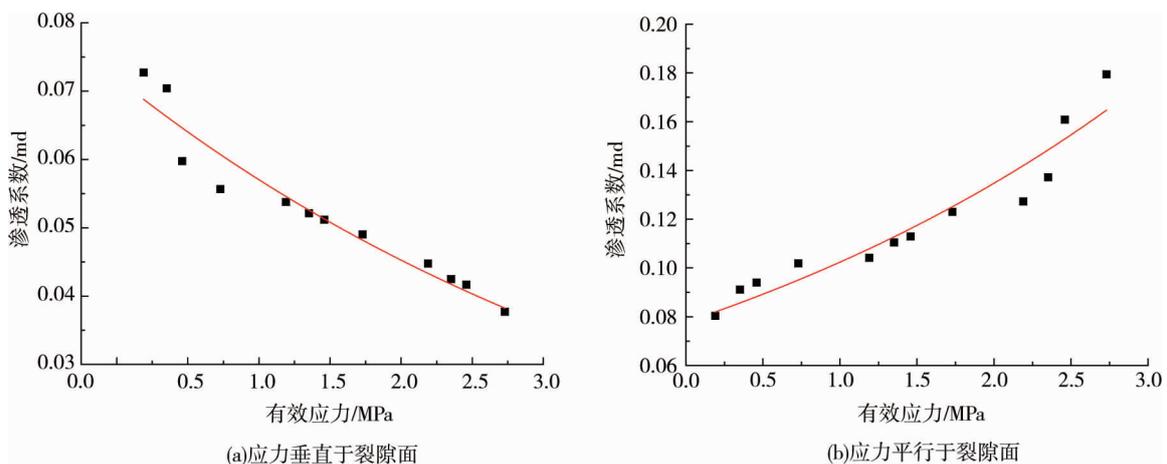


图7 有效应力-渗透系数的曲线拟合

## 4 结论

1) 当荷载方向垂直于裂隙面时, 试样渗透系数会随着应力的增大而减少, 且加载初期下降速率较快, 之后下降速率逐渐减少, 渗透系数与轴向有效应力呈负指数关系.

2) 当荷载方向平行裂隙面时, 由于试样的有效水力隙宽增大, 阻碍流体流过的能力降低, 因此渗透系数会相应的增大, 且渗透系数与侧向有效应力呈指数关系.

### 参考文献:

- [1] 靳德武, 刘英锋, 刘再斌, 等. 煤矿重大突水灾害防治技术研究新进展[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(1): 25 - 29.
- [2] 常宗旭, 赵阳升, 胡耀青, 等. 三维应力作用下单一裂隙渗流规律的理论与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 620 - 624.
- [3] 曾亿山, 卢德唐, 曾清红, 等. 单裂隙流 - 固耦合渗流的试验研究[J]. 实验力学, 2005, 20(1): 10 - 16.
- [4] 赵阳升, 杨栋, 郑少河, 等. 三维应力作用下岩石裂隙水渗流物性规律的实验研究[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 1999, 29(1): 82 - 86.
- [5] 于洪丹, 陈飞飞, 陈卫忠, 等. 含裂隙岩石渗流力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(s1): 2788 - 2795.
- [6] 赵阳升. 矿山岩石流体力学[M]. 太原: 煤炭工业出版社, 1994.
- [7] 郑少河, 赵阳升, 段康廉. 三维应力作用下天然裂隙渗流规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 133 - 136.
- [8] Louis C. Rock hydraulics in rock mechanics[M]. New York: Springer - Verlag, 1974: 299 - 387.
- [8] 刘才华, 陈从新. 三轴应力作用下岩石单裂隙的渗流特性[J]. 自然科学进展, 2007, 17(7): 989 - 994.
- [9] Walsh J B. Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(5): 429 - 435.