

张天军,张磊,李树刚,等. 含孔试样渐进性破坏的表面变形特征[J]. 煤炭学报,2017,42(10):2623-2630. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0022

ZHANG Tianjun,ZHANG Lei,LI Shugang, et al. Characteristics of the surface deformation of specimens with a hole during the progressive failure[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(10):2623-2630. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0022

含孔试样渐进性破坏的表面变形特征

张天军^{1,2},张磊²,李树刚²,张超²,宋爽²,包若羽²

(1. 西安科技大学 理学院,陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西 西安 710054)

摘要:瓦斯抽采钻孔周裂隙漏气是抽采失效的主要原因之一,孔周裂隙扩展在煤体破坏的过程中表现孕育、稳定扩展及迅速扩展3个阶段。为探究孔周裂纹在松软煤体不同破坏阶段的发展特征,开展含孔试样渐进性破坏过程中的孔周裂纹扩展规律研究。将石膏与水以质量比7:3混合制成类软煤含孔方形试样,进行单轴压缩试验并采用数字散斑相关测量方法(DSCM)获取试样表面全场变形。基于此,提出了利用DSCM系统确定应力阈值的方法,并将其用于含孔试样渐进性破坏过程的孔周变形精细化分析,利用该方法所确定的应力阈值可将试样的破坏过程划分为5个阶段,通过提取与计算分析试样表面全场变形数据,得到在不同阶段内试样表面相对位移、以及孔周位移。结果表明:试样表面相对位移发展历经缓慢降低,加速降低以及迅速降低3个阶段,其中加速降低和迅速降低阶段与应力-应变曲线的裂纹稳定扩展和裂纹加速扩展对应;在压缩过程中,由于孔周对称移动造成孔周表面拉伸和压缩错动,最终在表面形成主拉伸裂纹和法向剪切裂纹。

关键词:裂纹扩展;数字散斑;渐进性破坏;应力阈值;孔周位移

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)10-2623-08

Characteristics of the surface deformation of specimens with a hole during the progressive failure

ZHANG Tianjun^{1,2},ZHANG Lei²,LI Shugang²,ZHANG Chao²,SONG Shuang²,BAO Ruoyu²

(1. College of Science,Xi'an University of Science and Technology,Xi'an 710054,China; 2. College of Safety Science and Engineering,Xi'an University of Science and Technology,Xi'an 710054,China)

Abstract:The leak around the gas drilling borehole is one of the major reasons causing the drainage failure, and three stages (crack initiation stage, stable growth stage and unstable cracking stage) of the crack propagation around the gas drilling borehole are performed under the failure of coal. In order to find out the characteristics of crack propagation at different stages, a study on the crack propagation around the gas drilling borehole during the progressive failure was carried out. Plaster and water are blended in a mass ratio of 7 : 3 to make soft coal like blocks, and uniaxial compression tests were performed with digital speckle correlation method (DSCM) getting the surface deformation of specimens. Based on this, a method determining the stress threshold by DSCM was proposed, and the deformation around the hole in the specimens' progressive failure was analyzed though this method. The sample failure process was divided into five stages by the stress threshold determined by this method, then the full-field deformation data were calculated to obtain the surface relative displacement, displacement around the hole and crack mouth opening displacement. The results show that the development of the surface relative displacement can be divided into the gradually decrease stage,

收稿日期:2017-01-05 修回日期:2017-05-11 责任编辑:毕永华

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51374168,51504189);国家自然科学基金科学仪器基础研究专项资助项目(51327007)

作者简介:张天军(1971—),男,陕西临潼人,教授。E-mail:tianjun_zhang@126.com。通讯作者:张磊(1990—),男,湖南益阳人,博士研究生。E-mail:lei_zhang_xust@163.com

the aggravated decrease stage and the rapidly decrease stage, among that the aggravated decrease stage and the rapidly decrease stage are corresponded with the stable growth stage and unstable cracking stage which are found in stress-strain curve. As the symmetrical movement around the hole, tensile and compression state are formed which finally results in the tensile crack and the normal shear crack formed on the surface.

Key words: crack propagation; digital speckle correlation method; progressive failure; stress threshold; displacement around the hole

瓦斯抽采是治理和利用煤矿瓦斯的根本措施和主要途径,但在松软煤层中瓦斯抽采率普遍较低,究其原因主要为孔壁稳定性差,裂隙发育导致钻孔周边裂隙漏气^[1]。为解决钻孔周边漏气问题,前人从封孔材料^[2-3]、技术^[4-5]以及机理^[6]等多个方面开展了大量研究,但受钻孔变形及漏气机理研究手段所限,仍未阐明钻孔周边变形规律。基于此,开展含孔试样破坏过程中的表面变形研究有助于揭示孔周变形机理及漏气通道形成过程,为预防和处理抽采失效问题提供理论依据。

为获取含孔试样的破坏规律,LAJTAI等^[7]开展了大量含孔石膏试样的压缩试验,研究将含孔试样破坏形成的裂纹按形成过程划分为4类,并详细描述各类裂纹出现的状态。MARTIN^[8]将4类裂纹按产生位置归纳为3类(远场裂纹、主裂纹以及破碎区域),并在此基础上开展岩石破坏的渐进性研究,指出在长时间压缩过程中的试样的破坏应力与单轴压缩中的关键应力门槛值(裂纹起始应力 σ_{ci} ,裂纹破坏应力 σ_{cd} 及峰值应力 σ_f)存在对应关系,可用裂纹破坏应力 σ_{cd} 近似表征试样长期强度,大大缩短了试样长期强度研究时间。接着,傅宇方等^[9]在文献[7-8]的基础上采用RFPA^{2D}对不同围压条件下的脆性岩石孔周的裂纹演化规律进行了数值模拟研究,验证了三类破坏模式的存在。马少鹏等^[10]采用数字散斑相关测量方法(DSCM),对含孔洞的大理岩进行岩石变形观测,从应变局部化的角度解释岩石破坏过程中的裂纹扩展过程。朱谭谭等^[11]对含孔洞的砂岩开展了单轴压缩试验,得到宏观层面上裂隙倾角和破坏类型的关系。另一方面研究岩石渐进性破坏过程,EBERHARD等^[12]采用声发射监测系统对岩石破坏的过程进行了观测,提出并用移动回归法处理应变数据,通过声发射事件和振铃计数同时分析裂纹起始应力 σ_{ci} 的特征。周火明等^[13]对玄武岩进行单轴压缩,采用CT技术与声发射技术结合的观测方法,记录破坏过程中的CT图像以及声发射事件累计数,深入研究了在10%、20%、50%、90%峰值应力水平的裂纹的扩展情况。张晓平等^[14]对丹巴二云英片岩进行单轴压缩试验,研究其渐进性破坏过程,得到了 σ_{ci} 及 σ_{cd} 等

渐进性破坏指标。刘宁等^[15]采用声发射技术确定 σ_{ci} 、 σ_{cd} ,研究结果表明在不同围压下3种强度与围压近似呈线性关系,而 σ_{cd}/σ_f 、 σ_{ci}/σ_f 具有较高的稳定性, σ_{cd}/σ_f 保持在0.64~0.88,而 σ_{ci}/σ_f 保持在0.40~0.55。周辉等^[16]认为文献[12-13]中采用的声发射确定应力门槛值的方法存在较大的主观性,认为确定裂纹体积应变的应采用裂纹应变模型。

以上研究已经基本确定了含孔试样破坏过程中产生的裂纹类型,且根据不同方法提出了计算岩石渐进性破坏应力门槛值的方法。但用DSCM系统确定这些应力门槛值的研究较为少见,同时含孔试样在破坏的不同阶段内的裂纹扩展规律还未有公认的结论。为探究含孔试样在破坏的不同阶段内的裂纹扩展规律,本文对含孔试样进行单轴压缩试验,并采用DSCM系统详细记录试样破坏过程中的图像,获得试样的全应力-应变曲线。提出基于DSCM的渐进性破坏分区方法,并将其应用于计算应力门槛值。为含孔岩石渐进性破坏过程中的裂纹扩展、DSCM系统应用研究提供参考。

1 数字散斑相关测量方法

数字散斑相关测量方法(Digital Speckle Correlation Method,简称DSCM),又被称为数字图像相关方法(Digital Image Correlation,简称DIC),是一种能够获取试样表面变形场的非接触测量方法。该系统主要由采集系统和数据存储系统构成,如图1所示。该试验系统采用计算视觉原理,通过差分法、模式匹配等算法,匹配采集区域的数字散斑图形,计算得到全场变形信息。其变形测量结果在1667 pixel/mm分辨率下,误差约为30 nm^[17]。

在试验过程中系统实时采集试样表面图像,并以数字图像的方式存储在计算机内。使用VIC-3DTM系统计算得到全场应变并以矩阵的形式输出。假设每幅图像中水平方向含有*i*个分析点,竖直方向上还有*j*个分析点,则*t*时刻采集到图像经过计算后得到多维矩阵 R_t 。

$$R_t(X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}, U_{ij}, V_{ij}, W_{ij}, \epsilon_{xx_{ij}}, \epsilon_{yy_{ij}})$$

式中, $X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}, U_{ij}, V_{ij}, W_{ij}, \epsilon_{xx_{ij}}, \epsilon_{yy_{ij}}$ 分别为点(*i*,

j) 的 x 坐标, y 坐标, z 坐标, x 方向位移, y 方向位移, z 方向位移, x 方向应变以及 y 方向应变。

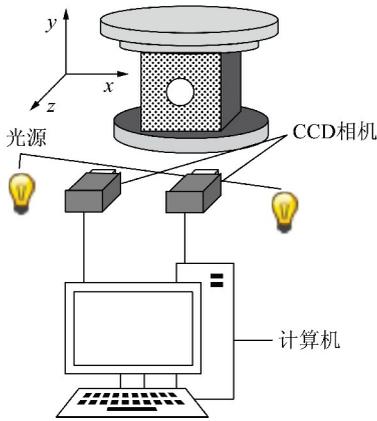


图 1 系统构成

Fig. 1 System structure

2 渐进性破坏中的应力门槛值

岩石类材料具有天然孔隙,在压缩破坏过程表现出渐进性,整个破坏过程历经原始裂隙闭合,宏观线弹性,萌生新裂纹,裂纹扩展以及最终试样断裂 5 个阶段。

2.1 应力门槛值的意义

在应力-应变曲线上,用 4 个应力门槛值(弹性起始应力 σ_{ee} , 裂纹起始应力 σ_{ci} , 裂纹破坏应力 σ_{cd} 以及峰值应力 σ_f) 划分这 5 个阶段。 σ_{ee} 为原始裂隙闭合阶段与弹性阶段的分界点,在此之前应力-应变曲线表现出非线性特征,而在此点之后试样近似可以看成是均质的弹性体,曲线表现出明显的线弹性。 σ_{ci} 为新裂纹萌生标志, MARTIN^[18] 通过加卸载循环实验发现 σ_{ci} 与试样的损伤程度无明显关系,其数值在试验中较为稳定。SCHMIDTKE^[19] 对 140 个试样进行长期加载试验发现峰值应力 σ_f 受加载时间的影响较大,仅在对数空间服从线性分布。MARTIN^[18] 对上述数据再次整理发现,当加载达到约 70% σ_f 时,试样即发生断裂。通过分析认为 σ_f 在长期加载的条件下不可靠,而裂纹破坏应力 σ_{cd} 一般发生在 70% σ_f ~ 85% σ_f , 可作为试样长期强度的参考。

2.2 基于 DSCM 的应力门槛值计算方法

目前常见的应力门槛值确定方法主要为声发射测试法和应变测量法,但这声发射方法未形成严格的计算规则,具有较大的主观性^[16]。本文基于应变测量法,采用 DSCM 获取的试件表面位移来计算应力门槛值。具体步骤如下:

首先,寻找 σ_f 及 σ_{ee} 。绘制应力-应变的曲线,取

曲线中对应的最大应力记为峰值应力 σ_f ; 同时取曲线中直线段部分的前端对应的应力为 σ_{ee} 。

接着,采用裂隙体积应变曲线确定 σ_{ci} 。在裂纹体积应变变化的过程中,裂纹体积应变在轴向压缩的过程中不断减少,而弹性体积应变在不断压缩。原生裂纹闭合的同时,新的微裂纹产生并成核。裂纹应变的最低点说明,原生裂隙闭合速度小于新裂纹产生,表现出新裂纹产生,故此点可看作为裂纹起始应力。裂隙体积应变 ε_{vc} 根据式(1)^[14,18] 得到。

$$\varepsilon_{vc} = \varepsilon_V - \varepsilon_{Ve} \quad (1)$$

式中, ε_V 为总体积应变; ε_{Ve} 为弹性体积应变。

在单轴压缩下,对方形试样而言,总体积应变、与各应变分量存在如下关系:

$$\varepsilon_V = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (2)$$

其中, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 分别为沿 x, y, z 方向的应变。其中 ε_y 即为轴向应变, ε_x 为横向应变。 ε_x 和 ε_y 均可由 DSCM 直接测得。此外,假定在 Z 方向上的变形前后对称,则 ε_z 可由式(3)计算得到。

$$\varepsilon_z = \frac{2w}{b} \quad (3)$$

式中, w 为试样的 z 向位移; b 为试样的厚度。

而由式(4)^[14,18] 可计算得到 ε_{vc} ,

$$\varepsilon_{vc} = \Delta V / V_{\text{elastic}} = \frac{1 - 2\mu}{E} (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (4)$$

式中, ΔV 为试样体积; V_{elastic} 为弹性体积; E 为弹性模量; μ 为泊松比; σ_1 为轴向应力; σ_3 为围压。

其中, μ 可以通过 DSCM 系统的 $\varepsilon_{xx_{ij}}, \varepsilon_{yy_{ij}}$ 计算得到, E 利用应力-应变曲线确定。

最后,通过表面相对距离曲线确定 σ_{cd} 。在试样的破坏过程中,宏观观测很难确定裂纹扩展导致试样破坏的时刻。由于出现裂纹,直接导致裂纹两侧的位移不连续,裂纹两边的点相对距离增大。故可以用试样表面各点的相对距离来衡量裂纹的扩展情况,寻找相对距离曲线上的变化点对应的应力作为裂纹破应力 σ_{cd} 。

3 松软含孔试样单轴压缩试验

由于松软煤取样困难且不易加工成型,而石膏材料的力学性质与煤岩体比较相近,同时具有强度可调,来源广泛,成本低廉等特点,故本文采用石膏粉末配置试样模拟松软煤岩。

3.1 试验过程

首先,配制试样浆液,浆液为石膏与水以质量比为 7:3 混合而成。接着,将所得浆液浇注于 70 mm × 70 mm × 70 mm 方形试样盒中。随后于浆液中心置入

直径 $\phi = 10$ mm, 高为 100 mm 圆柱体, 以此预制孔洞。最后待试样完全凝固后, 取出圆柱体, 在试样含钴孔的一面喷涂散斑, 所制试样情况见表 1。试验采用 DNS200 电子万能试验机加载, 加载方式为按位移控制, 加载速率为 1 mm/min。使用两组 Pointgrey®

CCD 相机以及 Pentax® 75 mm 镜头采集图像。为防止频闪对数据采集的影响, 光源为两架 OSRAM® 55460 光学仪器灯。加载过程中, 采用 VIC-Snap™ 系统采集图像, 采集频率为 1 Hz。使用 VIC-3D™ 系统计算试件表面位移场及应变场。

表 1 试样尺寸及试验参数

Table 1 Size of samples and experiment parameters

试样编号	弹性模量/MPa	尺寸(mm×mm×mm)	ϕ /mm	骨料状态	加载速率/(mm·min ⁻¹)	加载总时间/s
B3	805.28	70.6×70.0×71.1	9.6	粉末	1.0	201
B5	804.10	71.2×69.3×70.4	9.6	粉末	1.0	172
B6	795.00	70.8×70.4×70.9	9.6	粉末	1.0	176

3.2 试验结果

表 2 中试样 1~3 为山西五阳煤矿煤样, S1~S4 为新疆地区煤样。相对这两种典型的松软煤样, 本文所制试样各参数均介于两种试样之间, 确属于松软煤样的范围, 因此本文所采用配比适合于研究松软煤样。

表 2 软煤单轴压缩试验结果

Table 2 Soft coal sample specification parameters in uniaxial compression test

试样编号	峰值强度/MPa	峰值轴向应变 ϵ_f	弹性模量/MPa
1 ^[20]	3.32	0.029 6	70.00
2 ^[20]	2.76	0.052 5	83.00
3 ^[20]	4.61	0.005 0	184.00
B3	6.06	0.018 0	805.28
B5	6.69	0.018 9	804.10
B6	5.88	0.014 3	795.00
S1 ^[21]	10.91	0.007 7	1 395.00
S2 ^[21]	5.13	0.005 7	1 000.00
S3 ^[21]	9.46	0.005 8	1 595.00
S4 ^[21]	7.04	0.004 7	1 553.00

试样破坏前后照片如图 2 所示, 试样的全应力-应变曲线如图 3 所示。试样的均一性较好, 在 $0.01 < \epsilon < 0.02$ 内达到峰值强度, 其峰值强度范围在 5.8~6.7 MPa 之间, 平均值 6.19 MPa, 最大相差 0.494 MPa, 弹性模量在 795.0~805.3 MPa 之间, 平均值 801.46 MPa, 最大相差 6.46 MPa。

4 渐进性破坏中的表面变形

试样渐进性破坏的过程中伴随着裂纹扩展, 试样破坏的不同程度裂纹扩展表现不同。对试样在不同破坏程度下的裂纹扩展开展分析。

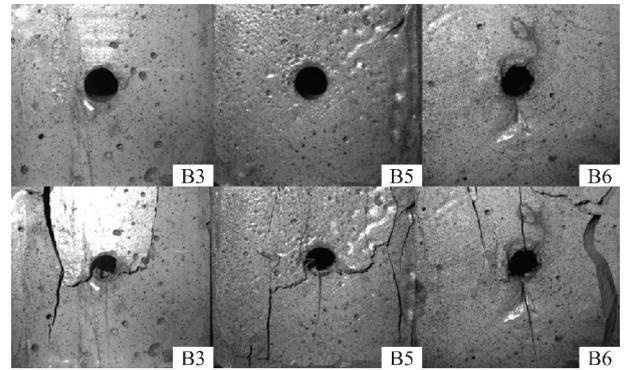


图 2 试样图

Fig. 2 Images of specimens

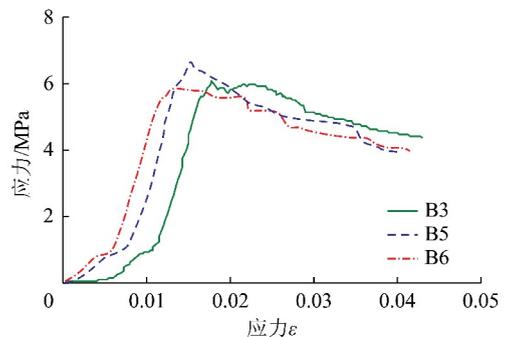


图 3 应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve

4.1 渐进性破坏的应力门槛值

试件的应力-应变特性如图 4 所示, 根据 2.2 节所述方法确定试件的应力门槛值, 用这 4 个关键点将应力-应变曲线化分为 5 个阶段。在试样内选取 4 条距离底部高度为 h 的水平测线, 获取其测线上各点的相对位移, 最终得到了应力门槛值见表 3。其中后 3 种试样由彭俊^[22] 计算得到。对比发现, 本文得到的各应力门槛值和峰值应力之比与文献[22]计算得到的结果具有相似性, 说明此方法较为准确。

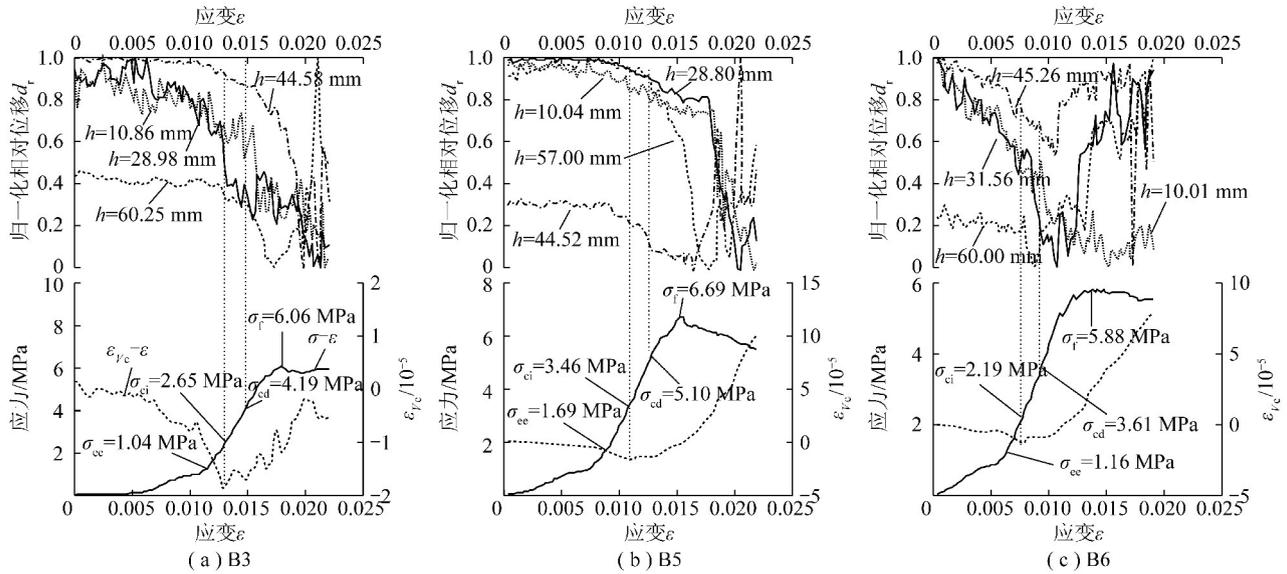


图 4 试样应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of samples

表 3 应力门槛值及其比值

Table 3 Stress thresholds and ratios of samples

试样名称	σ_{ee}/MPa	σ_{ci}/MPa	σ_{cd}/MPa	σ_f/MPa	σ_{ee}/σ_f	σ_{ci}/σ_f	σ_{cd}/σ_f
B3	1.04	2.65	4.19	6.06	0.17	0.44	0.69
B5	1.19	3.46	5.10	6.69	0.18	0.52	0.76
B6	1.16	2.19	3.61	5.84	0.20	0.38	0.62
LdB 花岗岩 ^[18]	27.9	65.0	122.8	160.8	0.17	0.40	0.76
南非灰长岩 ^[18]	31.8	72.2	167.5	226.7	0.14	0.32	0.74
Yeosan 大理岩 ^[18]	11.3	22.6	51.7	65.6	0.17	0.34	0.79

观察图 4 可以发现,相对位移 d_r 随着加载进行逐渐减小,并在峰值应力处产生一次较大的跌落。整个过程分为缓慢降低,加速降低以及迅速降低 3 个阶段。其中加速降低和迅速降低阶段与应力-应变曲线的裂纹稳定扩展和裂纹加速扩展对应,其中 B5 试样曲线最为典型,如图 4(b) 所示。试样破坏的过程共分为 5 段,分别为裂隙压密(I),弹性阶段(II),裂纹稳定扩展(III),裂纹加速扩展(IV)和峰后阶段(V)。

当轴向应力 $\sigma < \sigma_{ee}$ 时,试样处于裂隙压密阶段,当 $\sigma_{ee} \leq \sigma < \sigma_{ci}$ 时,试样处于弹性阶段。在这两个阶段中 d_r 与 ϵ 关系曲线处于缓慢降低阶段,由于试样内部原生的裂隙逐渐闭合,表面各点之间的距离逐渐减小, ϵ_{vc} 与 ϵ 关系曲线逐渐降低到最低点, d_r 与 ϵ 关系曲线呈现出波动并有逐渐下降的趋势。当 ϵ_{vc} 与 ϵ 关系曲线越过最低点后,意味着裂隙体积增长速度大于裂隙体积闭合速度,即试样的宏观行为主要表现为裂纹萌生。

当 $\sigma_{ci} \leq \sigma < \sigma_{cd}$ 时,进入裂隙稳定扩展阶段。新

生的裂纹体积逐渐超过闭合的裂纹体积, ϵ_{vc} 与 ϵ 关系曲线保持微速增长。由于轴向应力 σ 迅速增长,试样表面各点进一步被压缩,由于在某些裂纹集中在某一部分出现,同时挤压了其他表面各点使得表面各点之间的距离进一步降低,故 d_r 与 ϵ 关系曲线进入加速降低阶段。

当 $\sigma > \sigma_{cd}$ 时,该阶段内部分裂纹形成贯通,进入裂隙加速扩展阶段。由于大量的裂隙扩展形成宏观裂纹,裂隙体积显著增加, ϵ_{vc} 与 ϵ 关系曲线迅速上升。在大量的裂纹扩展下,试样表面各点分布的区域进一步被压缩,各点之间的距离迅速降低, d_r 与 ϵ 关系曲线表现出迅速降低,并在峰值应力附近达到该次降低的最低点。

4.2 孔周位移的变化规律

所有试样的孔周位移变化过程具有高度一致性,具体如图 5 所示。左右两侧孔壁 ($\alpha = 0^\circ, \alpha = 180^\circ$) 径向运动较为复杂,产生明显错动,并最终造成水平方向孔径增大。从环向位移来看,在 $\sigma < \sigma_{cd}$ 时(即在 I~III 区内),由于试样表面未出现宏观裂

纹,线性特征明显,左右两侧环向移动对称,如图 5(b),5(d)及 5(f)中的 $\alpha=0^\circ, \alpha=180^\circ$ 两条曲线分别关于 y 轴对称。但 $\sigma \geq \sigma_{cd}$ 后(即进入 IV 和 V

区),裂纹开始加速扩展,试样表面宏观裂纹出现标志着试样开始非线性破坏,左右两侧的环向移动明显不同。

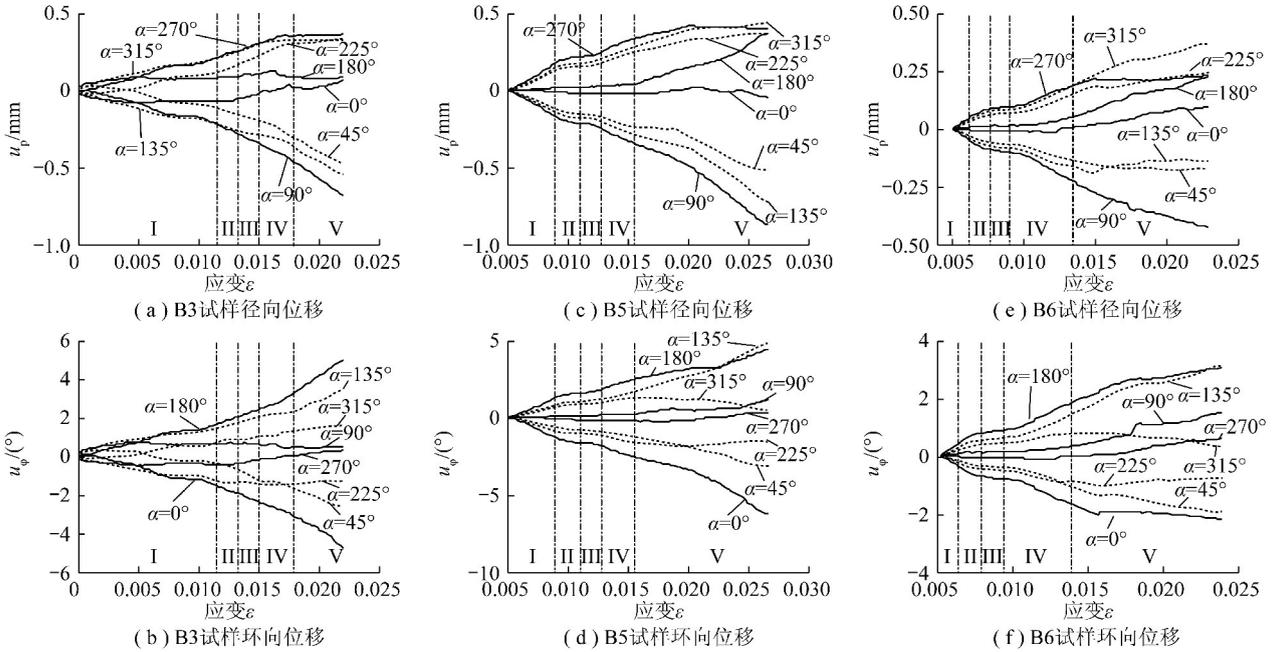


图 5 压缩过程中的孔周位移

Fig. 5 Displacement around the hole under compression

顶底两端($\alpha=90^\circ, \alpha=270^\circ$)在轴向加载的作用下,最终造成垂直方向孔径收缩。与左右两侧类似,在 $\sigma < \sigma_{cd}$ 时,试样顶底两端环向和径向位移均对称,如图 5(a),5(c)及 5(e)曲线所示。从径向位移来看,当 $\sigma \geq \sigma_{cd}$ 后,顶端下移逐渐大于底端隆起,且当试样达到峰值应力后,孔底的停止隆起,说明在裂纹的应力释放作用下,孔底受到的挤压程度减轻。

同时,在 $\sigma < \sigma_{cd}$ 时,孔上各点的径向移动减少,而孔下各点径向移动增加,其中 $\alpha=45^\circ$ 和 $\alpha=135^\circ, \alpha=225^\circ$ 和 $\alpha=315^\circ$ 移动规律相似, $\alpha=45^\circ$ 和 $\alpha=225^\circ, \alpha=135^\circ$ 和 $\alpha=315^\circ$ 移动对称,显示孔周各点均匀移动,呈现出上下对称的规律。

从环向移动来看,在 $\sigma < \sigma_{cd}$ 时, $\alpha=45^\circ$ 和 $\alpha=225^\circ$ 为顺时针移动; $\alpha=135^\circ$ 和 $\alpha=315^\circ$ 为逆时针移动。这样在孔周形成了上下两个拉伸区和左右两个压缩错动区,如图 6 所示。

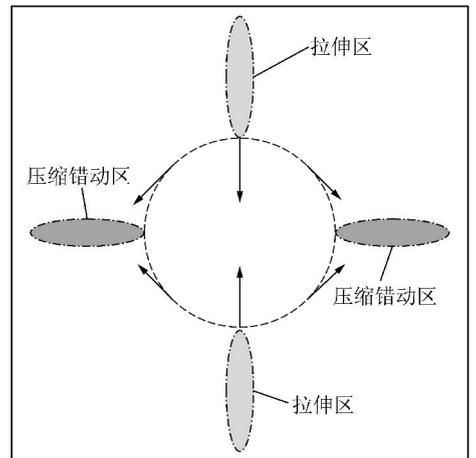


图 6 孔周移动趋势

Fig. 6 Moving tendency around the hole

5 抽采钻孔的漏气通道

“两堵一注”工艺广泛应用于本煤层水平钻孔封孔工程,解决了钻孔服役初期的密封问题。但受煤层上部载荷作用影响,孔周裂隙在钻孔服役过程中逐渐扩展,形成漏气通道最终导致封孔失效,如图 7 所示。

在未钻孔时,空气进入煤体的流动路径为 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$,将其称为天然运移通道。打钻后,钻孔成为

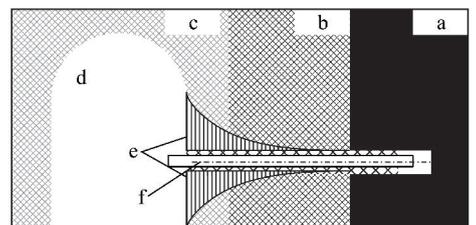


图 7 漏气通道示意

Fig. 7 Diagram of leakage channel

a—原岩应力区;b—应力增高区;c—破碎区;d—巷道;
e—钻孔拉伸区;f—钻孔压缩错动区

另外一条空气进入煤体的通道。封孔后,钻孔短时间能够保持密封状态,此时空气仅能从天然通道进入孔底。随着钻孔周围出现裂纹,空气进入孔底的路径增加,此时须分情况讨论:

(1) 钻孔孔周裂纹为贯穿裂纹,即裂纹延伸进入 a 区,增加的漏气路径为 $d \rightarrow e(f) \rightarrow a$ 。

(2) 钻孔孔周裂纹为表面裂纹,即裂纹仅在 c 区中出现,增加的漏气路径为 $d \rightarrow e(f) \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ 。

(3) 裂纹在 c 区中贯穿,并在 b 区中截止,增加的漏气路径为 $d \rightarrow e(f) \rightarrow b \rightarrow a$ 。

6 结 论

(1) 由于裂纹两端扩展造成试样表面产生挤压,相对位移随着挤压程度上升而逐渐降低,相对位移-应变曲线与应力-应变曲线存在较高程度的对应关系,其发展过程中的后两个阶段(加速降低阶段、迅速降低阶段)与应力-应变曲线的裂纹稳定扩展和裂纹加速扩展对应。

(2) 孔周径向移动呈现上下对称,左右相似;孔周环向移动关于孔心对称,总体形成上下两个拉伸区和左右两个压缩错动区。当试样进入 IV 和 V 区后,这种移动形式造成拉伸区中产生主拉伸裂纹,压缩错动区内产生剪切裂纹。

参考文献 (References):

[1] 周福宝,孙玉宁,李海莹,等. 煤层瓦斯抽采钻孔密封理论模型与工程技术研究[J]. 中国矿业大学学报,2016,45(3):433-439.
ZHOU Fubao, SUN Yuning, LI Haijian, et al. Research on the theoretical model and engineering technology of the coal seam gas drainage hole sealing[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(3):433-439.

[2] 倪冠华,林柏泉,翟成,等. 钻孔密封材料的微观特性及其对密封性能的影响[J]. 北京科技大学学报,2013,35(5):572-579.
NI Guanhua, LIN Baiquan, ZHAI Cheng, et al. Microscopic properties of drilling sealing materials and their influence on the sealing performance of boreholes[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(5):572-579.

[3] 张天军,包若羽,李树刚,等. 瓦斯抽采钻孔 CF 固化膨胀封孔材料性能研究[J]. 煤矿安全,2016,47(2):5-8.
ZHANG Tianjun, BAO Ruoyu, LI Shugang, et al. Research on performance of solidification expansion sealing material for gas extraction drilling[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(2):5-8.

[4] 张超,林柏泉,周延,等. 本煤层近水平瓦斯抽采钻孔“强弱强”带压封孔技术研究[J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(6):935-939.
ZHANG Chao, LIN Baiquan, ZHOU Yan, et al. Strong-weak-strong borehole pressurized sealing technology for horizontal gas drainage borehole in mining seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineer-

ing, 2013, 30(6):935-939.

[5] 郭德勇,杨雄,单智勇,等. 煤层深孔聚能爆破封孔技术[J]. 北京科技大学学报,2011,33(7):785-789.
GUO Deyong, YANG Xiong, SHAN Zhiyong, et al. Sealing technonly of coal bed deep-hole cumulative blasting[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(7):785-789.

[6] 张超,李树刚,曾强,等. 浆液在煤岩体裂隙中渗透规律的数值模拟[J]. 煤矿安全,2015,46(12):19-22.
ZHANG Chao, LI Shugang, ZENG Qiang, et al. Numerical simulation on permeation laws of grouting in coal and rock fracture[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(12):19-22.

[7] LAJTAI E Z, LAJTAI V N. The collapse of cavities[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1975, 12(4):81-86.

[8] MARTIN C D. Seventeenth canadian geotechnical colloquium: the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength[J]. Can. Geotech. J., 1997, 34(5):159-168.

[9] 傅宇方,黄明利,任凤玉,等. 不同围压条件下孔壁周边裂纹演化的数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(5):577-583.
FU Yufang, HUANG Mingli, REN Fengyu, et al. Numerical analysis of crack evolution around borehole in rock sample subject to confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5):577-588.

[10] 马少鹏,王来贵,赵永红. 岩石圆孔结构破坏过程变形场演化的实验研究[J]. 岩土力学,2006,27(7):1082-1086.
MA Shaopeng, WANG Laigui, ZHAO Yonghong. Experimental study on deformation field evolution during failure procedure of a rock borehole structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7):1082-1086.

[11] 朱谭谭,靖洪文,苏海健,等. 孔洞-裂隙组合型缺陷砂岩力学特性试验研究[J]. 煤炭学报,2015,40(7):1518-1525.
ZHU Tantan, JING Hongwen, SU Haijian, et al. Experimental investigation on mechanical behavior of sandstone with coupling effects under uniaxial compression[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7):1518-1525.

[12] EBERHARDT E, STEAD D, STIMPSON B, et al. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(2):222-233.

[13] 周火明,杨宇,张宜虎,等. 多裂纹岩石单轴压缩渐进破坏过程精细测试[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(3):465-470.
ZHOU Huoming, YANG Yu, ZHANG Yihu, et al. Fine test on progressive fracturing process of multi-crack rock samples under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3):465-470.

[14] 张晓平,王思敬,韩庚友,等. 岩石单轴压缩条件下裂纹扩展试验研究——以片状岩石为例[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(9):1772-1781.
ZHANG Xiaoping, WANG Sijing, HAN Gengyou, et al. Crack propagation study of rock based on uniaxial compressive test—a case study of schistose rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9):1772-1781.

[15] 刘宁,张春生,褚卫江. 锦屏深埋大理岩破裂特征与损伤演化规

- 律[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1606-1613.
- LIU Ning, ZHANG Chunsheng, CHU Weijiang. Fracture characteristics and damage evolution law of Jinping deep marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1606-1613.
- [16] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 硬岩应力-应变门槛值特点及产生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1513-1521.
- ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, et al. Characteristics and mechanism of occurrence of stress thresholds and corresponding strain for hard rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1513-1521.
- [17] MICHAEL A Sutton, JEAN-JOSÉ Orteu, HUBERT Schreier. Image correlation for shape, motion and deformation measurements [M]. Springer, 2009.
- [18] MARTIN C D, CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1994, 31(6): 643-659.
- [19] SCHMIDTKE R H, LAJTAI E Z. The long-term strength of Lac du Bonnet granite[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1985, 22(6): 461-465.
- [20] 李胜利, 靳钟铭, 魏锦平. 软煤大煤样的压裂特性研究[J]. 太原理工大学学报, 1999, 30(6): 567-570.
- LI Shengli, JIN Zhongming, WEI Jinping. Study of crack characteristic of big soft coal samples[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1999, 30(6): 567-570.
- [21] 伍永平, 高喜才. 不同加载模式软硬煤岩侧向变形特征的对比实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(S1): 44-48.
- WU Yongping, GAO Xicai. Experimental comparative study on lateral deformation characteristics of coal sample in different loading path[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S1): 44-48.
- [22] 彭俊, 蔡明, 荣冠, 等. 裂纹闭合应力及其岩石微裂纹损伤评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1091-1100.
- PENG Jun, CAI Ming, RONG Guan, et al. Stresses for crack closure and its application to assessing stress-induced microcrack damage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(6): 1091-1100.