

文章编号: 1671-251X(2025)02-0155-08

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2024090052

煤样受载破坏电阻率-应力-损伤耦合规律及机制研究

孙康¹, 刘强², 邱黎明², 李振雷², 王超杰³, 孙谦⁴, 刘海瑞⁵, 王立涛²

(1. 皖北煤电集团有限责任公司, 安徽宿州 234000; 2. 北京科技大学 资源与安全工程学院, 北京 100083;
3. 中国石油大学(华东) 机电工程学院, 山东青岛 266580; 4. 贵州兴安煤业有限公司, 贵州兴义 561504;
5. 河南龙宇能源股份有限公司 车集煤矿, 河南永城 476000)

摘要: 煤岩动力灾害的产生与煤岩应力集中息息相关, 不同应力状态下煤样电阻率存在着明显的差异。为分析煤样加载破坏过程中各阶段电阻率的变化与损伤规律, 建立了煤体电阻率加载测试系统, 并进行了不同阶段电阻率-应力相关性及损伤规律分析, 得出以下结论: ① 煤样电阻率与煤岩应力在不同阶段有着不同的对应关系, 在压缩阶段电阻率呈不断减小的趋势, 在弹性阶段与塑性阶段电阻率变化速度降低, 在破坏阶段随着煤样的破坏发生突增。② 不同煤样在压缩阶段、弹性阶段、塑性阶段的应力-电阻率相关性均大于 0.6, 表现出强相关性; 而在破坏阶段, 应力-电阻率相关性小于 0.4。③ 电阻率变化率在整个加载过程中分为平稳期与突变期 2 个部分, 在平稳期电阻率变化率波动较小并基本保持一致, 在破坏阶段电阻率变化率发生突增。④ 在塑性阶段之前, 电阻率取决于煤样基质本身的导电性质; 在塑性阶段和破坏阶段则是由孔隙扩展、贯通及断裂破坏引起的。

关键词: 煤岩动力灾害; 煤样破坏; 煤样电阻率; 煤岩应力; 相关性分析; 导电通道

中图分类号: TD315

文献标志码: A

Study on resistivity-stress-damage coupling patterns and mechanisms in coal failure under loading

SUN Kang¹, LIU Qiang², QIU Liming², LI Zhenlei², WANG Chaojie³, SUN Qian⁴, LIU Hairui⁵, WANG Litao²
(1. Wanbei Coal-Electricity Group Co., Ltd., Suzhou 234000, China; 2. School of Civil and Resource Engineering,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. College of Mechanical and Electronic
Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 4. Guizhou Xing'an Coal Industry Co., Ltd.,
Xingyi 561504, China; 5. Juji Coal Mine, Henan Longyu Energy Co., Ltd., Yongcheng 476000, China)

Abstract: The occurrence of dynamic disasters is closely related to stress concentration in coal and rock, and coal resistivity varies significantly under different stress states. To analyze resistivity variations and damage of coal sample failure under loading, a resistivity loading testing system for coals is developed. Correlation and damage analyses between resistivity and stress at different stages were conducted, leading to the following results: ① the relationship between coal resistivity and stress in coal and rock varied at different stages. Resistivity continuously decreased during the compression stage. The rate of resistivity variation slowed down during the elastic and plastic stages, and it increased sharply during the failure stage. ② The correlation between stress and resistivity exceeded 0.6 during the compression, elastic, and plastic stages, indicating strong correlations. However, during the failure stage, the correlation between stress and resistivity was less than 0.4. ③ The rate of

收稿日期: 2024-09-14; 修回日期: 2025-02-25; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52474204); 国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(52327804)。

作者简介: 孙康(1989—), 男, 安徽宿州人, 工程师, 硕士, 主要从事煤矿安全生产监督检查工作, E-mail: 570925046@qq.com。通信

作者: 邱黎明(1991—), 男, 河南周口人, 副教授, 博士, 主要从事煤岩动力灾害防治方面的研究工作, E-mail: qiuml@ustb.edu.cn。

引用格式: 孙康, 刘强, 邱黎明, 等. 煤样受载破坏电阻率-应力-损伤耦合规律及机制研究[J]. 工矿自动化, 2025, 51(2): 155-162.

SUN Kang, LIU Qiang, QIU Liming, et al. Study on resistivity-stress-damage coupling patterns and mechanisms in coal failure under loading[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(2): 155-162.



扫码移动阅读

resistivity variation during the entire loading process was divided into two phases: a steady phase with minimal fluctuations and an abrupt phase with a sharp increase in resistivity variation during the failure stage. ④ Before the plastic stage, resistivity was determined by the intrinsic conductivity of the coal matrix. During the plastic and failure stages, resistivity was influenced by pore expansion, permeability, and fracture damage.

Key words: coal and rock dynamic disasters; coal failure; coal resistivity; coal and rock stress; correlation analysis; conductive channels

0 引言

随着煤矿开采深度的增加,地应力逐渐增加,动力灾害愈加频繁,严重威胁煤矿安全生产。煤矿深部典型动力灾害主要包括冲击地压、煤与瓦斯突出和煤岩瓦斯复合动力灾害,具有突然、急剧、猛烈等特点^[1]。目前对于其形成过程及演化机制认识不清,灾害前兆信息辨识技术落后,但普遍认为应力是导致动力灾害的主要因素之一。因此,对煤层应力状态进行有效监测,是实现监测预警的基础^[2-3]。

目前煤层应力状态监测预警方法包括电磁辐射法^[4-5]、CT 法^[6]、电阻率法^[7]、微震法^[8]等。电阻率作为煤岩重要的物理电性参数,可以很好地反演出生产现场的煤岩裂隙发育程度^[9]。基于电阻率差异探测的电阻率法精度高^[10]、噪声小,可突破由点到面的监测,目前已被广泛应用于煤矿生产现场。

煤岩动力灾害的产生与煤岩应力集中息息相关。对于电阻率监测预警技术而言,电阻率与煤岩受载破坏状态之间的关系是基础^[11]。因此,对煤样电阻率变化规律的研究有助于实现煤样破坏精准探测。Wang Yungang 等^[12]研究了不同类型煤在单轴压缩下的电阻率变化情况,发现受载煤的电阻率变化能够很好地反映型煤微裂隙的产生、扩展和贯通的情况,并且指出在单轴压缩下煤的压缩、弹性阶段以电子导电性为主,塑性、破坏阶段以离子导电性为主。Sun Qiang 等^[13]研究了岩石单轴破坏的电阻率变化规律,发现电阻率随着岩石晶格破坏伸展的过程而发生剧烈变化,且剧变临界点在单轴压缩峰值的 75%~85% 之间。Chen Peng 等^[14]指出煤样导电分为离子导电和电子导电 2 种,离子导电为主的煤样经历了缓慢上升到加速上升的变化过程,而电子导电为主的煤样则经历先减小后增加的 V 型变化;煤样电阻率的突变(弹性阶段变为塑性阶段)发生在峰值应力 66%~87% 之间,归一化电阻率最大可达 3.49。李术才等^[15]建立了砂岩加载破坏的声发射-电阻率测试系统,确定了砂岩在单轴破坏过程中的声发射-电阻率变化规律,推导了基于声发射和电阻率的综合损伤模型,提出了砂岩破坏的判别标准和

前兆特征。陈耕野等^[16-17]研究了氯化钠溶液石灰岩、砂岩加载破坏过程的电学效应,通过数值拟合方法提出了基于电阻率的砂岩应力-应变过程的状态方程并进行了验证。

上述文献集中于煤岩电阻率变化规律及机制研究,而对于不同加载阶段应力与电阻率的相互作用关系研究相对较少。因此,本文选取煤样进行实验室加载破坏,研究其破坏时电阻率与应力、损伤的变化规律、耦合规律及相关性,为电阻率法监测煤岩动力灾害现象的应用提供理论支持。

1 实验方案

1.1 媒体电阻率加载测试系统

媒体电阻率加载测试系统主要由加载系统与电阻率信息采集系统组成,如图 1 所示,其中加载系统包括压力机、加载头及载荷控制系统 3 个部分。本文采用 YAW-600 微机控制电液伺服压力试验机进行加载控制。压力机最大载荷达 600 kN,压头刚度为 5 000 kN/mm,最小分辨力为 3 N,最小分辨位移为 0.3 μm,采样频率为 1 kHz。采用等速应力、等速位移、等速应变、力保持和位移保持等加载方式实时显示应力-应变曲线、载荷-时间曲线。

电阻率信息采集系统为 VICTOR 4 080 LCR,最高测试频率为 100 kHz,测试电平为 0.6 Vrms。LCR 测试仪与煤样连接方式采取正负极外接导线分别缠绕煤样两端。导线缠绕在距离煤样上下端 10 mm 处,避免端头破坏造成导线损坏。LCR 测试仪通过 USB 接线与 PC 连接,利用串口软件连续采集数据,并导出为 Excel 文件进行处理。电阻率测试频率为 100 kHz。

1.2 煤样品制备

煤样品取自河南省永城市矿区的车集煤矿Ⅱ₂煤层,煤质主要为无烟煤。据现场鉴定结果,煤层瓦斯含量为 0.06~14.49 m³/t,瓦斯超限情况较为严重。经过机械加工,将煤样切割为 φ 50 mm×100 mm 的圆柱形标准煤样,参数见表 1。

1.3 加载方案

将待测型煤样放置在加载系统上,轻轻压紧后

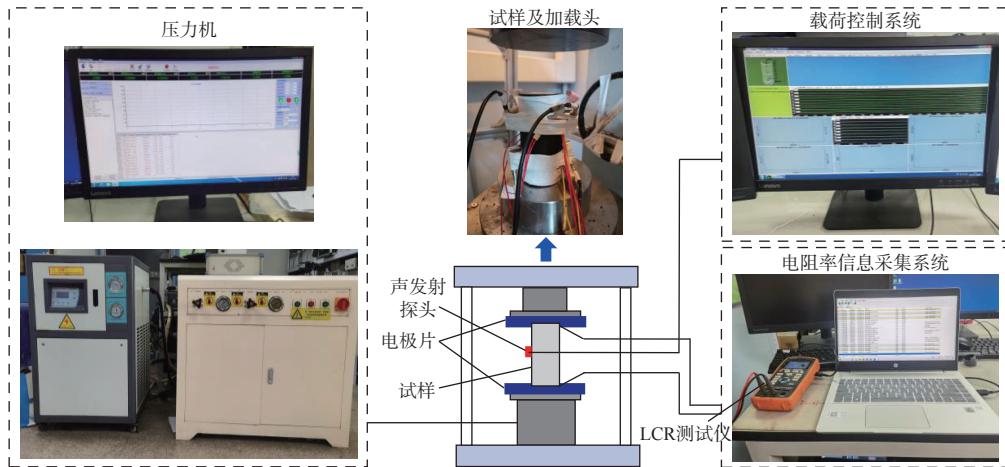


图 1 煤体电阻率加载测试系统

Fig. 1 Coal resistivity loading test system

表 1 煤样参数
Table 1 Sample parameters

编号	长/mm	宽/mm	质量/g	密度/(g·m ⁻³)
1	97.88	49.60	277.31	1.4670
2	98.02	49.08	286.28	1.5445
3	100.10	50.10	319.87	1.6218

测试顶端平整度;煤样两端面涂抹导电膏,在样品两端布置电极板并用绝缘板隔离,通过导线连接电极板至 LCR 测试仪;打开 LCR 数字电桥测试仪,热机 30 min,观察 LCR 数字电桥示数,直至稳定;开启压力机,设置加载方案为单轴加载,控制方法为位移加载,加载速率为 3 $\mu\text{m}/\text{s}$;启动 LCR 测试仪,布置测线至主机,随后开启压力机测试整个加载过程中的电阻率变化情况。

1.4 电阻率相关参数

在加载破坏过程中,对单一电阻率的关注度较低,一般更关注电阻率随应力变化情况。为了使电阻率的变化量更加明显,需对不同煤样的电阻率进行归一化处理。

$$\lambda = \rho / \rho_0 \quad (1)$$

式中: λ 为归一化后的电阻率,随着应力加载水平的增加而发生改变; ρ 为加载过程的电阻率; ρ_0 为初始时刻的电阻率。

为了分析评价煤样应力状态变化快慢,需要进一步对电阻率的时序变化情况进行分析。

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{\rho_i - \rho_{i-1}}{\rho_i} \quad (2)$$

式中: $d\lambda/dt$ 为煤样电阻率的突变能力,负值表示突减,正值表示突增; t 为时间; ρ_i 为 i 时刻的电阻率; ρ_{i-1} 为 $i-1$ 时刻的电阻率。

2 实验结果与分析

2.1 不同阶段煤岩电阻率-应力规律

对 3 个煤样进行单轴压缩破坏实验,其应力 σ 、电阻率 λ 随时间 t 变化曲线如图 2 所示。可看出应力与电阻率均有良好的对应关系。电阻率在煤样压缩阶段均呈不断减小的趋势,而在弹性阶段与塑性阶段变化速度降低,各煤样电阻率最低值为 0.8 左右。在破坏阶段,电阻率随着煤样的破坏均发生突增,增长幅度均大于 0.02。值得注意的是,3 块煤样在应力峰值均没有立即破坏,而是进入了具有一定支撑能力的峰后阶段,在这一阶段煤样仍存在一定的承载能力,电阻率变化量降低,这说明电阻率受煤样裂隙扩展的影响,伴随着大破坏的产生才出现电阻率的突增。

2.2 不同阶段应力-电阻率相关性分析

在岩石物理学的研究过程中,Archie 假设岩石基质为绝缘体^[18],岩体的导电性由岩体中连通孔的孔隙水决定,并忽略了电双性的作用,得到了阿尔奇公式:

$$\rho = FI_1\rho_w = \rho_w \alpha^{-m} S_w^{-n} \quad (3)$$

式中: F 为地层因子; I_1 为电阻率指数; ρ_w 为孔隙水的电阻率; α 为岩石的孔隙率; m 为胶结指数; S_w 为岩体的含水率; n 为饱和度指数。

由式(3)可知,煤样电阻率主要受煤样含水率及孔隙率共同作用影响。电阻率随着煤样孔隙率在应力加载过程中的变化而变化^[19]。因此,为进一步分析应力变化对电阻率的影响,采用二次多项式函数对不同阶段应力-电阻率进行数值模拟,结果如图 3 所示。可看出不同煤样在压缩阶段、弹性阶段、塑性阶段的电阻率与应力相关性较好;而在破坏阶段,电阻率与应力的相关性较差,这是由于破坏后孔隙、

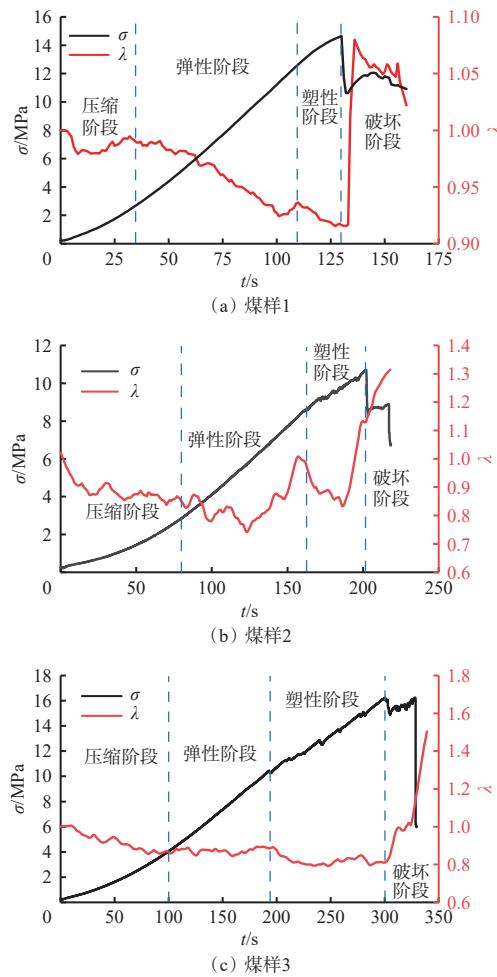


图 2 应力-电阻率-时间曲线

Fig. 2 Stress-resistivity-time curves

裂隙大范围变化, 电阻率点较为分散且没有明显的对应关系。

各煤样在不同阶段的应力-电阻率相关系数如图 4 所示。可看出在压缩、弹性、塑性 3 个阶段, 应力-电阻率相关系数均大于 0.6, 表现出强相关性; 而在破坏阶段, 应力-电阻率相关系数小于 0.4, 为弱相关性。煤样电阻率的变化受到孔隙率的影响。在煤样压缩阶段, 孔隙在应力作用下逐渐闭合; 在煤样弹性阶段, 煤样中发生弹性变形, 孔隙率变化较小; 在煤样塑性阶段, 煤样逐渐出现微破坏, 微孔隙得到发育。这 3 个阶段主要涉及微孔隙的闭合及发育, 并没有大孔隙的扩展, 因此在这 3 个阶段电阻率变化相对较小, 电阻率与应力有着良好的对应关系。而在破坏阶段, 煤样在应力作用下发生了猛烈的破坏并伴随着大裂隙的产生, 此时电阻率变化受到大裂隙影响, 与应力的相关性降低。

上述分析表明电阻率在应力作用下具有明显的变化趋势, 且这种变化趋势具有阶段变化的特性。在煤层开采过程中, 煤层受到采动应力影响发生变形, 此时煤层应力变化将会导致煤层电阻率发生变

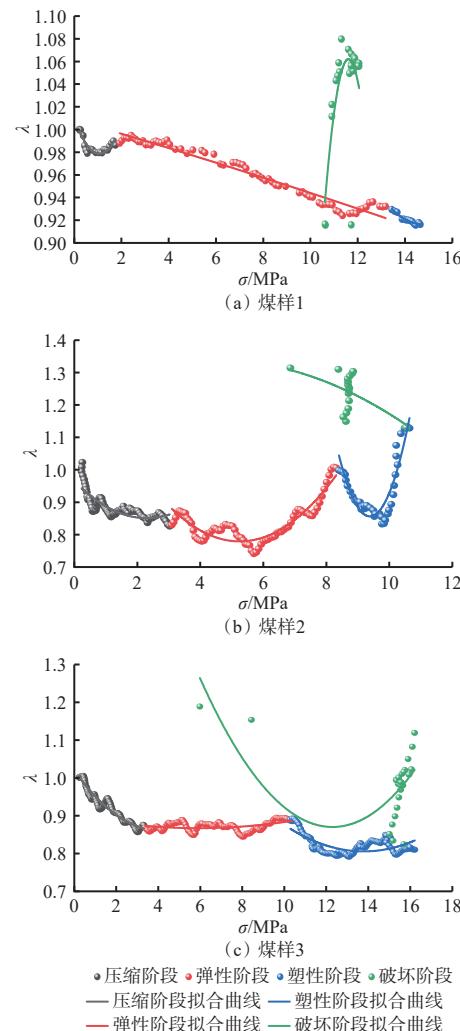


图 3 应力-电阻率耦合曲线

Fig. 3 Stress-resistivity coupling curves

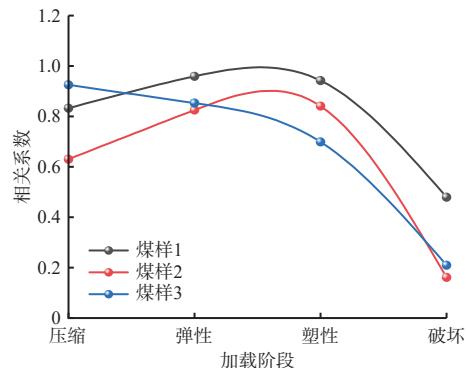


图 4 各煤样在不同阶段的应力-电阻率相关系数

Fig. 4 Stress-resistivity correlation coefficient across samples at different stages

化。而不同阶段电阻率的变化趋势是对煤层应力状态进行监测的理论依据。由此可见, 高电阻率区域对应煤层较为危险的区域。

2.3 电阻率变化率

对 3 个煤样电阻率变化率进行分析, 结果如图 5 所示。

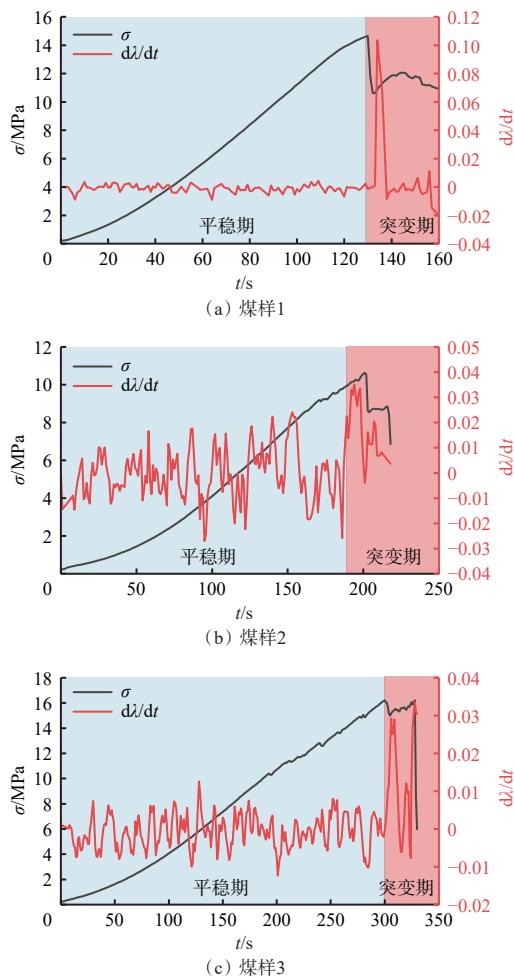


图 5 电阻率变化率随时间变化曲线

Fig. 5 Curve of resistivity change rate with time

由图 5 可看出, 电阻率变化率在整个加载过程中均表现出一定的波动性, 且在压缩、弹性、塑性阶段之前波动较小; 而在破坏阶段发生突增。因此, 将变化率时序变化可以分为平稳期与突变期 2 个部分。各煤样电阻率变化率在平稳期的变化均小于 0.01, 而在突变期电阻率变化率均大于 0.02。

在外界压力作用下, 煤样内部孔隙存在大量的非均匀破坏, 这些破坏对煤样导电通道造成影响, 进而导致波动性变化。因此, 波动性大小表明了煤样微破坏频率高低。电阻率变化率可以作为煤样破坏时刻的判断指标, 其值设为 0.02。

2.4 基于电阻率的损伤变化

M.Kachanov^[20]认为损伤实际上是材料在外界作用下有效承载面积不断减小的过程, 将损伤定义为有效承载面积与初始面积的比值。假设煤的损伤 D 是连续破坏的, 内部微元体随着破坏的产生逐渐增加。

$$D = \frac{N^*}{N_m} \quad (4)$$

式中: N^* 为材料受损后的面积; N_m 为材料初始无损的

横截面积。

按照损伤理论^[21], 煤样的应力方程满足:

$$\sigma = (1 - D)E\varepsilon \quad (5)$$

式中: E 为材料的弹性模量; ε 为煤样应变。

一般认为煤样力学参数分布满足 Weibull 分布^[21], 岩石应力-应变曲线的本构方程为

$$D = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^k\right) \quad (6)$$

式中: ε_0 为初始应变; k 为 Weibull 分布的形状系数。

利用电阻率变化累积量对煤样的细观破坏进行定量描述。则电阻率引起的损伤变化为

$$\frac{R}{R_m} = \frac{N^*}{N_m} = D = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^m\right) \quad (7)$$

式中: R 为某应力状态下煤样破坏引起的电阻率变化累积量; R_m 为煤样完全破坏后的电阻率总变化量。

将式(7)代入式(5), 得到基于电阻率的煤样应力模型:

$$\sigma = (1 - R/R_m)E\varepsilon \quad (8)$$

因此, 各煤样损伤变化曲线如图 6 所示。可看出各煤样在加载的稳定阶段损伤 D 呈线性增加, 此时煤样的损伤处于稳定增加阶段。随后煤样进入突变期发生大变形后, 损伤发生较明显的突变。对比损伤的变化曲线可以发现, 各煤样在加载前期出现了呈线性的缓慢增加趋势, 而在塑性阶段和破坏阶段电阻率迅速增加, 最终在完全破坏后损伤变为 1。

煤样发生破坏阶段前应力与损伤之间的相关性如图 7 所示。可看出应力与损伤的相关性较好, 属于强相关性。煤样破坏前内部损伤为微小变化, 此时电阻率主要受到微孔隙变化影响, 此时电阻率表征的损伤变化相关性较好。而在破坏时刻伴随着大断裂的产生、贯通, 损伤显著增加。煤样的裂纹扩展与滑移破坏是导致煤样破坏的主要因素, 而煤样破坏性裂隙出现是电阻率及损伤快速变化的根本原因。

3 煤样破坏损伤变化机制

3.1 煤岩电阻率导电通道

固体介质的导电可以分为电子导电与离子导电, 前人发现煤样基质导电主要为电子导电形式^[14]。同时, 考虑煤样内部孔隙中含有大量的矿物质、水分, 在内部孔隙也存在离子导电。而在孔隙表面, 受限于带电粒子浓度梯度的变化, 还存在电双层 (Electric Double Layer, EDL) 作用。因此, 煤的导电通道大致可以分为基质电子导电、孔隙水溶液导电及 EDL 层离子导电 3 条导电通道, 如图 8(a) 所示, 其等效电路如图 8(b) 所示。

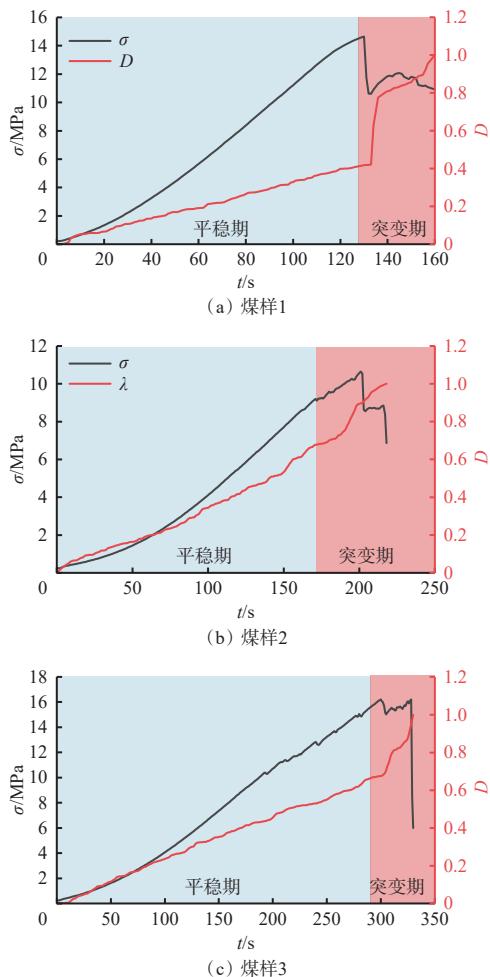


图 6 基于电阻率的煤样损伤变化曲线

Fig. 6 Coal damage variation curves based on resistivity

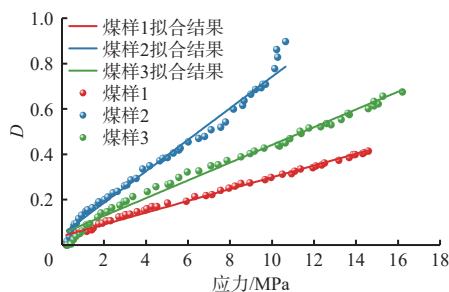


图 7 破坏前应力与损伤相关性

Fig. 7 Correlation between stress and damage before failure

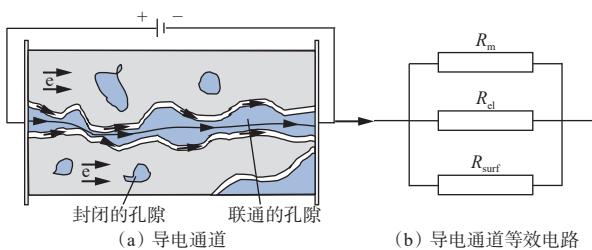


图 8 多孔介质的导电通道

Fig. 8 Schematic diagram of conductive pathways in porous media

由于电场的作用, 煤样及孔隙水中的带电介质通过以上 3 个导电通道传导。因此, 煤样的电阻率为

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R'_m} + \frac{1}{R_{el}} + \frac{1}{R_{surf}} \quad (9)$$

式中: R' 为煤样的电阻率; R'_m 为基质的电阻率; R_{el} 为孔隙水的电阻率; R_{surf} 为电双层的电阻率。

孔隙水对整体电导性的影响主要体现在孔隙水的盐度。同时, 在实际生产中煤样内部并不是饱和水, 大部分孔隙被空气、瓦斯等气体占据, 煤样内部的水分主要以束缚水为主。因此, 在分析煤样电阻率变化时, 上述 3 个导电通道要综合考虑。

3.2 受载破坏电阻率-应力-损伤耦合机制

电阻率在不同阶段的变化趋势有显著变化。在压缩阶段和弹性阶段电阻率保持不变或缓慢增加, 在塑性阶段电阻率增加明显, 最终达到峰值。煤样在加载过程中电阻率具有一定的波动性, 这与文献 [22] 的实验现象具有一致性。

煤样破坏过程的电阻率-应力-损伤耦合机制如图 9 所示。可看出在不同阶段的主控因素并不相同。在塑性阶段之前, 煤样内部主要是微孔隙的闭合, 煤样主要发生弹性应变, 因此电阻率的波动是由微孔引起的, 此时电阻率更多取决于煤样基质本身的导电性质; 而在塑性阶段和破坏阶段则是由孔隙扩展、贯通及断裂破坏引起的。同时, 煤样内部具有一定的含水性, 当裂隙网络贯通发育后, 水分迁移通道逐渐形成, 随后在大破坏形成后电阻率迅速增加。

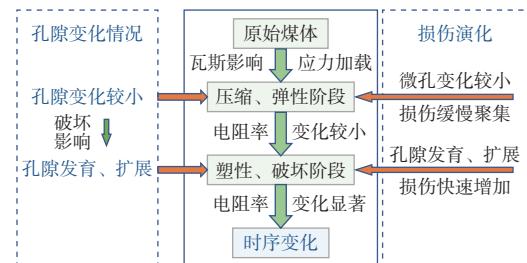


图 9 煤样破坏电阻率-应力-损伤耦合机制

Fig. 9 Mechanism of resistivity-stress-damage coupling in coal failure

在这个过程中, 损伤反映了煤样破坏程度, 其中在压缩、弹性阶段孔隙变化缓慢, 此时损伤呈缓慢线性积累。而随着塑性、破坏阶段煤样应力的增加, 内部孔隙发育并迅速扩展, 煤样内部破坏速度增加, 电阻率发生显著变化, 对应损伤快速增加。

4 结论

- 通过测试煤样加载破坏过程的电阻率变化, 确定了不同阶段应力-电阻率相关性、电阻率变化率变化规律, 并基于电阻率确定了煤样损伤变化规律。

2) 电阻率在煤样压缩阶段呈不断减小的趋势,而在弹性阶段与塑性阶段这一趋势变化降低,在破坏阶段随着煤样的破坏发生突增。

3) 在压缩阶段、弹性阶段、塑性阶段,电阻率与应力相关性较好,表现出强相关性;在破坏阶段,由于破坏后孔隙、裂隙的大范围变化,电阻率点较为分散且没有明显的对应关系,为弱相关性。

4) 电阻率变化率在整个加载过程中表现出一定的波动性,总体可分为平稳期与突变期,且在压缩、弹性、塑性阶段之前波动较小并基本保持一致;而在破坏阶段电阻率变化率发生突增;平稳期电阻率变化率变化均小于0.01,而突变期电阻率变化率均大于0.02。

5) 在塑性阶段之前,煤样主要发生弹性应变,电阻率波动是由微孔引起的,此时微孔隙引起的损伤决定煤样电阻率变化;而在塑性阶段和破坏阶段则是由孔隙扩展、贯通及断裂破坏引起的。同时,煤样内部具有一定的含水性,在煤样裂隙贯通后水分得以相互连接,随后在大破坏形成后电阻率迅速增加。

参考文献(References):

- [1] 袁亮, 姜耀东, 何学秋, 等. 煤矿典型动力灾害风险精 准判识及监控预警关键技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 306-318.
YUAN Liang, JIANG Yaodong, HE Xueqiu, et al. Research progress of precise risk accurate identification and monitoring early warning on typical dynamic disasters in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 306-318.
- [2] 邱黎明, 李忠辉, 王恩元, 等. 煤与瓦斯突出远程智 能监测预警系统研究[J]. 工矿自动化, 2018, 44(1): 17-21.
QIU Liming, LI Zhonghui, WANG Enyuan, et al. Research on remote intelligent monitoring and early warning system for coal and gas outburst[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(1): 17-21.
- [3] 刘应科, 龙昭熹, 邓淇, 等. 煤样受载损伤过程能量演 化规律与破坏特征试验[J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(1): 65-72.
LIU Yingke, LONG Zhaoxi, DENG Qi, et al. Energy evolution law and failure characteristics during coal loading and damaging process[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(1): 65-72.
- [4] 陈亚运, 周桢钧. 煤岩电磁辐射技术研究及其应用[J]. 煤炭技术, 2011, 30(9): 203-204.
CHEN Yayun, ZHOU Zhenjun. Research and appliance of technique of coal rock electromagnetic radiation[J]. Coal Technology, 2011, 30(9): 203-204.
- [5] 窦林名, 何学秋, 王恩元. 冲击矿压预测的电磁辐射技术及应用[J]. 煤炭学报, 2004(4): 396-399.
DOU Linming, HE Xueqiu, WANG Enyuan. Electromagnetic emission technique of monitoring rock burst and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2004(4): 396-399.
- [6] 杨更社, 谢定义, 张长庆. 岩石损伤 CT 数分布规律的 定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 279-280, 285.
YANG Gengshe, XIE Dingyi, ZHANG Changqing. The quantitative analysis of distribution regulation of CT values of rock damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(3): 279-280, 285.
- [7] 康建宁. 煤的电导率随地应力变化关系的研究[J]. 河 南理工大学学报(自然科学版), 2005(6): 430-433.
KANG Jianning. Research on relationship between coal conductivity and ground stress[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2005(6): 430-433.
- [8] 窦林名, 何学秋, REN Ting, 等. 动静载叠加诱发煤岩 瓦斯动力灾害原理及防治技术[J]. 中国矿业大学学 报, 2018, 47(1): 48-59.
DOU Linming, HE Xueqiu, REN Ting, et al. Mechanism of coal-gas dynamic disasters caused by the superposition of static and dynamic loads and its control technology[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 48-59.
- [9] 仇海生. 受载煤岩破裂过程电阻率变化规律试验研 究[J]. 世界科技研究与发展, 2016, 38(2): 245-248.
QIU Haisheng. Study on variation of coal rock loaded resistivity during fracturing process[J]. World Sci-Tech R & D, 2016, 38(2): 245-248.
- [10] 刘盛东, 刘静, 岳建华. 中国矿井物探技术发展现状和 关键问题[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 19-25.
LIU Shengdong, LIU Jing, YUE Jianhua. Development status and key problems of Chinese mining geophysical technology[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 19-25.
- [11] 崔伟雄, 袁博. 矿井电阻率法监测数据质量评价方法 探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(4): 143-151.
CUI Weixiong, YUAN Bo. Quality assessment of resistivity monitoring data of coal mines[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(4): 143-151.
- [12] 王永刚, 魏建平, 杨宋. 实验研究加载煤电参数变化[J]. Procedia Engineering, 2011, 26: 890-897.
- [13] 孙强, 朱淑云, 徐雷. 单轴压缩岩电参数变化[J]. 阿拉伯科学与技术, 2015, 8(4): 1869-1880.
SUN Qiang, ZHU Shuyun, XUE Lei. Electrical resistivity variation in uniaxial rock compression[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(4): 1869-1880.
- [14] 陈鹏, 王恩元, 陈雪溪, 等. 煤电阻率响应规律及机 制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 1-7.
CHEN Peng, WANG Enyuan, CHEN Xuexi, et al. Regularity and mechanism of coal resistivity response

with different conductive characteristics in complete stress-strain process[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, 25(5): 779-786.

[15] 李术才, 许新骥, 刘征宇, 等. 单轴压缩条件下砂岩破坏全过程电阻率与声发射响应特征及损伤演化[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 14-23.

LI Shucai, XU Xinji, LIU Zhengyu, et al. Electrical resistivity and acoustic emission response characteristics and damage evolution of sandstone during whole process of uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(1): 14-23.

[16] 陈耕野, 田军, 姚广仁. 岩石应力的电学效应及其断裂演化规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(11): 1832-1840.

CHEN Gengye, TIAN Jun, YAO Guangren. Electrical effect of rock stress and its fracture evolution laws[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(11): 1832-1840.

[17] CHEN Gengye, LIN Yunmei. Stress-strain-electrical resistance effects and associated state equations for uniaxial rock compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(2): 223-236.

[18] 孙建国. 阿尔奇(Archie)公式: 提出背景与早期争

(上接第 154 页)

[15] 曹印妮. 基于漏磁成像原理的钢丝绳局部缺陷定量检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

CAO Yinni. Study on wire rope local flaw quantitative testing basde on mfl imaging principle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

[16] SELEZNYOVA K, STRUGATSKY M, KLIAVA J. Modelling the magnetic dipole[J]. *European Journal of Physics*, 2016, 37(2). DOI: 10.1088/0143-0807/37/2/025203.

[17] 窦连城, 战卫侠. 钢丝绳断丝损伤漏磁场计算与仿真研究[J]. 工矿自动化, 2020, 46(10): 87-91.

DOU Liancheng, ZHAN Weixia. Calculation and simulation research on leakage magnetic field of broken wire damage of wire rope[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(10): 87-91.

[18] 李登蓬. 基于聚磁技术的钢丝绳损伤电磁检测传感器研究[D]. 济南: 济南大学, 2019.

LI Dengpeng. Research on electromagnetic detection sensor for wire rope damage based on magnetic concentration technology[D]. Jinan: University of Jinan, 2019.

[19] 郭永亮. 基于漏磁检测的钢丝绳断丝检测方法及系统

论[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(2): 472-486.

SUN Jianguo. Archie's formula: historical background and earlier debates[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(2): 472-486.

[19] 郭海军. 煤的双重孔隙结构等效特征及对其力学和渗透特性的影响机制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.

GUO Haijun. Equivalent characteristics of dual-porosity coal structure and their effects on coal mechanical properties and permeability[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.

[20] KACHANOV M. Effective elastic properties of cracked solids: critical review of some basic concepts[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1992, 45(8): 304.

[21] 朱万成, 魏晨慧, 田军, 等. 岩石损伤过程中的热-流-力耦合模型及其应用初探[J]. *岩土力学*, 2009, 30(12): 3851-3857.

ZHU Wancheng, WEI Chenhui, TIAN Jun, et al. Coupled thermal-hydraulic-mechanical model during rock damage and its preliminary application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(12): 3851-3857.

[22] SONG Mingyang, HU Qianting, LI Quangui, et al. Effects of damage on resistivity response and volatility of water-bearing coal[J]. *Fuel*, 2022, 324. DOI: 10.1016/J.FUEL.2022.124553.

实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.

GUO Yongliang. Method and system realization of broken wire of steel wire rope based on magnetic flux leakage detection[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.

[20] 朱良. 基于磁特性的钢丝绳断丝损伤定量检测研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.

ZHU Liang. Research on quantitative detection of breaken wire damage of wire ropes based on magnetic characteristics[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2019.

[21] 华晋伟, 王兵, 邵帅, 等. 基于漏磁原理的钢丝绳无损检测技术研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2014(5): 38-39, 105.

HUA Jinwei, WANG Bing, SHAO Shuai, et al. Research of examining steel wire with no damaging method[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2014(5): 38-39, 105.

[22] 刘国强, 赵凌志, 蒋继娅. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

LIU Guoqiang, ZHAO Lingzhi, JIANG Jiya. Ansoft engineering electromagnetic field finite element analysis[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.