

DOI: 10.11779/CJGE202206015

采动应力下深部煤体渗透率演化规律研究

荣腾龙^{1, 2}, 刘克柳¹, 周宏伟^{3, 4}, 关 灿¹, 陈 岩^{1, 2}, 任伟光⁵

(1. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454003; 3. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083; 4. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 5. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了研究深部开采工作面前方煤体的渗透属性, 首先基于典型开采方式应力路径进行了不同瓦斯压力下的深部煤体渗透率测试, 然后根据渗透率升降速率和单调性对渗透率的演化过程进行划分, 归纳出常规三轴加载和采动应力下煤体渗透率演化过程概化模型, 最后结合三向扰动应力下的深部煤体渗透率模型与二次多项式拟合关系建立了深部采动煤体全应力-应变渗透率理论模型。结果表明: 典型开采方式采动应力路径下深部煤体的应力-应变曲线不存在压密阶段; 峰值应力之前和之后测点的渗透率增加率上升幅度较小, 而峰值点的渗透率增加率上升幅度较大; 常规三轴加载的煤体渗透率曲线呈“V”字形, 相应的概化模型包括下降段、峰前缓升段、急升段和峰后缓升段; 采动应力下的深部煤体渗透率曲线呈倒“Z”字台阶形, 相应的概化模型可划分为峰前缓升段、急升段和峰后缓升段; 建立的渗透率理论模型能够表征不同开采方式下深部煤体全应力-应变过程的渗透率演化。

关键词: 深部煤体; 渗透率演化; 采动应力; 概化模型; 全应力-应变

中图分类号: TD712

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)06-1106-09

作者简介: 荣腾龙(1988—), 男, 讲师, 博士, 主要从事深部煤体多场耦合及瓦斯渗流方面的研究工作。E-mail: rongtenglong@126.com。

Permeability evolution of deep coal under mining stress

RONG Teng-long^{1, 2}, LIU Ke-liu¹, ZHOU Hong-wei^{3, 4}, GUAN Can¹, CHEN Yan^{1, 2}, REN Wei-guang⁵

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization, Jiaozuo 454003, China; 3. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 4. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 5. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to investigate its seepage properties, the permeability of the coal in front of deep working face under different gas pressures is tested based on the mining stress path of typical mining layouts. Subsequently, the permeability evolution is divided according to the rate and monotonicity of permeability variation. Two conceptual permeability models for the coal under different stress paths are obtained. One is about the conventional triaxial loading, and the other is about the mining stress path. Moreover, according to the permeability model for deep coal under triaxial disturbance stress and the quadratic polynomial fitting relationship, a theoretical permeability model for the deep coal in complete stress-strain process is developed. The test results show that there is no compaction stage in the stress-strain curves of the coal under typical mining stress. The increase rate of permeability at the testing points before and after the peak stress is small, but that at the peak stress point is very large. The permeability curve of the coal under the conventional triaxial loading is V-shaped. The conceptual permeability model under the conventional triaxial loading can be divided into decreasing section, slow increasing section before the peak, sharp increasing section and slow increasing section after the peak. The permeability curve of the deep coal under mining stress is inverted Z-shaped. The conceptual permeability model under the mining stress path can be divided into slow increasing section before the peak, sharp increasing section and slow increasing section after the peak. Finally, it is validated that the developed theoretical permeability model can evaluate the permeability evolution of the deep coal under different mining layouts.

Key words: deep coal; permeability evolution; mining stress; conceptual model; complete stress-strain

基金项目: 国家自然科学基金项目(52004081, 51904092, 52174175); 河南省高等学校重点科研项目(21A440005); 河南理工大学博士基金项目(B2020-34)

收稿日期: 2021-04-09

***通信作者:** (E-mail: rongtenglong@126.com)

0 引 言

深部煤炭开采的数量及范围逐年上升, 采深增加伴随瓦斯含量和瓦斯压力显著增大, 造成深部开采中瓦斯灾害的问题也更加严重^[1]。加大深部煤层的瓦斯抽采既有助于减少煤与瓦斯突出灾害, 又有助于达到瓦斯资源高效利用, 对于实现深部矿产和瓦斯资源安全高效、绿色开采具有重要影响^[2]。

深部开采工作面前方既是瓦斯灾害发生又是瓦斯抽采利用的关键区域, 深部开采工作面前方煤体的力学状态和渗透属性变化需要重点关注。研究表明当埋深超过 800 m 时, 中国深部煤层的渗透率将低于 $1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 的量级^[3]。深部煤层的低渗透性造成工作面前方煤体内瓦斯流动性差、抽采率低、煤与瓦斯突出危险性高。能否掌握深部开采过程中工作面前方煤体的渗透率演化规律是实现深部煤炭与瓦斯资源开采利用所面临的关键问题。

开采过程中工作面前方煤体内的渗透率变化主要受采动应力所影响。采动应力主要包括垂直方向升高的超前支承压力和水平方向下降的侧向压力两个方面。Zhou 等^[4]保持轴压恒定逐级卸围压测试了卸围压蠕变作用下的煤体渗透率。王辰霖等^[5]利用不同高度的煤样进行了围压恒定轴压循环加卸载下的煤体渗透率测试。贾恒义等^[6]对型煤和原煤煤样进行了轴压恒定围压循环加卸载下的渗透率测试。刘超等^[7]提出了轴压和围压分别循环加卸载的复杂应力路径, 开展了复杂应力路径下原煤渗透特性试验。以上研究分别改变轴压和围压的升降组合, 对煤体渗透率进行了深入研究, 而采动应力是一种轴压围压同时变化的应力组合。谢和平等^[8]根据工作面前方煤体的三向应力变化规律提出了一种考虑不同开采方式应力集中程度差异, 改变升轴压降围压速率模拟 3 种典型开采方式的采动应力路径。近年来大量学者^[9-17]依据该采动应力路径分别对不同深度工作面前方的煤体渗透率演化规律进行了试验研究(表 1)。上述试验研究较多针对特定模拟深度的渗透率结果进行定量分析, 较少对采动应力路径下煤体渗透率演化规律进行定性概括。

煤体渗透率理论模型研究方面, 学者们建立了大量的渗透率理论计算模型, 但是其中很多模型的建立背景来自于煤层气和井下瓦斯抽采方面, 这些模型大多以单轴应变、恒定体积等力学边界为基础, 并非从采动煤体的边界条件特征出发进行构建^[18-20], 其中大量模型分别考虑三向扰动应力^[21]、损伤破裂^[22]、吸附解吸^[23]等作用对渗透率的影响, 但结合采动煤体特征

综合考虑上述多种作用影响可适用于深部开采工作面前方煤体全应力-应变过程的渗透率模型还较少^[24]。

本文首先进行采动应力下深部煤体的渗透试验, 分析采动应力下深部煤体渗透率演化规律; 然后基于试验结果构建采动应力下深部煤体渗透率演化过程的概化模型, 对采动煤体渗透率演化过程的 3 阶段特征进行总结; 最后通过分段表征的方式建立深部采动煤体全应力-应变渗透率理论模型, 并利用不同开采方式下煤体渗透率试验结果对理论模型进行验证分析。

表 1 不同开采方式下采动煤体渗透率测试
Table 1 Permeability tests of mining-induced coal under different mining layouts

序 号	取样地点及文献	试验模	模拟原	测试气 体类型	年份
		拟埋深 /m	岩应力 /MPa		
1	平煤八矿己 14-14120 工作面 ^[9]	360	9	CH ₄	2012 年
2	晋煤赵庄矿 3 号煤层 ^[10]	360	9	CH ₄	2012 年
3	平煤十矿己 15-24080 工作面 ^[11]	600	15	CH ₄	2014 年
4	川煤白皎矿 2481 工作面 ^[12]	1000	25	CH ₄	2016 年
5	南川宏能煤矿井西翼 K ₁ 煤 层 ^[13]	200	5	CH ₄	2016 年
6	白皎矿#4 煤层 ^[14]	1000	25	CH ₄	2016 年
7	兖州盆地 ^[15]	1000	25	CH ₄	2017 年
8	平煤八矿某工作面 ^[16]	600	15	N ₂	2017 年
9	平煤己 15 煤层 ^[17]	320	8	CH ₄	2020 年

1 采动应力下深部煤体渗透试验

1.1 采动应力路径

煤层开采过程中, 工作面前方的煤体经受一次侧向应力卸载、支承压力增大又减小的过程(图 1)。图 1 中 σ_1 , σ_3 分别为轴向应力和水平应力, γ 为覆岩重度, H 为煤层埋深, α , β 分别为轴向应力和水平应力的应力集中系数, 下标 1, 2, 3 表示不同的开采方式, R'_c 为煤体残余强度。

根据深部采煤工作面支承压力和侧向压力的变化, 谢和平等^[8]利用常规三轴试验中的轴压模拟支承压力、围压模拟侧向压力, 提出了在室内试验中可应用的 3 种典型开采方式采动应力路径(图 2)。采动应力路径包括以下 3 个阶段: ①静水压力阶段(OA 段), 千米埋深煤岩体的原岩应力假设为 25 MPa, 将轴压和围压同步加载至该目标值; ②第 1 卸载阶段(AB 段), 偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)和环向应力(σ_3)加卸载速率之比为 2.25 : 1; ③第 2 卸载阶段(BC 段, BD 段, BE 段), 保护层、放顶煤和无煤柱 3 种开采方式对应煤体峰值点破坏时的应力集中系数分别为 2.0, 2.5, 3.0, 因而

设定偏应力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 和环向应力 σ_3 加卸载速率之比分别为 2.25 : 1, 3.5 : 1, 4.75 : 1。

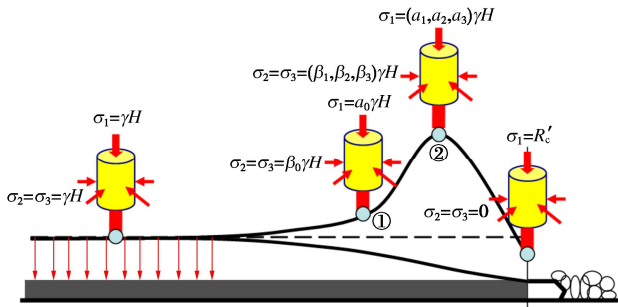


图 1 煤体采动应力变化^[8]

Fig. 1 Stress evolution of coal under mining^[8]

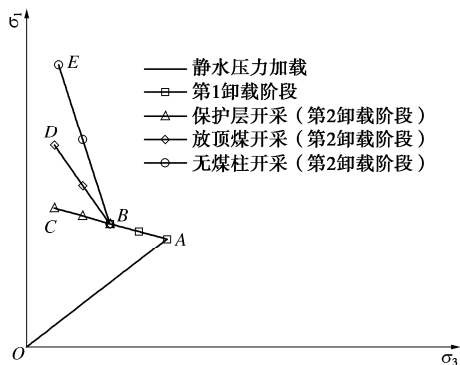


图 2 典型开采方式的采动应力路径^[8]

Fig. 2 Stress paths under typical mining layouts^[8]

1.2 试验样品和装置

取样地点为平煤集团十二矿己 15-31030 工作面，工作面埋藏深度约为 1100 m，因此所取试样属于深部煤样，具有深部煤体的一般性。首先从工作面现场采集大块煤体运输至室内进行取样。然后采用水钻法进行钻取，再经切割、打磨制备成标准尺寸为 $\phi 50\text{ mm} \times H100\text{ mm}$ 的圆柱形煤样（图 3）。最后利用恒温干燥箱对煤样进行加热，烘干至质量基本保持不变再进行渗透试验。煤体试样编号分别为 P1, P2, P3, P4。



图 3 深部煤体试样

Fig. 3 Tested samples of deep coal

渗透率测试的方法较多，其中瞬态脉冲衰减法更适合低渗岩石介质。由于本次所取煤样的埋深较大，初始渗透率较低，因而选用该方法进行试验。一般情况下低渗岩石（低于 10^{-16} m^2 ）渗透率的计算过程中

需考虑 Klinkenberg 效应。试验中所用千米埋深的煤体渗透率很低，需要考虑 Klinkenberg 效应的影响。瞬态脉冲衰减法计算渗透率的过程及 Klinkenberg 效应对气测渗透率结果的修正参考文献[25]进行。试验所用装置为高温高压三轴流变仪（图 4）。

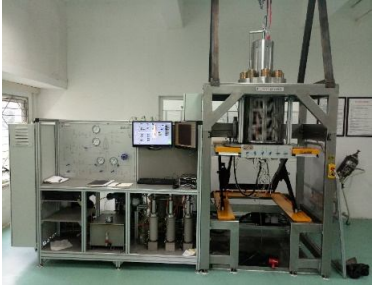


图 4 高温高压三轴流变仪

Fig. 4 Triaxial test system with high temperature and pressure

1.3 试验步骤

采动应力下深部煤体的渗透率测试依据不同开采方式中保护层开采的应力路径进行。将深部煤样从无荷载状态（图 5 中 O 点）同步加载轴压和围压至静水压力 25 MPa（图 5 中 A 点），然后进行采动应力下深部煤体渗透试验。将采动应力路径中的卸载阶段进行划分，轴压每升高 2.5 MPa、围压每卸载 2 MPa 设定为一个测试点。在每个测点下保持轴压和围压恒定，通入高纯氮气至目标气体压差进行渗透率测试。采动应力下深部煤体渗透试验的测点布置如图 5 所示。试验过程中煤样编号和测试的气体压差分别为 P1 (0.5 MPa)、P2 (1.0 MPa)、P3 (1.5 MPa)、P4 (2.0 MPa)。

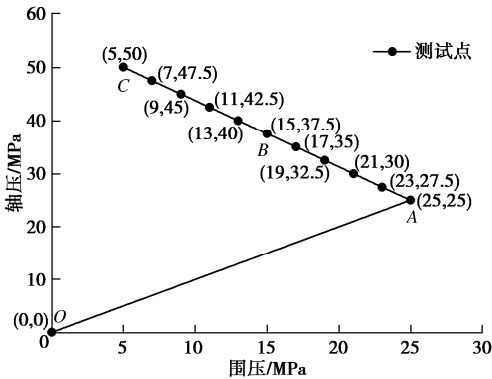


图 5 采动应力渗透试验测点布置

Fig. 5 Layout of testing points for permeability tests under mining stress

1.4 试验结果

图 6 为采动应力路径下深部煤体渗透率试验结果，结果均为原岩应力恢复（图 5 中 A 点）之后阶段的测试数据。可以看出，不同瓦斯压力下的煤体应力和渗透率结果呈现较为一致的变化规律。由于采动应力加卸载过程中需要进行瞬态脉冲衰减法的渗透率测

试,应力 - 应变曲线呈现明显的分级加载台阶式变化,但曲线整体保持连贯平滑,能够明确反映采动应力作用下深部煤体的应力 - 应变关系。与常规三轴加载下的应力 - 应变曲线不同,采动应力下煤体的应力 - 应变曲线不存在压密阶段,而包括弹性变形、裂纹稳定扩展、裂纹非稳定扩展、峰后应变软化的阶段。表 2 为不同气体压差下深部采动煤体的力学特征结果。可以看出,随着气体压差的增大,采动应力路径下深部煤体的峰值应力和峰值应变均整体呈现下降的趋势。

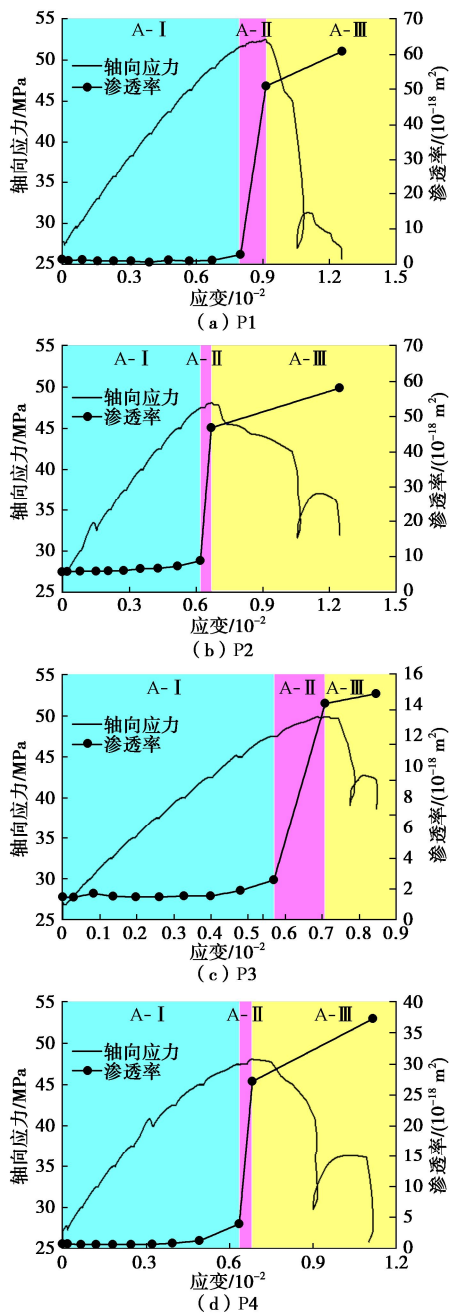


图 6 采动应力下深部煤体渗透率结果

Fig. 6 Permeability evolution of deep coal under mining stress
采动应力路径下,深部煤体的初始渗透率较低,均在 10^{-18} m^2 数量级及以下。随着采动加卸载过程的

进行,渗透率缓慢增大。不同气体压差下深部煤体的渗透率演化过程基本可划分为 3 个阶段 (A-I—A-III),3 个阶段的具体划分方法及意义见后文。为了消除初始渗透率的差异性影响,分析渗透率的演化过程,定义无因次的渗透率增加率:

$$\eta = \frac{k - k_0}{k_0}, \tag{1}$$

式中, η 为渗透率增加率, k 为计算点渗透率, k_0 为初始渗透率。

表 2 不同气体压差下深部采动煤体力学特征结果
Table 2 Mechanical results of deep coal under different gas pressures

试件编号	气体压差 /MPa	峰值应力 /MPa	峰值应变 /%
P1	0.5	52.53	0.92
P2	1.0	48.08	0.67
P3	1.5	49.82	0.71
P4	2.0	48.05	0.68

表 3 为峰值应力前后测点渗透率的增加率,其中 η_{bcp} , η_{cp} , η_{acp} 分别为峰值应力前一个测点,峰值应力点、峰值应力后一个测点渗透率较初始渗透率的增加率。可以发现,不同气压下峰值应力前一个测点的渗透率增加率均较低,峰值应力点的渗透率增加率有显著升高,而峰值应力后一个测点的渗透率增加率升高幅度较小。

表 3 峰值应力前后测点渗透率增加率
Table 3 Increase rates of permeability before and after peak stress

试件编号	η_{bcp}	η_{cp}	η_{acp}
P1	1.00	37.24	44.64
P2	0.56	7.30	9.31
P3	0.79	8.75	9.19
P4	5.10	41.51	57.39

2 深部煤体渗透率演化过程概化模型

2.1 常规三轴加载渗透率概化模型

目前,常规三轴加载路径下的煤体渗透率测试已经大量进行。图 7 汇总了一些常规三轴加载下的煤体渗透率试验结果。图 7 中煤体的应力 - 应变曲线表现出典型的非线性特征,而煤体的渗透率 - 应变曲线也呈现出明显的分区变化特征。从应力 - 应变曲线的变化特征出发,一些学者提出将常规三轴压缩全应力 - 应变下的煤体渗透率演化过程划分为 4 个阶段^[26-27] (图 8),即压密阶段 (B-I)、弹性变形阶段 (B-II)、屈服变形到峰值强度阶段 (B-III)、应变软化阶段 (B-IV),并分别描述了 4 个阶段中渗透率的演化规律。但是从应力 - 应变角度的划分方式存在个别阶段内渗透率升降速率突变及单调性不恒定的情况 (图 8),而在巷道掘进和采煤工作面推进过程中,明确掌握煤体渗

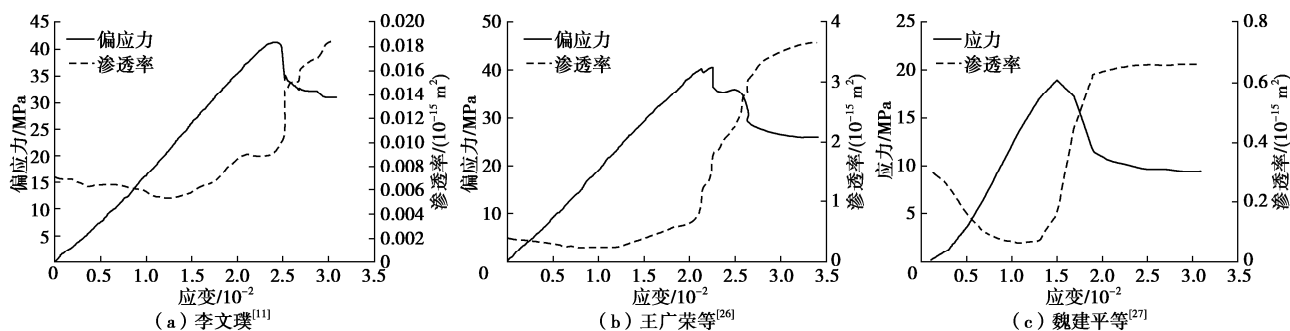


图7 常规三轴加载下煤体渗透率试验结果

Fig. 7 Permeability evolution of coal under conventional triaxial loading

透率的单调变化区域及升降速率对瓦斯抽采和区域防突具有重要意义。因此,本文从渗透率升降速率和单调一致性的角度出发建立渗透率概化模型。图8可以看出,全应力-应变下煤体的渗透率演化曲线整体呈“V”字型发展,但不同阶段渗透率的升降速率不同。由此可将常规三轴加载下的渗透率概化模型划分为下降段(C-I)、峰前缓升段(C-II)、急升段(C-III)和峰后缓升段(C-IV)4个阶段。

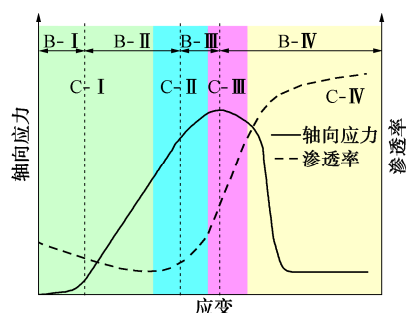


图8 常规三轴试验渗透率概化模型

Fig. 8 Conceptual permeability model for coal under conventional triaxial loading

(1) 下降段(C-I)

伴随开挖卸荷的过程,加工后的煤样相比原位状态来说,孔裂隙开度有所增加。在常规加载的初期,煤体内的孔裂隙结构在轴向应力的作用下逐渐压缩至闭合,应力-应变曲线出现压密阶段,瓦斯渗透通道变窄,渗透率逐渐下降。随后在弹性阶段,煤体仅发生弹性变形,孔裂隙的宽度被进一步压缩,渗透率缓慢下降至最小值^[12, 27]。因此,常规三轴加载中渗透率概化模型的下降段贯穿煤体的压密阶段和弹性阶段。

(2) 峰前缓升段(C-II)

在围压恒定作用下,轴向应力持续增加至煤体屈服强度后,煤体内部萌生新的微裂隙,原生裂隙不断扩展,煤样整体出现宏观的塑性变形。随着新裂隙的形成,煤体渗透率开始出现缓慢回升。

(3) 急升段(C-III)

当轴向应力接近峰值应力的时候,煤体内原生和新生微裂隙迅速扩展至贯通,瓦斯渗透通道形成并快速扩张导致渗透率急剧上升。峰值应力之后,轴向应力迅速跌落,煤体出现应变软化的现象。在应变软化的初期,煤体渗透率仍然持续急剧上升。这是由于宏观裂隙的产生和贯通是瞬间完成的,但瓦斯的渗透过程需要时间完成,造成渗透率的变化相对应力的变化来说具有一定的滞后性^[13]。

(4) 峰后缓升段(C-IV)

在峰后应变软化的后期,煤体丧失了大部分的承载能力,煤体内的裂隙持续扩展贯通且扩展速率逐渐下降。此时煤样主要的宏观破裂面已经形成,并随着压应力的作用而裂隙面相互错动,瓦斯流动通道再次被逐渐压实。在这一阶段内渗透率呈现缓慢升高且上升速率下降的变化趋势。

2.2 采动应力路径下渗透率概化模型

谢和平等^[8]提出的典型开采方式采动应力路径与常规三轴加载有很大不同,主要包括原岩应力恢复和加轴压卸围压的过程。基于图6的试验结果对比常规三轴加载下的渗透率演化过程,提出采动应力下深部煤体渗透率演化的概化模型。采动应力下的煤体渗透率曲线整体呈倒“Z”字台阶形发展,由此该模型可归纳为峰前缓升段(A-I)、急升段(A-II)和峰后缓升段(A-III)3个阶段。

与常规三轴加载过程相比,采动应力下的渗透率演化过程不包括下降段,即不存在孔裂隙通道的压缩过程。原因在于两个方面:①一方面深部煤体的初始孔隙率和渗透率很低,可压缩的孔隙体积在煤体中的占比很小,裂隙孔径较窄;②另一方面由于经历深部高地应力的原岩应力恢复(图2中OA段),煤体内的孔裂隙结构被大量压缩导致采动应力中第1卸载阶段(图2中AB段)的初始时刻可压缩的孔隙较少。因此采动应力路径下煤体的应力-应变曲线基本不存在

压密阶段, 弹性阶段初期的渗透率并未下降, 第1卸载阶段的初始渗透率较低。

采动应力第1卸载阶段开始后, 煤体进入弹性变形阶段, 此阶段深部煤体的渗透率缓慢升高, 偏应力持续增大而渗透率的增幅较小。同常规三轴加载一样, 在轴向应力接近峰值应力的时候, 煤体内大量裂隙迅速扩展贯通, 渗透率骤然上升。在峰后应变软化的过程中, 渗透率增长减缓。虽然图6中峰后渗透率的测点数据较少, 但已测的渗透率结果呈现了缓升的趋势, 这一变化规律在其它学者进行的采动应力渗透试验中也可得到验证^[12]。

3 深部采动煤体全应力-应变渗透率理论模型

3.1 模型建立

深部煤体渗透率概化模型定性给出了采动应力作用下轴向应力与渗透率的关系, 而精确掌握不同开采条件下的渗透率演化仍需理论模型作为基础。目前, 渗透率理论模型大多以煤体外部应力或煤体体积应变为自变量进行构建。全应力-应变过程中轴向应力的曲线在峰值处存在拐点, 体积应变的单调性也会在扩容点出现改变, 而全应力-应变中的煤体渗透率呈现持续单调升高的趋势。由此可见, 全应力-应变下煤体应力和体积应变的单调性均不能和渗透率保持一致。因而, 基于应力或应变利用一个表达式定量表征全应力-应变下渗透率的演化过程是十分困难的。Zheng等^[28]和薛熠等^[29]均将全应力-应变下的渗透率模型划分为峰前和峰后两个阶段进行构建。籍此, 本文借鉴分段表征的思想并结合概化模型中渗透率变化的升降速率和单调性(图9), 划分采动应力下峰前和峰后两个阶段构建深部采动煤体全应力-应变渗透率理论模型。

(1) 采动应力下峰前阶段

笔者等^[30]通过分析开采过程中煤体三向应力状态的变化, 初步建立了三向扰动应力下的深部煤体渗透率模型:

$$\frac{k}{k_0} = \exp \left\{ -6 \left(\frac{1}{(1-D)E_{b0}} - \left(1 - \frac{1}{\phi_0} \right) \frac{1}{E_{f0}} \right) \right. \\ \left. [(1-\nu_b)\Delta\sigma_c - \nu_b\Delta\sigma_a + (2\nu_b-1)\alpha_b\Delta p] - \right. \\ \left. \frac{2\varepsilon_L}{\phi_0} \left(\frac{F_1 p}{p_L + p} - \frac{F_{10} p}{p_{L0} + p} \right) \right\}, \quad (2)$$

式中, E_{b0} , E_{f0} 为煤体和裂隙的初始弹性模量, ϕ_0 为

煤体孔隙率, ν_b 为煤体泊松比, α_b 为 Biot 系数, $\Delta\sigma_c$, $\Delta\sigma_a$, Δp 为煤体所受围压增量、轴压增量和气体压力增量, F_1 为内膨胀应变系数, D 为采动过程中的损伤变量, 取值方式详见文献^[30]。

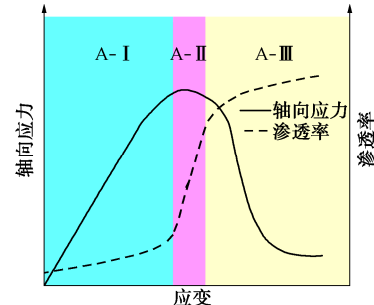


图9 采动应力下渗透率概化模型

Fig. 9 Conceptual permeability model for coal under mining stress

该模型可近似表征开采扰动应力作用下煤体在峰值应力跌落之前的渗透率演化过程, 但是较难描述峰后应变软化阶段的渗透率变化。因此, 该模型可作为深部采动煤体全应力-应变渗透率模型中计算峰前缓升段(A-I)和急升段(A-II)的基础。

(2) 采动应力下峰后阶段

煤体峰后渗透率的演化受控因素较多, 包括煤体破坏模式、加载控制方式、破裂程度、裂隙连通率等。目前, 鲜有基于经典力学理论建立的能够表征煤体峰后渗透率演化过程的理论模型^[24]。尹光志等^[31]利用煤岩三轴瓦斯渗流装置测试了不同地应力条件下的全应力-应变过程中峰后阶段煤体内的瓦斯渗流速度, 建立了峰后阶段瓦斯渗流速度与轴向应力的二次多项式拟合关系:

$$q = l\sigma_a^2 + m\sigma_a + n. \quad (3)$$

并基于下式指出煤体渗透率与瓦斯渗流速度存在正线性相关的关系:

$$k = \frac{\mu q L}{A(P_1 - P_2)}. \quad (4)$$

由式(3), (4)可得采动应力下煤体渗透率概化模型中峰后缓升段(A-III)的渗透率与轴向应力增量呈二次多项式的关系:

$$k \propto (\chi_1 \Delta\sigma_a^2 + \chi_2 \Delta\sigma_a + \chi_3), \quad (5)$$

式中, q 为瓦斯渗流速度, l , m , n 为拟合系数, σ_a 为轴向应力, μ 为瓦斯黏滞系数, A 为煤样横截面积, P_1 , P_2 分别为试样进口端、出口端瓦斯压力。

综合采动煤体渗透率概化模型的3个阶段及其特征(图9), 基于式(2), (5)的表达式可得深部采动煤体全应力-应变渗透率理论模型:

表 4 煤体基本参数列表^[14, 32-33]Table 4 Basic parameters of coal^[14, 32-33]

孔隙率 $\phi/\%$	煤体泊 松比 ν_b	内摩擦 角/ $^\circ$	煤体弹性模量 E_{b0}/GPa	裂隙弹性模量 E_{f0}/GPa	$\varepsilon_L/\%$	P_L/MPa	F_l	Biot 系数 α_b
10.11	0.22	25.12	6.84	3.00	0.52	3.34	0.20	1.00

$$\frac{k}{k_0} = \begin{cases} \exp \left\{ -6 \left(\frac{1}{(1-D)E_{b0}} - \left(1 - \frac{1}{\phi_0} \right) \frac{1}{E_{f0}} \right) \cdot [(1-\nu_b)\Delta\sigma_c - \nu_b\Delta\sigma_a + (2\nu_b-1)\alpha_b\Delta p] - \frac{2\varepsilon_L}{\phi_0} \left(\frac{F_l p}{P_L + p} - \frac{F_{l0} p}{P_{L0} + p} \right) \right\} & (\sigma_a \leq \sigma_{pd}) \\ \frac{k}{k_0} = \exp \left\{ -6 \left(\frac{1}{(1-D)E_{b0}} - \left(1 - \frac{1}{\phi_0} \right) \frac{1}{E_{f0}} \right) \cdot [(1-\nu_b)\Delta\sigma_c - \nu_b\Delta\sigma_{pd} + (2\nu_b-1)\alpha_b\Delta p] - \frac{2\varepsilon_L}{\phi_0} \left(\frac{F_l p}{P_L + p} - \frac{F_{l0} p}{P_{L0} + p} \right) \right\} + \chi_1 \Delta\sigma_v^2 + \chi_2 \Delta\sigma_v + \chi_3 & (\sigma_a > \sigma_{pd}) \end{cases} \quad (6)$$

式中, σ_{pd} 为峰后应变软化起始点的应力, χ_1 , χ_2 , χ_3 为待定拟合系数。参数 χ_1 , χ_2 , χ_3 根据渗透率结果基于二次多项式关系拟合确定, 待定拟合系数与煤体破坏模式、孔隙率、裂隙孔径、裂隙连通率等因素有较大关联。

理论模型将采动煤体全应力-应变下的渗透率计算过程划分为两部分。峰前缓升段 (A-I) 和急升段 (A-II) 的煤体渗透率利用式 (6) 第一式进行计算, 峰后缓升段 (A-III) 的煤体渗透率基于式 (6) 第二式进行表征。

3.2 模型验证

本文仅依据护层开采的应力路径进行了渗透率试验, 为了更好地验证深部采动煤体全应力-应变渗透率理论模型对不同采动应力路径的适用性, 模型验证基于赵宏刚等^[12]得到的不同开采方式下煤体渗透率试验结果展开, 拟合所用参数见表 4, 5。

表 5 峰后缓升段渗透率拟合系数

Table 5 Fitting coefficients in slowly increasing zone after peak stress

开采方式	χ_1	χ_2	χ_3	R^2
保护层	7.195×10^{-15}	2.531×10^{-7}	1.878	0.9894
放顶煤	-2.195×10^{-15}	1.578×10^{-7}	1.754	0.9253

图 10 可以看出, 所建立的渗透率理论模型具有明显的 3 阶段特征, 即存在峰前缓升段 (A-I)、急升段 (A-II) 和峰后缓升段 (A-III)。峰前缓升段和峰后缓升段渗透率的理论值与实测值吻合度较高, 而在急升段存在一定差距, 这是由于急升段煤体损伤变量理论值与煤体实际损伤演化规律的差异造成的。但总体来讲, 该理论模型结果与实测值变化规律较为一致, 能够较好的表征不同开采方式下煤体渗透率的演化过程。

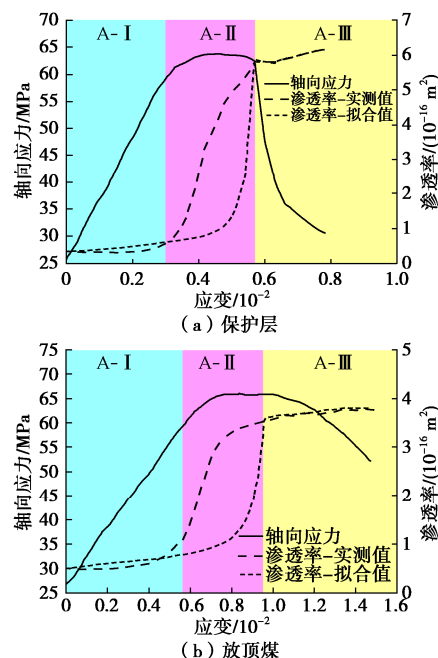


图 10 不同开采方式下深部煤体渗透率拟合结果

Fig. 10 Permeabilities of deep coal under different mining layouts

4 结 论

(1) 采动应力下煤体的应力-应变曲线不存在压密阶段, 而包括弹性变形、裂纹稳定扩展、裂纹非稳定扩展、峰后应变软化的阶段。在峰值应力之前和之后测点的渗透率增加率上升幅度较少, 而峰值点的渗透率增加率上升幅度较大。

(2) 常规三轴加载和采动应力下的煤体渗透率曲线分别呈“V”字形和倒“Z”字台阶形。根据全应力-应变过程中渗透率的升降速率和单调性建立了常规三轴和采动应力作用下渗透率演化过程的概化模型。常规三轴加载下渗透率概化模型包括下降段、峰前缓升段、急升段和峰后缓升段。采动应力下的渗透率概化模型包括峰前缓升段、急升段和峰后缓升段。

(3) 基于概化模型中渗透率三阶段的划分, 以三向扰动应力下的深部煤体渗透率模型为基础, 结合二次多项式拟合关系建立了深部采动煤体全应力-应变渗透率理论模型, 该模型可以较好的表征不同开采方式下深部煤体的渗透率演化过程。

参考文献:

- [1] 袁 亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1-6. (YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous

- exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, **41**(1): 1 - 6. (in Chinese))
- [2] 谢和平, 周宏伟, 薛东杰, 等. 我国煤与瓦斯共采: 理论与技术[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(8): 1391 - 1397. (XIE He-ping, ZHOU Hong-wei, XUE Dong-jie, et al. Theory, technology and engineering of simultaneous exploitation of coal and gas in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(8): 1391 - 1397. (in Chinese))
- [3] 申建, 秦勇, 傅雪海, 等. 深部煤层气成藏条件特殊性及其临界深度探讨[J]. 天然气地球科学, 2014, **25**(9): 1470 - 1476. (SHEN Jian, QIN Yong, FU Xue-hai, et al. Properties of deep coalbed methane reservoir-forming conditions and critical depth discussion[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, **25**(9): 1470 - 1476. (in Chinese))
- [4] ZHOU H W, WANG L J, RONG T L, et al. Creep-based permeability evolution in deep coal under unloading confining pressure[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, **65**: 185 - 196.
- [5] 王辰霖, 张小东, 李贵中, 等. 循环加卸载作用下不同高度煤样渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(10): 2299 - 2308. (WANG Chen-lin, ZHANG Xiao-dong, LI Gui-zhong, et al. Experimental study on the permeability of coal samples with different heights under cyclic loading and unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(10): 2299 - 2308. (in Chinese))
- [6] 贾恒义, 王凯, 王益博, 等. 围压循环加卸载作用下含瓦斯煤样渗透特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, **45**(5): 1710 - 1718. (JIA Heng-yi, WANG Kai, WANG Yi-bo, et al. Permeability characteristics of gas-bearing coal specimens under cyclic loading-unloading of confining pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2020, **45**(5): 1710 - 1718. (in Chinese))
- [7] 刘超, 黄滚, 赵宏刚, 等. 复杂应力路径下原煤力学与渗透特性试验[J]. 岩土力学, 2018, **39**(1): 191 - 198. (LIU Chao, HUANG Gun, ZHAO Hong-gang, et al. Tests on mechanical and permeability characteristics of raw coal under complex stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(1): 191 - 198. (in Chinese))
- [8] 谢和平, 周宏伟, 刘建锋, 等. 不同开采条件下采动力行为研究[J]. 煤炭学报, 2011, **36**(7): 1067 - 1074. (XIE He-ping, ZHOU Hong-wei, LIU Jian-feng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society, 2011, **36**(7): 1067 - 1074. (in Chinese))
- [9] 于文静. 典型开采条件下含瓦斯煤体渗透特性研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012. (YU Wen-jing. Study on Permeability Characteristics of Coal Under Three Typical Mining Conditions[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2012. (in Chinese))
- [10] 许江, 李波波, 周婷, 等. 加卸载条件下煤岩变形特性与渗透特征的试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, **37**(9): 1493 - 1498. (XU Jiang, LI Bo-bo, ZHOU Ting, et al. Experimental study of coal deformation and permeability characteristics under loading-unloading conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2012, **37**(9): 1493 - 1498. (in Chinese))
- [11] 李文璞. 采动影响下煤岩力学特性及瓦斯运移规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014. (LI Wen-pu. Research on Mechanical Characteristics and Gas Migration Law of Coal Influenced by Mining[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese))
- [12] 赵宏刚, 张东明, 刘超, 等. 加卸载下原煤力学特性及渗透演化规律[J]. 工程科学学报, 2016, **38**(12): 1674 - 1680. (ZHAO Hong-gang, ZHANG Dong-ming, LIU Chao, et al. Mechanical characteristics and permeability evolution rule of coal under loading-unloading conditions[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, **38**(12): 1674 - 1680. (in Chinese))
- [13] 蒋长宝, 段敏克, 尹光志, 等. 不同含水状态下含瓦斯原煤加卸载试验研究[J]. 煤炭学报, 2016, **41**(9): 2230 - 2237. (JIANG Chang-bao, DUAN Min-ke, YIN Guang-zhi, et al. Loading-unloading experiments of coal containing gas under the condition of different moisture contents[J]. Journal of China Coal Society, 2016, **41**(9): 2230 - 2237. (in Chinese))
- [14] ZHANG Z T, ZHANG R, XIE H P, et al. An anisotropic coal permeability model that considers mining-induced stress evolution, microfracture propagation and gas sorption-desorption effects[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, **46**: 664 - 679.
- [15] JU Y, ZHANG Q G, ZHENG J T, et al. Experimental study on CH₄ permeability and its dependence on interior fracture networks of fractured coal under different excavation stress paths[J]. Fuel, 2017, **202**: 483 - 493.
- [16] 薛熠. 采动影响下损伤破裂煤岩体渗透性演化规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017. (XUE Yi. Study on the Permeability Evolution of Fractured Coal under the Influence of Mining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017. (in Chinese))
- [17] XIE J, GAO M Z, ZHANG R, et al. Gas flow characteristics of coal samples with different levels of fracture network complexity under triaxial loading and unloading conditions[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, **195**: 107606.

- [18] PAN Z J, CONNELL L D. Modelling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, **92**: 1–44.
- [19] XUE S, ZHENG C S, KIZIL M, et al. Coal permeability models for enhancing performance of clean gas drainage: a review[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, **199**: 108283.
- [20] 肖智勇, 王长盛, 王 刚, 等. 基质-裂隙相互作用对渗透率演化的影响: 考虑基质变形和应力修正[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(12): 2209–2219. (XIAO Zhi-yong, WANG Chang-sheng, WANG Gang, et al. Influences of matrix-fracture interaction on permeability evolution: considering matrix deformation and stress correction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(12): 2209–2219. (in Chinese))
- [21] ZHOU H W, ZHAO J W, SU T, et al. Characterization of gas flow in backfill mining-induced coal seam using a fractional derivative-based permeability model[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, **138**: 104571.
- [22] XUE Y, GAO F, GAO Y N, et al. Quantitative evaluation of stress-relief and permeability-increasing effects of overlying coal seams for coal mine methane drainage in Wulan coal mine[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, **32**: 122–137.
- [23] LI J H, LI B B, CHENG Q Y, et al. Characterization of anisotropic coal permeability with the effect of sorption-induced deformation and stress[J]. *Fuel*, 2022, **309**: 122089.
- [24] 周宏伟, 荣腾龙, 牟瑞勇, 等. 采动应力下煤体渗透率模型构建及研究进展[J]. *煤炭学报*, 2019, **44**(1): 221–235. (ZHOU Hong-wei, RONG Teng-long, MOU Rui-yong, et al. Development in modeling approaches to mining-induced permeability of coals[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, **44**(1): 221–235. (in Chinese))
- [25] 荣腾龙, 周宏伟, 王路军, 等. 三向应力条件下煤体渗透率演化模型研究[J]. *煤炭学报*, 2018, **43**(7): 1930–1937. (RONG Teng-long, ZHOU Hong-wei, WANG Lu-jun, et al. Coal permeability model for gas movement under the three-dimensional stress[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, **43**(7): 1930–1937. (in Chinese))
- [26] 王广荣, 薛东杰, 郇海莲, 等. 煤岩全应力-应变过程中渗透特性的研究[J]. *煤炭学报*, 2012, **37**(1): 107–112. (WANG Guang-rong, XUE Dong-jie, GAO Hai-lian, et al. Study on permeability characteristics of coal rock in complete stress-strain process[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, **37**(1): 107–112. (in Chinese))
- [27] 魏建平, 王登科, 位 乐. 两种典型受载含瓦斯煤样渗透特性的对比[J]. *煤炭学报*, 2013, **38**(增刊 1): 93–99. (WEI Jian-ping, WANG Deng-ke, WEI Le. Comparison of permeability between two kinds of loaded coal containing gas samples[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, **38**(S1): 93–99. (in Chinese))
- [28] ZHENG C S, KIZIL M S, AMINOSADATI S M, et al. Effects of geomechanical properties of interburden on the damage-based permeability variation in the underlying coal seam[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, **55**: 42–51.
- [29] 薛 熠, 高峰, 高亚楠, 等. 采动影响下损伤煤岩体峰后渗透率演化模型研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, **46**(3): 521–527. (XUE Yi, GAO Feng, GAO Ya-nan, et al. Research on mining-induced permeability evolution model of damaged coal in post-peak stage[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, **46**(3): 521–527. (in Chinese))
- [30] 荣腾龙, 周宏伟, 王路军, 等. 开采扰动下考虑损伤破裂的深部煤体渗透率模型研究[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(11): 3983–3992. (RONG Teng-long, ZHOU Hong-wei, WANG Lu-jun, et al. A damage-based permeability models of deep coal under mining disturbance[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(11): 3983–3992. (in Chinese))
- [31] 尹光志, 黄启翔, 张东明, 等. 地应力场中含瓦斯煤岩变形破坏过程中瓦斯渗透特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(2): 336–343. (YIN Guang-zhi, HUANG Qi-xiang, ZHANG Dong-ming, et al. Test study of gas seepage characteristics of gas-bearing coal specimen during process of deformation and failure in geostress field[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(2): 336–343. (in Chinese))
- [32] 齐消寒. 近距离低渗煤层群多重采动影响下煤岩破断与瓦斯流动规律及抽采研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016. (QI Xiao-han. Research on the Coal Rock Failure and Methane Flow Laws of Short-Distance and Low Permeability Coal Seams Group under the Effect of Repeated Excavation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese))
- [33] 白 鑫. 液态二氧化碳相变射孔致裂煤岩体增透机理及应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019. (BAI Xin. Research on Mechanism and Application of Liquid Carbon Dioxide Phase Change Jet Fracturing Coal Seam to Increase Gas Permeability[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese))