

矿山环境保护

半干旱矿区植物根系对采动应力响应数值模拟

刘 英^{1,2}, 裴为豪¹, 郭 勇¹, 陈孝杨^{1,2}, 雷少刚³, 潘东江⁴, 宫传刚⁵, 陶慧玲¹, 陈 航³

(1. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽 淮南 232000;
3. 中国矿业大学 矿山生态恢复教育部工程研究中心, 江苏 徐州 221116; 4. 徐州工程学院 土木工程学院, 江苏 徐州 221018;
5. 安徽理工大学 空间信息与测绘工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要:根系损伤是半干旱井工开采煤矿区植物损伤的关键生态问题, 采动岩层破断运动诱发的根土层应力变化对植物根系的损伤机理及影响因素仍需深入探究。依据准黏聚力理论和锚固理论构建基于 FLAC^{3D} 的植物主根应力损伤数值模型, 通过控制变量, 分别模拟不同开采条件、不同根土层力学性质和不同根系密度和直径下植物根土复合单元与根系的宏观力学扰动特征, 构建植物根系应力对不同开采深度、推进速度、煤层埋深、煤层厚度的状态响应函数。结果得到: 开采基岩破断产生的顶板应力会传递到根土层, 根土层塑性区破坏范围随工作面不断推进递增, 扰动区根系上下部受到的最大剪应力增加, 根系上下部所受应力的非一致性是诱发采空区边界附近根系损伤的重要原因。控制单一变量的情况下, 扰动区根系受到的最大剪应力随着采厚的增加递增, 随采深的增加递减, 但采速的变化仅影响覆岩应力传递到根土层的时间, 对根土层塑性区破坏范围基本无影响; 随内摩擦角和黏聚力增加, 土体的抗剪性能越强, 根土层发生剪切破坏的区域递减, 利于植物根系保护; 随根径的增大, 根系单位面积上的应力递减, 而根系密度的变化对根系应力及根土层塑性区破坏程度影响较小。根系上下部应力差与采厚、采深、采速之间的响应函数类型均为连续渐变函数, 与推进距离之间的响应函数为阶跃变化函数。植被保护或源头减损时须调控开采沉陷位态, 或采用充填、部分充填等静态开采技术, 尽可能降低开采扰动对植物根系的应力损伤。研究结果可丰富半干旱矿区煤炭井工开采诱发植物损伤机理。

关键词: 半干旱矿区; 采动应力; 植被退化; 力学机制; 根系扰动

中图分类号: TD88 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)03-1717-15

Numerical simulation of plant root system stress response to coal mining disturbances in semiarid mining areas

LIU Ying^{1,2}, PEI Weihao¹, GUO Yong¹, CHEN Xiaoyang^{1,2}, LEI Shaogang³, PAN Dongjiang⁴,
GONG Chuangang⁵, TAO Huiling¹, CHEN Hang³

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. State Key Laboratory for Safe Mining of Deep Coal Resources and Environment Protection, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China; 3. Engineering Research Center of Ministry of Education for Mine Ecological Restoration, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. School of Civil Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, China; 5. School of Spatial Information and Geomatics Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

收稿日期: 2024-08-26 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1023

基金项目: 国家自然科学基金青年资助项目 (52204181); 国家自然科学基金重大项目课题资助项目 (52394193); 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2013CB227904)

作者简介: 刘 英 (1990—), 男, 安徽安庆人, 副教授, 硕士生导师, 博士。Email: liuying340825@aust.edu.cn

引用格式: 刘英, 裴为豪, 郭勇, 等. 半干旱矿区植物根系对采动应力响应数值模拟[J]. 煤炭学报, 2025, 50(3): 1717-1731.

LIU Ying, PEI Weihao, GUO Yong, et al. Numerical simulation of plant root system stress response to coal mining disturbances in semiarid mining areas[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(3): 1717-1731.



移动阅读

Abstract: Root damage is a critical ecological issue affecting vegetation in semi-arid underground coal mining areas. The mechanisms and influencing factors of root stress damage induced by stress changes in the root-soil layer due to mining-induced rock mass fracturing require further investigation. This study establishes a numerical model of root stress damage in the main root of plants based on FLAC^{3D}, incorporating the quasi-cohesion and anchoring theories. By controlling variables, the model simulates the macroscopic mechanical disturbance characteristics of the plant-soil composite unit and root system under different mining conditions, root-soil layer mechanical properties, and root density and diameter. State response functions of root stress to different mining depths, advance rates, coal seam depths, and coal seam thicknesses are then constructed. The results show that the roof stress generated by the fracturing of the mined bedrock is transmitted to the root-soil layer. The extent of plastic zone damage in the root-soil layer increases with the advancement of the working face. The maximum shear stress on the upper and lower parts of the disturbed zone roots increases, and the inconsistency of stress on the upper and lower parts of the root system is a major cause of root damage near the boundary of the goaf. Under single-variable control, the maximum shear stress on the disturbed zone roots increases with increasing coal seam thickness and decreases with increasing mining depth. However, the advance rate only affects the time it takes for the overlying rock stress to transmit to the root-soil layer, with little effect on the extent of plastic zone damage in the root-soil layer. With increasing internal friction angle and cohesion, the shear strength of the soil increases, reducing the area of shear failure in the root-soil layer and thus protecting the roots. As root diameter increases, the stress per unit area on the root decreases, while changes in root density have a relatively small impact on root stress and the extent of plastic zone damage in the root-soil layer. The response functions between the stress difference between the upper and lower parts of the root system and coal seam thickness, mining depth, and advance rate are all continuous and gradually changing functions, while the response function with respect to the advance distance is a step change function. Vegetation protection or source reduction requires controlling the mining subsidence state or employing backfilling, partial backfilling, and other static mining techniques to minimize the stress damage to plant roots caused by mining disturbances. The research findings enrich the understanding of plant damage mechanisms induced by underground coal mining in semi-arid areas.

Key words: semi-arid mining area; mining-induced stress; vegetation degradation; mechanical mechanism; root system disturbance

0 引 言

国家煤炭开采战略重心西移及集群化、高强度的开采方式,使得西部矿区本就脆弱的生态环境日趋退化,其中最直观的体现就是植被退化^[1-2]。现有研究从采空区上方岩层破断与运动^[3]、土体沉降变形^[4]、植物生长立地条件改变^[5]、植物叶片光合生理特征改变^[6]等角度对半干旱矿区采煤沉陷诱发的植物个体损伤机理及传递过程进行了系统阐释。实际上根系是植被汲取土壤水分、养分的重要器官,是植物“安身立命”的基础,参与生态系统物质循环和能量流动两大重要过程,而根系破坏直接限制植被生长发育^[7]。为此,学者们从个体尺度对煤炭开采植物根系损伤进行了相关研究,指出根系损伤是半干旱井工开采煤矿区植物损伤的关键生态问题^[8-9],这和根系与周围土体这一特殊界面相关力学过程密切相关。

目前关于采煤沉陷对根系损伤力学作用机制研究尚处起步阶段,有学者将采动诱发根系损伤分为根系拉伤、根系与地层滑移和根系与地层整体变形破

坏 3 种形式,给出了 3 种损伤形式的形成条件,分析了开采扰动后根土界面剪应力-应变关系^[9],但是该研究忽略了根土层关键力学性质(如内摩擦角、黏聚力)及植物根系特征差异(根系密度、直径)对根土界面剪应力-应变关系的影响。内摩擦角和黏聚力是描述土壤受到外力扰动时抗剪切破坏能力的重要指标^[10],植物根系具有固土护坡的作用,根本原因在于根系具有加筋锚固、提高土体黏聚力和抗剪强度的作用^[11],而西部半干旱区矿区不同工作面根土复合层内摩擦角与黏聚力、不同植物根系直径与分布密度均具有较强的空间异质性。也有学者在野外机械获取典型植株根系,然后在室内采用微机控制电子万能试验机进行根系的力学特性测试,定量分析根系承受土体变形损伤的极限抗拉力、抗拉强度等力学特性^[8]。但由于采煤沉陷对根系损伤力学作用机制复杂,致变因素模糊多元化,且根系生长在土壤内部,具有“黑箱效应”^[12],野外现场开展工作面自开切眼至终采线动态推进中植物根系损伤原位监测难度大,如目标植物如何选择、待监测的根系如何选择、采空区土体应力与根系应力

瞬时动态变化如何精准监测等均存在较大的不确定性。此外,当前研究主要围绕土壤水文环境条件-植被生态变化过程展开,缺少开采扰动-植被生态过程的直观体现,特别是不同开采强度(如开采深度、推进速度、煤层埋深、煤层厚度等)下植被根系的力学损伤状态响应关系缺乏系统研究。以上原因致使地下煤炭资源开采诱发的植物根系损伤与周围土体力学响应过程及影响因素的认识局限尚存,亟待开展进一步研究。

植物根系损伤力学模型是探究不同采动条件植物根系损伤与周围土体应力传递机制的重要手段^[13]。植物根系损伤力学模拟理论模型研究近年来取得了重要进展。基于根系渐进破坏理论提出的FBM模型,旨在模拟根系承受土体变形损伤的过程^[14]。但该模型缺点是根密度对模型结果影响较大,高估或低估根系对土壤的增强作用。Wu氏模型采用土壤中根系的分布数量与力学强度计算根黏聚力,但该模型对根系-土壤相互作用方式、根系物理力学特性等方面缺乏深入了解。能量法模型从能量角度出发,认为根-土复合体在直剪试验中消耗的能量可通过复合体直剪应力-应变关系曲线反映,缺点是仅适合对宏观根-土复合体在剪切过程中消耗总能量值与破坏过程进行分析^[15]。上述理论模型对于深入理解周围土体应力变化与植物根系损伤传递过程具有重要意义,但忽视了地下采动这一关键变量对根系损伤的耦合效应^[16]。数值力学模拟法在地下采动土体应力变化研究中被普遍采用,基于结构力学的方法,通过真实地模拟工作面开采过程中采空区上覆岩层的断裂及垮落的形态变化过程,进一步高效、适时且全面获取模型中各数值单元的应力变化^[17-18]。目前可用于植物根系力学损伤数字模拟潜在模型包括:UDECE/3DEC模型^[9]、FLAC^{3D}模型^[19]、MATLAB仿真模型^[20]、有限元软件ABAQUS自带的Mohr-Coulomb塑性模型^[21]、Drucker-Prager模型及Duncan-Chang非线性弹性模型^[22]等。其中,FLAC^{3D}数值模拟模型具备连续介质力学范畴内的普遍性分析能力,且在处理非连续介质环节上具有本质优势,特别适合于固体介质在荷载作用下静、动态响应问题的分析,可兼顾开采深度、推进速度、煤层埋深、煤层厚度及岩层结构等因素模拟分析采动诱发土体力学机制,在采矿岩石力学和矿山压力研究中有较广泛的应用^[19]。

在此背景下,以神东矿区大柳塔煤矿为工程背景,基于FLAC^{3D}数值模型,通过控制变量,揭示不同开采条件、不同根土层力学性质和不同根系密度和直径下植物根土复合单元与根系的宏观力学扰动特征,探索

构建植物根系应力对不同开采深度、推进速度、煤层埋深、煤层厚度的状态响应函数。

1 研究区概况

大柳塔煤矿地处位于鄂尔多斯高原东南部及陕北黄土高原北缘和毛乌素沙漠的东南边缘,年平均降水量405.6 mm,年平均蒸发量为2 111.2 mm,属于典型的半干旱高原大陆性季风气候。研究区煤炭资源赋存条件好,分布着不同井工开采条件的综采工作面60余个,工作面采高2.0~7.6 m,采深采厚比20.44~60.71,开采速度最小4.5 m/d、最高达20 m/d,倾向长度200~300 m,走向长度1 500~5 000 m不等,煤层倾角1°~3°。研究区地表植物类型多样,典型植物有油蒿、柠条、杨树、沙柳,还包括大量植被重建物种,如欧力、桃树、山杏、松树等。开采沉陷扰动区地表大量裂缝发育,诸多被拉伸/剪切的植物根系可见于裂缝侧面(图1)。区域表层主要被黄绵土覆盖,黄绵土层厚度平均30 m,覆岩厚度平均50 m,具有沟壑纵横、生态脆弱等特点。



图1 沉陷裂缝作用下植物根系损伤特征

Fig.1 Characteristics of plant root damage under crack sinking effect

2 数值模型的建立

前期采用堑壕法对开采扰动裂缝发育区植物根系分布调研发现,研究区典型植物沙柳、柠条、杨树等根系类型均发达的垂直主根,同时大量侧生根、水平根分布于主根两侧(图2)。其中,垂直主根集中分布在1.0~2.0 m根土层中,侧向须根发达,形态各异,根系密集层水平分布在植株周围3 m根土层中,不同生长年限植物根系直径差异较大,主要为1~30 mm。为揭示植物根系对地下煤炭开采上覆岩层应力变化的受力和变形响应规律,模型构建时理想的根系形态

必须是严格遵从实际根系分布形态来建立,但是不同类型、不同生长年限植物根系的形态差异较大,参照文献[9]的方法,按根系形态差异采用两类根土耦合模型,实现对植物根系的简化,即依据准黏聚力理论采用根土复合单元表示水平浅根,依据锚固理论用锚杆单元表示相对较粗的垂直根系。另外,采用微机控制电子万能实验机对典型植物根系抗变形能力进行力学特性测试,得到单根最大弹性模量在 0.21~0.80 GPa、抗拉强度 2~23 MPa。依据本研究测得的沙柳根系弹性模量 0.8 GPa、抗拉强度 18.22 MPa 以及根系直径

1 mm,将上述参数赋值到锚杆单元中,锚杆可近似等效替代成根系。依据前期植物根系调查结果,将典型植物根系简化成以主根为轴向、侧根为分支的全长黏结型锚杆,其中主根系简化成等效 1.5 m 全长锚固单元,侧根视为三维加筋加紧纤维的分布,植株密度设置为 3 m×2 m。依据加筋土理论,将 0~1.5 m 厚根土单元采用 Mohr-Coulomb 破坏准则。该模型由潘东江首次建立,利用该模型模拟了开采扰动后根土界面剪应力—应变关系,揭示了西部矿区植被根系采动损伤细观力学机制,模型的可行性已经进行过验证[9]。

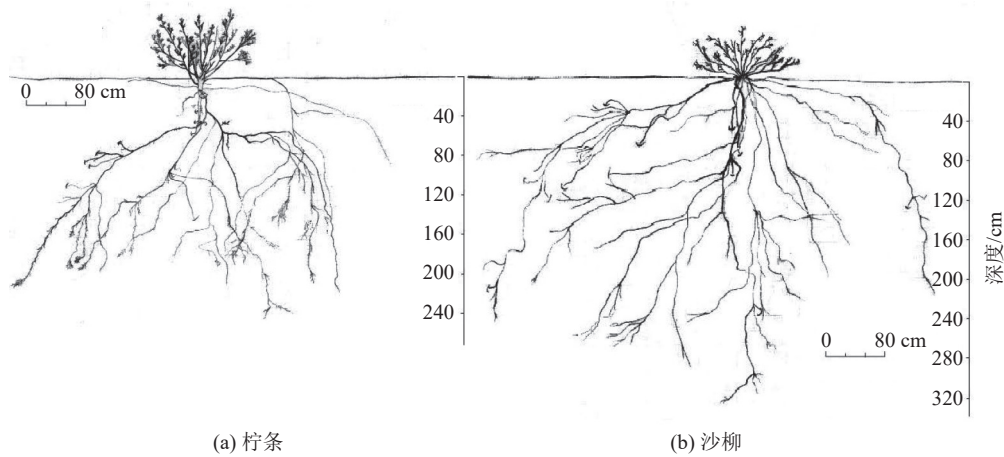


图 2 研究区典型植物根系形态

Fig.2 Typical root morphology of plants in study area

参照大柳塔煤矿 52304 工作面开切眼附近的 269 钻孔柱资料,选取各岩层的岩体力学参数(表 1)建立 FLAC^{3D} 数值模拟模型,模型大小为走向 x×倾向 y×高度 z=300 m×200 m×83 m,全长锚固单元数目(主根系数目)99×99=9 801 个。模型的左侧和右侧采用简化位移边界条件,在水平 x 方向上可以运动、在垂

直 z 方向上固定的铰支;模型底部边界固定,水平、垂直位移均为 0;模型顶部采用自由边界。模型根据岩层逐层进行网格划分,共计划分 277 815 个网格,单元强度准则采用摩尔-库仑准则(图 3a)。受地下开采联动影响,全长锚固单元在沿采空区边缘形成环形压应力带,在采空区上方形成拉应力区,如图 3b 所示。为

表 1 煤岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal rock							
岩性	厚度/m	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
根土层	1.5	1 600	0.02	0.006 7	10	0.01	0.005
黄绵土	2	1 600	0.02	0.006 7	10	0.007 4	0.003 5
黄绵土	9	1 600	0.067	0.019	10	0.007 4	0.003 5
黄绵土	16	1 600	0.085	0.025	10	0.007 4	0.003 5
细粒砂岩	5	2 400	11	7.5	28	2.4	1.2
中粒砂岩	2.5	2 450	20.5	12.3	32	2.6	1.3
泥岩	7	2 440	13.6	7.03	26	2.4	1.2
粉砂岩	4	2 180	22.2	16.7	32	3.4	1.6
泥岩	6	2 440	12	7.2	26	1.8	0.9
5-2煤	6	1 350	1.4	0.6	23	1.2	0.6
粉砂岩	24	2 500	21.1	15.8	32	3.2	1.6

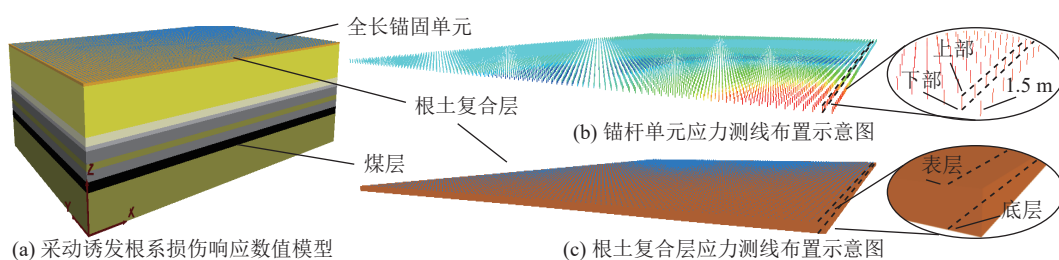


图3 采动根系应力损伤数值模型示意图

Fig.3 Numerical model diagram of stress damage to root systems caused by underground mining

监测全长锚固单元下部和上部的应力和应力差,分别在 $y=14\text{ m}$ 处设置监测线,每一条监测线设置99个测点,共计198个测点。此外,还在根土复合层表层和底层 $y=1\text{ m}$ 处分别设置监测线,每一条监测线设置100个测点,共计200个测点,监测根土复合层表层和底层的最大剪应力。

3 模拟方案

采用控制变量法,分别对不同开采条件,即开采速度(Mining velocity, M_v)、采高(Mining height, M_h)、埋深(Mining depth, M_d)和推进距离(Propulsion distance, P_d)、不同根土层力学性质(黏聚力 Cohesion, c 、内摩擦角 Internal friction angle, φ)和不同根系密度(Root density, R_p)和直径(Root diameter, R_d)下植物根土复合单元与根系的宏观力学扰动特征进行模拟计算,共计建立了9组数值计算模型。具体如下:

1) 以52304工作面地质采矿条件为原型构建的基本模型(对照组):采高6 m,埋深59 m,推进距离110 m,根土层黏聚力10 kPa,内摩擦角 10° ,植物根系密度99个 $\times$ 99个,植物根系直径1 mm。

2) 煤层采高:分别设置为1、2、3、4、5、6 m;

3) 煤层埋深:分别设置为56、59、62、65、68、71 m;

4) 推进距离:分别设置为70、80、90、100、110、120 m;

5) 开采速度模型:分别以5、10、20、40 m/次的速度从70 m推进至110 m;

6) 根土层黏聚力:分别设置为3、5、8、10、15、20 kPa;

7) 根土层内摩擦角:分别设置为 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 、 35° ;

8) 根系密度:分别设置为49个 $\times$ 49个、57个 $\times$ 57个、65个 $\times$ 65个、76个 $\times$ 76个、82个 $\times$ 82个、99个 $\times$ 99个;

9) 根系直径:分别设置为1、3、7、10、22、30 mm。

4 结果与分析

4.1 采动诱发植物根土复合单元应力变化特征

4.1.1 不同埋深、采高条件下根土层应力变化特征

不同煤层埋深开采扰动下的根土层最大剪应力曲线变化趋势如图4a—图4b所示,相较于未扰动区在开切眼至终采线附近,根土层所受最大剪应力显著增加,底层最大剪应力均高于表层最大剪应力。工作面推进至终采线过程中,根土层最大剪应力呈降低趋势,在扰动区处,根土层最大剪应力降低最后趋于平稳。煤层埋深大于68 m时,根土层最大剪应力数值明显降低,根土表层塑性区以拉伸破坏为主;煤层埋深小于68 m时,随埋深降低根土表层塑性区剪切破坏区及根土底层剪切破坏区面积均逐渐增大。随着煤层采高增加,相较于未扰动区在开切眼至终采线附近根土层所受最大剪应力显著增加,且底层最大剪应力均高于表层最大剪应力,地表应力扰动范围随采高增加而扩大,采高6 m时,地表扰动范围扩大到终采线外约20 m(图4c—图4d)。根土表/底层剪切破坏区面积随采高的增加而增加,其中表层塑性区以拉伸破坏为主,底层塑性区主要为剪切破坏。且随着工作面向前推进,不同埋深、采高条件下根土表层动态拉伸区均呈弧形分布状。

4.1.2 不同开采速度与推进距离条件下根土层应力变化特征

不同煤层开采速度下的根土表/底层最大剪应力变化趋势基本相同,在开切眼至终采线附近,受地下采动影响根土层所受最大剪应力显著增加,底层最大剪应力均高于表层最大剪应力,但不同开采速度引起的根土表/底层最大剪应力差异较小,仅在距终采线约30 m范围内,根土表层最大剪应力随开采速度的增加而增加,而根土底层最大剪应力随开采速度的增加而降低(图5a—图5b)。根土表层塑性区以拉伸破坏为主,根土表底层塑性区发生剪切破坏区域随着推进距离的增大而增大。不同开采速度下根土表层动态拉伸区均呈弧形分布状,但对地表应力扰动范围基

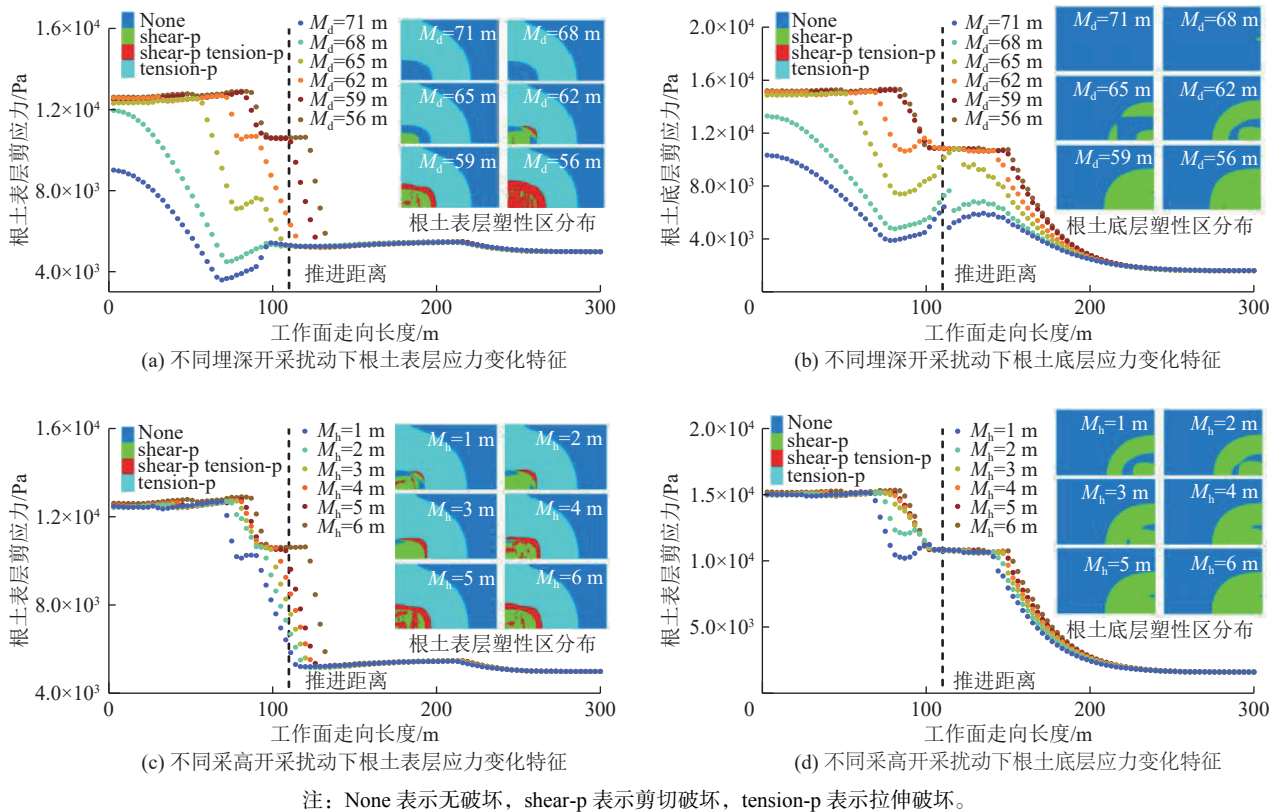


图4 不同埋深与采高开采扰动下根土层应力变化特征

Fig.4 Stress variation characteristics of root soil layer under different buried depths and mining thickness disturbances

本没影响。工作面推进到 80 m 时,相较于未扰动区根土层剪应力已经显著增加,根土表层剪应力已有部分区域达到最大值 1.25×10^4 Pa,根土表层塑性区以拉伸破坏为主,但根土底层塑性区并未发生明显变化;此后工作面从 80 m 推进到 110 m,地表应力扰动范围进一步扩大,根土表层塑性区拉伸与剪切破坏范围均显著增加,同时根土底层塑性区开始出现剪切破坏区且破坏区面积随推进距离增加而不断扩大(图 5c—图 5d)。

4.1.3 不同力学性质条件下根土层应力变化特征

当 $\varphi=10^\circ$ 时,地下开采扰动传递到根土表层和底层最大剪应力分别为 1.25×10^4 Pa 和 1.50×10^4 Pa,此后随着根土层 φ 的增加,传递到根土表层和底层的剪应力显著增大,当 $\varphi=35^\circ$ 时,传递到根土表层和底层最大剪应力为 2.67×10^4 Pa 和 4.27×10^4 Pa(图 6a—图 6b),根土层 φ 越大,地下开采扰动传递到根土层的最大剪应力范围越小。根土层 φ 的增加对根土底层塑性区的影响较大,当 $\varphi=10^\circ$ 时,根土底层塑性区主要以剪切破坏为主,此后随着 φ 的增加,剪切破坏区逐渐向工作面中心收缩,其他区域逐渐由之前的剪切破坏转变为拉伸破坏。当 $c=3$ kPa 时,地下开采扰动传递到根土表层和底层最大剪应力分别为 0.45×10^4 Pa 和 0.68×10^4 Pa,这与未扰动区根土层应力大小差异较小,

但在该条件下土体松散度较高,土体极易受到地下开采的扰动,根土表层与底层剪切破坏区域分别占工作面面积的 100% 和 50%;此后随着根土层 c 的增加,传递到根土表层和底层的剪应力显著增大,当 $c=20$ kPa 时,传递到根土表层和底层最大剪应力为 2.45×10^4 Pa 和 2.70×10^4 Pa(图 6c—图 6d),根土表层与底层剪切破坏与拉伸破坏并存,且扰动范围(塑性区)随 c 的增加逐渐缩小。

4.1.4 采动诱发不同根系密度与直径下根土层应力变化特征

在相同的开采条件下,在开切眼至终采线附近,受地下采动影响根土层所受最大剪应力显著增加,底层最大剪应力 (1.50×10^4 Pa) 均高于表层最大剪应力 (1.25×10^4 Pa),但不同植物根系密度与直径根土表/底层最大剪应力差异较小,最大剪应力曲线也基本重合,地表应力扰动范围也基本相同。工作面中心根土表层塑性区均受剪切破坏,其他区域为拉伸破坏,根土底层塑性区主要受到剪切破坏(图 7a—图 7d)。

4.2 采动诱发植物根系应力变化特征

4.2.1 不同埋深、采高对根系应力的影响

不同煤层埋深采动诱发根土复合单元应力变化传递到植物根系(即模型中的锚杆),引起根系上下部应力变化(图 8a—图 8b)。煤层埋深 56 m 时,开切眼

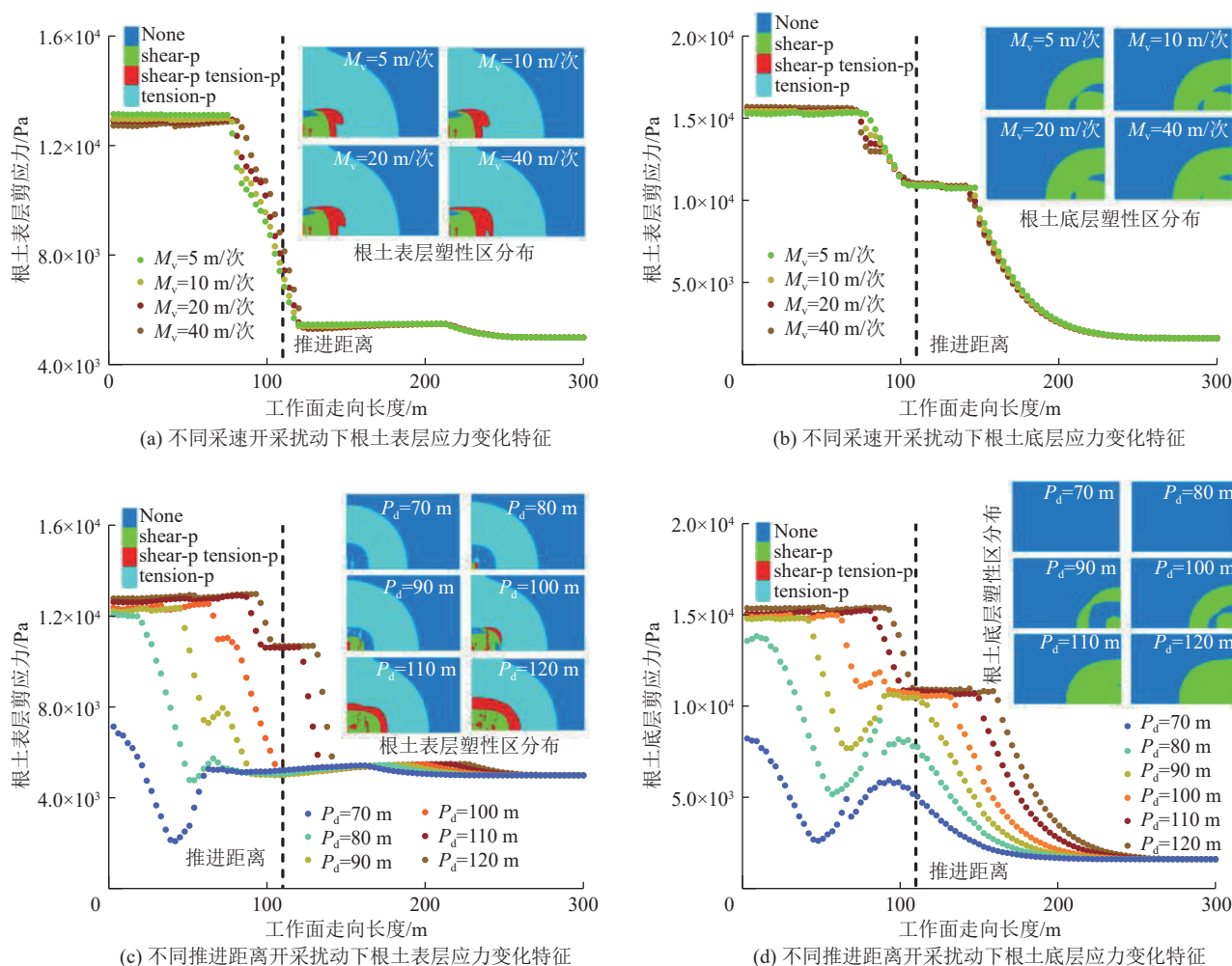


图5 不同采速与推进距离条件下根土层应力变化特征

Fig.5 Stress variation characteristics of root soil layer under different advancing distances and speeds

处根系上下部应力值分别为 9.99 MPa 和 9.81 MPa, 终采线附近根系上下部应力值分别为 0.31 MPa 和 -2.33 MPa, 应力差高达 2.64 MPa; 煤层埋深 62 m 时, 根系上下部应力值显著降低, 开切眼处分别为 2.93 MPa 和 2.84 MPa, 终采线附近根系上下部应力值分别为 0.17 MPa 和 -0.34 MPa, 应力差为 0.51 MPa; 此后随埋深增加, 根系上下部应力值呈小幅降低趋势, 当煤层埋深 71 m 时, 开切眼处根系上下部应力值分别为 0.81 MPa 和 0.79 MPa, 终采线附近根系上下部应力值分别为 0.07 MPa 和 -0.04 MPa。由此可见, 煤层埋深越小 (特别是小于 62 m 时), 采动诱发植物根系应力根土复合单元应力变化传递到植物根系上下部应力与应力差越大, 在开切眼处根系上下部应力值最大, 但根系上下部应力差在终采线附近最高。不同煤层采高诱发植物根系上下部应力与应力差曲线变化如图 8c—图 8d 所示。采动诱发植物根系上下部应力随煤层采高降低而降低, 在开切眼处根系上下部应力值最大, 但根系上下部应力差在终采线附近最高。采高

6 m 时, 开切眼处根系上下部应力值最大, 分别为 5.75 MPa 和 5.68 MPa, 终采线附近根系上下部应力值分别为 0.25 MPa 和 -1.36 MPa, 应力差 1.61 MPa; 采高 2 m 时, 开切眼处根系上下部应力值分别降低至 3.52 MPa 和 3.30 MPa, 终采线附近根系上下部应力值分别为 0.72 MPa 和 -0.46 MPa, 应力差 1.18 MPa。

4.2.2 推进距离与速度对根系应力的影响

随工作面推进距离从 70 m 增加到 120 m, 采动诱发根系上下部应力显著增加 (图 9a—图 9b)。当推进距离在 70、80 m 时, 根系应力值变化幅度缓慢, 如推进距离 70 m 时, 开切眼处根系上下部应力值分别为 0.75 MPa 和 0.695 MPa, 终采线附近根系上下部应力值分别为 0.006 MPa 和 -0.12 MPa, 应力差较小, 仅为 0.126 MPa; 推进到 80 m 时, 开切眼处根系上下部应力值分别为 1.12 MPa 和 1.09 MPa, 终采线附近根系上下部应力值分别为 0.033 MPa 和 -0.21 MPa, 应力差也仅为 0.243 MPa。此后当推进距离大于 90 m 时, 根系应力值变化梯度显著增大, 开切眼处根系上下部应力

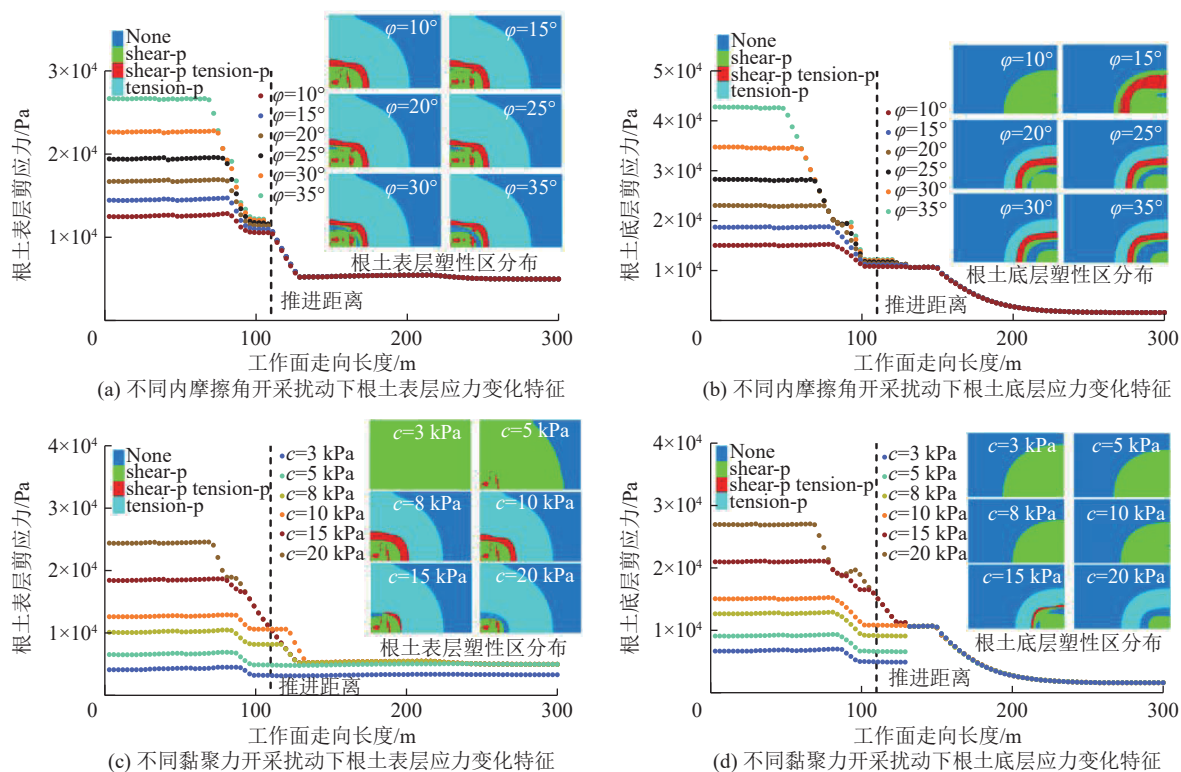


图 6 不同根土层内摩擦角、黏聚力下根土层应力变化特征

Fig.6 Stress variation characteristics of root soil layer under different cohesion and internal friction angles

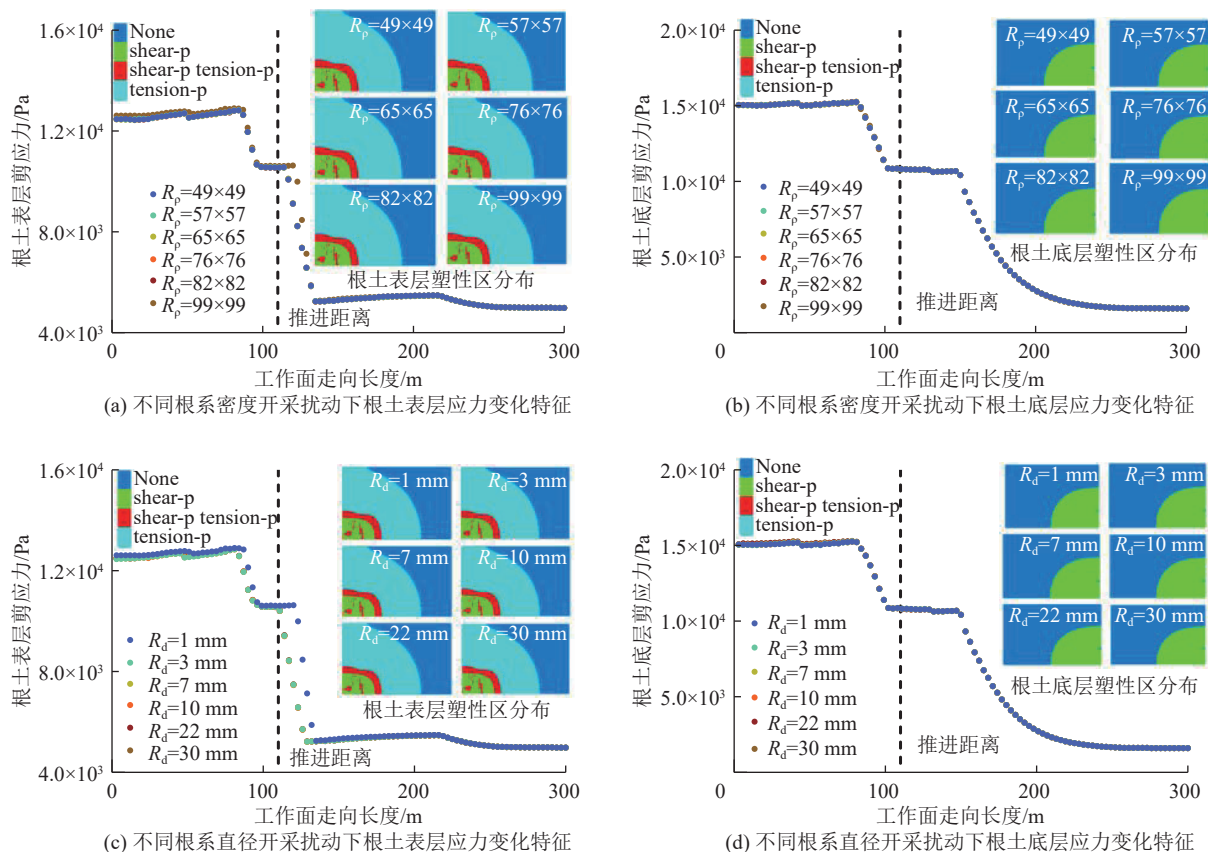


图 7 不同根系密度与直径下根土层应力变化特征

Fig.7 Stress variation characteristics of root soil layer under different root density and diameter

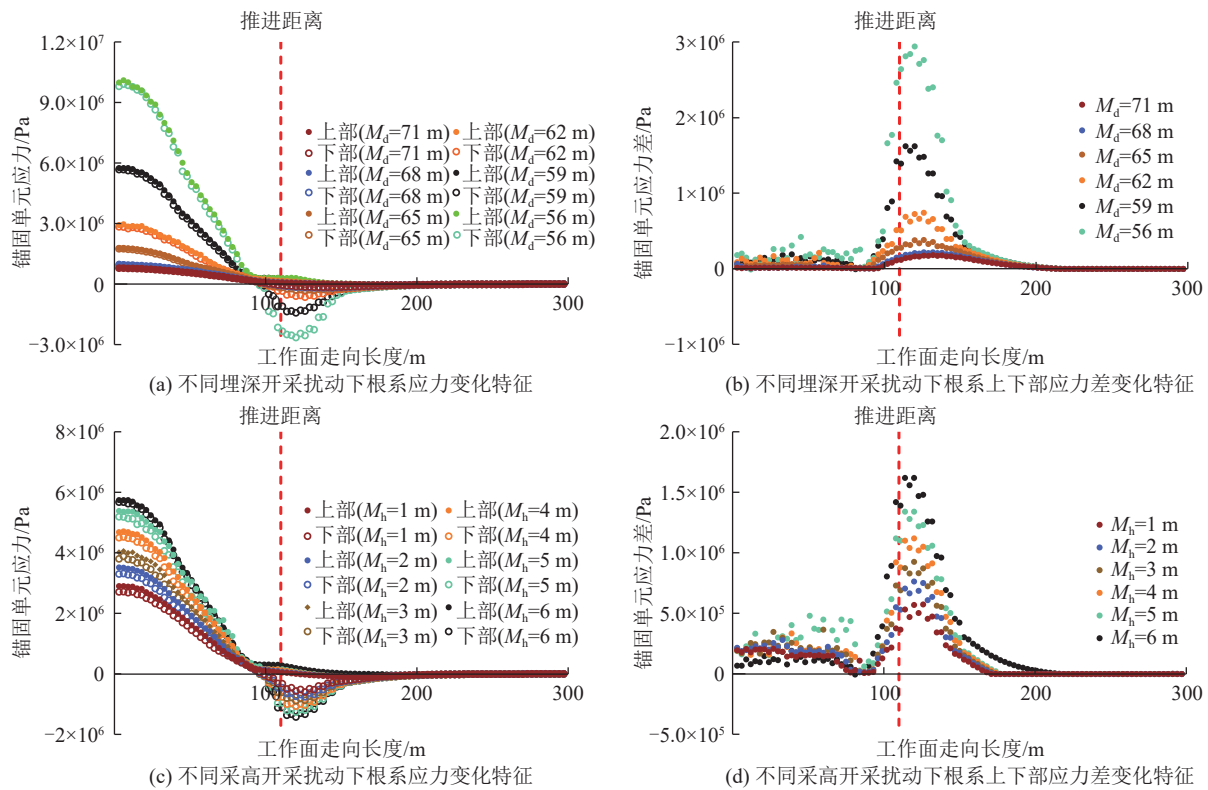


图8 不同埋深、采高开采扰动下根系应力变化特征

Fig.8 Variation characteristics of root stress caused by different mining thickness and buried depth

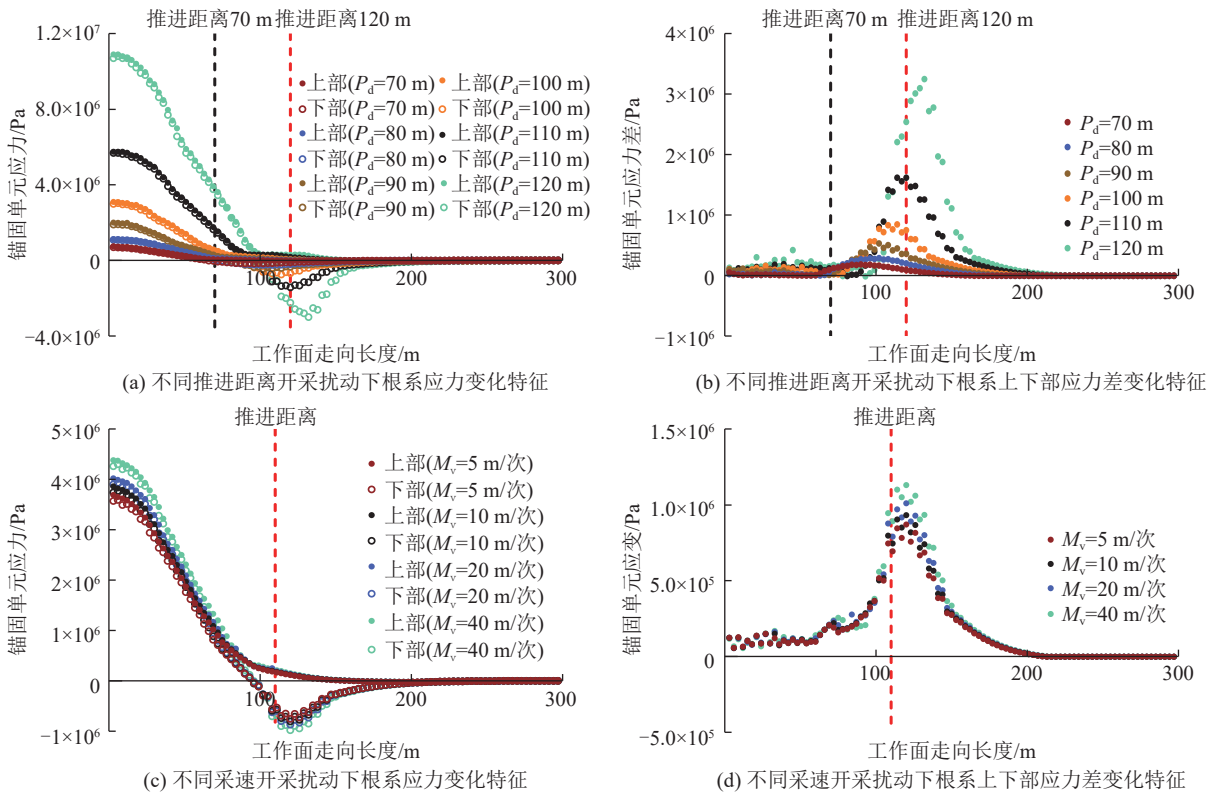


图9 不同推进距离与速度下根系应力变化特征

Fig.9 Variation characteristics of root stress under different propulsion distances and speeds

值分别为 2.00 MPa 和 1.90 MPa, 终采线附近根系上下部应力值分别为 0.066 MPa 和 -0.25 MPa, 应力差

为 0.316 MPa; 推进到 120 m 时, 开切眼处根系上下部应力值分别增加到 10.9 MPa 和 10.7 MPa, 终采线附近

根系上下部应力值分别增加到 0.26 MPa 和 -2.99 MPa, 应力差高达 3.25 MPa。从工作面走向 70 m 处, 分别以 5、10、20 m/次的速度推进至 110 m 处, 开切眼处根系上部应力值差异较小, 分别为 3.69、3.86、4.02 MPa; 开切眼处根系下部应力值分别为 3.57、3.74、3.90 MPa; 对应的终采线附近根系上下部应力差差异也较小, 分别为 0.694、0.745、0.790 MPa(图 9c—图 9d)。20 m/次的开采速度是前期调查获取的最高采速, 而通过上述模拟结果可知, 采速从 5 m/次增加到 20 m/次采动诱发根系上下部应力变化量很小, 为此本次模拟将采速增加至 40 m/次, 结果发现开切眼和终采线附近处根系下部应力差也仅为 0.12 MPa 和 1.13 MPa, 但是该采速在实际煤炭过程中很难达到, 因此, 在推进相同距离情况下, 不同采速采动诱发根系应力影响较小。

4.2.3 根土层力学性质(黏聚力、内摩擦角)对根系应力的影响

随根土层黏聚力增加, 开切眼处采动诱发植物根系上下部应力均逐渐降低, 其中, 当 $c=3$ kPa 时, 根系上下部应力分别高达 6.32 MPa 和 6.24 MPa; 当 $c=20$ kPa 时, 根系上下部应力分别降低至 4.93 MPa 和 4.90 MPa(图 10a)。当 $c=8$ kPa 与 10 kPa 时, 终采线附近根系上下部应力差分别为 1.67 MPa 和 1.62 MPa;

当 $c=3$ kPa 与 5 kPa 时, 终采线附近根系上下部应力差分别为 -0.27 MPa 和 -0.20 MPa; 当 $c=15$ kPa 与 20 kPa 时, 终采线附近根系上下部应力差均为 0.445 MPa(图 10b)。随根土层内摩擦角增加, 开切眼处采动诱发植物根系上下部应力均逐渐降低, 且均超过 4.0 MPa。当 φ 小于 15° 时, 终采线附近根系上下部应力差大于 1.5 MPa; 当 φ 大于 15° 时, 终采线附近根系上下部应力差较小, 处于 0.51~0.52 MPa(图 10c—图 10d)。不同根土层黏聚力、内摩擦角下, 采动诱发根系最大应力变化之处均位于终采线附近。

4.2.4 根土层根系密度与直径对根系应力的影响

当 ρ 为 99×99 时, 开切眼处根系上下部应力分别为 5.75 MPa 和 5.68 MPa; 直至 ρ 为 49×49 时, 开切眼处根系上下部应力分别增加至 5.91 MPa 和 5.76 MPa。当 ρ 分别为 99×99 、 82×82 、 76×76 、 65×65 、 57×57 和 49×49 时, 终采线附近根系上下部应力差最大, 分别为 1.62、1.46、1.46、1.42、1.41、1.41 MPa(图 11a—图 11b)。由此可知, 当开采条件一致, 开切眼处采动诱发植物根系上下部应力随植物根系密度的降低有极小幅增加, 而在终采线附近采动诱发植物根系上下部应力差达到最大, 但是不同根系密度下这种应力差的差异也较小。随根系直径的增加, 采动诱发植物根系上下部应力最大值出现在开切眼处, 当 d 分别为 1、

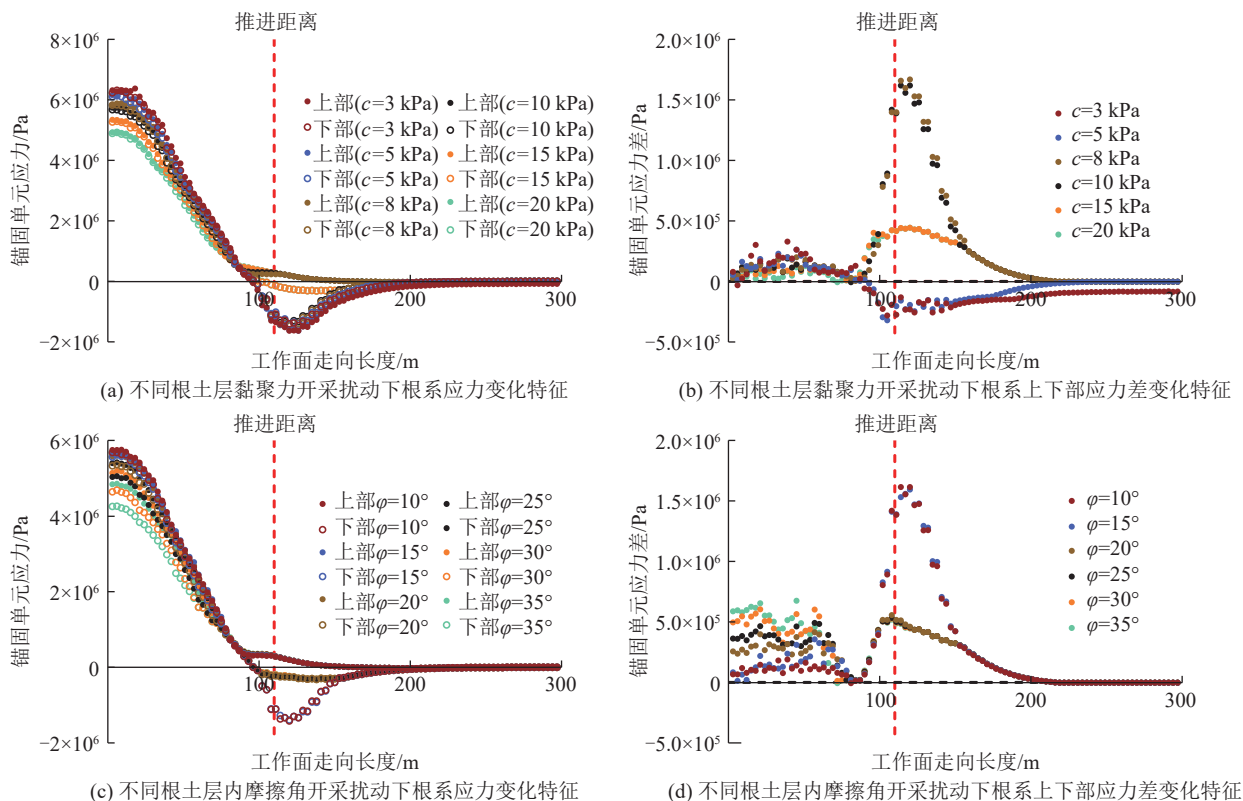


图 10 不同根土层黏聚力、内摩擦角下根系应力变化特征

Fig.10 Variation characteristics of root stress under different soil cohesion and internal friction angles

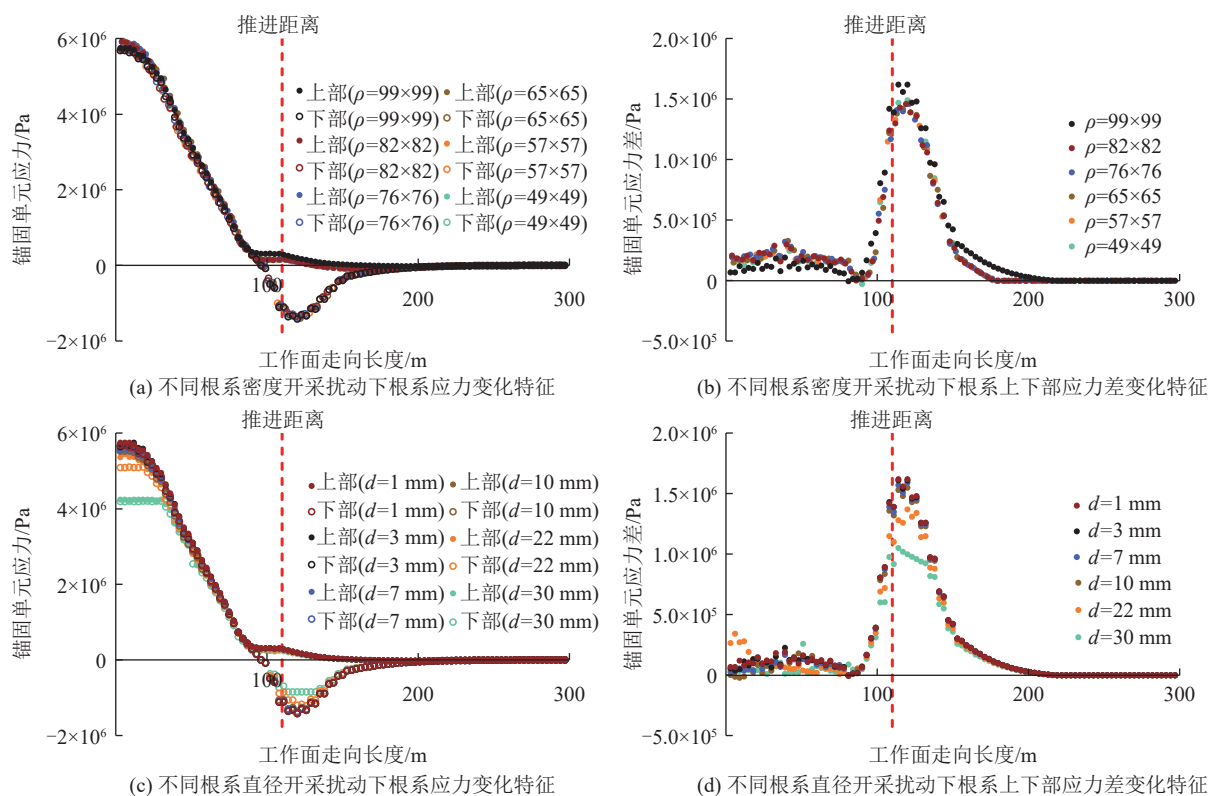


图 11 不同根系密度与直径下根系应力变化特征

Fig. 11 Variation characteristics of root stress under different root density and diameter

3、7、10、22、30 mm 时, 根系上部应力最大值分别为 5.75、5.70、5.59、5.52、5.36、4.24 MPa, 根系下部应力最大值分别为 5.68、5.64、5.56、5.52、5.09、4.19 MPa, 即根系上下部应力最大值随根系直径的增加而降低。而随根系直径的增加, 采动诱发植物根系上下部应力差最大值出现在终采线附近处, 当 d 分别为 1、3、7、10、22、30 mm 时, 根系上下部应力差分别为 1.62、1.61、1.57、1.53、1.28、1.05 MPa, 即终采线附近处植物根系上下部应力差随根系直径的增加而降低。

5 讨 论

5.1 采动诱发根土层与植物根系应力扰动机理

井工煤炭开采是从地层内部沉积岩获取煤炭资源, 采空区上覆岩层应力的平衡状态被破坏, 形成垮落带、裂隙带与弯曲下沉带, 工作面开采过程中覆岩内应力场变化是“三带”形成的驱动力^[3]。研究表明, 浅埋煤层工作面应力变化的突出特点是随开采推进巷道顶板基岩沿全厚切落, 开挖后顶板卸压, 在两帮形成应力集中区, 基岩破碎产生的顶板应力会波及地表, 形成的顶板应力峰值通常高达 20 MPa^[23]。工作面顶板在其自重和上覆岩层载荷作用下的运动, 伴随顶板采动应力向上覆岩层进行传递^[24], 顶板应力向地表传递过程应力受衰减系数影响, 土体沉陷裂隙区会

降低岩体完整性而弱化传递应力的能力, 进而降低应力大小^[23], 因此, 采动应力传递到根土层时, 根土表层剪应力降低至 1.25×10^4 Pa(图 5c), 且根土表层应力低于底层的 1.50×10^4 Pa(图 5d)。而不同推进距离条件下的传递到根土层最大应力存在明显差异, 其反映了推进距离对顶板应力向根土层应力传递的影响(图 5c—图 5d)。模拟结果显示顶板应力随工作面推进小于 80 m 时先增长后趋于稳定的过程, 随着工作面推进距离的增大, 顶板暴露面积逐步增大, 覆岩空间结构的几何尺度逐渐增大, 造成传递到采空区上覆岩层载荷随之增大, 导致根土表层与底层塑性区破坏范围均随着工作面推进距离的增大而增大, 扰动区根系受到的应力也随着工作面推进距离的增大而增大(图 9a—图 9b)。采深、采高相同条件下, 随采速的增加工作面推进相同距离(110 m)所需时间变短, 仅覆岩破坏达到充分采动的的时间越快, 同时由于推进距离相同, 采动应力向上覆岩层传递扰动范围基本一致(图 5a—图 5b), 不同采速下扰动区根系受到的应力差异也较小(图 9c—图 9d)。

煤层开采高度直接影响垮落带和裂隙带形态的发育, 采煤厚度的增加上覆岩层垮落变形加剧, 裂隙带发育延伸范围增大, 经岩层传递至地表后, 根土层发生剪切破坏的区域增大^[25]。已有研究表明, 煤层采

高越大,覆岩破坏达到充分采动的推进距离越大^[26],换言之,推进距离相同的情况下,覆岩破坏高度发育到最大值的区域随采高的增大而增大,因此在根土层形成高剪应力平稳区的范围越大(图 4c—图 4d),扰动区根系受到的应力也随着采高的增大而增大(图 8c—图 8d)。岩体力学性质一致的情况下,煤层埋深越大,煤层与地表间的岩层越厚,覆岩的承载能力越强^[26],意味着推进距离相等时开挖煤层引起的岩层应力传递到地表所需时间越久。另外埋深越大,覆岩破坏达到充分采动的推进距离越小,即推进距离相同的情况下,覆岩破坏高度发育到最大值的区域随埋深的增大而减小(图 4a—图 4b),故煤层埋深距地表 68、71 m 时,推进到 110 m 时采动应力还处于增长阶段,根土表层与底层均未发生剪切破坏,该煤层埋深下的根土层并未达到使土体发生剪切破坏时的最大剪应力,此时扰动区根系受到的应力相对较低(图 8a—图 8b)。

依据库仑定律 $\tau = c + \sigma \tan \varphi$, 土体内摩擦角 φ 与黏聚力 c 是根土复合体的抗剪强度关键影响参数^[25], 仅考虑单一变量的情况下, 根土复合体的抗剪强度均随 φ 与 c 的增加而增大。土体内摩擦角 φ 越大, 颗粒间的摩擦力越大, 土体的抗剪性能越强^[27], 意味着在煤炭采高、埋深、推进距离均一致时, 根土层发生剪切破坏的区域及高剪应力平稳区的范围均随内摩擦角 φ 的增大逐渐减小(图 6a—图 6b)。类似的, 土壤黏聚力是土壤颗粒间的库仑力、范德华力、胶结作用力等的总和^[28], 体现在土壤颗粒之间的结合程度的强弱, 根土层黏聚力较大, 土体颗粒间作用力越大, 土体抗剪强度越高, 意味着开采条件一致时, 根土层发生剪切破坏的区域及高剪应力平稳区的范围均随黏聚力 c 的增大逐渐减小(图 6c—图 6d)。当土体的抗剪性能越强时, 土壤也能够更好地支撑和保护植物根系, 从而减少因外力作用导致的根系损伤, 有利于植物根系的稳固和生长(图 10a—图 10d)。

虽然植被根系对浅层土可有效起到加筋作用, 对深层土体起到锚固作用, 但在模型中根土底层实际上也是黄绵土层最顶部, 这时植被根系对塑性区应力分布影响甚微, 同时由于模型构建时, 锚杆简化为 1.5 m 长主根, 虽然根土底层应力向表层传递时受衰减系数(通常在 0~1.0)影响^[29], 导致根土底层应力大于表层, 应力衰减系数主要与土层物理力学性质有关。但是在 1.5 m 尺度范围内, 根系对土体加筋/锚固作用体现的并不明显。从具体数值来看, 根系密度 ρ 从 49×49 增加到 99×99, 根土表层应力从 12 472 Pa 增加至 12 616 Pa, 根土底层应力从 15 050 Pa 增加至 15 066 Pa;

根系直径从 1 mm 增加至 30 mm, 根土表层应力从 12 616 Pa 降低至 12 490 Pa, 根土底层应力从 15 066 Pa 增加至 15 083 Pa(图 7)。因此, 仅考虑单一变量的情况下, 植物根系密度与直径的变化对根土层应力及塑性区破坏程度影响较小。另外, 模拟发现根系开采扰动下所受最大应力随根径的增大而减小(图 11c—图 11d), 原因在于在受到相同拉力时, 根径较大其变形程度越大, 即应变更大。又因应力是作用于单位面积上的力, 当根径增大时, 相同的拉力作用下, 根系单位面积上的应力会减小, 即最大应力值减小。此外, 根径较大的根系由于其更大的横截面积, 能够更好地分散和吸收拉力, 从而表现出较低的应力集中现象, 这也是导致最大应力随根径增大而减小的原因之一^[30]。需要指出的是, 从不同条件下锚杆上部 and 下部存在应力差, 特别是终采线附近应力差更是高于充分采动稳沉区, 当然这只是推进到终采线时呈现的最终模拟结果, 实际上开采推进过程该现象一直存在, 有研究表明, 锚杆上部和下部所受力的非一致性是引发采空区边界附近根系损伤的重要原因^[9], 因此, 开采诱发的根系应力损伤区域随着开切眼推进到终采线全过程逐渐扩大。

5.2 植物根系应力—开采扰动的响应关系分析

状态响应函数一般有连续渐变函数、阶跃变化函数、带时滞的状态变化函数、不可逆变化函数 4 种类型^[31]。可梯度观测、控制试验、模型模拟等方法获取基础数据, 在此基础上构建生态系统状态变量和控制参数的响应函数, 通过分析响应函数的极限、收敛、拐点特征, 进而对状态响应函数类型进行判别^[32]。

依据前文提到的锚杆上部和下部所受力的非一致性是根系损伤的重要诱因, 笔者基于对照组基本模型, 从模拟结果中提取推进距离为 110 m 时锚杆上下部应力与应力差作为因变量(此时上覆岩层尚未稳沉, 锚杆上下部应力差最大), 选择采高、埋深、推进距离、推进速度作为自变量(控制参数), 分析控制参数与锚杆上下部应力与应力差之间的响应函数(图 12)。推进距离小于 100 m 时, 锚杆上下部应力差随推进距离的增加递增, 推进距离在 100~110 m 时, 锚杆上下部应力差出现明显突变拐点, 从推进距离 100 m 时的 0.767 MPa 迅速增加至 1.38 MPa, 这符合阶跃变化响应函数变化特征(图 12c)。这意味着在终采线位置的植物根系上下部会受到较大的应力差, 但是此时植物根系是否会被拉断, 还与植物单根极限抗拉强度相关, 若此时的应力差大于单根极限抗拉强度, 则根系损伤形式为拉断损伤^[9]。锚杆上下部应力差均随采高、推进速度的增加线性递增, 响应函数类型属于连续渐变

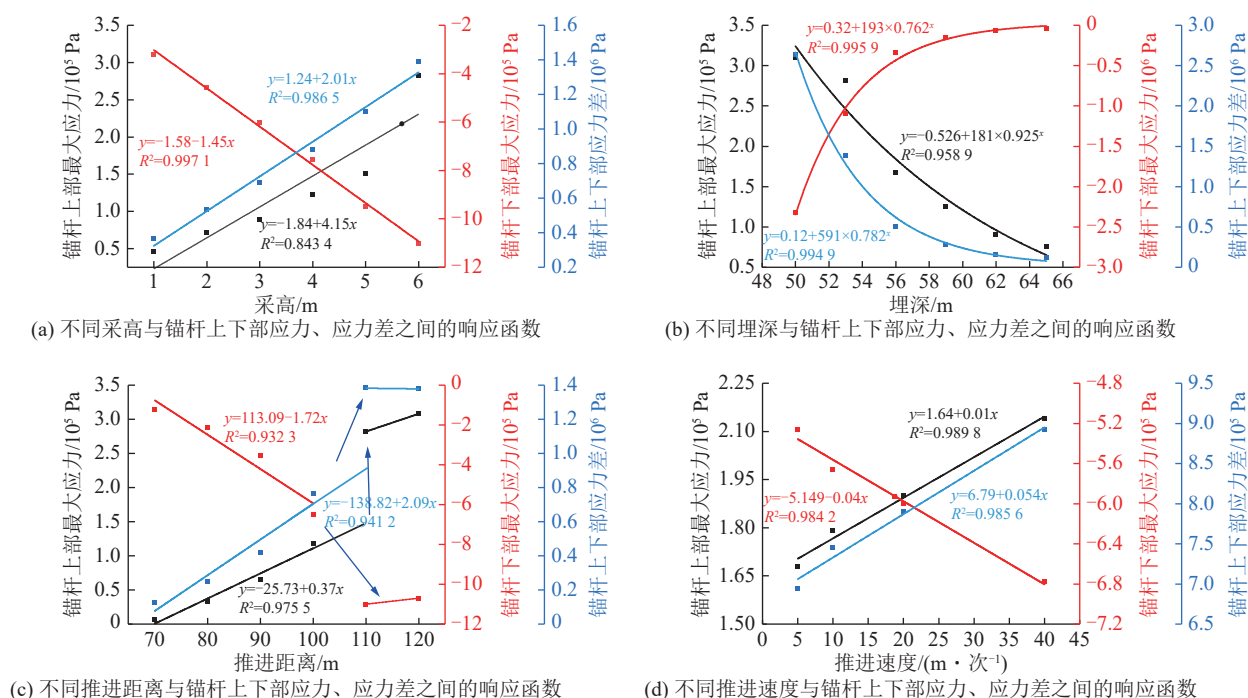


图12 不同采高、采深、推进距离、推进速度锚杆上下部应力与应力差之间的响应函数

Fig.12 Response function between upper and lower stress and stress difference of bolt with different mining thickness, mining depth, advancing distance and advancing speed

函数,此时响应函数不收敛且不存在明显突变拐点(图12a、图12d)。锚杆上下部应力差随埋深的增加递减,此时响应函数类型依然属于连续渐变函数(图12b),但该响应函数随着埋深的增加无线趋近于0,理论上来说可以通过增加埋深来降低对植物根系的应力损伤,但是在实际中采深主要决定于煤层的赋存条件。从植被保护或源头减损视角来说,半干旱矿区井工煤炭开采必须充分调研不同植物根系力学特性,调控开采沉陷位态,如使覆岩运动位态从台阶式下沉转变为渐进式沉降,降低应力扰动水平,还可采用充填、部分充填等静态开采技术,优化采厚和推进速度等手段尽可能降低开采扰动对植物根系的应力损伤。

5.3 研究不足

本文旨在采用数值模拟手段,通过控制变量法从不同根土层物理力学性质、开采条件和根系特性的角度,揭示半干旱矿区采动诱发植物根系应力损伤规律,避免了野外现场监测试验的不确定性,但仍存在如下研究不足:①模型构建时,依据锚固理论采用锚杆单元来代表植物的垂直主根,从图2典型植物根系形态可知,现实植物根系类型包括主根和各级侧根或不定根^[33],而植物侧根或不定根的延伸方向与垂直方向存在较大的夹角,且侧根或不定根根径通常小于主根、根系密度大于主根,会导致采动诱发该类根系的应力损伤规律存在差异,后续模拟研究将进一步通过构建具有侧根的根系模型丰富完善采动诱发植物根系应

力损伤规律;②模型中植物主根依据锚固理论采用锚杆进行简化替代,把根假设成刚性杆件来进行模拟,这在前人的研究中多采用此方法来简化根系^[9,34],证明此类替代在模拟试验中是可行的,但是土体中植物根系通常是柔性的,根系柔性能够帮助植物在遭遇外界压力或干扰时,通过调整自身形态来保持稳定,确保植物能够稳定生长。另外,当根系抗拉强度低于根土层界面强度时出现根系拉断的现象,而锚杆所能承受的抗拉强度远高于柔性根系,因此,在模拟结果中并不能看到锚杆被拉断的情况,导致模拟结果存在一定不足,模拟过程必须尽量赋予锚杆单元相应的根系力学性质。③西部干旱半干旱矿区还包括有过断层开采、倾斜长臂开采、深部开采、多层重复开采等各种类型工作面,判别植物根系应力-开采扰动的响应函数类型时,应构建相应的模型来进行具体分析。

6 结论

1) 开采基岩破断产生的顶板应力会传递到根土层,受衰减系数影响根土底层应力水平高于表层,根土层塑性区破坏范围随工作面不断推进递增,扰动区根系上下部受到的最大剪应力增加,根系上下部所受应力的非一致性是诱发采空区边界附近根系损伤的重要原因。

2) 控制单一变量的情况下,扰动区根土层受到的最大剪应力导致的塑性剪切破坏区域随着采高的增

加递增,随埋深的增加递减,随采速的增加递增;随内摩擦角和黏聚力增加,土体的抗剪性能越强,根土层发生剪切破坏的区域递减,利于植物根系保护;随根径的增大,根系单位面积上的应力递减,根土层塑性区破坏程度基本无影响,而根系密度的变化对根系应力及根土层塑性区破坏程度基本无影响。

3) 根系上下部应力差与采高、采深、采速之间的响应函数类型均为连续渐变函数;与推进距离之间的响应函数为阶跃变化函数,半干旱矿区井工煤炭开采时需结合植物根系力学特性,调控开采沉陷位态,或采用充填、部分充填等静态开采技术,优化采高和推进速度等手段从源头来降低开采扰动对植物根系的应力损伤。

参考文献(References):

- [1] 刘英,雷少刚,陈孝杨,等. 神东矿区植被覆盖度时序变化与驱动因素分析及引导恢复策略[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3319–3331.
LIU Ying, LEI Shaogang, CHEN Xiaoyang, et al. Temporal variation and driving factors of vegetation coverage in Shendong central mining area based on the perspective of guided restoration[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3319–3331.
- [2] 王双明,杜华栋,王生全. 神木北部采煤塌陷区土壤与植被损害过程及机理分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 17–26.
WANG Shuangming, DU Huadong, WANG Shengquan. Analysis of damage process and mechanism for plant community and soil properties at northern Shenmu subsidence mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 17–26.
- [3] 钱鸣高,许家林. 煤炭开采与岩层运动[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 973–984.
QIAN Minggao, XU Jialin. Behaviors of strata movement in coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 973–984.
- [4] LU L, FAN H D, LIU J, et al. Time series mining subsidence monitoring with temporarily coherent points interferometry synthetic aperture radar: A case study in Peixian, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(15): 461.
- [5] FENG Y, WANG J M, BAI Z K, et al. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 191: 12–25.
- [6] LIU Y, LEI S G, CHEN X Y, et al. Disturbance mechanism of coal mining subsidence to typical plants in a semiarid area using O-J-I-P chlorophyll a fluorescence analysis[J]. Photosynthetica, 2020, 58(5): 1178–1187.
- [7] BANDOPADHYAY S, LI X X, BOWSHER A W, et al. Disentangling plant- and environment-mediated drivers of active rhizosphere bacterial community dynamics during short-term drought[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 6347.
- [8] 丁玉龙,雷少刚,卞正富,等. 开采沉陷区四合木根系抗变形能力分析[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(6): 970–974, 981.
DING Yulong, LEI Shaogang, BIAN Zhengfu, et al. Distortion-resistant ability of Tetraena mongolica root at the mining subsidence area[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(6): 970–974, 981.
- [9] 潘东江,张农,赵一鸣,等. 西部矿区植被根系采动损伤特征及细观力学机制[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 373–380.
PAN Dongjiang, ZHANG Nong, ZHAO Yiming, et al. Characteristics and mesoscopic mechanics of vegetation roots damage induced by mining in western mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 373–380.
- [10] 焦峰,许江,郭保华,等. 充填厚度对岩石节理剪切强度影响的剪切试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(2): 405–412.
JIAO Feng, XU Jiang, GUO Baohua, et al. A shear test study on the influence of filled thickness on the shear strength of rock joints[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(2): 405–412.
- [11] 宋世杰,张家杰,杨帅,等. 黄河上中游采煤沉陷区水土流失效应的探索与思考[J]. 绿色矿山, 2024, 2(2): 169–182.
SONG Shijie, ZHANG Jiajie, YANG Shuai, et al. Exploration and thinking on soil erosion effect of coal mining subsidence area in the upper and middle reaches of the Yellow River[J]. Journal of Green Mine, 2024, 2(2): 169–182.
- [12] BUTNOR J R, SAMUELSON L J, STOKES T A, et al. Surface-based GPR underestimates below-stump root biomass[J]. Plant and Soil, 2016, 402(1): 47–62.
- [13] ZHU H, ZHANG L M, XIAO T, et al. Enhancement of slope stability by vegetation considering uncertainties in root distribution[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 85: 84–89.
- [14] LOTFALIAN M, NASIRI M, MODARRES A, et al. Slope stability analysis considering weight of trees and root reinforcement[J]. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 2019, 27(4): 201–208.
- [15] PHILLIPS C J, EKANAYAKE J C, MARDEN M. Root site occupancy modelling of young New Zealand native plants: Implications for soil reinforcement[J]. Plant and Soil, 2011, 346(1): 201–214.
- [16] 张涛,刘松玉,蔡国军. 基于能量原理的木质素固化粉土剪切特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1501–1512.
ZHANG Tao, LIU Songyu, CAI Guojun. Shear behaviors of lignin stabilized silt based on the principle of energy conservation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1501–1512.
- [17] 余大军,杨张杰,郭运华,等. 基于 FLAC^{3D} 横观各向同性模型的煤矿井田初始地应力场反演方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(10): 3427–3434.
YU Dajun, YANG Zhangjie, GUO Yunhua, et al. Inversion method of initial geostress in coal mine field based on FLAC^{3D} transverse isotropic model[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(10): 3427–3434.
- [18] 刘辉,刘小阳,邓喀中,等. 基于 UDEC 数值模拟的滑动型地裂缝发育规律[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 625–632.
LIU Hui, LIU Xiaoyang, DENG Kazhong, et al. Developing law of sliding ground fissures based on numerical simulation using UDEC[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 625–632.
- [19] PANG L F, LIU W T, QIN Y Y. Analysis of main controlling factors of overburden failure in coal mining under thick coal seam geological conditions[J]. Geotechnical and Geological Engineering,

- 2021, 39(2): 883–896.
- [20] 张云伟, 戈振扬, 周跃. 植物侧根对土壤牵引效应的计算机仿真[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(11): 35–39.
- ZHANG Yunwei, GE Zhenyang, ZHOU Yue. Computer simulation of traction effect of plant lateral roots on soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(11): 35–39.
- [21] 田佳, 曹兵, 及金楠, 等. 花棒根-土复合体直剪试验的有限元数值模拟与验证[J]. *农业工程学报*, 2015(16): 152–158.
- TIAN Jia, CAO Bing, JI Jinnan, et al. Numerical simulation and validation test of direct shear test for root-soil composite of *Hedysarum scoparium* using finite element method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015(16): 152–158.
- [22] LAI X, LIU L S, LIU Q W, et al. Slope stability analysis by peridynamic theory[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 744–746: 584–588.
- [23] 黄庆享, 高翔宇, 贺雁鹏, 等. 浅埋近距离煤层工作面过采煤柱覆岩结构及动载传递规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(3): 517–524.
- HUANG Qingxiang, GAO Xiangyu, HE Yanpeng, et al. Research on strata structure and dynamic load transfer of under coal pillars of last mining section in shallow and close coal seams[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(3): 517–524.
- [24] 李春元, 张勇, 左建平, 等. 深部开采砌体梁失稳扰动底板破坏力学行为及分区特征[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(5): 1508–1520.
- LI Chunyuan, ZHANG Yong, ZUO Jianping, et al. Floor failure mechanical behavior and partition characteristics under the disturbance of voussoir beam instability in deep coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1508–1520.
- [25] 张锋, 李永恩, 郭志强, 等. 采动巷道软弱顶板塑性破坏演化规律与支护方案[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(7): 24–30.
- ZHANG Feng, LI Yongen, GUO Zhiqiang, et al. Evolution law and control method of plastic zone in soft weak roof of mining roadway[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(7): 24–30.
- [26] 郭文兵, 赵高博, 白二虎. 煤矿高强度长壁开采覆岩破坏充分采动及其判据[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(11): 3657–3666.
- GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, BAI Erhu. Critical failure of overlying rock strata and its criteria induced by high-intensity longwall mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(11): 3657–3666.
- [27] TANG Y J, XIE Z, XU D C, et al. Research on the shear angle theory based on the internal friction in high-speed cutting of high-entropy alloy FeCoNiCrAl[J]. *Strength of Materials*, 2023, 55(1): 214–225.
- [28] 田愉琴, 王兵, 汪建芳, 等. 黄土丘陵区典型草本根系特征对土壤抗剪特性的影响[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(3): 153–159.
- TIAN Yuqin, WANG Bing, WANG Jianfang, et al. Influence of typical herbaceous root characteristics on soil shear properties in Loess Hilly Regions[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(3): 153–159.
- [29] 钟涛平, 李振雷, 何学秋, 等. 弱化浅层岩体防治急倾斜特厚煤层冲击地压研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2024, 6(3): 16–29.
- ZHONG Taoping, LI Zhenlei, HE Xueqiu, et al. Research on rock burst prevention by shallow rock mass weakening in steeply inclined and extremely thick coal seams[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2024, 6(3): 16–29.
- [30] 张欣, 王博, 刘铁军, 等. 半干旱矿区典型灌木根系固土力学及疲劳性能的差异性[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(6): 47–53, 87.
- ZHANG Xin, WANG Bo, LIU Tiejun, et al. Differences in soil reinforcement and root fatigue properties of typical shrubs in semi-arid mining areas[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(6): 47–53, 87.
- [31] COLDING J. Resilience practice: Building capacity to absorb disturbance and maintain function[J]. *Ecological Restoration*, 2014, 32(2): 214–215.
- [32] 雷少刚, 卞正富, 杨永均. 论引导型矿山生态修复[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 915–921.
- LEI Shaogang, BIAN Zhengfu, YANG Yongjun. Discussion on the guided restoration for mine ecosystem[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 915–921.
- [33] SAFI A. WOX11-mediated plant resilience: Nematodes cut and adventitious lateral roots surge[J]. *Plant Physiology*, 2024, 195(1): 273–275.
- [34] 言志信, 宋云, 江平, 等. 植物摩擦型根-岩土相互作用的初步研究[J]. *中国科学(技术科学)*, 2010, 40(9): 1109–1113.
- YAN Zhixin, SONG Yun, JIANG Ping, et al. Preliminary study on interaction between plant frictional root and rock-soil mass[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2010, 40(9): 1109–1113.