

公路隧道揭煤掌子面前方围岩应力分布规律

龙其毕¹, 黄飞^{1,2*}, 罗亚飞^{1,2}, 钟小凤¹, 刘磊¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为了研究扁平大跨度公路隧道揭煤掌子面前方围岩的应力分布规律, 以松坎隧道为工程背景, 采用FLAC^{3D}数值模拟软件构建隧道穿越煤层的数值计算模型, 分析掌子面前方围岩的应力演化规律。研究表明: (1) 隧道掘进过程中, 掌子面前方围岩的垂直应力均呈现先急剧增大后逐渐衰减至原岩应力的趋势, 但掌子面前方不同位置处的围岩所受垂直应力集中系数有所差异, 具体表现为隧道底部应力集中系数大于隧道顶部, 隧道左侧应力集中系数大于右侧; (2) 随着掌子面与煤层距离减小, 围岩垂直应力的变化区域宽度呈现先减小后增大的“V”型变化趋势, 隧道左侧的应力变化区域宽度变化幅度大于右侧; (3) 掌子面前方围岩内的水平应力呈现出从零逐渐增大至原岩应力的变化趋势, 掌子面离煤层越近, 前方围岩水平应力增幅越小。

关键词: 隧道; 掌子面; 应力分布; 煤系地层; 数值模拟

中图分类号: U451.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2025)01-0050-07

Stress Distribution Law of Surrounding Rock in Front of Tunnels Face During Coal Seam Penetration in Highway Tunnels

LONG Qibi¹, HUANG Fei^{1,2*}, LUO Yafei^{1,2}, ZHONG Xiaofeng¹, LIU Lei¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disaster for Southern Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the stress distribution law of surrounding rock in front of the tunnel face in flat large-span highway tunnel, taking Songkan tunnel as the engineering background, the numerical calculation model of tunnel crossing coal seam is constructed by FLAC^{3D} numerical simulation software, and the stress evolution law of surrounding rock in front of the tunnel face is analyzed. The results show that firstly, in the process of tunnel excavation, the vertical stress of the surrounding rock in front of the tunnel face increases sharply at first and then decreases gradually to the original rock stress. However, the vertical stress concentration factors of the surrounding rock at different positions in front of the tunnel face are different. The stress concentration factor at the bottom of the tunnel is greater than that at the top of the tunnel, and the stress concentration factor on the left side of the tunnel is greater than that on the right side. Secondly, as the distance between the tunnel face and the coal seam decreases, the width of the change area of the vertical stress of the surrounding rock decreases first and then increases in a shaped “V”. The width of the stress change area on the left side of the tunnel is larger than that on the right side. Lastly, the horizontal stress in the surrounding rock in front of the tunnel face shows a trend of increase from zero to the original rock stress. The closer the tunnel face is to the coal seam, the smaller the increase of the horizontal stress of the surrounding rock in front of the tunnel face.

Keywords: tunnel; tunnel face; stress distribution; coal-bearing strata; numerical simulation

收稿日期: 2024-11-01

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52274198)

* 通信作者, E-mail: fhuang@hnust.edu.cn

穿煤系地层的隧道工程在施工过程中潜在瓦斯灾害风险,对施工人员生命安全构成重大威胁,同时又可能导致工程效益严重损失^[1].公路隧道断面较大,全断面面积可达百余平方米,且公路隧道形状扁平,跨度较大,在隧道掘进施工过程中,掌子面拱顶、拱肩与拱底等不同位置的围岩开挖卸载后应力集中程度差异较大,导致掌子面前方不同损伤程度的裂隙岩体延伸至煤层,瓦斯气体沿裂隙通道渗入隧道内,易引发瓦斯事故^[2].

现阶段,一些学者基于数值模拟、室内试验等方法对隧道揭煤防突和隧道穿不良地层时围岩的稳定性展开研究,并取得诸多成果^[3-6].马强等^[7]采用理论分析和数值模拟相结合的方法研究掌子面前方围岩的破坏特征,确定了穿煤隧道的最小安全岩柱厚度;龚兵文等^[8]根据围岩应力演化规律定义预测距离和安全保障距离,并建立预测体系且成功应用于施工现场;姚海波等^[9]采用数值模拟方法对破碎带油气田隧道开挖掌子面前方围岩安全厚度进行分析,并结合现场监测数据,确定出瓦斯隧道施工围岩安全厚度.

由于公路穿煤隧道断面尺寸较大,施工过程中掌子面各位置围岩受力情况不同,导致前方煤岩体的应力演化路径各异,由此诱导产生不同形态、不同程度与不同范围的损伤裂隙,为煤层瓦斯的渗流提供了不同的应力条件和渗流通道.基于此,以松坎隧道为工程背景,通过数值模拟方法研究距煤层不同位置的掌子面前方围岩应力演化特征,该研究对公路隧道穿越煤层的安全施工具有一定的指导意义.

1 工程背景与数值模型

1.1 工程概况

松坎隧道项目区地处黔北高原北部,属桐梓县尧龙山镇及松坎镇.隧道设计为分离式单向3车道,内轮廓高8 m,净宽16 m,隧道全断面面积大于120 m²,属于典型大断面公路隧道.据勘探资料,该隧道的煤岩体主要由泥岩、煤、砂岩和灰岩组成,其中隧道穿煤处煤层倾角为60°~70°,煤层瓦斯含量为8.10~25.72 m³/t,实测煤层最大瓦斯压力为2.63 MPa.

1.2 数值计算模型

采用FLAC^{3D}有限差分软件模拟分析隧道断面各位置前方围岩应力的演化特征和前方围岩塑性区分布规律.所建数值模型长100 m,宽60 m,高60 m;煤层倾角70°,与隧道夹角45°,位于隧道掘进50 m位置,如图1所示.假设边界条件:模型侧面使用水平方向约束,底面使用固定约束,顶部为自由面.假设分步开挖,每步开挖时间步相同,忽略开挖过程的影响.依据《公路瓦斯隧道设计与施工技术规范》(JTG/T 3374—2020),隧道掌子面在距煤层不小于20 m位置时应进行超前钻探,在距煤层垂距10 m的位置应再次探测,钻孔抽放瓦斯时掌子面距煤层距离不小于5 m^[10],故分别在掌子面距煤层20,10,5 m这3个位置设置监测点对前方围岩应力进行监测.各监测点位置及编号如图2所示.

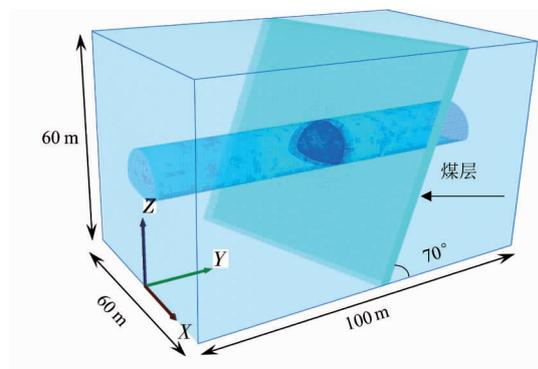


图1 计算模型

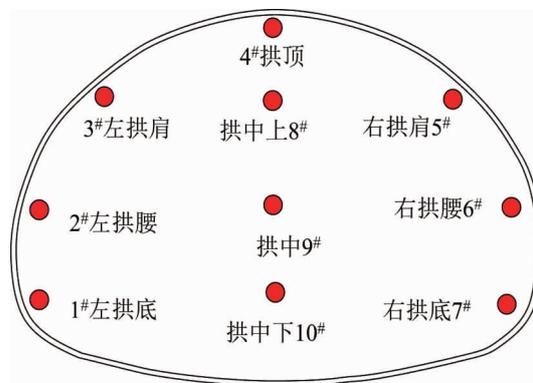


图2 隧道监测点位置及编号

1.3 相关参数设定

该隧道的煤岩体主要由泥岩、煤、砂岩和灰岩组成,考虑Mohr-Coulomb模型适用于土壤、岩石和混凝土等松散胶结的颗粒材料,符合本次模拟的需求,故选取Mohr-Coulomb模型作为本次研究的本构模型.综合考虑室内物理力学试验结果和工程地质资料,确定围岩力学参数^[11].数值计算参数如表1所示.

表1 数值计算参数

名称	密度/(kg/m ³)	体积模量 K /GPa	剪切模量 G /GPa	黏聚力 c /MPa	抗拉强度 t /MPa	摩擦角 φ /(°)
粉砂岩	2 550	10.30	8.15	3.11	2.60	39.0
细粉砂岩	2 700	14.86	11.31	3.56	4.30	38.6
泥岩	2 500	6.08	2.90	0.94	1.77	26.0
煤	1 380	4.60	2.05	1.21	0.62	38.3

2 计算结果及分析

2.1 隧道断面不同位置处垂直应力演化特征

为了描述隧道掌子面不同位置处的应力分布差异性,本文采用应力集中系数 K 进行定量描述,计算式为

$$K = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma} \quad (1)$$

式中: σ_{\max} 为最大应力; σ 为原岩等效应力.

隧道断面不同位置处垂直应力变化规律如图3所示,其中区域I为前方围岩应力迅速增大阶段,区域II为前方围岩应力缓慢下降阶段.由图3可知,掌子面前方围岩垂直应力呈现先增大后减小的变化趋势.当掌子面距煤层20 m时,隧道左侧和右侧拱底、拱腰、拱肩处围岩垂直应力在掌子面前方0~5 m达到最大值,隧道左侧拱底(1[#])、拱腰(2[#])和拱肩(3[#])的应力集中系数分别为1.56,1.48和1.33;隧道右侧拱底(7[#])、拱腰(6[#])和拱肩(5[#])应力集中系数分别为1.71,1.64和1.33.隧道中轴线拱顶(4[#])和拱中上(8[#])处围岩垂直应力在掌子面前方7.5 m达到最大值,应力集中系数均为1.31;隧道中轴线拱中(9[#])和拱中下(10[#])处围岩应力集中系数相近,分别为1.40和1.41.

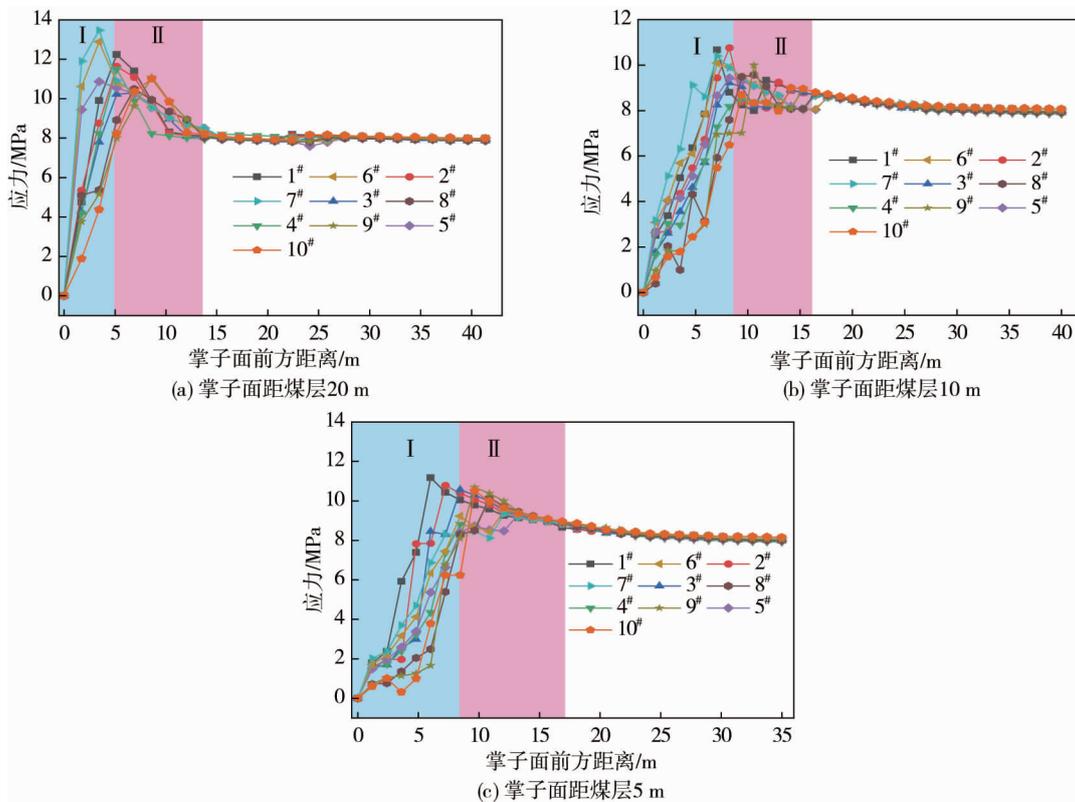


图3 开挖过程中掌子面前方围岩垂直应力分布

当掌子面距煤层10 m时,掌子面前方左侧和右侧拱底、拱腰、拱肩处围岩的垂直应力均存在差异,左拱底(1[#])和右拱底(7[#])围岩的垂直应力差异明显,应力集中系数分别为1.30和1.33;左拱腰(2[#])围岩的应力集中系数较大,为1.35;右拱肩(5[#])的应力集中系数大于左拱肩(3[#]),两者应力集中系数分别为1.18

和1.15.隧道中轴线前方即拱中上(8[#])、拱中(9[#])和拱中下(10[#])三者的应力集中系数差异很大,应力集中系数分别为1.22,1.25和1.38.

当掌子面距煤层5 m时,前方左侧围岩应力集中系数表现为拱底(1[#])>拱腰(2[#])>拱肩(3[#]),应力集中系数分别为1.39,1.35和1.32;前方右侧围岩应力集中系数呈现拱腰(6[#])>拱肩(5[#])=拱底(7[#]),应力集中系数分别为1.18,1.17和1.17;隧道中轴线前方围岩应力集中系数表现为拱中(9[#])>拱中下(10[#])>拱中上(8[#])>拱顶(4[#]),应力集中系数分别为1.33,1.32,1.27和1.25.

2.2 隧道截面不同位置处应力分布宽度分析

已有研究表明^[12-13]:从垂直应力最大值的位置到掌子面的距离为垂直应力的增长区,该区容易受外部载荷扰动影响而产生破坏,使弹性区积累的大量弹性能突然释放,从而造成煤岩动力灾害.因此,分析应力增长区的宽度对预防煤岩动力灾害事故具有重要的作用.以下规定:垂直应力最大值的位置到掌子面的距离为 L_1 ;垂直应力最大值的位置至原岩应力位置为卸荷区,其距离记为 L_2 ;图3中区域I的宽度对应 L_1 ,区域II的宽度对应 L_2 ,这2个区域即为掌子面前方围岩应力变化区,本文定义其宽度为 L ,三者关系为

$$L = L_1 + L_2. \quad (2)$$

2.2.1 隧道断面不同位置处应力增长区宽度分析

图4为掌子面前方不同位置围岩应力增长区宽度分布.从图4可知,隧道断面前方围岩应力增长区宽度随掌子面与煤层距离增大总体表现为先增大后减小的趋势.断面左侧拱腰(2[#])和拱肩(3[#])在掌子面距煤层8 m时,应力增长区宽度达到最大,分别为10.48和11.79 m;拱底(1[#])在掌子面距煤层10 m时应力增长区宽度达到最大,为11.03 m.断面右侧前方围岩应力增长区宽度均在掌子面距煤层6 m时达到最大,右侧拱底(7[#])、拱腰(6[#])和拱肩(5[#])的应力增长区宽度分别为12.41,13.65和13.65 m.断面中轴线拱顶(4[#])、拱中上(8[#])和拱中(9[#])的应力增长区宽度在掌子面距煤层8 m时达到最大值,分别为14.41,14.41和13.10 m,拱顶(4[#])和拱中上(8[#])的应力增长区宽度相同且最宽;拱中下(10[#])在掌子面距煤层10 m时,应力增长区宽度达到最大,宽度为13.79 m.

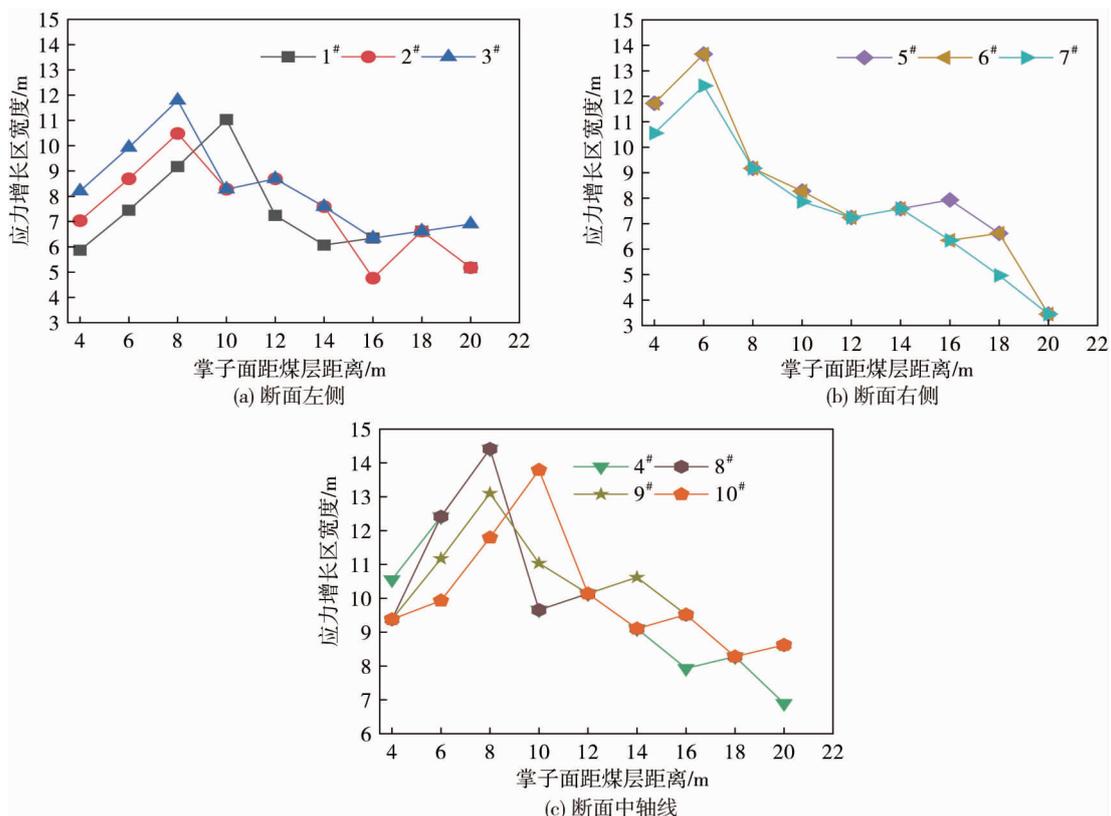


图4 掌子面前方围岩应力增长区宽度分布

2.2.2 隧道断面不同位置处应力变化区宽度分析

图5为掌子面前方不同位置围岩应力变化区宽度分布.从图5可知,随着隧道掌子面与煤层距离增大,掌子面前方围岩应力变化区宽度总体表现为先减小后增大的“V”型变化趋势,掌子面距煤层9~13 m时,前方围岩应力变化区宽度出现极小值.隧道断面左侧拱肩(3[#])、拱腰(2[#])和拱底(1[#])围岩应力变化区宽度在掌子面距煤层12 m时最小,宽度分别为15.90,14.48和13.04 m,在极值附近围岩应力变化区宽度出现较大的增长幅度.断面右侧拱肩(5[#])、拱腰(6[#])和拱底(7[#])围岩应力变化区宽度在掌子面距煤层10 m时达到最小,宽度分别为17.90,19.31和17.90 m.断面中轴线前方围岩应力变化区宽度在掌子面距煤层12 m时达到最小,拱顶(4[#])和拱中上(8[#])前方围岩应力变化区宽度均为18.82 m;拱中(9[#])和拱中下(10[#])的围岩应力变化区宽度分别为17.30,15.90 m.

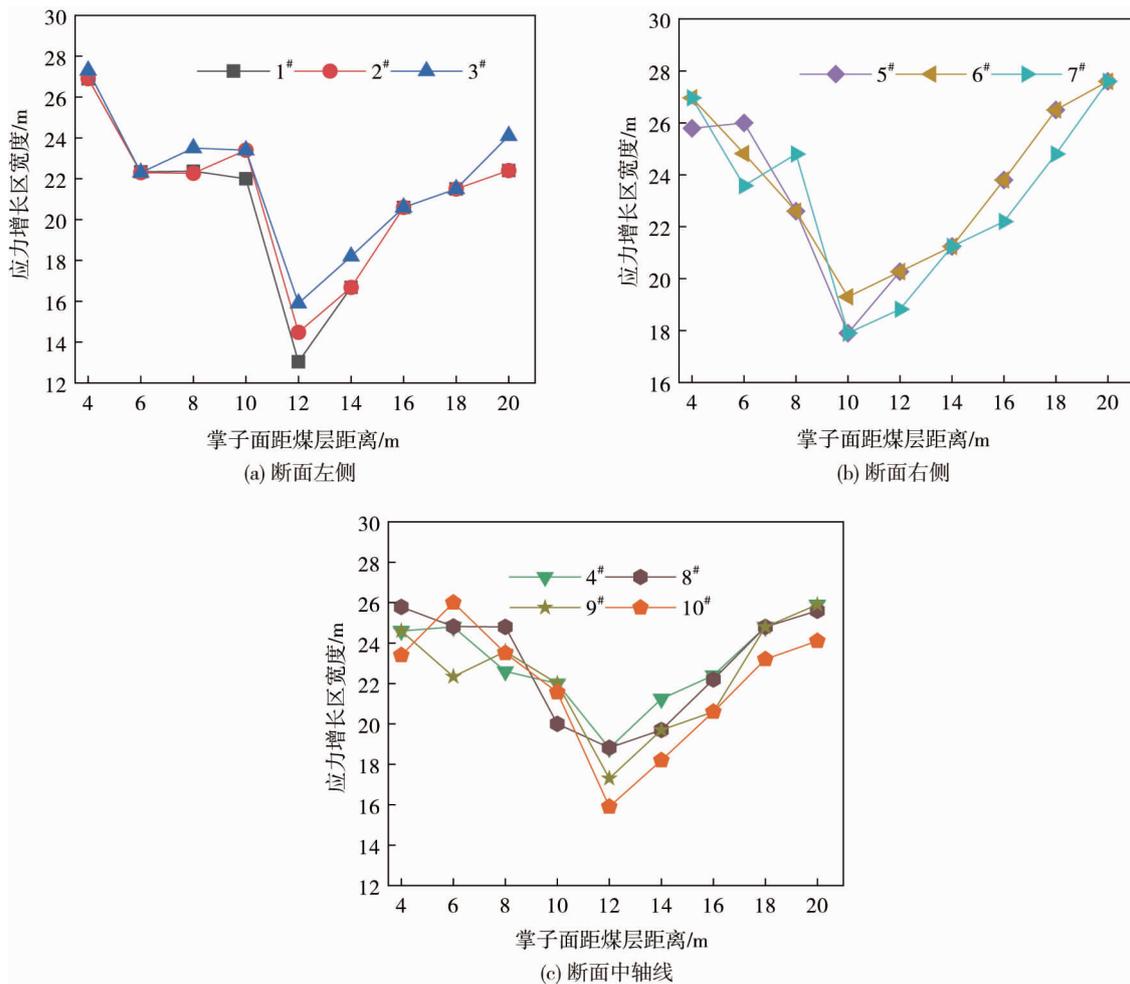


图5 掌子面前方围岩体应力变化区宽度分布

2.3 隧道断面不同位置处水平应力分布规律

图6为开挖过程中掌子面前方围岩水平应力分布,其中区域A为围岩水平应力上升区,区域B为围岩处于原岩应力状态.由图6可知,当掌子面距煤层20 m时,掌子面前方10 m处左侧拱底(1[#])、拱腰(2[#])和拱肩(3[#])水平应力分别增长到4.93,4.89和4.81 MPa;右侧拱底(7[#])、拱腰(6[#])和拱肩(5[#])水平应力分别为4.92,4.91和4.79 MPa;拱中下(10[#])、拱中(9[#])、拱中上(8[#])和拱顶(4[#])围岩水平应力分别达到4.89,4.88,4.84和4.67 MPa.当围岩与掌子面距离大于10 m时,为原岩状态.隧道底部围岩水平应力大于顶部,这与巷道围岩应力计算理论相符合^[14].隧道左侧围岩水平应力大于右侧,这可能是由于左侧围岩距煤层较近,受到煤层影响.

当掌子面距煤层10 m时,在掌子面前方10 m处左侧拱底、拱腰和拱肩水平应力分别增长到4.44,

4.44和4.17 MPa;右侧拱底、拱腰和拱肩水平应力分别增长到4.64,4.63和4.45 MPa,拱中下、拱中上、拱中和拱顶围岩水平应力分别为4.11,4.25,4.25和4.10 MPa.围岩与掌子面距离大于18 m后,接近原岩状态.

当掌子面距煤层5 m时,在掌子面前方10 m处左侧拱底、拱腰和拱肩水平应力分别增长到3.75,3.75和3.73 MPa;右侧拱底、拱腰和拱肩水平应力分别增长到4.27,4.26和4.15 MPa,拱中下、拱中上、拱中和拱顶围岩水平应力分别为3.18,3.26,3.63和3.91 MPa.围岩与掌子面距离大于20 m后,逐渐接近原岩状态.

综上所述,随着掌子面距煤层越近,掌子面附近围岩水平应力越低,应力升高区宽度越宽,这反映掌子面距煤层越近前方围岩稳定性越低,因此,在隧道施工即将穿越煤层时应尽早采取加强支护措施,确保施工安全.

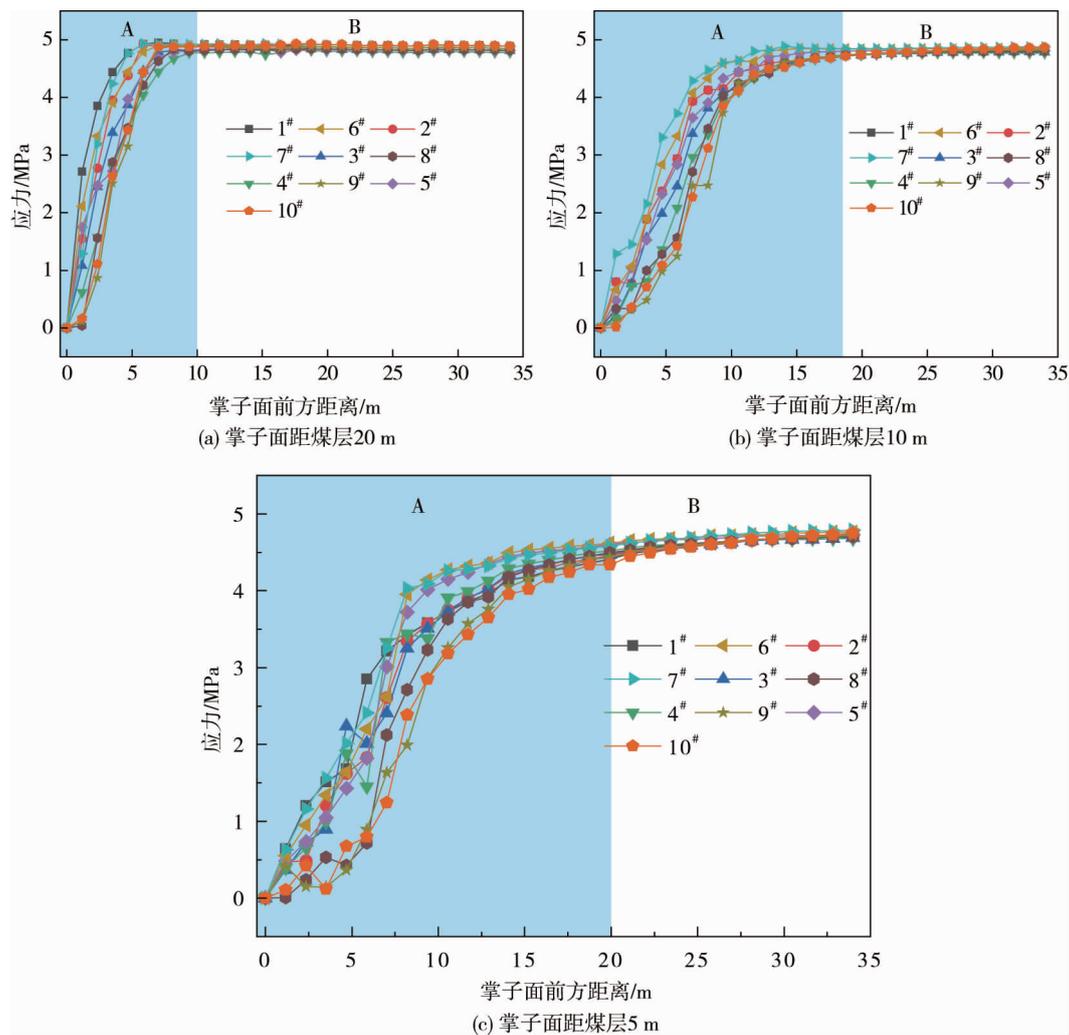


图 6 开挖过程中掌子面前方围岩水平应力分布

3 结论

1)穿煤隧道掘进过程中,掌子面前方不同位置处围岩所受的垂直应力均呈现出急剧增大后逐渐衰减至原岩应力的趋势;水平应力均呈现出从零逐渐增加至原岩应力的趋势.

2)掌子面不同位置处前方围岩的垂直应力集中系数表现出较大差异,具体表现为拱底>拱腰>拱肩,而隧道左侧区域应力集中系数大于右侧.

3)随着隧道掘进靠近煤层,应力变化区宽度呈现先减小后增大的“V”型变化趋势,隧道左侧的应力变化区宽度变化幅度大于右侧.

参考文献:

- [1] 王海洋,赵树磊,陈祥,等.我国隧道瓦斯事故统计及影响因素分析[J].中国安全科学学报,2021,31(4):34-40.
- [2] 康勇,杨春和,何正,等.煤系地层大跨度隧道围岩结构稳定性研究[J].岩土力学,2010,31(增刊1):266-270.
- [3] 谢衍光,苟德强,陈成军.瓦斯突出隧道防突安全岩盘厚度计算方法研究[J].铁道工程学报,2017,34(3):53-57.
- [4] 张晗秋,周标,周飞,等.考虑孔隙水作用的盾构倾斜隧道开挖面可靠性分析[J].矿业工程研究,2024,39(3):20-28.
- [5] 石广斌,魏娟盆,肖清,等.泥岩隧洞仰拱矢跨比对围岩稳定性的影响[J].矿业工程研究,2023,38(3):1-8.
- [6] 阴瑞强.公路隧道穿越煤系地层安全岩柱预留厚度及揭煤方法研究[D].重庆:重庆科技学院,2021.
- [7] 马强,邹智波,黄飞,等.大断面隧道揭急倾斜突出煤层临界安全岩柱厚度[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(2):7-12.
- [8] 龚兵文,孙臣,胡杰.大断面石门揭煤突出预测技术研究:以华蓥山隧道为例[J].能源与环保,2018,40(11):86-89.
- [9] 姚海波,杜宇,张文选,等.油气田瓦斯隧道开挖掌子面围岩安全厚度研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(1):168-174.
- [10] 中华人民共和国交通运输部.公路瓦斯隧道设计与施工技术规范:JTG/T 3374—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.
- [11] 李磊.采动煤岩体结构效应及其诱冲机制研究与实践[D].北京:中国矿业大学(北京),2020.
- [12] 张民波.采掘影响下煤岩应力-损伤-渗流特性研究及应用[D].北京:中国矿业大学(北京),2015.
- [13] 谢和平,周宏伟,刘建锋,等.不同开采条件下采动力学行为研究[J].煤炭学报,2011,36(7):1067-1074.
- [14] 沈明荣,陈建峰.岩体力学[M].2版.上海:同济大学出版社,2015.