

壁后空洞分布对砌碛巷道围岩 稳定性影响的数值分析

张自政*, 于宪阳

(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;
湖南科技大学 煤炭安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要:针对砌碛巷道壁后存在空洞的问题,根据伯方煤矿砌碛巷道壁后空洞窥测结果,利用FLAC^{3D}数值分析软件,研究壁后空洞位置与大小等分布形态对砌碛巷道围岩稳定性的影响规律。结果表明:壁后空洞区域增大出现会增大巷道拱顶区域塑性破坏范围;空洞作用下,最大垂直应力出现在直墙碛体底部,最大水平应力出现在底部电缆沟下方碛体;巷道变形以两帮移近为主。研究成果可为开发砌碛巷道修复技术提供理论依据。

关键词:砌碛巷道;壁后空洞;塑性区;围岩变形

中图分类号:TD322 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2018)03-0014-09

Numerical Investigation of the Influence upon Brickwork Roadway Surrounding Rock Stability Subjected to Wall Back Cavity

Zhang Zizheng, Yu Xianyang

(Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Goal Mines,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
Hunan Provincial Key Laboratory of Safety Mining and Techniques of Coal Mine,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Based on the observation results of the brickwork roadway in the Bofang Coal Mine, the software of FLAC^{3D} is employed to study the brickwork roadway surrounding rock stability with respect to the distribution of the wall back cavity. Results show that the extent of plastic failure in the roadway roof will increase with the increase of the wall back cavity areas; the maximum vertical stress appears at the bottom of the rectilinear wall, and the maximum horizontal stress appears at the bottom; the rib-to-rib convergence is the roadway main deformation. The research results have provided a theoretical basis for the development of repair technology for the brickwork roadway.

Keywords: brickwork roadway; wall back cavity; plastic zone; surrounding rock deformation

砌碛支护在我国煤矿井下支护应用广泛,但由于各种原因(采动扰动、壁后充填不密实等),碛体壁后出现空洞的概率极高,而且位置分布不规律^[1,2]。由于碛体壁后空洞的存在,碛体结构受到偏心力,从而在局部会产生预想不到的应力集中,间接降低了碛体结构的承载能力,进而造成碛体结构的损伤或者破坏^[3-6]。以往文献较少研究砌碛巷道壁后空洞分布对砌碛巷道围岩稳定性的影响,因此,本文以山西兰花

收稿日期:2018-05-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51804111;51434006);国家安监总局安全生产重特大事故防治关键技术科技项目(hunan-0001-2017AQ);湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ3185)

*通信作者,E-mail:1010096@hnust.edu.cn

集团伯方煤矿二盘区变电所为研究对象,开展壁后空洞分布对砌碛巷道围岩稳定性影响规律探讨,研究结果为类似条件下的砌碛巷道修复提供参考。

1 工程概况

伯方煤矿二盘区变电所位于二盘区运输巷东侧,平行于盘区运输巷布置,与盘区运输巷间煤柱宽 17 m.盘区运输巷与盘区轨道巷之间煤柱宽 26 m,盘区轨道巷与盘区回风巷之间煤柱宽 35 m.变电所东侧为水仓,水仓东侧为 3204 联络巷,水仓与变电所间煤柱宽 15 m,3204 联络巷与变电所间煤柱宽 35 m.变电所南侧 3202 工作面及 3203 工作面已全部回采完毕,东西两侧分别为未开采的 3204 及 3205 工作面.目前正在安装 3207 工作面,准备 3204 工作面.变电所位置如图 1a 所示.变电所布置在 3#煤层中,沿煤层顶板掘进,断面为扇形拱,如图 1b 所示.采用料石砌碛支护,砌碛厚度 500 mm.煤层厚度 5.82 m,煤层倾角 2°~6°,内生裂隙,呈条带状结构,煤层节理中等发育.硬度 $f < 1.5$.变电所附近的 621 号钻孔柱状如图 1c 所示。

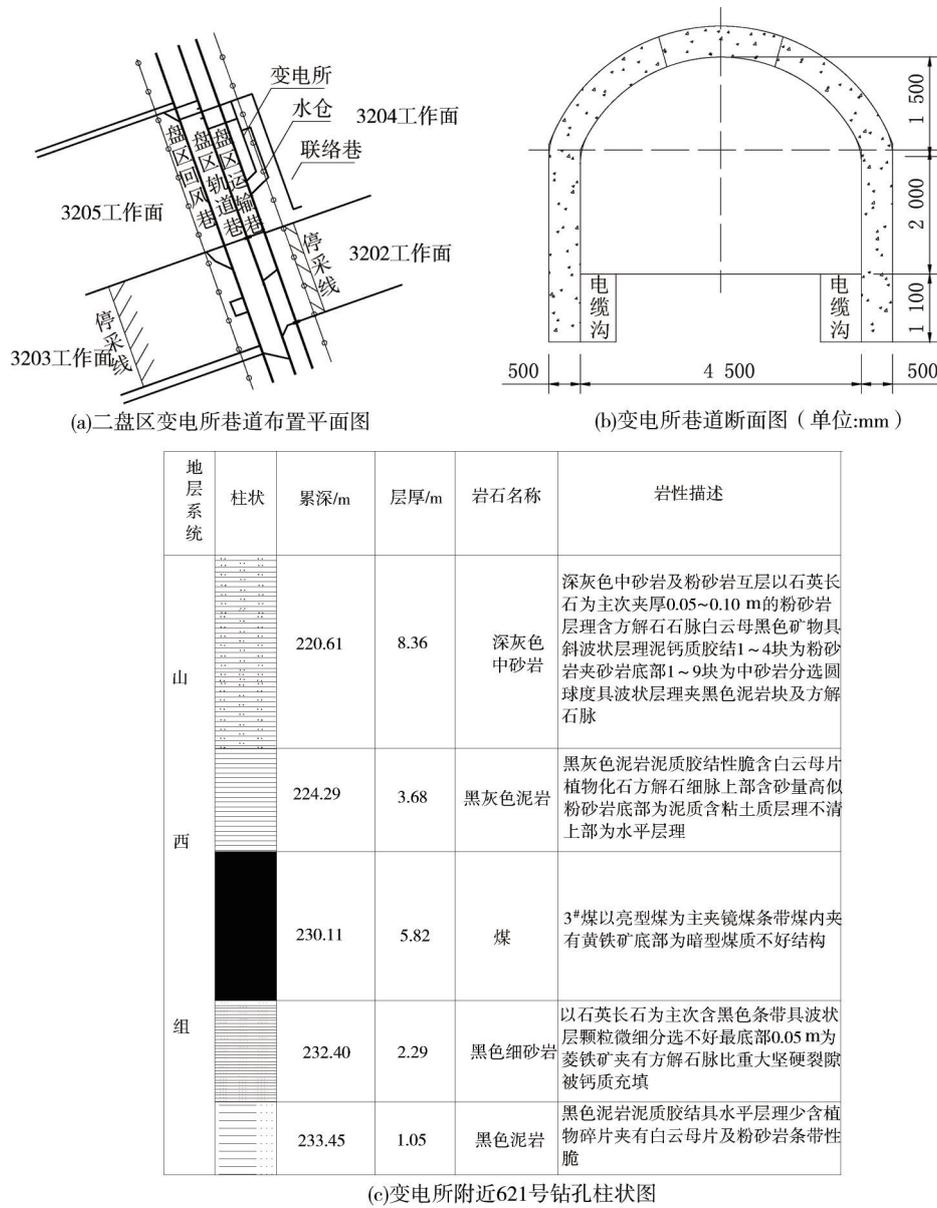


图 1 二盘区变电所采掘情况及地质条件

2 二盘区变电所变形壁后空洞分布类型

空洞的位置不同对围岩应力分布和砌碛结构破坏程度的影响是不一样的.通过现场钻孔窥视仪探测,

壁后空洞的分布大体可以归纳为以下 5 种情况:拱顶处空洞、两肩部对称空洞、一侧肩部偏载空洞、顶部空洞和肩部对称空洞^[1].其分布形态如图 2 所示.

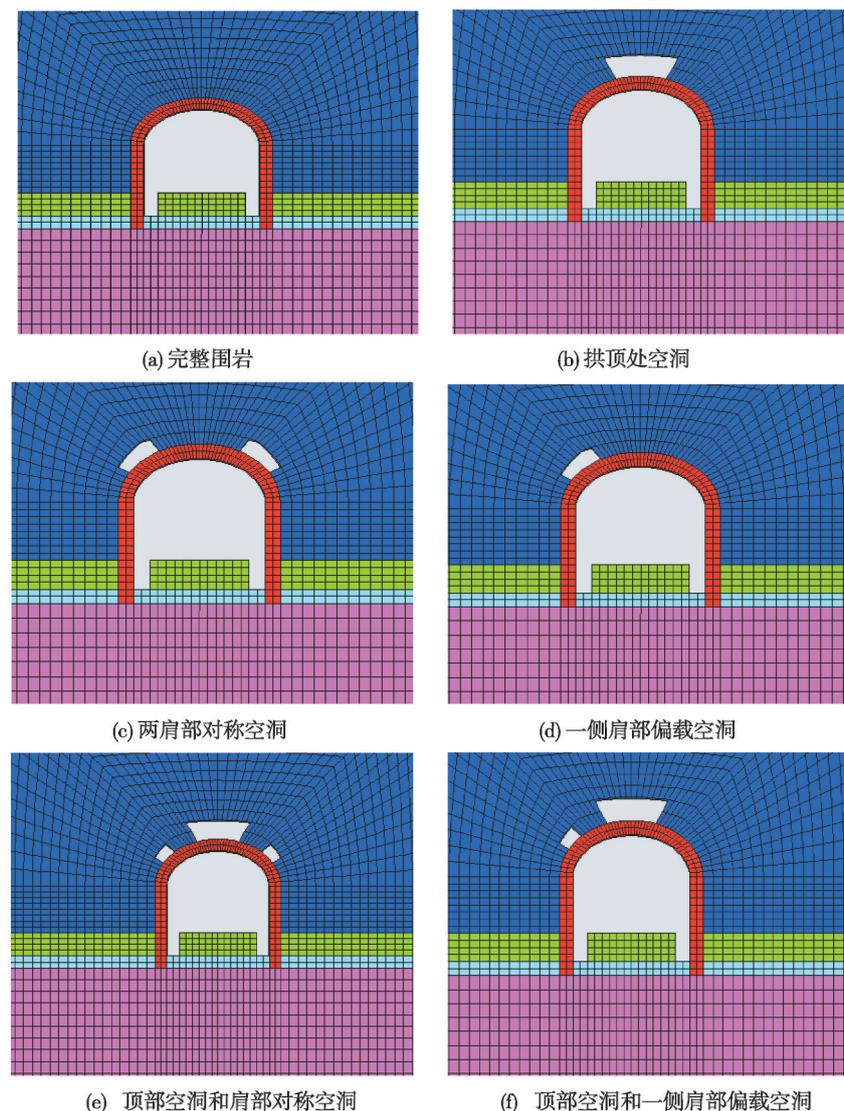


图 2 不同位置壁后空洞的分布形态

3 壁后空洞分布对二盘区变电所围岩稳定的影响

3.1 数值分析模型

根据伯方煤矿提供的钻孔柱状图,建立如图 3 所示数值分析模型.由于变电所围岩变形符合平面应变,所以取模型的厚度为 1 m.模型长 \times 宽 \times 高 = 50 m \times 1 m \times 30.5 m,共划分网格数为 6 864 个.模型上部边界施加压力使其等同于上覆岩层的重量(200 m),底边界垂直方向固定,左右边界水平方向的水平力并固定.数值模拟中各层岩体物理力学参数如表 1 所示.模型开挖计算步骤:①计算原岩应力 \rightarrow ②掘进二盘区变电所硐室并支护 \rightarrow ③设计不同位置壁后空洞模拟变电所变形破坏情况.

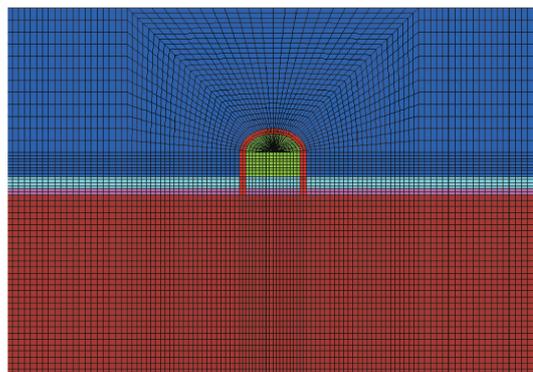


图 3 二盘区变电所数值模型

表1 各层岩体物理力学参数

岩层	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	摩擦角/(°)	粘结力/MPa	
煤	0.071	0.068	18	0.8	
顶板	泥岩	0.420	0.340	20	1.2
	中砂岩	1.300	0.800	24	2.2
底板	细砂岩	1.300	0.800	24	2.2
	泥岩	0.830	0.625	22	1.4
	碛体	2.980	2.050	32	3.5

3.2 壁后空洞分布对变电所围岩塑性区影响分析

由于变电所掘进过程中碛体壁后出现空洞,不同位置的空洞对变电所围岩的变形破坏以及受力影响不同.本节模拟中拱顶处空洞的高度统一为0.8 m,肩部的空洞高度统一为0.4 m.根据第二节介绍,变电所碛体后的空洞分布有5种情况.不同位置的空洞对变电所围岩塑性区分布的影响如图4所示.

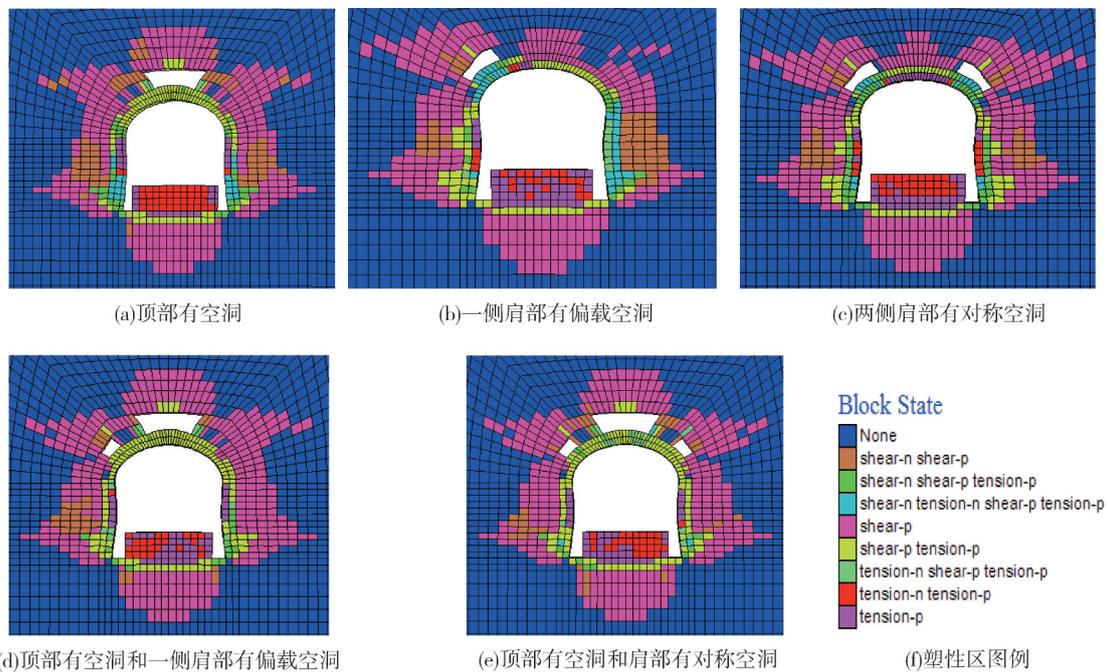


图4 不同位置的壁后空洞对变电所围岩塑性区分布的影响

由图4可知,不同位置的壁后空洞对变电所围岩塑性区分布的影响有以下规律:

- 1) 当仅顶部壁后有空洞时,变电所开挖后,由于拱顶位置出现空洞,从模拟结果中得到围岩的塑性区分布:顶板塑性区宽1.6 m,肩角处塑性区宽4.0 m,两帮塑性区宽4.0 m,底板塑性区宽2.0 m;
- 2) 当仅一侧肩部有偏载空洞时,变电所开挖后,由于一侧肩部出现偏载空洞,从模拟结果中得到围岩的塑性区分布:顶板塑性区宽0.8 m,有空洞一侧肩角处塑性区宽4.5 m,无空洞一侧肩角处塑性区宽2.5 m,有空洞一侧帮塑性区宽4.0 m,无空洞侧帮塑性区宽3.5 m,底板塑性区宽2.0 m;
- 3) 当两侧肩部有对称空洞时,变电所开挖后,由于两侧肩部出现对称空洞,从模拟结果中得到围岩的塑性区分布:顶板塑性区宽1.2 m,两肩角处塑性区宽4.5 m,两帮塑性区宽4.0 m,底板塑性区宽2.0 m.
- 4) 当顶部有空洞和一侧肩部有偏载空洞时,变电所开挖后,由于顶部和一侧肩部出现空洞,从模拟结果中得到围岩的塑性区分布:顶板塑性区宽1.6 m,有空洞一侧肩角处塑性区宽4.0 m,无空洞一侧肩角处塑性区宽4.0 m,有空洞一侧帮塑性区宽4.0 m,无空洞侧帮塑性区宽4.0 m,底板塑性区宽2.0 m;
- 5) 当顶部有空洞和肩部有对称空洞时,变电所开挖后,由于顶部空洞和两侧肩部出现对称空洞,从模拟结果中得到围岩的塑性区分布:顶板塑性区宽1.6 m,两肩角处塑性区宽4.5 m,两帮塑性区宽4.0 m,底

板塑性区宽 2.0 m;

6) 由以上模拟结果可知,肩部空洞出现会增大拱顶区域塑性区范围;存在肩部偏载空洞时,顶部空洞出现会增大顶板塑性区。

3.3 壁后空洞分布对变电所硐体塑性区影响分析

变电所围岩壁后存在不同位置的空洞一方面改变了变电所的受力状况,一方面对变电所砌碇碇体的影响也不尽相同.壁后空洞分布对变电所硐体塑性区的影响如图 5 所示。

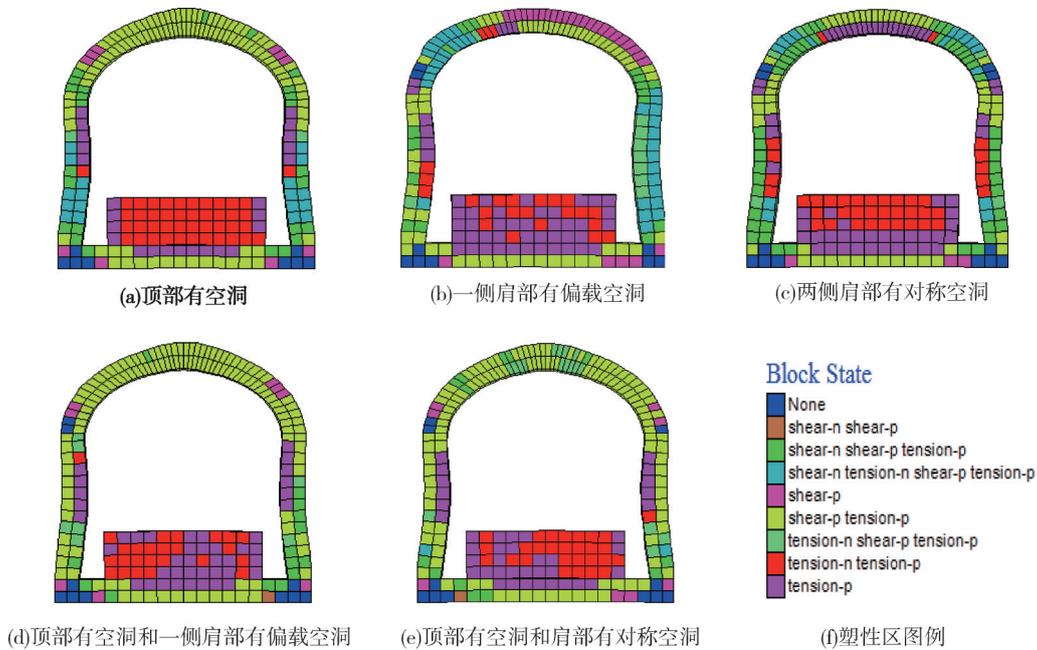


图 5 不同位置的壁后空洞对硐体塑性区分布的影响

由图 5 可知,不同位置的壁后空洞对硐体塑性区分布的影响有以下规律:

1) 当变电所壁后顶部出现空洞,拱顶处的位移向上,硐体产生通常所说的“桃尖型变形”,底部中央处硐体受拉破坏,两直墙内层硐体上部受拉破坏,下部受拉破坏,两直墙外层硐体受拉剪破坏,拱顶受拉剪破坏;

2) 当变电所壁后一侧肩部出现偏载空洞,空洞处的硐体出现外凸,底部中央处硐体受拉破坏,空洞侧外层直墙硐体受拉剪破坏,电缆沟以上内层直墙硐体受拉破坏,拱顶无空洞侧外层硐体受剪破坏,靠近偏载空洞处内层硐体出现部分剪破坏,其余受拉剪破坏;

3) 当变电所壁后两侧肩部出现对称空洞,空洞处的硐体出现外凸,底部中央处硐体受拉破坏,空洞处硐体出现拉剪破坏,拱顶外层硐体受拉剪破坏,内层硐体受拉破坏,两侧直墙硐体受拉破坏;

4) 当变电所壁后一侧肩部和顶部出现空洞,空洞处的硐体出现外凸,底部中央处硐体受拉破坏,空洞处硐体出现拉剪破坏,其余拱顶处硐体亦受拉剪破坏,两侧电缆沟以上内层直墙硐体受拉破坏,其余受拉剪破坏;

5) 当变电所壁后出现顶部空洞和两侧肩部对称空洞,空洞处的硐体出现外凸,底部中央处硐体受拉破坏,拱顶处硐体出现拉剪破坏,两侧电缆沟以上内层直墙硐体受拉破坏,其余受拉剪破坏。

从砌碇变形图中也可以明显的看到,由于砌碇壁后的空洞存在,使得砌碇局局部受力集中,造成关键部位的稳定性变差,变形量加大,且变形趋向于空洞.硐体极易遭到破坏,使它的支护能力无法得到发挥,从而引发变电所失稳变形.由上述的各个断面的破坏形式可得到硐体破坏具有如下特征:

1) 非对称载荷空洞作用下,硐体破坏呈现明显非对称性.硐体的破坏表现为结构性破坏,即底板硐体受拉破坏,两侧直墙硐体同时受拉破坏和剪破坏,拱顶硐体也同时受拉破坏和剪破坏,且分布跟空洞分布

有关;

2)在对称载荷作用下,碛体破坏仍表现为结构性破坏.其破坏形式和非对称载荷作用下相同,但碛体破坏呈现明显对称性.底板碛体受拉破坏,两侧直墙碛体也受拉破坏,拱顶碛体受拉剪破坏.

3.4 壁后空洞分布对变电所围岩及碛体应力影响分析

变电所围岩壁后存在不同位置的空洞一方面改变了变电所的受力状况,一方面对变电所砌碛碛体的影响也不尽相同.模拟过程中取水平应力为垂直应力的1.25倍.图6所示为壁后空洞分布对变电所围岩及碛体垂直应力影响,图7为壁后空洞分布对变电所围岩及碛体水平应力影响.

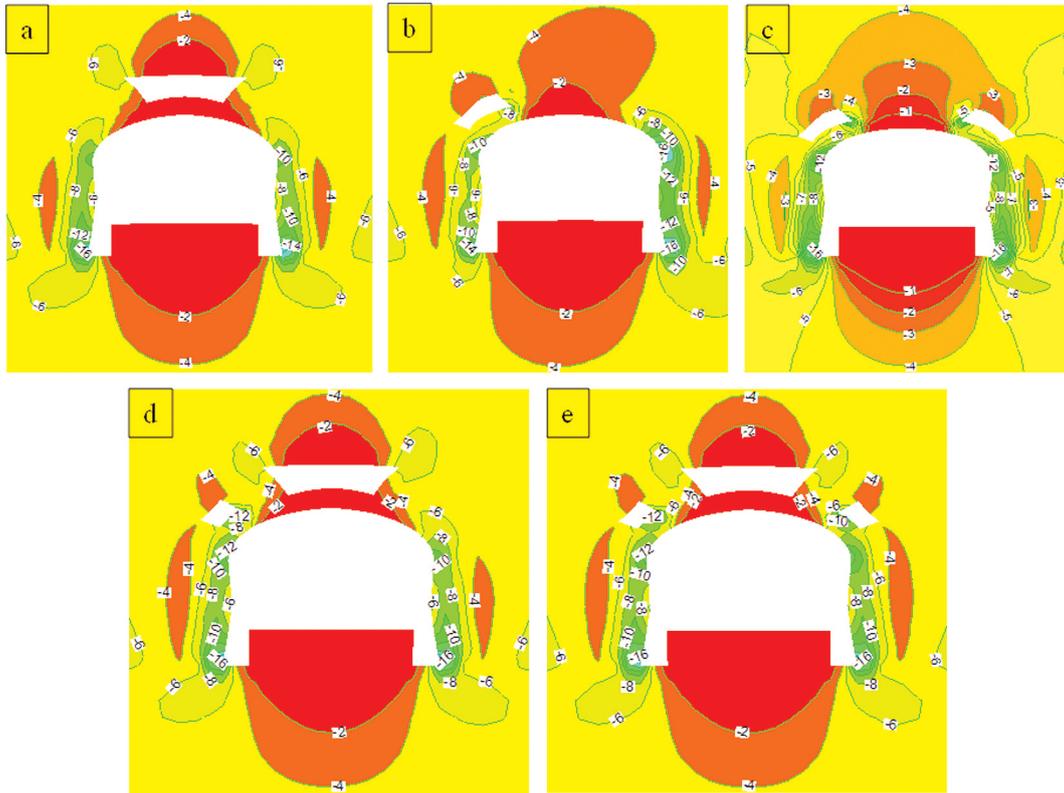


图6 不同位置的壁后空洞对变电所围岩垂直应力分布影响(单位:MPa)

由图6可知,不同空洞分布下,变电所碛体的垂直应力特征如下:

1)当变电所壁后顶部出现空洞,由于变电所碛体壁后未充填密实的空洞存在,空洞下方的碛体内垂直应力明显降低,根据应力转移理论,两侧直墙碛体出现应力增高,直墙上部和拱顶交接处与直墙底部均出现应力集中,其最大垂直分别达到12.60,18.44 MPa,应力集中系数为2.46,3.58.由于两侧电缆沟的开挖,底板中央处碛体与底煤均处于应力降低区.

2)当变电所壁后一侧肩部出现偏载空洞,由于左侧肩部偏载空洞的存在,肩部空洞下方碛体垂直应力降低,在空洞靠近拱中央处出现垂直应力集中,其最大垂直应力为8.76 MPa,肩部空洞对称的右侧出现垂直应力升高,两者中间碛体为垂直应力降低区;底板处碛体为垂直应力降低区;两侧直墙碛体均为垂直应力增高区,肩部碛体与直墙碛体交接处、直墙底部碛体处均出现垂直应力集中,其中最大垂直应力出现在无空洞侧直墙底部碛体处,其次是无空洞侧肩部碛体与直墙碛体交接处,然后是空洞侧直墙底部碛体处,最后是空洞侧肩部碛体与直墙碛体上部交接处,4处最大垂直应力分别为17.67,17.36,13.85,11.57 MPa,应力集中系数分别为3.43,3.37,2.69,2.25.

3)当变电所壁后两侧肩部出现对称空洞,由于肩部对称空洞的存在,变电所的垂直应力分布也是对称分布.肩部空洞下方碛体垂直应力降低,两侧空洞中间碛体也为垂直应力降低区;底板处碛体为垂直应力降低区;两侧直墙碛体均为垂直应力增高区,肩部碛体与直墙碛体交接处、直墙底部碛体处均出现垂直

应力集中,其中最大垂直应力出现在直墙底部碛体处,其次是肩部碛体与直墙碛体上部交接处,两处最大垂直应力分别为 14.70,12.06 MPa,应力集中系数分别为 2.85,2.34。

4)当变电所壁后一侧肩部和顶部出现空洞,由于左侧肩部偏载空洞和顶部空洞的存在,肩部空洞下方碛体垂直应力增高,顶部空洞下方碛体处于垂直应力降低区内;底板处碛体为垂直应力降低区;两侧直墙碛体均为垂直应力增高区,肩部碛体与直墙碛体交接处、直墙底部碛体处均出现垂直应力集中,其中最大垂直应力出现在无空洞侧直墙底部碛体处,其次是无空洞侧肩部碛体与直墙碛体交接处,然后是空洞侧直墙底部碛体处,最后是空洞侧肩部碛体与直墙碛体上部交接处,4处最大垂直应力分别为 16.58,16.50,13.80,11.47 MPa,应力集中系数分别为 3.22,3.20,2.68,2.28。

5)当变电所壁后出现顶部空洞和两侧肩部对称空洞,由于肩部对称空洞和顶部空洞的存在,变电所的垂直应力分布也是对称分布。肩部空洞下方碛体垂直应力增高,顶部空洞下方碛体为垂直应力降低区;底板处碛体为垂直应力降低区;两侧直墙碛体均为垂直应力增高区,肩部碛体与直墙碛体交接处、直墙底部碛体处均出现垂直应力集中,其中最大垂直应力出现在直墙底部碛体处,其次是肩部碛体与直墙碛体上部交接处,2处最大垂直应力分别为 16.56,13.88 MPa,应力集中系数分别为 3.22,2.70。

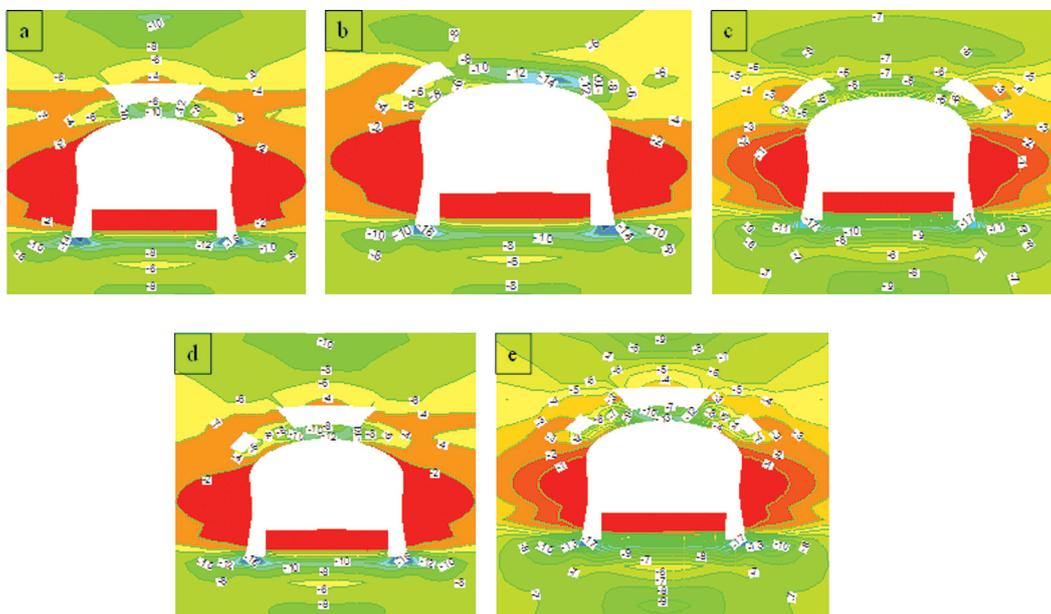


图7 不同位置的壁后空洞对变电所围岩水平应力分布影响(单位:MPa)

由图7可知,不同空洞分布下,变电所碛体的水平应力特征如下:

1)当变电所壁后顶部出现空洞,顶部空洞下方的碛体水平应力出现增高,拱顶其余部分和两侧直墙水平应力均降低,底部电缆沟下方碛体水平应力出现快速增高且大于顶部碛体的水平应力,底部碛体应力集中最大为 14.71 MPa,水平应力集中系数为 2.28。

2)当变电所壁后一侧肩部出现偏载空洞,肩部空洞下方的碛体水平应力呈现中心对称,外层碛体上部和内层碛体下部出现较高水平应力,外层碛体下部和内层碛体上部出现较低水平应力;拱顶其余碛体出现水平应力增高,应力在肩部偏载空洞对称处近拱顶中央处外层碛体达到最大为 15.92 MPa,应力集中系数为 2.47;两直墙碛体水平应力出现应力降低;底部电缆沟下方碛体水平应力出现应力集中,其水平应力最大为 14.41 MPa,水平应力集中系数为 2.24。

3)当变电所壁后两侧肩部出现对称空洞,由于对称空洞的存在,变电所碛体水平应力对称分布。空洞下方外层碛体上部和内层碛体下部出现较高水平应力,外层碛体下部和内层碛体上部出现较低水平应力;拱顶其余碛体出现水平应力降低;两直墙碛体出现水平应力降低;底部电缆沟下方碛体水平应力出现应力集中,其水平应力最大为 14.00 MPa,水平应力集中系数为 2.17。

4)当变电所壁后一侧肩部和顶部出现空洞,由于顶部空洞的存在,其下方的碛体均处于水平应力增高区,顶部空洞下方碛体出现水平应力集中,最大水平应力为 15.79 MPa,应力集中系数为 2.45,肩部空洞下侧碛体出现局部的水平应力增高,拱顶其余区域碛体均处于水平应力降低区;两直墙碛体出现水平应力降低;底部电缆沟下方碛体水平应力出现应力集中,无肩部空洞一侧碛体水平应力略大于有肩部空洞一侧,两者最大水平应力分别为 14.714, 14.705 MPa,水平应力集中系数分别为 2.285, 2.283.

5)当变电所壁后出现顶部空洞和两侧肩部对称空洞,由于对称空洞的存在,变电所碛体水平应力对称分布.顶部空洞下方碛体处于水平应力增高区,两侧肩部空洞下方碛体处于水平应力降低区,其余拱顶碛体部分都处于应力降低区;两直墙碛体出现水平应力降低;底部电缆沟下方碛体水平应力出现应力集中,其水平应力最大为 14.72 MPa,水平应力集中系数为 2.86.

3.5 壁后空洞分布对变电所碛体变形影响分析

根据以上数值模拟,得到空洞分布对变电所碛体变形的影响.存在不同位置壁后空洞时变电所的碛体变形统计结果如表 2 所示.

表 2 存在不同位置壁后空洞时变电所的围岩变形统计

序号	空洞类型	顶板下沉量	底鼓量	左直墙移近量	右直墙移近量
1	顶板空洞	-27.71	43.93	179.8	179.4
2	一侧肩部偏载空洞	40.72	43.58	205.2	188.0
3	两侧肩部对称空洞	46.24	43.80	205.1	206.1
4	顶板空洞和一侧肩部偏载空洞	52.12	43.76	193.8	180.1
5	顶板空洞和两侧肩部对称空洞	52.21	43.79	194.4	195.5

注:顶板下沉量为负表示顶板位移向上;左直墙是指出现偏载空洞的一帮

根据表 2 的统计结果,可以得到以下结论:

1)根据序号 1 的结果,仅仅存在顶板空洞时,由于碛体产生“尖桃型”变形,导致碛体顶部中央位移向上,即顶板下沉量为负.

2)根据对比序号 1 和序号 4 的结果,在存在顶板空洞的前提下,当一侧出现偏载空洞时,碛体顶部中央下沉量为正值,且大于底鼓量,左右直墙的移近量均大于仅存在顶板空洞的情况,出现偏载空洞的左直墙移近量大于无空洞的右直墙移近量.

3)根据对比序号 2 和序号 3 的结果以及对比序号 4 和序号 5 的结果,肩部空洞的增加会增加原来无空洞侧直墙(右直墙)的移近量,变电所变形加重.

4 现场修复方案

为了控制二盘区变电所壁后空洞造成的围岩变形失稳,现场设计采用了注浆加锚索补强支护的技术方案^[7-10].注浆主要包括深浅孔注浆,首先在巷道顶板打设浅孔(1 m 的注浆管,排距 4 m)用于修复填实变电所壁后空洞;然后,采用 2.5 m 的注浆管进行深孔注浆(注浆压力 2~3 MPa,排距 2 m);深浅孔注浆均采用水灰比 1.5 : 1 的高水速凝材料.锚索补强主要是顶板采用 $\Phi 15.24$ mm \times 7 300 mm 的钢绞线,两帮采用 $\Phi 15.24$ mm \times 5 200 mm 的钢绞线,排距均为 1.8 m.现场矿压监测结果:充填注浆、施工锚索至稳定期间,两帮最大移近量为 33 mm,顶底板最大移近量为 25 mm,围岩变形比较小,修复效果比较好.

5 结论

1)肩部空洞出现会增大拱顶区域塑性区范围;存在肩部偏载空洞时,顶部空洞出现会增大顶板塑性区.

2)空洞作用下,碛体破坏表现为结构性破坏;当出现对称空洞作用时,碛体破坏也呈现对称性,底板

碇体受拉破坏,两侧直墙碇体也受拉破坏,拱顶碇体受拉剪破坏;当出现非对称载荷空洞作用时,碇体破坏呈现明显非对称性,底板碇体受拉破坏,两侧直墙碇体同时受拉破坏和剪破坏,拱顶碇体也同时受拉破坏和剪破坏,且破坏形式跟空洞分布有关。

3) 空洞作用下,垂直应力最大值出现在直墙碇体底部,水平应力最大值出现在底部电缆沟下方碇体;当空洞仅出现在顶部时,垂直应力最大为 18.44 MPa,应力集中系数 3.58;当顶部空洞和两侧对称同时存在时,水平应力最大为 14.72 MPa,应力集中系数为 2.86;无论空洞如何分布,两侧直墙碇体上部和下部都会出现垂直应力集中,出现偏载空洞时,应力集中系数偏大;拱顶区域碇体出现水平应力集中,空洞分布越多,最大水平应力越大,当顶部空洞和两侧对称空洞都出现时,水平应力最大为 14.72 MPa,水平应力集中系数为 2.86。

4) 仅仅存在顶板空洞时,由于碇体产生“尖桃型”变形,导致碇体顶部中央位移向上;变电所变形主要是两帮移近;肩部空洞的增加会增加原来无空洞侧直墙的移近量。

参考文献:

- [1] 郑斌. 砌碇巷道变形破坏机理及修复技术研究[J]. 科技与企业, 2013(10): 237-239.
- [2] 姚裕春, 黄庆享, 余学义, 等. 砌碇巷道粉煤灰壁后充填机理及应用[J]. 矿山压力与顶板管理, 2001, 18(3): 48-50.
- [3] 徐营, 柏建彪, 武增荣, 等. 砌碇巷道失稳机理及加固技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(6): 790-796.
- [4] 马述起, 柏建彪, 张轩亮, 等. 砌碇巷道冒顶机理及控制技术研究[J]. 金属矿山, 2011, 40(8): 49-52.
- [5] 梁华杰, 王丽, 赵忠义. 砌碇巷道壁后注浆加固技术研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(8): 49-52.
- [6] 王连国. 锚注支护技术在砌碇巷道修复加固中的应用[J]. 矿业研究与开发, 2000, 20(3): 5-6.
- [7] 代军, 刘凯, 梁彦军. 返修巷道全断面注浆加固技术研究[J]. 能源技术与管理, 2012(3): 57-59.
- [8] 曹明, 荆升国, 谢文兵, 等. 深部高应力软岩巷道注浆加固围岩控制技术研究[J]. 能源技术与管理, 2012(3): 55-56.
- [9] 宁帅, 冯光明, 牛建春, 等. 高水速凝材料在超高冒顶巷道治理中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(8): 21-23.
- [10] 王卫军, 杨磊, 林大能, 等. 松散破碎围岩两步耦合注浆技术的研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(6): 42-45.