

$$I_{sc} = \frac{d_{max}}{d_{min}} \tag{8}$$

式中： d_{min} 为巷道围岩的最小塑性扩展半径。

2.2 圆巷塑性区形态特征指标分析

建立了上述基本形态特征指标之后,为了明确各指标之间的差异、指标的合理性及其随形态的变化规律,选取不同形态塑性区(如图6中①~⑦所示)进行几何形态特征分析,其中各指标统计数据见表1.表1

中 η 为双向压力之比值,即 $\eta = \frac{D_{\zeta 1} P_1}{D_{\zeta 3} P_3}$.

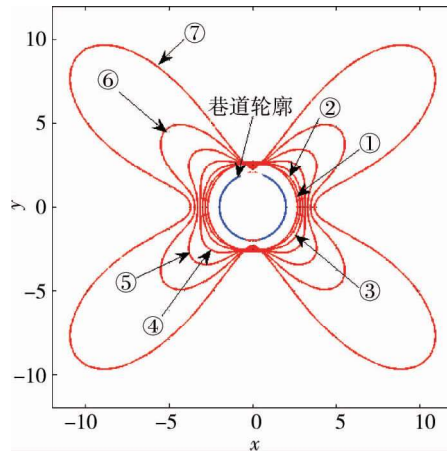


图6 圆巷塑性区的几何形态

表1 不同形态塑性区的几何形态特征指标

塑性区编号	η	A_c	U_c	E_f	$R_{eq,p}/m$	E_{dc}	I_{sc}
①	1.0	1.000	1.000	0.906	2.761	1.381	1.000
②	1.3	1.085	1.115	1.023	2.845	1.470	1.086
③	1.6	1.164	1.118	1.238	2.992	1.537	1.164
④	1.9	1.239	1.221	1.680	3.276	1.842	1.418
⑤	2.2	—	1.676	2.679	3.836	2.450	1.957
⑥	2.5	—	2.439	5.205	4.982	3.550	2.889
⑦	2.8	—	4.110	18.379	8.805	7.067	6.059

从图6及表1中可以看出,双向压力比值小于2时,轴向系数 A_c 逐渐增大,塑性区形状由圆形向、椭圆、圆角矩形变化.轴向系数增大为原来的1.239倍,表明塑性区长轴方向的尺寸有了较大的增加,巷道围岩在与压力增加的垂直方向即水平方向存在明显的塑性破坏扩展, A_c 值越大则扩展深度越深,该部位岩体稳定性愈差.

进一步讨论 η 与 $U_c, I_{sc}, E_f, E_{dc}, R_{eq,p}$ 的关系及各形态指标随塑性区分布的变化规律,绘制关系曲线图如图7~图9所示.

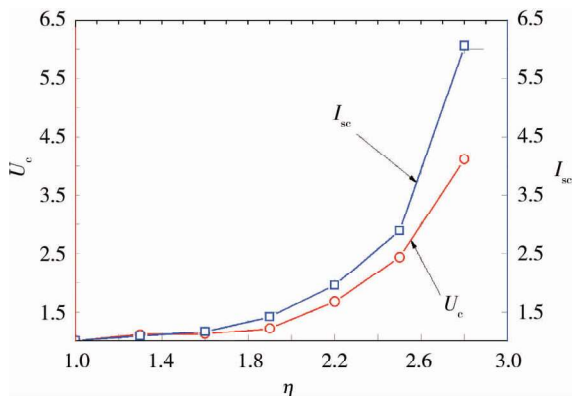


图7 $\eta - U_c, I_{sc}$ 关系曲线

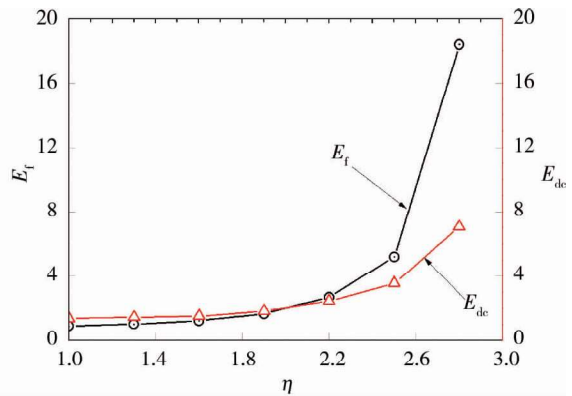


图8 $\eta - E_f, E_{dc}$ 关系曲线

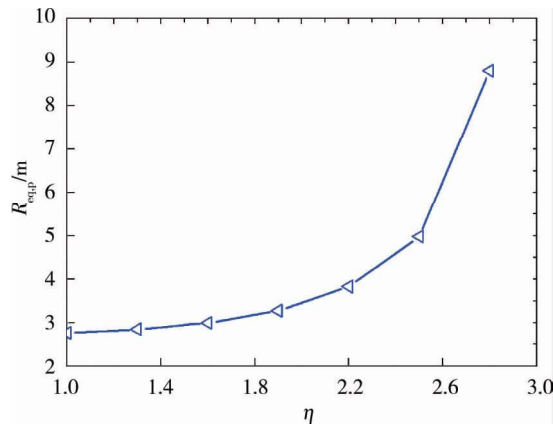
图9 $\eta - R_{eq,p}$ 关系曲线

图7显示了圆巷塑性区均匀程度及不规则性随双向压力比的变化.随着 η 的增大, U_c, I_{sc} 值均不断的增大,当 η 超过1.9后, U_c, I_{sc} 增加的速率变大,特别是 I_{sc} 加速更为明显.最大值达到6.059.对比图6可知,塑性区演变为蝶形、长叶蝶形后,塑性区 $0 \sim 2\pi$ 各方位的塑性扩展深度均匀性显著减小,亦意味着塑性区形状变得更为不规则,巷道围岩稳定性大大降低. U_c, I_{sc} 的变化规律基本一致,而 I_{sc} 对形态的变化更加敏感,说明 U_c 及 I_{sc} 均可作为表征塑性区形态均匀性、规则性的特征指标,但采用 I_{sc} 指标进行表征将更能反映形态的变化差异.

从图8可以看出, E_f 及 E_{dc} 随 η 的变化趋势相似,均可分为两个阶段,即先经历了缓慢增长段,然后转入急速增长段; η 在1.0~2.2时, E_f 与 E_{dc} 的值基本相同,但是 $\eta > 2.2$ 之后,二者的差异快速增大, E_f 的值明显大于 E_{dc} 的,最大值分别为18.379与7.067,表明圆形巷道围岩塑性区进入蝶形后,塑性区的面积、局部极限扩展深度不仅均会大幅增加,且此时塑性区面积的增速要远大于极限塑性扩展半径的,因此,围岩的整体稳定性也大大降低.

图9为 $\eta - R_{eq,p}$ 关系曲线,同图8中 E_f 曲线的几何意义一样,均反映了围岩塑性区范围、大小的演化特征;图中显示出二者的演化规律极相似,开始近乎为匀速增加阶段($\eta \in [1.0, 2.2]$),而后为加速增长阶段,塑性区等效半径最大值达到8.805 m,这已经远超过锚杆的锚固范围,甚至是普通锚索的锚固范围.这说明采动巷道、毗邻掘进活动巷道及存在爆破、冲击等扰动源严重影响的巷道,在高偏应力场作用下,塑性区尺寸变得异常大,围岩稳定性控制将面临更大的挑战.同时,也说明了塑性区进入蝶形演化阶段后,塑性区尺寸的变化更敏感,即随双向压力差的增加而加速增大,故在(超)高偏应力场环境下,巷道则愈加容易失稳破坏.

综上所述, A_c, U_c, E_f 等6个指标从几何形状、大小、范围方面较好的刻画了塑性区的形态特征,它们共同构成了圆巷塑性区形态特征指标体系,其中 A_c, U_c, I_{sc} 表征围岩塑性区的几何形状特征,应该指出, A_c 主要应用于(椭)圆形、圆角矩形塑性区的形态描述,而 $E_f, E_{dc}, R_{eq,p}$ 分别表征塑性区的范围大小、局部极限扩展尺寸及等效尺寸.通过深入分析每个指标的内涵及其变化,得出了各指标与塑性区形态演化的关系及其对巷道围岩稳定性的影响,为下一步定量评价巷道围岩稳定性提供了新的科学依据,也为以塑性区理论为基础的围岩分级新方法奠定了指标基础.

3 算例分析

3.1 计算条件

在本节算例分析中,以江西某煤矿一深部采动巷道为工程背景,根据实际条件进行适当简化,给出岩土计算参数如下:巷道开挖半径 $R_0 = 2.3$ m;巷道埋深800 m, P_1 约为20 MPa,水平压力 P_3 取15 MPa;根据井下以往矿压观测数据,最大主应力影响系数 $D_{\zeta_1} = 2.0$,最小主应力影响系数 D_{ζ_3} 可取1.0;巷道等效围岩黏聚力 $c = 1.1$ MPa,内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$,泊松比 $\mu = 0.3$.

3.2 结果及分析

将上述计算参数代入1.1节中的式(1),便可绘制出当前围岩条件及应力环境下圆形动压巷道的塑性

区形态分布图,如图10所示.若该深埋巷道不受动压影响,处于区域常规均匀应力场环境 $P_1 = P_3 = 20 \text{ MPa}$,则由式(2)可得围岩塑性区半径 $R_p = 3.346 \text{ m}$.

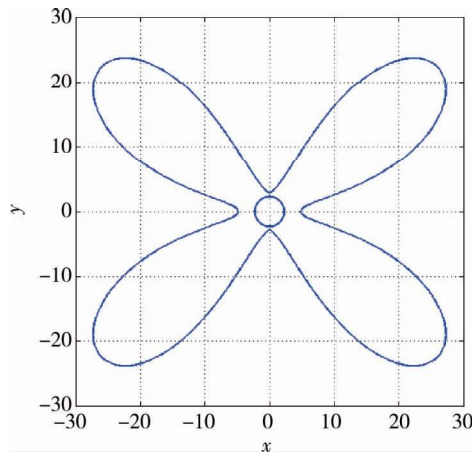


图10 塑性区边界分布图

进一步地,对塑性区边界分布图图10进行尺寸标定,借助图像统计分析软件可以获取巷道围岩塑性区如 A_{p0} , d_{\max} 等基本指标计算参数,然后代入式(3)~式(8),进而得到塑性区几何形态特征指标值,同时,将均匀应力场条件下圆形塑性区的相关参数及指标值计算出,如表2所示.

表2 塑性区形态特征指标值

形态	η	基本参数						形态指标					
		L_1/m	L_2/m	d_{\max}/m	d_{\min}/m	P_b/m	A_p/m^2	A_c	U_c	E_f	$R_{\text{eq},p}/\text{m}$	E_{dc}	I_{sc}
圆形	1.00	6.692	6.692	3.346	3.346	21.023	35.171	1.0	1.000	1.116	3.346	1.455	1.000
蝶形	2.67	—	—	34.271	3.066	296.600	1 337.043	—	5.236	78.455	20.630	14.900	11.178

1)从图10可以看出,围岩塑性区呈现明显的四肢蝶叶型,且上、下蝶叶分布不对称,向小主应力方向偏转一定的小角度.单肢蝶叶延展长度颇大,类似“棒槌”形.从范围上来说,单肢塑性蝶叶的大小已经远远超过巷道断面,整个塑性区总体上占据了一个50 m见方的区域,这说明巷道围岩塑性破坏范围极大.

2)定量分析各个形态指标数据也可以证明围岩产生塑性破坏的严重程度.形状指标 $U_c = 5.236$, $I_{\text{sc}} = 11.178$,说明围岩塑性区的形状十分不规则,巷道各方位的塑性破坏深度差异较大,存在局部破坏范围大的地方多,围岩失稳概率亦增高.此外,从塑性区的扩展范围来看,指标 $E_f = 78.455$,表明塑性破坏面积达到了巷道断面的78倍多,而塑性区的平均尺寸 $R_{\text{eq},p} = 20.63 \text{ m}$,约为巷道半径的9倍,塑性蝶叶的极限扩展深度也达巷道尺寸的14.9倍.由此可见围岩的整体及局部塑性破坏范围之大,目前井下支护材料的支护范围均无法相比.

3)对比分析表2中圆形及蝶形塑性区的形态指标数据可知,动压巷道围岩塑性区不仅其形状不规则性、均匀性指标值(U_c, I_{sc})要显著大于非动压均匀应力场的,而且塑性区范围、尺寸指标也远远大于后者的.例如,非动压巷道的扩展因子 E_f 仅为1.116,动压巷道的 E_f 却达到了78.455;二者的 d_{\min} 虽然大致相同,但是 d_{\max} 却相差近10倍.

4)动压巷道塑性区表征整体尺寸及局部极限尺寸的指标为 $R_{\text{eq},p} = 20.63 \text{ m}$, $E_{\text{dc}} = 14.9$,分别是均匀应力场下非动压巷道相应指标的6.17倍及10.24倍,处于 $\eta - R$ 曲线加速阶段后期,塑性区产生了如文献[20]中所述的恶性扩展效应(Malignant Expansion of Plastic Zone 效应),巷道围岩失稳破坏.从动压巷道及均匀轴对称巷道塑性区的形态特征指标差异可以认识到,对于(强)动压巷道,应该加强巷道布置及开采设计的优化,减小扰动,促进围岩应力环境的均匀化,进而为巷道维护提供有力条件.

4 结论

1)塑性区蝶叶的分布具有非对称性,上、下蝶叶向小主应力方向偏转一定的小角度.塑性蝶叶随着压

力比增大而快速发展,导致塑性半径在大小主应力夹角方向上急剧增大,并达到最大值。

2) 塑性区随双向压力比演变为蝶形、长叶蝶形后,各方位塑性扩展深度均匀性显著减小,塑性区面积增速远大于极限塑性扩展半径的,且塑性区尺寸的变化更敏感,故在(超)高偏应力场下,巷道愈加容易失稳破坏。

3) 构建了圆巷塑性区形态特征指标体系,分为第一类(A_c, U_c, I_{sc})及第二类($E_f, E_{dc}, R_{eq,p}$)形态指标,算例分析表明它们均能较好地刻画塑性区的形态特征。深入分析了各指标的内涵及其与塑性区形态演化、围岩稳定性的关系,为巷道围岩稳定性定量评价及围岩分级奠定了指标基础。

4) 动压巷道及非动压轴对称巷道塑性区的形态特征指标分析结果表明,对于深部(强)动压巷道的围岩控制,应该重视优化巷道布置,弱化扰动影响,促进应力场均匀化,为巷道维护提供有利条件。

参考文献:

- [1] 何满潮,钱七虎.深部岩体力学基础研究综述[C]//第九届全国岩石力学与工程学术大会论文集.北京:科学出版社,2006:49-62.
- [2] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
- [3] 王卫军,袁越,余伟健,等.采动影响下底板暗斜井的破坏机理及其控制[J].煤炭学报,2014,39(8):1463-1472.
- [4] 赵志强.大变形回采巷道围岩变形破坏机理与控制方法研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2014.
- [5] 贾后省.蝶叶塑性区穿透特性与层状顶板巷道冒顶机理研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2015.
- [6] 马念杰,赵希栋,赵志强,等.深部采动巷道顶板稳定性分析与控制[J].煤炭学报,2015,40(10):2287-2295.
- [7] 马念杰.回采巷道围岩活动规律及其控制[D].徐州:中国矿业大学,1988.
- [8] Ma N J, Hou C J. A research into plastic zone of surrounding strata of gateway effected by mining abutment stress[C]// Proc of the 32nd U S Symposium on Rock Mechanics.1990.
- [9] 侯朝炯.巷道围岩控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2014.
- [10] 蒋斌松,张强,贺永年,等.深部圆形巷道破裂围岩的弹塑性分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):982-986.
- [11] 朱以文,黄克戩,李伟.地应力对地下洞室开挖的塑性区影响研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(8):1344-1348.
- [12] 陈立伟,彭建兵,范文,等.基于统一强度理论的非均匀应力场圆形巷道围岩塑性区分析[J].煤炭学报,2007,32(1):20-23.
- [13] 潘阳,赵光明,孟祥瑞.基于 Hoek-Brown 强度准则的巷道围岩弹塑性研究[J].工程地质学报,2011,19(5):637-641.
- [14] 高召宁,孟祥瑞,王广地.考虑渗流、非轴对称荷载作用的隧道围岩塑性区分析[J].现代隧道技术,2014,51(2):70-75.
- [15] 刘朝科,任建喜.非均匀应力场圆形巷道塑性区研究[J].煤矿安全,2014,45(3):42-45.
- [16] 谷拴成,张磊.基于霍克-布朗准则的巷道围岩塑性区估计[J].煤炭工程,2012(9):70-73.
- [17] 李宇翔,彭永久,林全坤,等.非对称荷载作用下圆形洞室塑性区边界的近似计算[J].公路工程,2012,37(4):128-131.
- [18] 马念杰,李季,赵志强.圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(2):206-213.
- [19] 郭晓菲,马念杰,赵希栋,等.圆形巷道围岩塑性区的一般形态及其判定准则[J].煤炭学报,2016,41(8):1871-1877.
- [20] 袁越,王卫军,袁超,等.深部矿井动压回采巷道围岩大变形破坏机理[J].煤炭学报,2016,41(12):2940-2950.

沿空留巷围岩变形机理及控制技术

许向前*, 赵健, 郑志阳

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘要:为控制沿空留巷围岩变形,分析不同阶段巷道围岩结构和应力分布,研究围岩变形机理,结果表明:影响沿空留巷围岩变形的的主要因素是巷道顶板的三铰接梁结构.结合影响巷道顶板下沉和巷帮挤出的具体因素,研究下沉量和挤出量的计算方法,并以下沉量和挤出量为依据,确定沿空留巷围岩变形的控制策略.通过研究巷旁支护对控制围岩变形效果的影响,提出根据顶板下沉量判断顶板触矸情况,确定巷旁支护工艺.利用数值模拟软件,计算某矿沿空留巷时巷道围岩与巷旁充填体的应力分布情况,验证该矿沿空留巷围岩变形的控制效果和巷旁支护的合理性.

关键词:沿空留巷;围岩变形;巷旁支护;数值模拟

中图分类号:TD322

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2017)02-0020-05

Deformation Mechanism and Control Technology of Surrounding Rock of Gob-side Entry Retaining

Xu Xiangqian, Zhao Jian, Zheng Zhiyang

(School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to control the surrounding rock deformation of the gob-side entry retaining, the structure of the roadway surrounding rock and stress distribution in different stages are analyzed and the deformation mechanism of surrounding rock is studied. Results show that the main factors affecting the deformation of the surrounding rock are the three-hinged beam structure of the roadway roof. According to the specific impact factors of roadway roof sinking and side wall out, this paper studies the method of calculating the amount of sinking and the amount of extrusion. In addition, the control strategy of surrounding rock deformation of gob-side entry retaining is determined based on the amount of sedimentation and extrusion. The influence of roadway-side support on the deformation of surrounding rock is analyzed. It is proposed to judge the roof contacting gangue according to the amount of roof sinking, and then determine the road-side support technology. The numerical simulation software is used to calculate the stress distribution of the surrounding rock and the road-side filling body in the mine, and the control effect of the surrounding rock deformation and the rationality of the road-side support are analyzed.

Keywords: gob - side entry retaining; surrounding rock deformation; roadway - side support; numerical simulation

我国中东部浅部煤炭资源日益枯竭,大部分矿井转入深部开采,深部开采面临着开采成本高和采出率低的问题.因此,在保证安全生产的前提下,降低开采成本、提高煤炭采出率,成为目前亟待解决的问题.沿空留巷不仅减少一条巷道的掘进费用,降低矿井生产成本;还可以不留区段煤柱,提高煤炭的采出率.近年

收稿日期:2017-02-28

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120023110023);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014QZ03)

*通信作者,E-mail: xiangqian20062006@126.com

来对沿空留巷技术的研究日渐增多,如石建军等^[1]通过建立反映岩层基本特征的力学模型,对留巷顶板断裂位置进行分析研究,得到基本顶断裂的形式和条件;卢小雨等^[2]基于支架-围岩整体力学模型,分析沿空留巷顶板下沉量的影响因素,认为巷内支护阻力对顶板下沉量几乎没有影响;黄万朋等^[3]研究了钢管混凝土支柱的承载性能,提出一种钢管混凝土支柱+柔性垫层的新型巷旁支护结构。

但现有的研究很少通过研究沿空留巷围岩变形机理,结合沿空留巷围岩变形量,分析控制沿空留巷围岩变形的办法。本文从沿空留巷围岩变形机理着手,研究沿空留巷围岩变形及控制,并以某矿运输顺槽为工程实例,利用数值模拟对围岩控制效果进行验证,为该矿沿空留巷提供技术参考。

1 沿空留巷围岩变形机理

大煤柱护巷和沿空掘巷时,工作面后方的回采巷道随采随废,而沿空留巷时,随着工作面的推进,不仅需要加强支护留巷,还需要在留巷和采空区之间进行巷旁支护。为更好的控制巷道围岩变形,掌握沿空留巷围岩变形机理,需要研究不同阶段巷道的结构、应力及变形特征。

1.1 不同阶段巷道围岩结构特征

掘巷阶段:在回采巷道掘进过程中,开挖空间较小,围岩受扰动范围小,巷道围岩结构变化不大。

首次回采阶段:随着上区段工作面的回采,采空区出现大面积悬顶,采用全部跨落法处理采空区时,留巷直接顶在远离巷道处全部跨落,在巷道巷旁支护处不跨落。基本顶受上覆岩层载荷的影响,会在实体煤一侧断裂、旋转下沉,直至触矸稳定,最终形成三铰接梁结构。首次回采后,工作面后方留巷的围岩结构如图1所示。

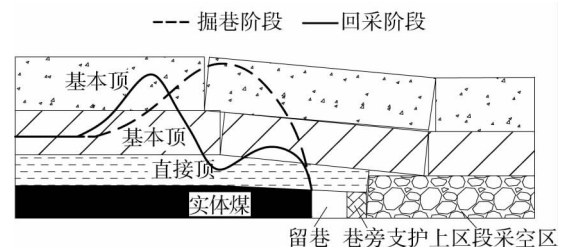


图1 沿空留巷围岩结构图

二次回采阶段:在下区段工作面回采过程中,回采巷道作为留巷重复使用,工作面后方的留巷随采随废。

若加强支护及时、巷旁支护有效,工作面前方的留巷围岩会继续保持三段铰接梁结构。

1.2 不同阶段巷道围岩应力及变形特征

掘巷阶段:巷道围岩结构在掘巷阶段变化不大,但受采动影响,巷道围岩应力会重新分布,并产生应力集中,煤体中支承压力的分布如图1中虚线所示。巷道围岩变形与巷内基本支护情况有关,通常这一阶段巷道围岩变形量占总变形量的比例很小。

首次回采阶段:工作面后方留巷的基本顶断裂形成三铰接梁结构后,巷道实体煤一侧出现内应力场,如图1中实线所示。三铰接梁结构稳定之前,基本顶岩梁剧烈旋转下沉,留巷顶板下沉量迅速增加,同时,受基本顶岩梁旋转下沉运动的影响,煤帮向外挤出。基本顶岩梁触矸后,三铰接梁结构趋于稳定,顶板下沉量不再增加,顶板最终下沉量 Δh 为^[4]

$$\Delta h = \frac{C}{L} [h - m_z (K_A - 1)] \quad (1)$$

式中: Δh 为留巷顶板的最终下沉量; C 为巷道中线到岩梁端部断裂线水平距离; L 为岩梁悬跨度(岩梁端部断裂线到触矸点间的水平距离); h 为工作面采高; m_z 为直接顶厚度; K_A 为矸石的碎胀系数。

二次回采阶段:下区段工作面回采时,工作面前方留巷受支承压力的影响,围岩应力再次升高,巨大的叠加应力会造成围岩破碎范围迅速扩大^[5],围岩体积迅速增加,变形更加剧烈。

2 沿空留巷围岩变形控制

根据沿空留巷围岩变形机理可知,围岩变形造成的主要问题是巷道顶板下沉量和煤帮挤出量大。这些围岩变形问题在大煤柱护巷和沿空掘巷时同样存在,而围岩结构和应力状态上的差异,使沿空留巷围岩变形控制有着新的特点。