

doi: 10.11799/ce201810005

极近距离立体交叉巷道交错段围岩控制与支护技术

陈善昌

(中煤一建南阳坡分公司, 山西 朔州 036000)

摘要: 针对极近距离的空间立体交叉巷道交错段的围岩控制, 根据自稳隐形拱理论对上方巷道掘进对其下伏巷道造成的影响进行了理论分析, 分析认为: 当上方巷道在其下伏巷道的自稳隐形拱范围内掘进时, 并不会对其下伏巷道顶板造成应力集中现象, 而只会增加其下伏巷道自稳隐形拱的高度, 从而造成下伏巷道顶板压力的增大。同时, 减小上方巷道的跨度能够有效减小其下伏巷道的顶板压力, 从而有利于其下伏巷道的顶板稳定性控制。并以南阳坡煤矿极近距离立体交叉巷道为工程背景, 计算了上方巷道掘进时其下伏巷道的顶板压力, 对掘进通过下伏巷道时进行了数值模拟, 以此为依据对立体交叉巷道的交错点的下伏巷道支护进行了优化设计, 在上方巷道掘进的过程中保证了下伏巷道的稳定性, 为类似工程提供了借鉴意义。

关键词: 极近距离; 交叉巷道; 围岩控制; 支护技术; 自稳隐形拱

中图分类号: TD353+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2018)10-0019-06

Discussion on surrounding rock control and support technology for the crossing part of ultra-close interchange roadway

CHEN Shan-chang

(Nanyangpo Branch of China Coal No. 1 Construction Company, Shuozhou 036000, China)

Abstract: The stress distribution of roadway becomes extremely complex at the roadway intersection. Aiming at the surrounding rock control at the intersection of close space-crossing roadway, based on the theory of self-stabilized hidden arch, theoretical analysis was carried out on the influences of the upper roadway excavation on the lower roadway. The theoretical results show that, when the upper roadway excavation is in the range of the self-stabilized hidden arch of the lower roadway, the stress of the lower roadway roof surrounding rock will not concentrate, but the upper roadway excavation will enlarge the range of the self-stabilized hidden arch of the lower roadway which results in an increasing pressure on the lower roadway roof. Meanwhile, decreasing the span of the upper roadway can reduce the lower roadway roof pressure, which is conducive for the roof surrounding rock control. According to the theoretical results, with the engineering background of the close space-crossing roadway in Nanyangpo Coal Mine, the lower roadway roof pressure during the upper roadway excavating was calculated, and the situation was simulated when the upper roadway excavating pass above the lower roadway. Based on the above research, the support of the intersection of close space-crossing roadway design was optimized.

Keywords: ultra-close; crossing roadway; surrounding rock control; support technology; self-stabilized hidden arch

在煤矿地下开采中, 巷道的稳定性一直是重要的研究对象^[1]。煤矿生产系统庞大而复杂, 井下巷道错综复杂, 不可避免的会出现巷道交叉的情况。巷道初次开挖会导致破坏原有的围岩应力平衡, 致使应力重新分配, 而巷道的相互交叉会对原本即有巷道的围岩再次造成扰动, 使得原本平衡后的即有巷道围岩应力再次进行应力分配, 从而导

致巷道交叉段附近的围岩应力变得更加复杂、围岩变形加剧。因此, 在巷道交叉地段往往需要加大支护力度, 从而保证巷道的正常运营。巷道交叉段的围岩稳定性控制又较为困难, 一直是巷道稳定性分析和支护的重点、难点。已有学者对巷道交叉段的围岩稳定及支护进行了大量的研究, 取得了广泛的成果, 如李龙福^[2]对软岩巷道交叉段围岩稳

收稿日期: 2018-08-15

作者简介: 陈善昌(1986—), 男, 山东枣庄人, 硕士, 现从事煤矿开采技术工作, E-mail: 405000975@qq.com。

引用格式: 陈善昌. 极近距离立体交叉巷道交错段围岩控制与支护技术 [J]. 煤炭工程, 2018, 50(10): 19-24.

定性进行了数值模拟研究；陈士海等^[3]对深部群巷道交叉段跨采超前加固支护进行了研究；郭志彪等^[4]对深部立体交叉巷道破坏机理及控制对策进行了分析研究。

上述研究成果多数为平面交叉巷道^[5-7]，而立体交叉巷道的研究因其应力分布更为复杂，更加难以分析，多是停留在数值模拟阶段^[8,9]，尤其是对于极近距离的立体交叉巷道的相关研究报道则更为少见。本文以南阳坡煤矿极近距离立体交叉巷道为研究对象，结合工程实例，对立体交叉巷道的顶板压力进行理论分析，并采用FLAC^{3D}软件对立体交叉巷道的应力分布进行模拟研究，为极近距离立体交叉巷道的支护设计提供有效的参考依据。

1 工程条件

根据矿井生产需要，为形成4#煤辅运系统，掘进4#煤西翼辅运巷绕道。4#煤西翼辅运巷绕道初始跨度为5.2m，初始巷道高度为3m，巷道由4#煤采区回风大巷向西施工，掘进64m后从4#煤采区主运大巷上方穿过，如图1(a)所示。4#煤采区主运大巷沿煤层底板掘进，巷道宽度为5.4m，巷道高度为4.1m，采用“锚网索+W钢带”支护方式；在4#煤西翼辅运巷绕道施工前已掘进完毕。两个巷道的层间距为1.25m，二者位置关系如图1(b)所示。4#煤采区主运大巷直接顶为约2m厚的煤层，煤层上方为平均厚度为3.85m的泥岩，岩体的抗拉强度为0.85MPa；老顶为平均厚度为4.7m的细砂岩，岩体的抗拉强度为2.77MPa。

2 下巷顶板受力分析

2.1 自稳隐形拱理论

在巷道开挖后，围岩初始应力平衡遭到破坏，引起应力的重新分布，进而造成巷道围岩的移动变形和破坏。而

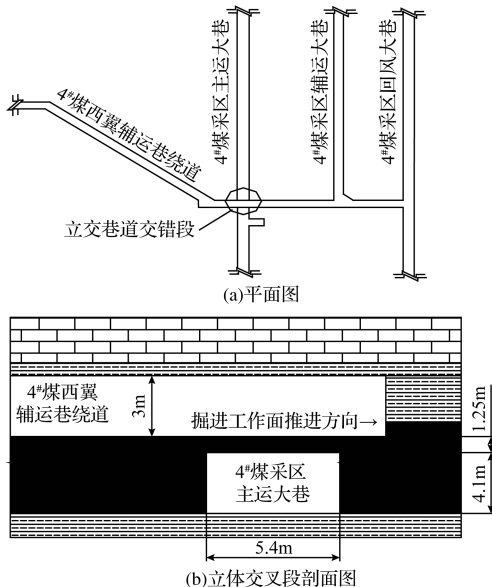


图1 4#煤西翼辅运巷绕道与4#煤采区主运大巷位置关系图

实践证明，巷道围岩在一定状态下是可以自稳的。正因为巷道的自稳能力，巷道围岩才能抵抗垂直地应力的作用而不致使巷道垮塌。由自稳隐形拱^[10]和拱效应可知：无论巷道围岩如何松软破碎，只要其仍是连续介质，则即便巷道围岩出现冒顶、片帮的现象，这种片帮和冒顶现象不是无限的，最终必然会达到一种相对平衡状态。同样也即是说，在巷道围岩平衡自稳的过程中，巷道围岩有可能会出现冒顶和片帮的危险，因此，支护结构的作用并不是也不能抵抗原始地应力，其作用是最大限度的利用围岩的自稳能力和自稳结构，并支撑其在自稳过程中可能出现片帮和冒顶的岩层以保证煤矿的安全生产。根据自稳隐形拱理论^[11,12]，对不稳定危害岩体区域以及自稳结构进行了划分，并建立坐标系，如图2所示。

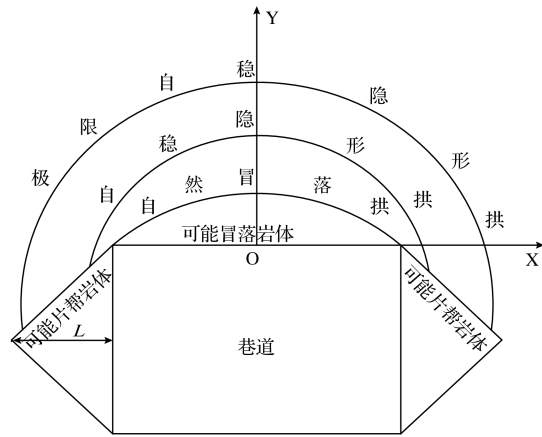


图2 巷道围岩不稳定区划分示意图

巷道开挖后，若及时采取支护措施，帮部围岩较为完整，根据自稳隐形拱理论，自稳隐形拱的破坏曲线为：

$$y = \left(\frac{3P_0 W_0^2 - 12P_0 x^2}{4P_0 + 12\sigma_1} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中， W_0 为巷道原始宽度，m； σ_1 为围岩抗拉强度，MPa； P_0 为原岩应力，MPa； x 为巷道中心线到巷道两帮的距离，m； y 为自稳隐形拱发育的高度，m。

令 $x=0$ ，则可求得自稳隐形拱在巷道顶板方向的最大发育高度：

$$y = \left(\frac{3P_0 W_0^2}{4P_0 + 12\sigma_1} \right)^{1/2} \quad (2)$$

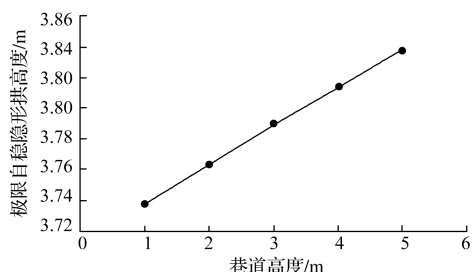
而当巷道在不及及时支护或者巷道围岩十分破碎、松软情况下，巷道两帮容易发生破坏，巷道两帮的极限片帮深度为^[13] $L = \frac{h}{2\sqrt{2}}$ ，其中 h 为巷道高度，如图2所示。此时，巷道的自稳隐形拱将会变到最大，称为“极限自稳隐形拱”^[14]。极限自稳隐形拱是巷道围岩可能发生破坏的最大区域边界，因此，极限自稳隐形拱内的围岩重量即是巷道支护所需承载的最大重量。此时，极限自稳隐形拱的轮廓方程为^[14]：

$$y_{lid} = \left[\frac{3P_0(W_0 + 2L)^2 - 12P_0x^2}{4P_0 + 12\sigma_1} \right]^{1/2} - \sqrt{2}L \quad (3)$$

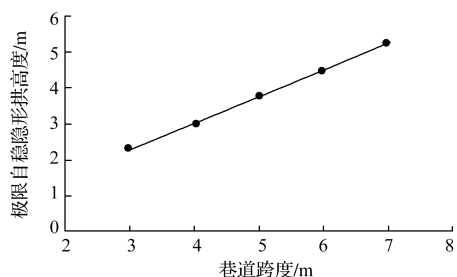
令 $x=0$ ，则可求得极限自稳隐形拱的最大高度为：

$$y_{lid} = \left(\frac{W_0}{2} + L \right) \left(\frac{3P_0}{P_0 + 3\sigma_1} \right)^{1/2} - \sqrt{2}L \quad (4)$$

有效控制顶板的极限自稳隐形拱高度能够有效减小巷道的顶板压力，从而提高支护结构的稳定性。由式(4)可知：影响巷道极限自稳隐形拱高度的因素有巷道跨度、巷道高度、围岩抗拉强度以及围岩所受应力状态。而人为可控因素主要有巷道跨度和巷道高度，因此，为考察不同巷道断面尺寸对巷道极限自稳隐形拱高度的影响，当巷道围岩垂直应力为 10MPa，围岩抗拉强度为 1.2MPa，巷道跨度为 5m 时，巷道极限自稳隐形拱的高度如图 3(a) 所示；巷道高度为 3m 时，巷道极限自稳隐形拱高度如图 3(b) 所示。



(a)不同巷道高度对极限自稳隐形拱高度影响曲线



(b)不同巷道跨度对极限自稳隐形拱高度影响曲线

图 3 巷道断面尺寸对极限自稳隐形拱的影响曲线

由图 3 可知，当巷道跨度为 5m，巷道高度在 1~5m 之间变化时，巷道极限自稳隐形拱的高度在 3.73~3.83m 之间变化，其变化范围仅为 0.1m；而当巷道高度为 3m，巷道跨度在 3~7m 之间变化时，巷道极限自稳隐形拱高度在 2.30~5.27m 之间变化，其变化范围为 2.97m。由此可见，巷道跨度对巷道极限自稳拱的高度影响较大，因此，减小巷道跨度能够有效减小巷道极限自稳隐形拱的高度，从而减小巷道顶板压力。

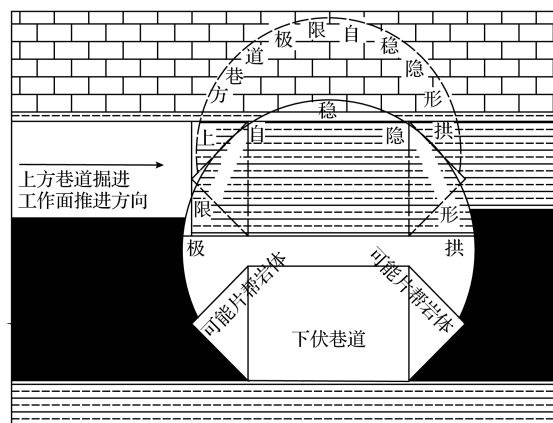
2.2 4#煤采区主运大巷初始极限自稳隐形拱高度

近距离立体交叉巷道掘进对围岩的影响主要是上方巷道的掘进会对下伏巷道围岩造成扰动，造成下伏巷道顶部压力增大，巷道围岩变形严重。而极近距离的空间交叉巷道由于巷道间层间距过小，下伏巷道对顶板的支护方式受到限制，传统的锚杆、锚索不能起到很好的护顶效果。因此，对于近距离空间交叉巷道而言，下伏巷道顶板安全及

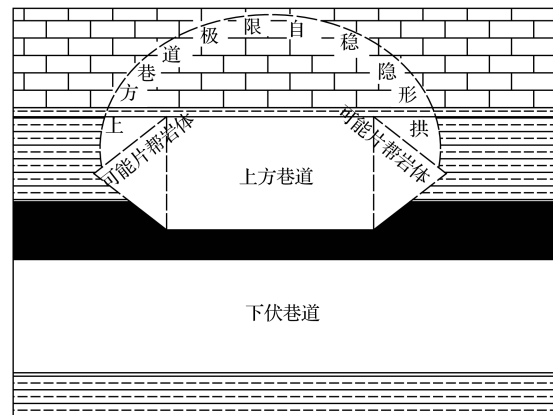
其支撑效果影响着煤矿工作人员的人身安全以及巷道的正常运营。已知南阳坡煤矿 4#煤采区主运大巷的初始跨度为 5.4m，巷道高度为 4.1m，巷道标高+550~+430m，地面标高+872~+1043m，其平均埋深为 467m。由于巷道上方煤层较薄(约为 2m)，巷道直接顶大部分为平均厚度为 3.85m 的泥岩，岩体的抗拉强度为 0.85MPa，因此，计算过程中按照直接顶为泥岩进行计算；老顶为平均厚度为 4.7m 的细砂岩，岩体的抗拉强度为 2.77MPa。将相关参数代入式(4)中可得 4#煤采区辅运大巷顶板的初始极限自稳隐形拱的高度为： $y_x=4.69m$ 。

2.3 上方巷道掘进对下方巷道的影

由前文分析可知，下伏巷道的开挖会造成其顶板方向围岩破坏，4#煤采区主运大巷顶板的初始自稳隐形拱的高度为： $y_x=4.69m$ ，由自稳隐形拱的概念可知 4#煤采区主运大巷顶板 4.69m 范围内的岩层均为潜在的破碎岩体。已知上方 4#煤西翼辅运巷道掘进时，该巷道与 4#煤采区主运大巷的层间距为 1.25m，且此时 4#煤西翼辅运巷道高度为 3m。因此，上方 4#煤西翼辅运巷道是在下伏 4#煤采区主运大巷的自稳隐形拱范围内掘进，如图 4(a) 所示，即是在破碎围岩中掘进。因此，上方巷道在其下伏巷道的极限自稳隐形拱范围内掘进时，并不会造成下伏巷道顶板自稳隐形拱范围内的岩体应力集中。而上方巷道的开挖掘进，



(a)正视图



(b)左视图

图 4 立交巷道交错点自稳隐形拱范围示意图

必然会对其下伏巷道围岩产生扰动,从而引起下伏巷道极限自稳隐形拱范围的增大,如图4(b)所示。

已知上方4#煤西翼辅运巷绕道初始跨度为5.2m,巷道高度为3m,与其下伏4#煤采区主运大巷层间距为1.25m,则其平均埋深为462m。其直接顶为平均厚度为4.7m的细砂岩,岩体的抗拉强度为2.77MPa。由于是在破碎岩体中掘进,因此,考虑4#煤西翼辅运巷绕道两帮的极限片帮深度为: $L_x = \frac{3}{2\sqrt{2}} = 1.06\text{m}$ 。将相关参数代入式(4)中可得该巷

的极限破坏深度为: $y_{lid} = 3.33\text{m}$ 。因此,在上方4#煤西翼辅运巷绕道开挖时,4#煤采区主运大巷极限自稳隐形拱的高度增加到 $3.33+1.25+3=7.58\text{m}$ 。

综上所述,由于上方4#煤西翼辅运巷绕道的掘进是在其下伏4#煤采区主运大巷的自稳隐形拱范围内,而自稳隐形拱范围内的岩体为破碎岩体,因此,上方4#煤西翼辅运巷绕道的开挖并不会造成下伏4#煤采区主运大巷自稳隐形拱范围内岩体应力集中。4#煤西翼辅运巷绕道的掘进和开挖所引起的

扰动,只会导致下伏4#煤采区主运大巷的极限自稳隐形高度在原有基础上增大。在4#煤西翼辅运巷绕道尚未开挖前,4#煤采区主运大巷的极限自稳隐形拱顶板高度为4.69m,当上方巷道开挖后下伏4#煤采区主运大巷的极限自稳隐形高度增长到7.58m。则下伏巷道顶板压力近似按矩形面积计算,则: $Q = \gamma \cdot W_0 \cdot y_{slid} = 25 \times 5.4 \times 7.58 = 1023.3\text{kN}$ 。

3 数值模拟分析

3.1 建立模型

为了保证数值分析结果的可靠性,应建立合理、正确的计算模型。依据建模原则,以南阳坡煤矿4#煤采区主运大巷和4#煤西翼辅运巷绕道两相交巷道为工程背景,利用FLAC^{3D}建立数值计算模型。计算模型尺寸为长度×宽度×高度=52m×52m×50m,岩层呈水平分布,模型周围各边界均为水平位移约束,底部为固定位移约束,上部施加12MPa应力作为上部自重压力,岩石力学参数见表1。

表1 岩石力学参数

编号	岩性	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	体积模量/GPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	切变模量/GPa	抗拉强度/MPa
1	泥岩	2200	1.11	2.71	26.2	0.50	1.98
2	6#煤	1500	0.90	2.0	30	0.34	0.45
3	泥岩	2200	1.15	2.94	28.5	0.66	1.88
4	4#煤	1500	0.89	1.92	41	0.33	0.43
5	泥岩	2200	1.10	6.70	32	0.48	0.85
6	细砂岩	2500	1.55	9.18	44.5	0.80	2.77
7	泥岩	2200	1.10	7.4	31.2	0.48	1.37
8	粉砂岩	2560	1.42	8.36	45.2	0.65	2.98
9	细砂岩	2500	1.55	9.10	45	0.83	2.84

3.2 模拟方案

该模拟方案主要以4#煤采区主运大巷和4#煤西翼辅运巷绕道为研究对象,对4#煤采区主运大巷的稳定性进行分析。通过对4#煤西翼辅运巷绕道掘进和4#煤采区主运大巷的情况进行数值模拟,4#煤西翼辅运巷绕道从右上方向左掘进,每次推进1m,模拟在不同距离条件下4#煤采区主运大巷的应力分布和围岩位移变化情况,并进行分析,从而得出相适应的支护方案。

3.3 模拟结果分析

为了对模拟结果进行合理分析,以4#煤采区主运大巷巷道中心线为中心点,依照掘进顺序,每5m记录一次模拟结果,向左侧掘进过程中4#煤西翼辅运巷绕道与4#煤采区主运大巷不同水平距离时的巷道围岩应力分布云图如图5所示。通过对实际模拟情况进行分析,可以得到以下结论:

1) 在上伏巷道掘进的过程中,垂直应力比水平应力对下伏巷道产生的应力现象明显;通过下伏巷道后,下伏巷道上方垂直应力减小,通过合理支护后,下伏巷道的稳定性会增强。

2) 4#煤采区主运大巷开挖后,巷道顶板方向垂直应力

出现了卸载现象。这是由于巷道的开挖导致顶板岩体破坏,从而造成了顶板岩体应力卸载。

3) 当4#煤西翼辅运巷绕道掘进工作面距离其下伏4#煤采区主运大巷道较远时,4#煤西翼辅运巷绕道掘进工作面前方有垂直应力集中现象,而当4#煤西翼辅运巷绕道掘进工作面进入4#煤采区主运大巷顶板自稳隐形拱范围内时,掘进工作面前方的应力集中现象消失。

4) 随着4#煤西翼辅运巷绕道的不断掘进,造成了4#煤采区主运大巷帮部的垂直应力集中,而其顶板并未出现应力集中现象。然而4#煤采区主运大巷顶部应力卸载范围不断向上增大,说明4#煤采区主运大巷顶板自稳隐形拱的范围扩大了。

综上所述,4#煤西翼辅运巷绕道在其下伏4#煤采区主运大巷的自稳隐形拱范围内掘进时,并不会造成下伏巷道的顶板应力集中,而会造成下伏巷道顶部自稳隐形拱的范围扩大。数值模拟结果与理论分析结果一致。

4 立体巷道交叉断加强支护设计

4.1 下伏巷道的支护参数设计

南阳坡煤矿为了能够使上方4#煤西翼辅运巷绕道顺利

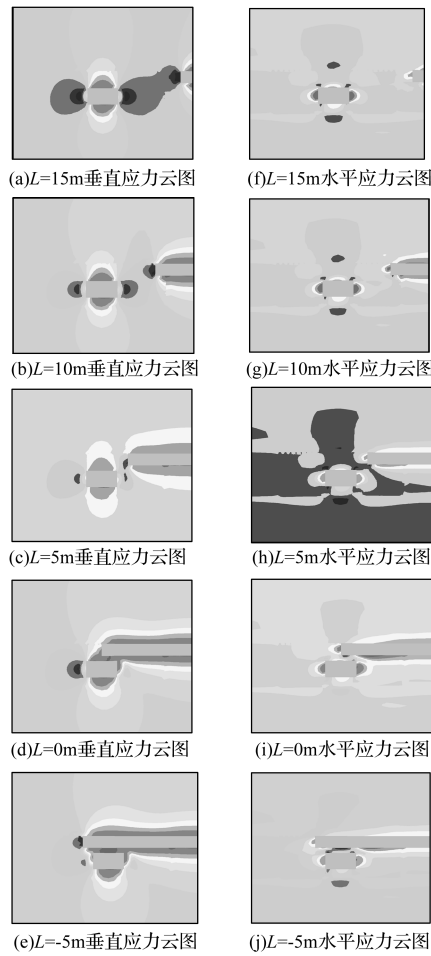


图 5 不同水平距离下的应力云图

通过 4#煤采区主运大巷顶板，在下伏巷道原有支护的基础上，采用木垛加强支护。在 4#煤采区主运大巷相应位置内打设 6 组井字型木垛，木垛采用 2.5m 长半圆木，每两组木垛间距不超过 500mm，且用 2.5m 长半圆木联系起来，木垛端头外露 0.5m。然而木垛支护往往都是根据经验或反复试验对木垛支护进行设计，而不是通过工程设计以及科学计算来设计和优化。因此，木垛支护带有其盲目性，会出现支护能力过剩或者支护能力不足的情况，无法对木垛的支护阻力进行量化。另外，木垛在作业空间狭小的巷道中占用空间较大，不利于矿井的通风和运输。随着矿山机械的发展，单体液压支柱的应用越来越灵活，而且单体液压支柱的支护阻力能够被有效量化，有利于矿井支护设计。

经前文分析，当上方巷道开挖后下伏巷道的极限自稳隐形拱高度增长到 7.58m。当上方 4#煤西翼辅运巷绕道掘进时，下伏 4#煤采区主运大巷的顶板压力最大增加到 1023.3kN。因此，若采用单体液压支柱代替木垛进行支护的话，应保证单体柱能够有效抵抗巷道顶板压力。建议使用 DW35-300/100 型单体，其额定工作阻力为 300kN。因此，南阳坡煤矿在立交巷道交叉段，每个断面应至少使用 4 排单体柱，为充分保证巷道顶部稳定性，增加一排单体支

柱，总共是 5 排单体液压支柱，其支护断面如图 6(a) 所示。由于上方 4#煤西翼辅运巷绕道跨度为 5.2m，同时其巷帮极限破坏深度为 $L_s = \frac{3}{2\sqrt{2}} = 1.06m$ ，因此，在下伏 4#煤采区主运大巷轴向方向其加强支护范围最小应为： $W_s + 2L = 5.2 + 1.06 \times 2 = 7.4m$ ，且由于巷道顶板为煤层，因此在上方巷道掘进通过交叉段时应在下伏巷道加强支护段铺设人工假顶以保证上方顶板煤层的完整性，其巷道断面支护如图 6(b) 所示。

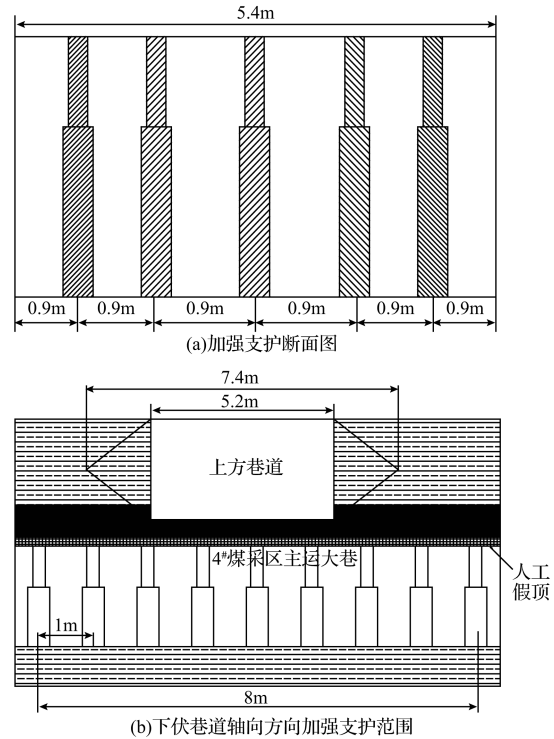


图 6 立交巷道交错段下伏巷道加强支护示意图

4.2 支护效果分析

为使上方 4#煤西翼辅运巷绕道能够安全掘进通过 4#煤采区主运大巷，有必要在上方 4#煤西翼辅运巷绕道掘进过程中对 4#煤采区主运大巷的顶底板移近量进行监测。在 4#煤采区主运大巷断面顶板中央布置测点，采用十字交叉法测量在加强支护后，上方 4#煤西翼辅运巷绕道掘进过程中 4#煤采区主运大巷的顶底板最大移近量。其监测结果如图 7 所示。

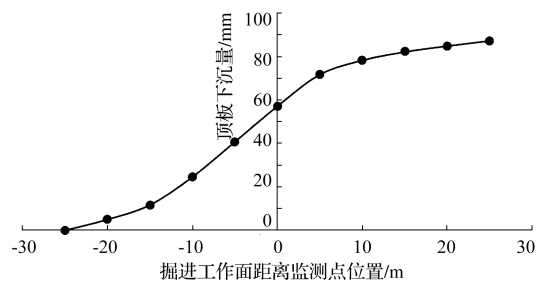


图 7 掘进过程中巷道交叉段下伏巷道顶板下沉量曲线

由图7可知:当上方4[#]煤西翼辅运巷绕道掘进工作掘进至距检测点15m时,下伏4[#]煤采区主运大巷顶板下沉量开始增大。在掘进工作面推进过巷道10m后,4[#]煤采区主运大巷顶板下沉量开始趋于平缓。说明上方巷道的掘进的扰动影响半径为10~15m。同时,在立交巷道交叉段采用液压支柱支护能够有效控制顶板下沉量,使其上方4[#]煤西翼辅运巷绕道顺利通过立交巷道交叉段。

5 结 论

1) 对空间立交巷道的交叉段来说,上方巷道如若在其下伏巷道的自稳平衡拱内进行掘进,则不会在下伏巷道顶板中造成应力集中现象。但是,上方巷道的掘进会破坏其下伏巷道即有的自稳平衡,导致下伏巷道的自稳平衡拱范围增大,从而造成下伏巷道顶板压力剧增。

2) 巷道跨度相比于巷道高度对巷道极限自稳隐形拱的高度影响较大,因此,在满足巷道运营的条件下减小上方巷道的跨度能够有效减少上方巷道的自稳隐形拱高度,从而减小上方巷道掘进时对其下伏巷道造成的顶板压力。

3) 自稳隐形拱是巷道的稳定界面,将巷道顶板的垂直应力转向巷道两帮。因此,在4[#]煤西翼辅运巷绕道经过4[#]煤采区主运大巷时,支护重点应在4[#]煤西翼辅运巷绕道的两帮所对应的4[#]煤采区主运大巷顶部范围内。

4) 在4[#]煤西翼辅运巷绕道经过4[#]煤采区主运大巷顶板时,4[#]煤采区主运大巷自稳隐形拱高度增加到7.58m,可以采用单体液压支柱对巷道顶板进行支护。

参考文献:

- [1] 曹日红,曹平,张科,等.考虑应变软化的巷道交叉段稳定性分析[J].岩土力学,2013,34(6):1760-1765,1821.
- [2] 李龙福,金爱兵,邓富根,等.软岩交叉巷道开挖围岩稳定性数值模拟分析[J].中国矿业,2011,20(9):84-91.
- [3] 陈士海,魏海霞,吕国仁,等.深部巷道交叉段跨采超前加固技术[C]//第十一次全国岩石力学与工程学术大会论文集,2010:352-356.
- [4] 郭志彪,张跃林,王炯.深部立体交叉巷道破坏机理及控制对策研究[J].中国矿业,2015,24(3):150-153.
- [5] 张伟,孙龙华.巷道交叉角度对围岩稳定性影响分析研究[J].煤炭工程,2014,46(12):101-104.
- [6] 曹日红,曹平,林杭,等.巷道交叉段围岩变形规律及安全度分析[J].采矿与安全工程学报,2013,30(5):728-734.
- [7] 王成,张农,李桂臣,等.巷道交岔点的数值模拟分析与支护[J].采矿与安全工程学报,2008,25(4):384-388.
- [8] 殷宝昌,王涛,孟祥阁.极近距离立交巷道交错点联合支护技术研究[J].采矿技术,2011,11(5):17-18,57.
- [9] 何满潮,李国峰,任爱武,等.深部软岩巷道立体交叉硐室群稳定性分析[J].中国矿业大学学报,2008,37(2):167-170.
- [10] 惠兴田.巷道顶板中的自稳隐形拱[J].建井技术,2000,21(5):17-19.
- [11] 惠兴田,韦正范,苏培莉.自稳隐形拱地研究与应用[J].矿业安全与环保,2006,33(6):38-40.
- [12] 张伟,惠兴田.基于自稳隐形拱理论的巷帮稳定性控制[J].煤炭技术,2013,32(1):132-134.
- [13] 刘玉卫,黄庆亨.自稳隐形拱理论在软岩巷道围岩控制中的应用[J].煤炭工程,2011,43(9):81-83,86.
- [14] 黄庆亨,冉隆明,李培树.构造破碎带大巷复修的支护理论与实践[J].煤炭科学技术,2008,36(6):15-18.

(责任编辑 张宝优)