沿空掘巷窄煤柱应力计算方法研究

吴志刚[1,2,3]，汪占领[1,2,3]，石 蒙[1,2,3]
(1. 煤炭科学研究总院 开采研究分院，北京 100013；2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部，北京 100013；
3. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室，北京 100013)

[摘 要] 分析工作面侧向覆岩移动规律，提出上覆岩层弯曲下沉带三角形结构。通过理论分析，提出不同岩性顶板条件下沿空掘巷窄煤柱载荷的计算公式，在柳巷煤矿中硬顶板条件下，采高 11.05m，巷道宽度 4.86m，高度 3.42m，煤柱宽度 10m，计算得煤柱应力 2.78MPa，现场煤柱中布置 4 个钻孔应力计，监测数据平均值为 2.83MPa，窄煤柱应力理论计算值是现场监测数据的 98%，基本吻合。

[关键词] 沿空掘巷；窄煤柱；煤柱应力；钻孔应力计
[中图分类号] TD322 [文献标识码] A [文章编号] 1006-6225 (2019) 01-0026-04

Narrow Coal Pillar Stress Calculation of God Side Entry Retaining

WU Zhi-gang[1,2,3], WANG Zhan-ling[1,2,3], SHI Meng[1,2,3]
(1. Coal Mining & Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China;
2. Mining Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;
3. State Key Laboratory of Coal Resource High Effective Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China)

Abstract: The overlying strata movement principle along lateral of working face was analyzed, and then triangle structure of bending and subsidence belt of overlying strata was put forward. According theoretical analysis, the formula of narrow pillar loading of gob side entry under different roof condition was put forward, based on the roof condition of Liuxiang coal mine, mining height was 11.05m, roadway width 4.86m, hight was 3.42m, coal pillar width was 10m, and then coal pillar stress 2.78MPa was derived, about four borehole stressmeters were layout in coal pillar in field, the average monitoring data was 2.83MPa, the theoretical value was about 98% of field monitoring data.

Key words: gob side entry, narrow coal pillar; coal pillar stress; borehole stressmeter

在上世纪 50 年代开始，沿空掘巷在我国许多矿务局开始应用，最初完全意义上的沿空留巷，是在采空区边缘使用木支柱，矸石袋、混凝土块、金属支柱等多种材料支护巷道。目前很少有严格意义上的沿空掘巷，基本上都是在采空区的边缘，预留一定宽度的窄煤柱掘进巷道。窄煤柱主要有两个作用：第一，支撑上覆岩层载荷；第二，防止相邻采空区漏风、漏水。对于综放工作面，沿空掘巷十分有利于巷道维护。国外，如澳、英等国不研究沿空掘巷；美、德等国的区段煤层平巷均布置在实体煤中；俄罗斯、乌克兰的沿空掘巷只采用金属支架支护。

由于综放窄煤柱护巷的沿空巷道围岩松软破碎，国内众多学者提出综放窄煤柱护巷的设计原则，侯朝炯、李学华、柏建彪等人根据顶板岩层铰接结构[1-3]，提出沿空掘巷大小结构分析方法，认为关键岩块 B 是煤柱稳定的关键因素，服从 S-R (Sliding-Rotation) 稳定性原理，得出煤柱宽度的公式，认为在中等稳定围岩的煤柱的宽度在 3.5~5.0m 之间，锚杆支护提高围岩体的黏聚力和内摩擦角；李栖凤、柏建彪[4]等分析综放工作面倾向压力分布规律，认为相邻采空区煤体边缘一定范围 (一般 0~7 m) 内形成应力降低区，巷道布置在应力降低区，巷道支护、维护成本低；岳帅帅等人[5]根据矿压规律显现认为巷道应布置在应力降低区；汪永茂[6]等人根据半年的观测数据，把煤柱分为 3 个区，设计煤柱宽度 4m；康立军[7]在现场实测和理论分析基础上，认为巷道应布置在应力减低区，巷道变形最小；王德超[8]通过现场应力监测和数值模拟相结合的研究方法确定区段煤柱合理留设宽度；张科学[9]从采空区侧向支承应力分布规律和煤柱应力分布、巷道围岩应力分布、巷道

[收稿日期] 2018-10-09 [DOI] 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2019.01.006
[基金项目] 中国煤炭科工集团面上项目：基于采空区侧向三角形结构平衡支撑的窄煤柱宽度设计方法 (2018-TD-MS026)
[作者简介] 吴志刚 (1976-)，男，山东五莲人，研究员，硕士。
[引用格式] 吴志刚，汪占领，石 蒙. 沿空掘巷窄煤柱应力计算方法研究[J]. 煤矿开采，2019，24 (1)：26-29.

围岩变形与煤柱宽度的关系等多个方面研究深部煤层群沿空掘巷煤柱尺寸；苏海[10]采用理论计算和数值模拟相结合研究深部综放大断面沿空掘巷小煤柱宽度的难题；赵国贞[11]把顶板岩层简化为梁结构，提出沿空掘巷围岩结构力学模型；杨吉平[12]以沿空掘巷围岩大、小结构的稳定性为理论基础，认为保持小煤柱的稳定性是沿空掘巷稳定的根本，根据围岩强度强化理论，采用高强度高预应力锚网索联合支护；王卫军[13]等人应用损伤理论分析沿空掘巷实体煤帮的支承压力分布；张源[14]等人根据围岩顶板的裂隙统计规律，认为基本顶的断裂、回转和滑移失稳是沿空巷道围岩大变形的根本原因，造成巷道两帮收敛量大，煤壁破碎，片帮严重，锚杆托盘拉脱等；张广超[15]研究动压沿空窄煤柱巷道变形特性，综放沿空巷道顶板呈现非对称变形破坏特征，表现为煤柱侧顶板严重下沉、剧烈水平滑移变形及肩角部位顶板错位、嵌入、台阶下沉等，认为基本顶的破断和回转下沉运动是沿空巷道不对称变形破坏的根本力源，靠煤柱侧顶板及肩角部位是巷道变形破坏的关键部位；秦海忠、张志青[16-17]等人研究动压影响窄煤柱的锚杆支护；徐军[18]采用数值计算的方法研究了王庄煤矿巷道开挖前残留煤柱初始应力场、位移场分布规律，揭示窄煤柱宽度对残留煤柱应力场和位移场的影响规律；张广超[19]采用 FLAC^{3D}数值分析了不同煤柱宽度下围岩主应力差、变形及破坏演化规律，认为合理煤柱宽度为 6～10m，并结合实际地质和生产条件确定试验巷道煤柱宽度为 8m；华心祝[20]采用 FLAC^{3D}软件研究孤岛工作面沿空掘巷超前支承压力分布特征。通过建立孤岛工作面沿空掘巷基本顶的力学模型，推导出受动压影响时巷道顶板下沉量的计算公式。支护强度对煤柱稳定性影响方面，张源[21]等人采用采用 FLAC^{3D}有限差分数值模拟方法，研究不同支护强度条件下窄煤柱的变形和破坏规律；靖洪文等针对综放开采沿空掘巷围岩控制的问题，采用 FLAC^{3D}模拟留设 5m 煤柱护巷时回采巷道围岩和小煤柱应力演化过程，锚杆（索）支护形式能有效控制围岩变形破坏。国内外众多学者从不同角度研究窄煤柱的设计方法，但是没有开展煤柱的载荷计算方法以及相应计算公式研究。

1　沿空掘巷的基本原理

沿空留巷、沿空掘巷都是在采空区边缘布置巷道，都是受工作面侧向岩层移动规律的影响，沿空留巷经历工作面回采全部过程，采动期间，采空区上覆岩层剧烈移动，围岩应力强烈变化和重新分配，巷道周围围岩体变形显著。沿空掘巷时，采空区侧向岩层移动剧烈活动已经结束，巷道周围围岩体应力分布稳定。沿空掘巷在时间和空间上都非常有利。工作面回采结束后，工作面后方上覆岩层依次形成垮落带、裂缝带和弯曲下沉带[22]，垮落带自由垮落，岩层结构破坏严重、彼此之间没有水平力联系。裂缝带在垮落带之上，裂缝带整体结构破坏，具有一定层次，岩块之间可能彼此绞接，在水平方向和垂直方向承载能力不强，不能承受上覆岩层的重量。弯曲下沉带在裂缝带上方，岩层整体移动，属于非破坏岩层。岩层结构没有裂缝、破坏，基本保持完整承载能力，类似板梁弯曲，弯曲下沉带能够承载上覆岩层载荷，形成稳定的结构。在采空区侧向形成类似三角形的稳定结构，如图 1 所示，沿空掘巷三角形稳定结构的下方（图中红色三角形），煤柱载荷相对较小，有利于巷道稳定。

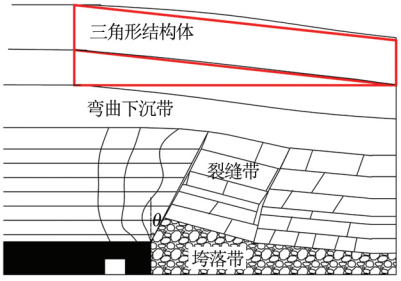

图 1　采空区侧向岩层分布示意

2　窄煤柱载荷估算方法

国内外众多学者研究沿空留巷充填体载荷计算方法，吴建[23]、孙恒虎[24-25]认为垮落带决定着巷道支护系统的载荷大小，根据力矩平衡原理提出充填体载荷的计算公式；李化敏[26]、李迎富[27]分析基本顶关键块稳定性，提出充填体支护阻力计算公式；涂敏[28]根据弹性地基顶板挠曲运动方程，计算充填体支护阻力。沿空留巷充填体的阻力或者载荷计算中，都是以采空区上覆岩层的裂缝带为基础，基本顶关键块为重点研究对象。沿空掘巷窄煤柱计算同样以裂缝带作为载荷计算的基础。Mark 在大量实际案例基础上，考虑侧压载荷影响，提出长壁工作面煤柱载荷的计算方法，根据 Mark 提出的载荷计算方法[29-30]，提出窄煤柱的载荷估算。

综合国内外沿空留巷、沿空掘巷窄煤柱的研究成果，认为：采空区内弯曲下沉带对窄煤柱的载荷几乎没有影响，采空区裂缝带的高度和形态决定了

窄煤柱的载荷。结合 Mark 长壁煤柱稳定性分析法和工作面顶板的岩层特性，窄煤柱承载结构如图 2 所示，窄煤柱上方岩层呈倒台阶承载形态，台阶边缘和垂线呈一个夹角 θ，类似长臂工作面的侧向支撑角，根据面积分摊法，窄煤柱承载如图 2 所示的红色梯形载荷，梯形下底边长为煤柱宽度加上巷道宽度的一半，梯形的高度为裂缝带高度减去煤层开采厚度。

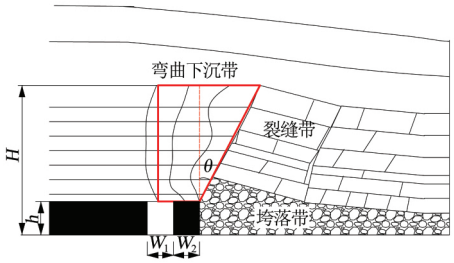

图 2　沿空窄煤柱承载结构

窄煤柱的载荷计算公式为:

$$\sigma = \frac{\{w_1 + 2w_2 + (H-h)\tan\theta\}\gamma(H-h)}{2w_2}$$

式中，w_1为留巷巷道宽度；h 为巷道高度；w_2为煤柱宽度；H 为裂缝带高度（参见建筑下水体下导水裂缝带计算公式，公式见表 1，公式中 m 为开采高度）；θ 为侧向支承角（取值见表 1）；γ 为工作面上覆岩层容重，0.025～0.027N/mm^2。

表 1　裂应力计算公式参数

工作面顶板岩性	裂缝带高度 H/m	侧向支承角 θ(°)
坚硬	$H = \frac{100m}{1.2m+2} \pm 8.9$	30
中硬	$H = \frac{100m}{1.6m+3.6} \pm 5.6$	20
软弱	$H = \frac{100m}{3.1m+5} \pm 4$	10

3　工程实践

柳巷煤矿设计生产能力为 1.2Mt/a，位于陕北榆神矿区。开采 3 号煤，厚度 11.05m，煤层结构致密，节理裂隙不发育。煤层结构简单，个别含 1 层夹矸，煤层平均倾角 0.3°。直接顶为泥岩，厚度 2.66m，基本顶为灰白色块状中-粗粒长石砂岩，厚 18m，煤层埋深 209～321m，开采方法为综采放顶煤，采高 3.8m，巷道长度 1500m 左右。把 30108 工作面回风巷与 30106 工作面采空区间的煤柱尺寸缩小为 10m，小煤柱巷道宽度 4.86m，高度 3.42m，支护形式采用高预应力锚杆锚索加强支护。顶板及煤柱帮锚杆为 20 号左旋无纵筋螺纹钢锚杆，长度 2.4m，树脂加长锚固，顶板配 ϕ14mm 圆钢焊接的钢筋托梁，煤柱帮采用 W 型钢护板，厚度 4mm，宽 280mm，长度 450mm。采用 8 号铁丝编织的菱形网护煤柱帮和护顶，网格为 50mm×50mm。工作面帮使用塑钢网片和玻璃钢锚杆支护，玻璃钢锚杆规格为 ϕ18mm×1600mm。锚杆排距 1000mm，顶板每排 5 根锚杆，间距 900mm。两帮每排各 4 根锚杆，间距 950mm。采用 ϕ17.8mm 锚索进行补强，长度 5.3m，配 300mm×300mm×14mm 高强度拱形可调心托板及配套锁具，每排 1 根布置，排距 2000mm。锚杆预紧扭矩不低于 400N·m。锚索张拉预紧力 180～200kN。

30108 工作面回风巷宽度 A=4.86m，高度 h=3.42m，煤柱宽度 B=10m，工作面属于硬度较高中硬顶板，θ=20°，采高 11.05m，裂缝带高度 H 的中值为 51.9m。根据煤柱载荷（应力）计算公式，当裂缝带取中值时，煤柱的应力为:

$$\sigma = \frac{\{w_1 + 2w_2 + (H-h)\tan\theta\}\gamma(H-h)}{2w_2} = 2.78\text{MPa}$$

巷道掘进距离工作面切眼 400m 的位置，4 月 7 日在 10m 煤柱中安装 4 个钻孔应力计，安装深度分别为 2m，4m，6m，7m，钻孔应力计安装的初始压力分别为 8.2MPa，7MPa，9.2MPa，12MPa，平均 9.1MPa，安装之后，钻孔应力计开始和煤柱耦合，钻孔应力计数据下降，开始 8d 内，钻孔应力计数据快速下降。4 月 15 日，4 个钻孔应力计数据分别为 3.5MPa，3.1MPa，2.6MPa，4.6MPa，平均 3.48MPa，经过 30d 时间，钻孔应力计和煤柱充分耦合，4 个钻应力计数据分别为 2.7MPa，2.8MPa，2.3MPa，3.5MPa，平均值为 2.83MPa，此时钻孔应力计监测数据为煤柱载荷，4 个钻孔应力计平均数据的变化曲线如图 3 所示。

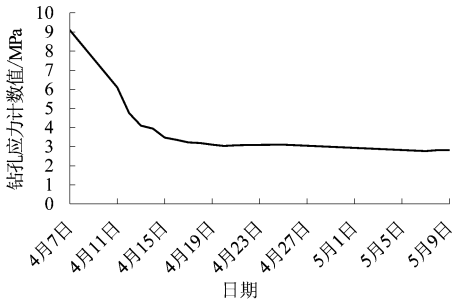

图 3　钻孔应力计平均测试曲线

煤柱载荷应力理论计算值为 2.78MPa，煤柱内安装 4 个钻孔应力计的实测平均值为 2.83MPa，2 个数据相差不大，证明载荷计算公式的合理性。

4 结　论

根据工作面侧向岩层移动规律，上覆岩层的弯曲下沉带形成自平衡的三角形平衡结构，沿空掘巷窄煤柱布置在三角形结构体的下方，结合长壁煤柱载荷分析的方法，提出窄煤柱载荷的计算公式，公式包括采高、巷道宽度、煤柱宽度、上覆岩层结构类型等多个参数。窄煤柱载荷计算公式，参数明确简单，为沿空掘巷窄煤柱设计方法提供研究基础。载荷计算公式在中硬顶板条件下，证明公式的合理性，需要在软弱、中硬顶板等条件下进一步验证。

[参考文献]

[1] 侯朝炯，李学华．综放沿空掘巷围岩大、小结构的稳定性原理 [J]．煤炭学报，2001，26（1）：1-7.

[2] 柏建彪，黄汉富．综放沿空掘巷围岩控制机理及支护技术研究 [J]．煤炭学报，2000，25（5）：478-481.

[3] 李学华．综放沿空掘巷围岩稳定控制原理与技术 [M]．徐州：中国矿业大学出版社，2008.

[4] 李栖凤．无煤柱开采 [M]．北京：煤炭工业出版社，1986.

[5] 张　源，万志军，李付臣，等．不稳定覆岩下沿空掘巷围岩大变形机理 [J]．采矿与安全工程学报，2012，29（4）：451-458.

[6] 岳帅帅，孙　浩，庞龙龙，等．大采高综放开采沿空掘巷矿压显现特征分析 [J]．煤矿安全，2016，47（1）：192-195.

[7] 康立军，冯增强．南屯矿 63 上 10 综放工作面沿空掘巷矿压显现规律探讨 [J]．煤炭科学技术，1998（7）：41-45.

[8] 王德超，李术才，王　琦，等．深部厚煤层综放沿空掘巷煤柱合理宽度试验研究 [J]．岩石力学与工程学报，2014，33（3）：539-548.

[9] 王卫军，冯　涛，侯朝炯，等．沿空掘巷实体煤帮应力分布与围岩损伤关系分析 [J]．岩石力学与工程学报，2002，21（11）：590-593.

[10] 张科学．深部煤层群沿空掘巷护巷煤柱合理宽度的确定 [J]．煤炭学报，2011，36（S1）：28-35.

[11] 苏　海．深部综放大断面沿空掘巷小煤柱尺寸优化及控制技术 [J]．煤矿开采，2015，20（2）：39-42.

[12] 赵国贞，马占国，孙　凯，等．小煤柱沿空掘巷围岩变形控制机理研究 [J]．采矿与安全工程学报，2010，27（4）：517-521.

[13] 杨吉平．沿空掘巷合理窄煤柱宽度确定与围岩控制技术 [J]．辽宁工程技术大学学报（自然科学版），2013（1）：39-43.

[14] 张广超，何富连．大断面强采动综放煤巷顶板非对称破坏机制与控制对策 [J]．岩石力学与工程学报，2016，35（4）：806-818.

[15] 秦海忠．采动影响留巷煤柱内沿空掘巷强力锚网索支护技术 [J]．煤矿开采，2012，17（2）：69-72.

[16] 张志青，王国龙，康健婷．采动影响下窄煤柱沿空掘巷支护技术研究 [J]．煤炭工程，2016，48（2）：83-86.

[17] 徐　军，神文龙，李思超，等．残留煤柱沿空掘巷围岩应力场及位移场分布 [J]．煤矿安全，2015，46（12）：38-41.

[18] 张广超，何富连．大断面综放沿空巷道煤柱合理宽度与围岩控制 [J]．岩土力学，2016，37（6）：1721-1728.

[19] 华心祝，刘　淑，刘增辉，等．孤岛工作面沿空掘巷矿压特征研究及工程应用 [J]．岩石力学与工程学报，2011，30（8）：1646-1651.

[20] 张　源，万志军，程敬义，等．支护强度对沿空掘巷煤柱稳定性影响 [J]．辽宁工程技术大学学报，2013(4)：443-448.

[21] 靖洪文，王　猛，汪小东，等．综放沿空煤巷不同支护方式围岩变形演化规律的数值模拟 [J]．辽宁工程技术大学学报(自然科学版)，2009，28（6）：869-872.

[22] 陆士良．无煤柱护巷的矿压显现 [M]．北京：煤炭工业出版社，1982.

[23] 吴　健，孙恒虎．巷旁支护载荷和变形设计 [J]．采矿与安全工程学报，1986（2）：2-11.

[24] 孙恒虎，赵炳利．沿空留巷的理论与实践 [M]．北京：煤炭工业出版社，1993.

[25] 孙恒虎，吴　健．沿空留巷的矿压规律及岩层控制 [J]．煤炭学报，1992（1）：15-24.

[26] 李化敏．沿空留巷顶板岩层控制设计 [J]．岩石力学与工程学报，2000，19（5）：651 - 654.

[27] 李迎富，华心祝，蔡瑞春．沿空留巷关键块的稳定性力学分析及工程应用 [J]．采矿与安全工程学，2012，29（3）：357-364.

[28] 涂　敏．沿空留巷顶板运动与巷旁支护阻力研究 [J]．辽宁工程技术大学学报（自然科学版），1999，18（4）：347 - 351.

[29] Mark，C.，1987，Analysis of Longwall Pillar Stability，Ph. D. Thesis，PA State Univ.，University Park，PA，414pp.

[30] Mark C.（2006）. The evolution of intelligent coal pillar design：1981 - 2006. Proceedings of 25th International Conference on Ground Control in Mining，Morgantown，WV：West Virginia University，2006，Aug：325-334.

[责任编辑：潘俊锋]

（上接 4 页）

[12] 颜金培，杨林军，张　霞，等．燃烧源 $PM_{2.5}$ 凝结洗涤脱除实验研究 [J]．燃料化学学报，2008（3）：267-272.

[13] 甘建平，马宝岐，尚建选，等．煤炭分质转化理念与路线的形成和发展 [J]．煤化工，2013，41（1）：3-6.

[14] 董华松，黄文辉．CO_2 捕捉与地质封存及泄漏监测技术现状与进展 [J]．资源与产业，2010，12（2）：123-128.

[15] 王　众，张哨楠，匡建超．碳捕捉与封存技术国内外研究现状评述及发展趋势 [J]．能源技术经济，2011，23（5）：42-47.

[16] 王明明，徐　磊，段　雪，等．中国二氧化碳资源化有效利用的战略选择 [J]．资源科学，2009，31（5）：829-835.

[17] 王友启，赵峰华，刘柏林，等．炼油厂排放二氧化碳用于驱油埋存的可行性评价 [J]．油气地质与采收率，2010，17（2）：70-73，115-116.

[责任编辑：邹正立]