

文章编号: 1673-3363-(2013)05-0673-06

沿空留巷砌块式墙体结构承载特性及应用研究

韩昌良¹, 张农^{1,2}, 王晓卿¹, 李宝玉¹, 李志兵¹

(1. 中国矿业大学矿业工程学院, 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 湖南科技大学煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要 为了探讨砌块式墙体对沿空留巷的适应性, 研究了墙体结构形式、破坏过程、本构关系及承载力, 揭示了沿空留巷砌块式墙体结构的破坏机理及承载特性。研究表明, 沿空留巷砌块式墙体的破坏通常发生在第 III 阶段, 在第 I, II 阶段的留巷具有易护性; 砌块式墙体的轴向受压承载力应与其所需的支护阻力相匹配; 砌块式墙体的强度应与顶底板的强度相匹配。基于两大匹配原则, 提出了砌块式沿空留巷设计的整套流程, 将其应用到沙曲矿工程实践, 设计了尺寸为 0.80 m×0.18 m×0.12 m、强度不低于 10 MPa 的砌块和强度不低于 2.5 MPa 的砂浆, 采用特殊的一顺一丁形式砌筑成宽度为 1.6 m、强度介于 4.3 MPa 和 9.3 MPa 的墙体, 取得了良好的留巷效果。

关键词 沿空留巷; 砌块式墙体; 破坏机理; 承载特性; 承载力匹配; 强度匹配

中图分类号 TD 353

文献标志码 A

Bearing behavior of block wall structure in gob-side entry retaining and its application

HAN Chang-liang¹, ZHANG Nong^{1,2}, WANG Xiao-qing¹, LI Bao-yu¹, LI Zhi-bing¹

(1. School of Mines, Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Hunan Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract To investigate the adaptability of block wall in gob-side entry retaining, block wall structure form, failure process, constitutive relation and bearing capacity were studied, revealing the failure mechanism and bearing behavior of block wall structure. The results show that failure of block wall in gob-side entry retaining usually occurs in III stage, and retained entry is easily maintained in I, II stages. Axial bearing capacity of block wall should match its support resistance, and the strength of wall, roof and floor should be matched. Based on the two matching principles, a whole design process of block wall structure in gob-side entry retaining was proposed, and has been applied in Shaqu Coal Mine. The blocks with the size of 0.80 m×0.18 m×0.12 m, strength over 10 MPa and the mortar with the strength over 2.5 MPa, were designed to lay block wall with width of 1.6 m and strength between 4.3~9.3 MPa by using special masonry form, which has achieved favorable effects in gob-side entry retaining.

Key words gob-side entry retaining; block wall; failure mechanism; bearing behavior; bearing capacity matching; strength matching

收稿日期: 2012-10-31

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110095110013); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX10B_147Z)

作者简介: 韩昌良(1985-), 男, 江苏省睢宁县人, 博士, 从事巷道围岩控制方面的研究。

通信作者: 张农

E-mail: zhangnong@126.com

Tel: 0516-83590503

沿空留巷作为无煤柱开采的核心技术,对提高煤炭开采的经济和社会效益具有重要的意义^[1]。巷旁支护体是沿空留巷的关键,需要具备较快的增阻速度、较高的支护阻力以及及时支护并切落一定范围的顶板,足够的可缩量以适应围岩的剧烈变形以及合理的经济性^[2]。传统的巷旁支护形式有木垛支护、密集支柱支护、矸石带支护、料石垛支护、混凝土砌块支护等^[3]。木垛支护和密集支柱支护存在支护阻力小、密闭性差、材料消耗量大等缺点,矸石带和料石垛支护存在可缩量大、劳动强度大、密闭性差等弊端,因此近些年发展起来的整体浇筑巷旁充填技术是沿空留巷巷旁支护的发展方向^[4]。但是由于工艺、装备和材料性能的不足,充填时各配料不能严格按照比例混合,导致充填体强度不够,且很难充分接顶。混凝土砌块式巷旁支护形式,在地面预制砌块,可严格控制配比,因此强度可得到保证,同时块体尺寸可灵活调整,干燥后体积稳定,能够适应采高的变化,因而具备强度高、接顶充分、密封性好、灵活性强等诸多优点。但是砌块式墙体本身是由砌块和砂浆黏结而成,横向和竖向灰缝形成了大量弱面,这种结构作为沿空留巷巷旁支护会呈现出特殊的承压失稳特性,因而需要在砌块式墙体强度、宽度等参数的选择上形成合理的方法。本文针对这一关键问题,采用理论分析、工程实践等手段,探讨混凝土砌块式墙体对沿空留巷的适应性,尤其承载力和强度的匹配性,提出沿空留巷砌块式墙体结构参数的确定方法。

1 沿空留巷砌块式墙体结构及破坏特征

1.1 沿空留巷砌块式墙体结构

沿空留巷砌块式墙体结构取决于砌块的砌筑方式,砌筑方式对墙体的强度和稳定性有很大影响。为保证墙体的整体承载性,砌筑时应上下错缝,内外搭砌,且要求铺砌均匀、灰浆饱满。墙体通常采用一顺一丁、三顺一丁和梅花丁的砌筑方式^[5],如图 1 所示。

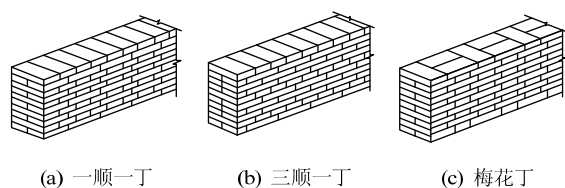


图 1 墙体常见结构形式

Fig.1 Common structure forms of wall

但在留巷实践中,墙体是随着工作面的推进从后往前依次分段全高施工,需要考虑前后两段墙体的搭接问题。如果完全按照图 1 的形式砌筑,搭接时将存在一定困难,考虑到竖向灰缝对墙体抗压强度的影响远远小于水平灰缝,兼顾墙体的搭接,在施工中往往取折中方案,即回避砌筑应上下错缝、内外搭砌这一要求,通缝砌筑,辅以墙体表面喷射抗裂砂浆。

1.2 沿空留巷砌块式墙体破坏特征

墙体的破坏形式是多种多样的,概括起来有受压破坏、受拉破坏和剪切破坏 3 种形式。而砌块式墙体的受力在沿空留巷中以垂向荷载为主,故主要描述沿空留巷砌块式墙体受压时的破坏特征。

按照文献[6-7]对 MU10 普通烧结砖和 M5 水泥混合砂浆砌筑的标准试件(240 mm×370 mm×720 mm)进行轴压试验,模拟沿空留巷砌块式墙体的破坏过程及特征,如图 2 所示。

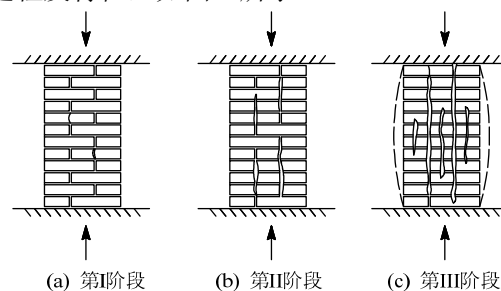


图 2 砖砌体标准试件的破坏过程

Fig.2 Failure process of block wall standard specimen

第 I 阶段:开始加载,直到个别砖块上出现细微可见的裂缝,应力应变呈直线关系。该阶段末的轴向荷载 N_1 与极限荷载 N_u 关系为 $N_1/N_u=0.5\sim0.7$ 。在砌块式沿空留巷中,此阶段滞后工作面一小段距离,采空区顶板岩层在墙体附近切断,自下而上垮落,巷旁墙体作为支座开始支撑已垮岩层的残留边界及其上未垮顶板,墙体内部个别砌块出现裂缝,外部没有明显变化。

第 II 阶段:继续加载,个别砖块上的裂缝贯通,并沿竖向灰缝通过若干皮砖,形成平行于加载方向的纵向间断裂缝。若荷载不增加,裂缝发展可稳定。该阶段末的轴向荷载 N_2 与极限荷载 N_u 关系为 $N_2/N_u=0.8\sim0.9$ 。在砌块式沿空留巷中,此阶段滞后工作面距离稍长,随着垮落层位不断提高,墙体上方已垮岩层承重不断增加,产生“平移”甚至“反转”形式的下沉,同时已垮岩层上方的平衡未垮岩层还会失去平衡,产生具有“给定变形”性质的平移下沉,巷

旁墙体持续受压，墙体内部开始出现不及墙高的贯通裂缝，墙体表面喷层出现开裂现象。

第 III 阶段：荷载增加不多，裂缝也会发展很快，此后即使荷载不再增加，裂缝仍然不断发展，形成上下贯通的裂缝将砌体分割成若干半砖小柱，砌体横向变形明显增大，向外鼓出，半砖小柱丧失稳定而破坏。此阶段末的轴向荷载 N_u 即为砌体的极限荷载。在砌块式沿空留巷中，此阶段滞后工作面距离较长，围岩活动趋于稳定，但顶板可能存在残余变形，将直接导致墙体内部裂缝上下贯通，墙体被切割成若干块段，墙体外部表现为墙体开裂，喷层脱落。

在沿空留巷中，砌块式墙体的破坏通常发生在第 III 阶段，此阶段距离工作面较远，因此在能满足使用要求的前提下，应尽量采用阶段留巷，使留巷段始终处于第 I、II 阶段，此 2 阶段的留巷具有易护性。对于全长留巷，在第 I、II 阶段要保证足够的支护强度，将显著抑制第 III 阶段留巷顶板的残余变形，阻止墙体破坏，有利于砌块式留巷的长期稳定。

2 沿空留巷砌块式墙体典型承载特征

2.1 沿空留巷砌块式墙体典型本构关系

砌体的应力-应变关系是砌体结构的一项基本力学性能^[8]，如前所述，沿空留巷砌块式墙体主要承受压力，因此主要研究墙体轴向受压时的本构关系。

试验发现，墙体轴向受压时，应变随着应力的增加而增大，且随后应变增长的速度大于应力增长的速度，即应力-应变呈非线性关系。由大量试验得到了曲线的经验表达式，该式以砌体抗压强度平均值 f_m 为变量^[5]，如下：

$$\varepsilon = -\frac{1}{\xi} \ln \left(1 - \frac{\sigma}{f_m} \right) \tag{1}$$

式中： ξ 为与块体类别和砂浆强度有关的砌体变形弹性特征系数， $\xi=460\sqrt{f_m}$ ； f_m 为墙体抗压强度平均值，MPa。

由式(1)得到墙体轴向受压时的应力-应变上升段曲线，如图 3a 所示。

由式(1)可知，当 $\sigma = f_m$ 时， $\varepsilon \rightarrow \infty$ ，曲线只有上升段，由前面对墙体破坏特征的分析，当 $\sigma \geq (0.8 \sim 0.9)f_m$ 时，墙体将处于破坏状态，因此实际设计中只需考虑曲线的上升段。《砌体结构设计

规范》中取砌体应力 $\sigma = 0.43f_m$ 时的割线模量作为砌体的弹性模量，即图 3a 中 a 点为屈服点。取 $\sigma = 0.9f_m$ 为砌体的极限应力^[5]，即图 3a 中 b 点为破坏点。但墙体在实际受压过程中，当应力达到极限值时，墙体发生破裂，应力并不突然下降，而是一个相对缓慢的过程，这说明破坏后的墙体仍具有一定的承载能力，即存在“残余强度”，据此绘出墙体受压应力-应变全曲线，如图 3b 所示。

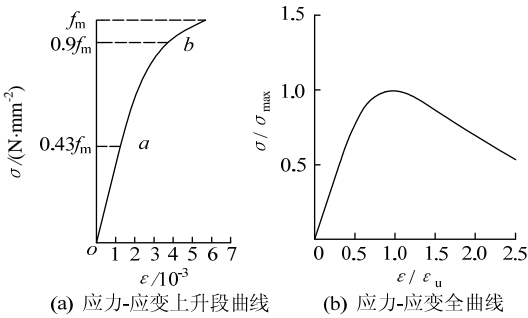


图 3 墙体受压应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curve of wall under compression

2.2 沿空留巷砌块式墙体承载力计算

2.2.1 砌块式墙体抗压强度平均值的计算

影响墙体抗压强度的因素较多，采用从强度破坏机理上建立计算公式，再用试验数据确定有关参数的做法难以执行^[9]。因此根据大量试验数据的统计分析，归纳出了适用于各类墙体的统一的抗压强度平均值的计算公式^[5]，如式(2)所示：

$$f_m = k_1 f_1^\alpha (1 + 0.07 f_2) k_2 \tag{2}$$

式中： k_1 、 α 为与块体类别有关的参数； f_1 为块体抗压强度等级或平均值，MPa； f_2 为砂浆抗压强度平均值，MPa； k_2 为砂浆强度影响的修正系数。

式(2)中的各项参数与墙体种类对应的取值关系如表 1^[10]所示。

表 1 计算参数表 Table 1 Schemes of calculation parameters			
墙体种类	k_1	α	k_2
烧结普通砖、烧结多孔砖、蒸压灰砂砖、蒸压粉煤灰砖	0.78	0.5	当 $f_2 < 1$ 时， $k_2 = 0.6 + 0.4f_2$
混凝土砌块	0.46	0.9	当 $f_2 = 0$ 时， $k_2 = 0.8$
毛料石	0.79	0.5	当 $f_2 < 1$ 时， $k_2 = 0.6 + f_2$
毛石	0.22	0.5	当 $f_2 < 2.5$ 时， $k_2 = 0.4 + 0.24f_2$

注： k_2 在表列条件以外时均等于 1。

对于不同种类的墙体，由其块体和砂浆的抗压强度值，可以计算墙体的抗压强度平均值。

2.2.2 砌块式墙体承载力的计算

综合以上分析,讨论砌块式墙体轴向受压的极限荷载 N_u 的计算方法。《砌体结构设计规范》中规定了轴心受压的无筋砌体承载力计算公式^[5],结合砌块式墙体典型本构关系分析中取 $\sigma = 0.9f_m$ 为墙体的破坏点,将公式修改如下:

$$N_u \leq 0.9\varphi f_m b l \quad (3)$$

式中: N_u 为砌块式墙体轴向受压极限承载力, MN; φ 为高宽比 β 和轴向力的偏心距 e 对受压构件承载力的影响系数; b 为砌块式墙体宽度, m; l 为砌块式墙体一次砌筑长度, m。

沿空留巷墙体截面为矩形,因此仅讨论矩形截面情况下 φ 的计算。假设沿空留巷砌块式墙体为轴心受压,则 φ 仅由高宽比 β 决定,与轴向力的偏心距 e 无关。因此有^[7]:

$$\varphi = \begin{cases} 1 & , \beta \leq 3 \\ \frac{1}{1+\lambda\beta^2} & , \beta > 3 \end{cases} \quad (4)$$

式中 λ 为与砂浆强度有关的系数。

根据大量工程实践,当充填体的高宽比小于 1.25 时,有利于充填体的稳定^[11],绝大多数的沿空留巷符合该条件,因此 φ 的取值仅需考虑 $\beta \leq 3$ 的情况。但不能一味增大墙体宽度,这不但会增加护巷的成本,还会增加留巷材料运输量和劳动施工强度^[12],故应遵循“在满足充填体稳定性的条件下支护宽度尽可能小”^[13]的原则。对于一些特殊的大高宽比沿空留巷, φ 的取值须满足 $\beta > 3$ 的情况。

3 砌块式沿空留巷的墙体匹配原则及设计流程

3.1 砌块式沿空留巷墙体承载力匹配原则

前人对于沿空留巷巷旁支护所需的支护阻力已提出了诸多力学模型,有条带分割法、切顶法等,文章在分析对比各种方法的基础上选用条带分割法来计算沿空留巷砌块式墙体所需的支护阻力 P ^[5,14-15],如下:

$$P = \frac{m\gamma h}{2a} \left[a^2 + ah(m-1)\tan\theta + \frac{h^2 \tan^2\theta(m-1)(2m-1)}{6} \right] + \gamma h L_m \left[a + h(m-1)\tan\theta \right] + \frac{\sigma_b h^2}{6} \quad (5)$$

式中: P 为砌块式墙体所需的支护阻力, MN/m; m 为垮落层数; γ 为第 1~ m 层岩层的平均容重, kN/m³; h 为切顶岩层的平均厚度, m; a 为巷道维护宽度, m; θ 为切顶岩层垮落角的余角; L_m 为第 m 层岩层

破断特征尺寸,一般取周期来压步距, m; σ_b 为切顶岩层的平均抗拉强度, MPa。

沿空留巷砌块式墙体的轴向受压承载力应与其所需的支护阻力相匹配,即墙体承载力匹配原则。建立二者的匹配公式:

$$Pl \leq N_u \quad (6)$$

将该式与式(3)联立,得到沿空留巷砌块式墙体承载力匹配原则的最终计算式:

$$P \leq 0.9b\varphi f_m \quad (7)$$

3.2 砌块式沿空留巷墙体强度匹配原则

实践中发现,增大砌块式墙体的抗压强度,虽然墙体的极限承载力也在不断增大,很好地满足了沿空留巷砌块式墙体承载力匹配原则,但仍不足以保证沿空留巷的成功。当砌块式墙体上方顶板的强度低于墙体强度时,墙体会压碎局部顶板发生“钻顶”现象,“钻顶”不但会切落采空区侧顶板,还会切断留巷侧顶板,导致留巷顶板下沉严重、控顶困难;当砌块式墙体下方底板的强度低于墙体强度时,墙体会发生“钻底”现象,“钻底”会使顶板整体下沉、增大底鼓,同时墙体可能受底板水平应力剪切水平灰缝而破坏。因此沿空留巷砌块式墙体还须满足强度匹配原则,即墙体的强度应与顶底板的强度相匹配。匹配公式如下:

$$\begin{cases} f_m \leq f_{\text{顶}} \\ f_m \leq f_{\text{底}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $f_{\text{顶}}$ 为墙体上方顶板的平均强度, MPa; $f_{\text{底}}$ 为墙体下方底板的平均强度, MPa。

在沿空留巷实践中,需要实测顶底板的平均抗压强度,与计算的砌块式墙体所需的最低抗压强度相比较,如果相比较小,需要采取注浆等加固措施,有时即便采取加固措施,仍不能满足强度要求,则该巷不适合砌块式沿空留巷。很多时候,留巷段顶底板浅部围岩由于卸荷作用发生松动扩容变形,致其强度偏低,需要清理掉浅部松散围岩,使砌块式墙体与强度较大的岩体直接接触。

3.3 砌块式沿空留巷设计流程

综合沿空留巷砌块式墙体的承载力匹配原则和强度匹配原则,提出砌块式沿空留巷的 2 个设计流程。1) 先根据采高、留巷断面及位置等综合因素确定砌块式墙体宽度,结合计算得到的沿空留巷砌块式墙体所需的支护阻力,根据承载力匹配原则,导出砌块式墙体抗压强度平均值,判断其是否满足强度匹配原则,最终确定墙体参数;2) 先根据已有

墙体材料确定砌块式墙体抗压强度平均值，判断其是否满足强度匹配原则，结合计算得到的沿空留巷砌块式墙体所需的支护阻力，根据承载力匹配原

则，导出砌块式墙体宽度。砌块式沿空留巷的设计流程如图 4 所示。

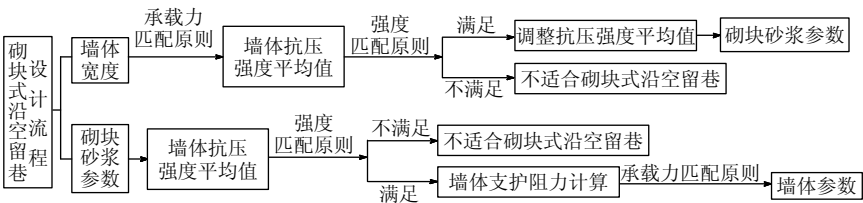


图 4 砌块式沿空留巷设计流程

Fig.4 Design flow about block gob-side entry retaining entry retaining

4 工程应用

4.1 工程概况

沙曲矿 24202 工作面平均埋深 471 m，煤层平均厚 2.56 m，倾角 2°~5°。伪顶为黑色泥岩，厚度为 0.78 m，直接顶为细砂岩，厚度 0.8 m，基本顶为黑色砂质泥岩，厚度为 1.0 m，顶板抗压强度平均值为 9.3 MPa。直接底为厚 3.66 m 的灰色细砂岩，基本底为黑色砂质泥岩，厚度为 1.9 m，底板抗压强度平均值为 12.5 MPa。所采 4#煤层上覆 3#煤层，平均间距 2.58 m，下接 5#煤层，平均间距 5.56 m，属于近距离煤层群开采条件。工作面绝对瓦斯涌出量为 65 m³/min，经测定属于煤与瓦斯突出工作面。

为解决本工作面瓦斯治理难题，设计采用沿空留巷 Y 型通风煤与瓦斯共采技术，在解决瓦斯超限问题的同时，利用留巷空间抽采采空区卸压瓦斯。综合 24202 工作面现有因素及留巷易护性考虑，决定采用砌块式阶段留巷技术，留巷段够用即弃，最终确定留巷的最佳长度为 80~120 m。24202 工作面阶段留巷示意图如图 5 所示。

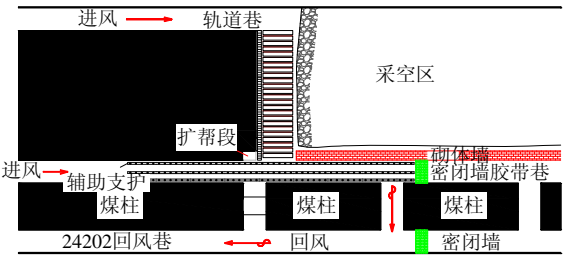


图 5 24202 工作面阶段性留巷示意图

Fig.5 Schematic diagram about stage gob-side

4.2 墙体参数确定

采用前述砌块式沿空留巷设计流程中的第 1 个流程展开设计。

4.2.1 砌块式墙体宽度的确定

传统的全长留巷，墙体高宽比 β 小于 1.25 时，

有利于墙体稳定。考虑本次留巷阶段性的特点，可适当增大高宽比，将墙体的高宽比确定在 1.25~2.0 范围内。在平均采高 2.56 m 的条件下，结合留巷位置及断面等因素，兼顾护巷成本和施工强度，最终将墙体宽度 b 定为 1.6 m。

4.2.2 砌块式墙体所需支护阻力及抗压强度平均值的计算

按照式(5)来计算沿空留巷砌块式墙体所需的支护阻力 P 。根据 24202 工作面的具体条件，确定各参数如表 2 所示。

表 2 煤层顶板岩石参数
Table 2 Rock parameters of coal seam roof

$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	m	h/m	a/m	$\theta/(^{\circ})$	L_m/m	σ_v/MPa
25	13	1.0	4.2	45	14	6

将表 2 中各参数代入式(5)，计算得到沿空留巷砌块式墙体所需的支护阻力 P 为 6.2 MN/m。

由砌块式墙体所需的支护阻力 P ，结合确定的墙体宽度 b ，可知高宽比 $\beta \leq 3$ ，将其代入式(7)，使其满足墙体承载力匹配原则，计算得墙体抗压强度平均值 $f_m \geq 4.3 \text{ MPa}$ 。顶板的平均抗压强度 $f_{\text{顶}}$ 为 9.3 MPa，底板的平均抗压强度 $f_{\text{底}}$ 为 12.5 MPa，代入式(8)，知墙体抗压强度平均值 f_m 无须调整，即可满足墙体强度匹配原则。

4.2.3 砌块、砂浆各参数的确定

由墙体抗压强度平均值 f_m ，参照式(2)及表 1，计算得到砌块强度 f_1 和砂浆强度 f_2 的 4 对恰当组合值，如表 3 所示。

表 3 砌块和砂浆强度强度组合值 (MPa)

Table 3 Strenth combination value between block and mortar

组合项目	I	II	III	IV
f_1	8.0	9.0	10.0	11.0
f_2	6.2	4.1	2.5	1.1

试验证明, 砌块强度对砌体抗压强度的影响程度要远远大于砂浆, 但砂浆强度也决定着灰缝强度, 比对 4 个组合, 最终选取第 III 个组合, 即砌块强度 f_1 不小于 10.0 MPa, 砂浆强度 f_2 不小于 2.5 MPa。为了保证砌体强度, 在预制砌块和砂浆时, 可适当加大其强度。采用水泥、粉煤灰、砂及石子按照一定比例制备砌块, 采用水泥、粉煤灰、细沙等制备砂浆, 制作标准试件经养护后测得砌块和砂浆的平均抗压强度分别为 12.3 MPa 和 3.6 MPa, 均满足设计要求。

砌块的尺寸对墙体的抗压强度影响较大。砌块的高度增加, 其抗弯、抗剪和抗拉能力增大^[5], 因此也提高了墙体的抗压强度, 但受压时的脆性也会增大。砌块的高度还要受到采高的影响, 合理的砌块高度, 应能保证墙体充分接顶。砌块高度较大, 欠接顶量随之增加; 块体高度较小, 墙体的不稳定性随之增加。综合以上因素, 并考虑到人体工学原理, 最终将砌块尺寸确定为 0.80 m×0.18 m×0.12 m。砌筑时在欠接顶空间内注入混凝土湿料, 保证充分接顶。

4.2.4 砌筑方式的确定

沙曲矿沿空留巷墙体砌筑中更多考虑了砌筑方便性, 采用特殊的一顺一丁砌筑方式, 通缝砌筑。实践证明, 该砌筑方式能够满足墙体的承载要求。砌筑方式如图 6 所示。

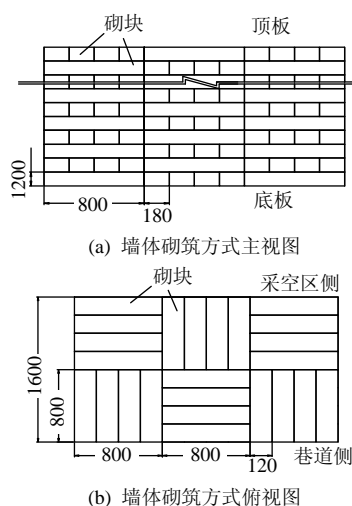


图 6 沿空留巷砌块式墙体砌筑方式 (mm)

Fig.6 Masonry way of gob-side entry retaining block wall

4.3 留巷效果

在沙曲矿 24202 工作面留巷过程中, 连续观测了 5 个阶段留巷 40, 80 和 120 m 处的表面位移情况, 得到了留巷 40, 80 和 120 m 处的巷道平均断

面和断面的平均收缩率, 如表 4 所示。

表 4 留巷断面收缩情况

Table 4 Shrinkage of gob-side entry retaining section

阶段留巷长度/m	0	40	80	120
巷道尺寸/m	4.2×2.8	4.1×2.6	3.9×2.4	3.7×2.2
巷道断面/m ²	11.76	10.66	9.36	8.14
断面收缩率/%	-	9.4	20.4	30.8

可以看到, 留巷达到阶段留巷的最大长度 120 m 时, 断面收缩率为 30.8%, 断面为 8.14 m², 能够很好满足瓦斯抽采和通风要求。

5 结 论

1) 沿空留巷砌块式墙体的破坏通常发生在第 III 阶段, 在第 I, II 阶段的阶段留巷具有易护性; 在全长留巷中, 尤其要保证第 I, II 阶段的支护强度。

2) 提出在不同高宽比情况下, 沿空留巷砌块式墙体承载力的计算公式: $N_u \leq 0.9\varphi f_m b l$, 其中

$$\varphi = \begin{cases} 1, & \beta \leq 3 \\ \frac{1}{1 + \lambda\beta^2}, & \beta > 3 \end{cases}$$

3) 提出砌块式沿空留巷的 2 大设计原则: 承载力匹配原则, 即沿空留巷砌块式墙体的轴向受压承载力应与其所需的支护阻力相匹配; 强度匹配原则, 即墙体的强度应与顶底板的强度相匹配。

4) 基于 2 大原则, 提出砌块式沿空留巷设计的整套流程, 包括墙体宽度、强度及砌块、砂浆参数的确定。

5) 研究成果应用到沙曲矿沿空留巷工程实践, 取得了良好的留巷效果, 证明了砌块式墙体可以适应沿空留巷的承载要求及设计流程的可行性。

参考文献:

- [1] 阚甲广. 典型顶板条件沿空留巷围岩结构分析及控制技术[D]. 徐州: 中国矿业大学矿业工程学院, 2009.
- [2] 柏建彪, 周华强, 侯朝炯, 等. 沿空留巷巷旁支护技术的发展[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 183-186. BAI Jian-biao, ZHOU Hua-qiang, HOU Zhao-jiong, et al. Development of support technology beside roadway in goaf-side entry retaining for next sublevel[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 183-186.
- [3] 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.

(下转第 685 页)