

## 基于双向板理论充填挡墙配筋力学模型

张爱卿<sup>1</sup>, 吴爱祥<sup>1</sup>, 韩斌<sup>1</sup>, 于少峰<sup>1</sup>, 常宝孟<sup>1</sup>, 王虎<sup>1,2</sup>, 武栓军<sup>1,2</sup>

- (1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京, 100083;
2. 金川集团有限公司, 甘肃 金昌, 737100)

**摘要:** 基于混凝土结构双向板理论, 建立钢混充填挡墙配筋力学模型, 并推导出充填挡墙配筋数量与充填体强度及充填挡墙厚度的关系式。以金川二矿区为工程分析实例, 采用控制变量法(CVM)研究充填体强度和充填挡墙厚度与充填挡墙配筋数量的变化规律。研究表明: 在充填挡墙尺寸一定的前提下, 充填挡墙的厚度随着充填体强度的增大呈线性增大; 当充填挡墙尺寸和充填体强度一定的前提下, 充填挡墙的配筋数量与充填挡墙的厚度呈二项式相关, 当充填挡墙尺寸和充填挡墙厚度一定的前提下, 充填挡墙的配筋数量与充填体强度呈线性相关。最终得到充填体强度与充填挡墙配筋数量的理论关系式。

**关键词:** 充填挡墙; 力学模型; 影响因素; 变化规律

中图分类号: TD853

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2017)11-3006-07

## Mechanical model of filling blocking wall reinforcement based on two-way slab theory

ZHANG Aiqing<sup>1</sup>, WU Aixiang<sup>1</sup>, HAN Bin<sup>1</sup>, YU Shaofeng<sup>1</sup>, CHANG Baomeng<sup>1</sup>,  
WANG Hu<sup>1,2</sup>, WU Shuanjun<sup>1,2</sup>

- (1. School of Civil & Resource Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Jinchuan group Co., LTD., Jinchang 737100, China)

**Abstract:** Based on the “two-way slab” theory of concrete structure, the reinforcement of the filling blocking wall mechanical model was established, and the formula of amount of the filling blocking wall reinforcement with backfill strength and filling blocking wall thickness was elicited. Taking Jinchuan second mine as an example for engineering analysis, the rule of backfill strength and filling blocking wall thickness changing with the amount of filling blocking wall reinforcement by control variate method (CVM) was studied. The results show that, on the premise of certain size of filling blocking wall, the filling blocking wall thickness increases linearly with the increasing of strength of backfill; on the premise of certain size of filling blocking wall and the strength of backfill, there is a negative correlation between the amount of filling blocking wall reinforcement and the thickness of filling blocking wall; on the premise of certain size of filling blocking wall and the thickness of filling blocking wall, there is a positive correlation between the amount of filling blocking wall reinforcement and the strength of backfill. The final theoretical equation among the strength of backfill and the amount of filling blocking wall reinforcement was obtained.

**Key words:** filling blocking wall; mechanical model; influencing factor; variation law

收稿日期: 2016-11-20; 修回日期: 2017-01-17

基金项目(Foundation item): 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAB08B02) (Project(2012BAB08B02) supported by the National Key Technologies R&D Program for the 12th Five-year Plan of China)

通信作者: 韩斌, 博士, 副教授, 从事采矿与岩石力学研究; E-mail: hanb666@163.com

充填挡墙设计不仅要在强度上承受来自充填料浆的作用, 还要在结构上满足抵抗矿区爆破震动和充填料浆滤水的要求。其强度和结构同矿山充填工艺密切相关, 影响充填质量、生产能力和成本效益。但是由于每个矿山井下充填条件的复杂性, 所选用的充填挡墙类型并不完全相同, 目前, 国内外针对充填挡墙配筋设计尚无完整的规范可以参考。国内外学者在充填挡墙受力分析和数值模拟方面进行了大量的研究。王丽红等<sup>[1]</sup>对原有单一结构的混凝土充填挡墙进行了优化改进以及工艺研究, 针对不同尺寸巷道采用不同形式的充填挡墙。汪海萍等<sup>[2]</sup>提出了采场充填挡墙的具体实施方案, 并对充填挡墙进行受力分析及力学参数计算, 得出挡墙厚度。袁世伦<sup>[3]</sup>用有限元法对采场围岩和充填体的应力分布状况进行了研究, 按充填料浆 3 种不同力学性质状态对充填挡墙进行了受力分析和计算。NORTJÉ 等<sup>[4]</sup>针对充填过程中挡墙的受力进行分析, 并对其设计。KANOWNA 等<sup>[5]</sup>对已有充填挡墙的厚度由 40 cm 调整至 35 cm, 并利用 FLAC<sup>3D</sup> 软件进行模拟分析, 结果表明可保证其正常使用。对于充填挡墙配筋设计方面的研究, 国外内的矿山虽已有成功案例, 但对于充填挡墙配筋设计力学模型鲜有研究。本文作者基于双向板塑性铰理论, 建立钢混充填挡墙配筋力学模型, 并对其进行理论分析, 以甘肃金川二矿区某巷道处钢混充填挡墙为例, 分析充填体强度和充填挡墙厚度对充填挡墙配筋的影响规律。研究成果可为其他矿山井下充填挡墙配筋设计提供科学参考。

### 1 充填挡墙配筋力学模型理论分析

分析近些年钢混充填挡墙工程实例<sup>[6-14]</sup>, 可以发现充填挡墙厚度远小于其高度和长度, 且充填挡墙长度与高度的比为 2~3, 参考混凝土结构设计规范并结合工程实际, 可将充填挡墙简化为混凝土双向板模型进行配筋研究。

依据混凝土双向板塑性铰理论分析四边固定矩形充填挡墙的破坏机构, 如图 1 所示。将板上连续出现的塑性铰连在一起而形成的连线称为塑性铰线, 正弯矩引起正塑性铰线, 负弯矩引起负塑性铰线。图 1 中共有 5 条正塑性铰线(4 条斜向塑性铰线相同, 均用 1 表示; 水平塑性铰线用 2 表示)和 4 条负塑性铰线(分别用 3~6 表示)。这些塑性铰线将充填挡墙分为 4 个板块。 $l_{01}$  和  $l_{02}$  分别为板的短跨(充填挡墙高度)和长跨(充填挡墙长度)方向的长度,  $M_{1u}$  为板的跨中极限

承载力,  $M''_{1u}$  和  $M''_{2u}$  分别为板的长跨和短跨方向上支座的极限承载力。

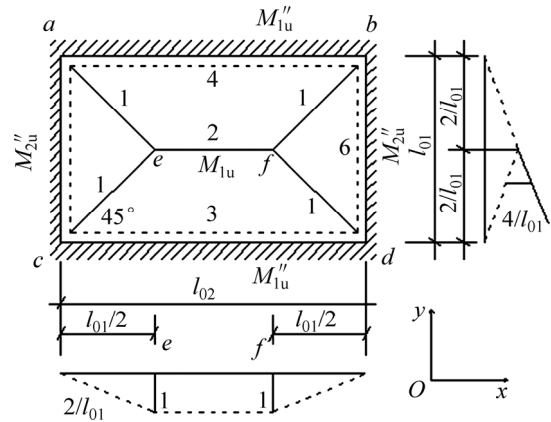


图 1 四边固定充填挡墙力学模型

Fig. 1 Mechanical model of retaining wall with four sides fixed

单位长正塑性铰线的受弯承载力为

$$m_1 = M_{1u} / l_{02}; \quad m_2 = M_{2u} / l_{01} \tag{1}$$

单位长负塑性铰线的受弯承载力为

$$m'_1 = M_{1u} / l_{02}; \quad m''_1 = M''_{1u} / l_{02}; \quad m'_2 = M_{2u} / l_{01}; \quad m''_2 = M''_{2u} / l_{01} \tag{2}$$

为了简化, 近似取斜向塑性铰线与板边的夹角为 45°。设点 e 和 f 发生单位竖向位移, 则各条塑性铰线的转角分量及铰线在 x 和 y 方向的投影长度如下。

对于塑性铰线 1(共 4 条):

$$\theta_{1x} = \theta_{1y} = 2 / l_{01}, \quad l_{1x} = l_{1y} = l_{01} / 2$$

对于塑性铰线 2,

$$\theta_{2x} = 4 / l_{4y}, \quad \theta_{2y} = 0; \quad l_{2x} = l_{02} - l_{01}, \quad l_{2y} = 0$$

对于塑性铰线 3 和 4,

$$\theta_{3x} = \theta_{4x} = 2 / l_{01}, \quad \theta_{3y} = \theta_{4y} = 0; \quad l_{3x} = l_{4x} = l_{02}, \quad l_{3y} = l_{4y} = 0$$

对于塑性铰线 5 和 6,

$$\theta_{5x} = \theta_{6x} = 0, \quad \theta_{5y} = \theta_{6y} = 2 / l_{01}; \quad l_{5x} = l_{6x} = 0, \quad l_{5y} = l_{6y} = l_{01}$$

于是, 内功 U 为

$$U = 4(m_1 l_{1x} \theta_{1x} + m_2 l_{1y} \theta_{1y}) + m_2 l_{2x} \theta_{2x} + m'_1 l_{3x} \theta_{3x} + m'_2 l_{4x} \theta_{4x} + m'_2 l_{5x} \theta_{5x} + m''_2 l_{6x} \theta_{6x} = \frac{2}{l_{02}} (2M_{1u} + 2M_{2u} + M'_{1u} + M''_{1u} + M'_{2u} + M''_{2u}) \tag{3}$$

式中:  $\theta_j$  为塑性铰线的转角分量及铰线在 x 和 y 方向

的投影长度;  $m_i$  为单位长正塑性铰线的受弯承载力, kN;  $m'_i$  和  $m''_i$  为单位长负塑性铰线的受弯承载力, kN。

可求得外功  $W$  为

$$W = p_u \left[ \frac{l_{01}}{2} \times l_{02} - 2 \times \frac{l_{01}}{2} \times \frac{1}{3} \times \frac{l_{01}}{2} \right] = \frac{p_u l_{01}^2}{6} (3l_{02} - l_{01}) \quad (4)$$

最后由虚功方程, 得到

$$2M_{1u} + 2M_{2u} + M'_{1u} + M''_{1u} + M'_{2u} + M''_{2u} = \frac{p_u l_{01}^2}{12} (3l_{02} - l_{01}) \quad (5)$$

式中:  $p_u$  为极限均布荷载, Pa。

各截面总的受弯承载力用相应的弯矩设计值代替。但一个方程无法同时确定多个变量, 为此, 需要补充附加条件。

假定长短跨比  $n = \frac{l_{02}}{l_{01}}$ ,  $\alpha = \frac{m_2}{m_1}$ ,  $\beta = \frac{m'_1}{m_1} = \frac{m''_1}{m_1} =$

$\frac{m'_2}{m_2} = \frac{m''_2}{m_2}$ , 则式(5)可表示为

$$m_{1u} = \frac{p_u l_{01}^2}{8} \frac{(n-1/3)}{(n\alpha + \alpha\beta + n + \alpha)} \quad (6)$$

当设计钢混充填挡墙时, 长短跨比  $n$  为已知, 这时只要选定  $\alpha$  和  $\beta$ , 求出其他的受弯承载力, 考虑到应尽量使按塑性铰线法得出的 2 个方向的截面应力较接近, 宜取  $\alpha = 1/n^2$ ; 同时考虑到节省钢材及配筋方便, 取  $\beta = 2$ 。

当钢混充填挡墙施工时, 是将一定数量一定规格的钢筋提前插入周边围岩中, 然后再喷射混凝土。但在实际工程中, 由于岩石强度较低、施工困难或应满足滤水要求等原因, 导致充填挡墙竖向配筋很难插入顶部围岩中, 因此, 从安全性角度考虑, 可将充填挡墙与四周围岩之间的接触关系假设为挡墙底部及两边简支, 挡墙顶部自由, 则双向板与围岩接触的弯矩  $M'_{1u}$ ,  $M''_{1u}$ ,  $M'_{2u}$  和  $M''_{2u}$  均为 0, 则式(5)可简化为

$$M_{1u} + M_{2u} = \frac{p_u l_{01}^2}{24} (3l_{02} - l_{01}) \quad (7)$$

式(6)可表示为

$$m_{1u} = \frac{p_u l_{01}^2}{8} \frac{(n-1/3)}{(n+\alpha)} \quad (8)$$

将式(8)代入式(1), 可求得纵向弯矩  $M_{1u}$  和横向弯矩  $M_{2u}$ :

$$M_{1u} = m_{1u} l_{02} = \frac{p_u l_{01}^2 l_{02}}{8} \frac{(n-1/3)}{(n+\alpha)} \quad (9)$$

$$M_{2u} = \alpha m_{1u} l_{01} = \frac{\alpha p_u l_{01}^3}{8} \frac{(n-1/3)}{n+\alpha} \quad (10)$$

将所求得的弯矩代入下式, 可求出一定厚度的充填挡墙在充填料浆的作用下, 其充填挡墙纵向和横向的配筋根数:

$$n_i = \frac{A_i}{A_{si}} = \frac{\gamma M_i}{f_y \gamma_s h_0 A_{si}} \quad (11)$$

式中:  $n_i$  为纵向或横向受拉钢筋数量, 根;  $A_i$  为纵向或横向受拉钢筋的总面积,  $m^2$ ;  $A_{si}$  为纵向或横向受拉钢筋单筋截面面积,  $m^2$ ;  $f_y$  为钢筋屈服强度, MPa;  $h_0$  为挡墙所在巷道的有效厚度, m;  $\gamma$  为结构重要性系数, 取 1.1;  $\gamma_s$  为内力臂系数, 取 0.95;  $M_i$  为弯矩设计值, kN·m。

## 2 工程实例

金川二矿区具有矿体厚大、破碎、采矿效率高、对破碎矿体适应性好等特点, 采用空心砖砌筑挡墙, 存在施工效率低、作业周期长的问题, 拟采用喷浆式钢筋混凝土充填挡墙。以金川二矿区某巷道处的钢筋混凝土充填挡墙为例, 采用理论计算确定充填体强度和充填挡墙的厚度, 为分析充填挡墙配筋根数与充填体强度和充填挡墙厚度的定量关系提供参考。

### 2.1 充填挡墙荷载作用理论计算

充填料浆充填矿房一般分层进行, 若一次充填至充填挡墙的顶部, 则充填料浆对充填挡墙作用最大。根据充填料浆形态的不同, 分成静液态二相流、无黏性松散充填体和黏性松散充填体 3 种作用形式, 经分析可知, 当无黏性松散充填体作用于充填挡墙时, 充填料浆对充填挡墙的作用最大<sup>[16-21]</sup>。充填料浆作用于充填挡墙时受力分析如图 2 所示。

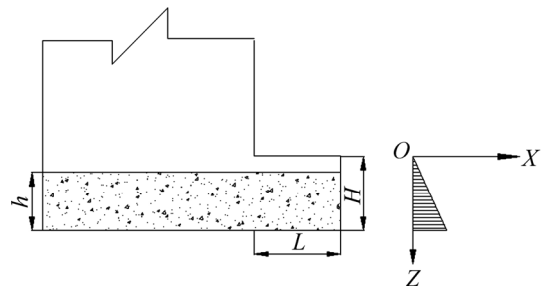


图 2 充填料浆低于充填挡墙高度时受力分析

Fig. 2 Stress analysis of filling slurry below height of filling retaining wall

其计算公式为

$$q = \begin{cases} 0, & 0 \leq z \leq H-h \\ \gamma_1(z-H+h) \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}), & H-h \leq z \leq H \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\gamma_1$  为充填料浆容重,  $\text{kN/m}^3$ ;  $h$  为充填料浆液面高度, 从充填挡墙墙底开始计算,  $\text{m}$ ;  $\varphi$  为充填料浆的内摩擦角,  $(^\circ)$ 。

由式(12)可以看出: 作用于充填挡墙的荷载的大小与充填料浆的物理力学指标密切相关。当  $h=l_{01}$  时, 作用于充填挡墙的极限均布荷载  $p$  为

$$p = \gamma_1 l_{01} \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})$$

金川二矿区某巷道处钢筋混凝土充填挡墙的设计宽度为 5 m, 设计高度为 4 m, 其充填体的物理力学参数为  $\gamma_1=21 \text{ kN/m}^3$ ,  $\varphi=33^\circ$ ,  $h=l_{01}=4 \text{ m}$ , 将物理力学参数代入式(12)中, 可求得其作用于充填挡墙上的极限均布荷载  $p_1=24.76 \text{ kPa}$ 。

### 2.2 充填挡墙厚度理论计算

大量的工程实践表明: 充填挡墙养护 1~2 d 就进行采空区充填, 若按照《采矿设计手册》“井巷工程卷”中防水闸门设计, 会导致计算出的挡墙厚度较小<sup>[2-3]</sup>。因此, 在原有假设条件下, 对充填挡墙厚度计算公式进行以下修正: 1) 将公式中的混凝土设计强度修正为充填挡墙养护时间实测强度; 2) 充填挡墙应具有一定的渗透性, 有利于加快充填体的排水固结, 充填挡墙厚度计算时可不考虑抗渗性。充填挡墙厚度修正后的计算公式为:

$$B = \frac{\left[ (l_{01} + l_{02})^2 + \frac{4fl_{01}l_{02}}{f'_c} \right]^{\frac{1}{2}} - (l_{01} + l_{02})}{4 \tan \theta} \quad (13)$$

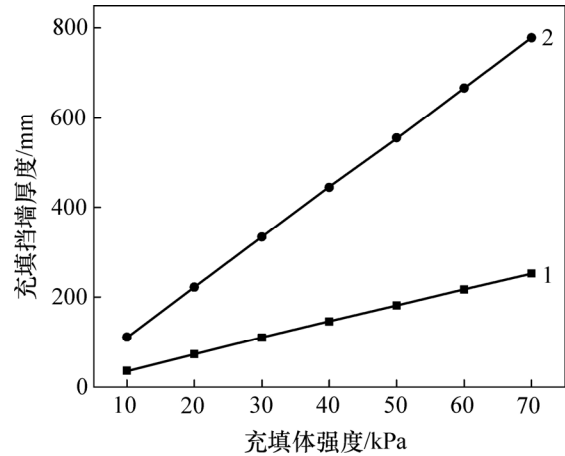
$$B = \frac{fl_{01}l_{02}}{2(l_{01} + l_{02})f'_v} \quad (14)$$

式中:  $B$  为挡墙厚度,  $\text{m}$ ;  $f'_v$  为挡墙混凝土抗剪强度实测值,  $\text{MPa}$ ;  $f'_c$  为挡墙混凝土抗压强度实测值,  $\text{MPa}$ ;  $f$  为充填料浆作用荷载,  $\text{MPa}$ ;  $\theta$  为充填挡墙嵌入巷道的角度,  $(^\circ)$ 。

由式(13)和式(14)可以看出: 充填料浆物理力学参数和充填挡墙尺寸为可变参数, 充填挡墙依据使用的位置选取相应的尺寸, 在使用位置一定的前提下充填挡墙尺寸为常数, 则可以得出在充填挡墙尺寸一定的情况下, 充填挡墙的厚度取决于充填体的物理力学参数。

现场实测 C25 的混凝土 24 h 的抗压强度为 0.6 MPa, 抗剪强度设计值为 0.1 MPa, 代入式(13)和

式(14)分析充填体强度对充填挡墙厚度的影响规律, 并得出利用 2 个不同计算公式计算充填体强度与充填挡墙厚度的关系, 如图 3 所示。



1—式(13)所得结果; 2—式(14)所得结果。

图 3 充填体强度与充填挡墙厚度的关系

Fig. 3 Relationship between strength of filling body's and thickness of filling retaining

由图 3 可以看出: 充填挡墙的厚度随着充填体强度的增大呈线性增长, 式(14)所得结果比式(13)所得结果大, 为了保证充填挡墙的结构安全性, 应选取式(14)计算充填挡墙厚度。

将式(14)简化为

$$B = K_1 f \quad (15)$$

式中:  $K_1 = \frac{l_{01}l_{02}}{2(l_{01} + l_{02})f'_v}$ 。

将作用于充填挡墙上的极限均布荷载  $p_1$  为 24.76 kPa 代入式(15)计算充填挡墙厚度, 计算得  $B=276 \text{ mm}$ , 为了满足施工要求, 确定充填挡墙厚度  $B=300 \text{ mm}$ 。

### 2.3 充填挡墙配筋理论计算

将充填挡墙的极限均布荷载  $p_1 = \gamma_1 l_{01} \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})$  代入式(8), 可求得  $m_1$ :

$$m_1 = \frac{(3n-1)p_1 l_{01}^2}{24(\alpha+n)} \quad (16)$$

将式(16)代入式(9)和式(10)可求得  $M_i$  为:

$$M_1 = \frac{n(3n-1)p_1 l_{01}^2 l_{02}}{24(\alpha+n)} \quad (17)$$

$$M_2 = \frac{\alpha(3n-1)p_1 l_{01}^3}{24(\alpha+n)} \quad (18)$$

将式(17)和式(18)代入式(11)可求得充填挡墙配筋数量  $n_i$  为:

$$n_1 = \frac{A_{01}}{A_{s1}} = \frac{m(3n-1)p_1 l_{01}^2 l_{02}}{24(\alpha+n)(B-C_1)f_y \gamma_s} \quad (19)$$

$$n_2 = \frac{A_{02}}{A_{s2}} = \frac{\gamma\alpha(3n-1)p_1 l_{01}^3}{24(\alpha+n)(B-C_1)f_y \gamma_s} \quad (20)$$

式中： $A_{01}$  为纵向受拉钢筋的总面积， $m^2$ ； $A_{02}$  为横向受拉钢筋的总面积， $m^2$ ； $A_{s1}$  为纵向受拉钢筋单筋截面面积， $m^2$ ； $A_{s2}$  为横向受拉钢筋单筋截面面积， $m^2$ ； $n_1$  为纵向受拉钢筋配筋数，根； $n_2$  为横向受拉钢筋配筋数，根； $C_1$  为混凝土保护层厚度，参考混凝土结构规范一般取 0.02 m。

由式(19)与式(20)可以发现：充填料浆物理力学参数和充填挡墙尺寸为可变参数，在充填挡墙使用位置一定的前提下，充填挡墙配筋数量变化与充填挡墙尺寸的变化无关，可得充填挡墙配筋数量与充填挡墙厚度和充填体强度之间的简化关系式为：

$$n_1 = \frac{K_{1u} p_1}{B - C_1} \quad (21)$$

$$n_2 = \frac{K_{2u} p_1}{B - C_1} \quad (22)$$

式中： $K_{1u} = \frac{m(3n-1)p_1 l_{01}^2 l_{02}}{24(\alpha+n)f_y \gamma_s}$ ； $K_{2u} = \frac{\gamma\alpha(3n-1)l_{01}^3}{24(\alpha+n)f_y \gamma_s}$ 。

工程现场选用 Q235 的钢筋进行施工，钢筋的屈服强度  $f_y=235 \text{ N/mm}^2$ ，C25 混凝土抗压强度  $f_c=11.9 \text{ N/mm}^2$ 。钢混充填挡墙的竖向方向选择  $\phi 16$  钢筋，其单筋截面面积为  $200.96 \text{ mm}^2$ ，横向选取  $\phi 14$  钢筋，其单筋截面面积为  $153.86 \text{ mm}^2$ ，其他参数的取值同前。利用控制变量法(CVM)分析充填料浆作用荷载和充填挡墙厚度对充填挡墙配筋数量的影响规律，当充填挡墙厚度为 0.3 m 时，选取充填体强度分别为 10, 20, 30, 40, 50 和 60 kPa，当充填体强度为 24.8 kPa 时，选取充填挡墙厚度分别为 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 和 0.35 m，得到关系曲线分别如图 4 和图 5 所示。

从图 4 可以看出：在充填挡墙尺寸和充填挡墙厚度一定的前提下，充填挡墙的配筋数量与充填强度呈线性相关。从图 5 可以看出：在充填挡墙尺寸和充填体强度一定的前提下，充填挡墙的配筋数量与充填挡墙厚度呈二项式相关。由图 4 和图 5 均可以看出：由于充填挡墙的长度比充填挡墙的高度大，因而纵向配筋的数量比横向配筋的要多。

将上述参数代入式(19)和式(20)，得纵向配筋面积  $A_{01}$  为  $2645.78 \text{ mm}^2$ ，横向配筋面积  $A_{02}$  为  $1083.71 \text{ mm}^2$ ，充填挡墙竖向方向按照 13 根  $\phi 16$  的钢筋配筋，横向方向按照 7 根  $\phi 14$  的钢筋配筋。

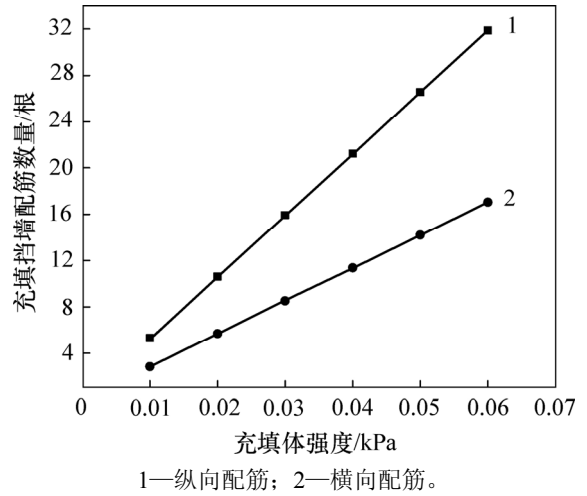


图 4 充填体强度与充填挡墙配筋数量的关系

Fig. 4 Relationship between filling body strength and number of steel wires of filling retaining wall

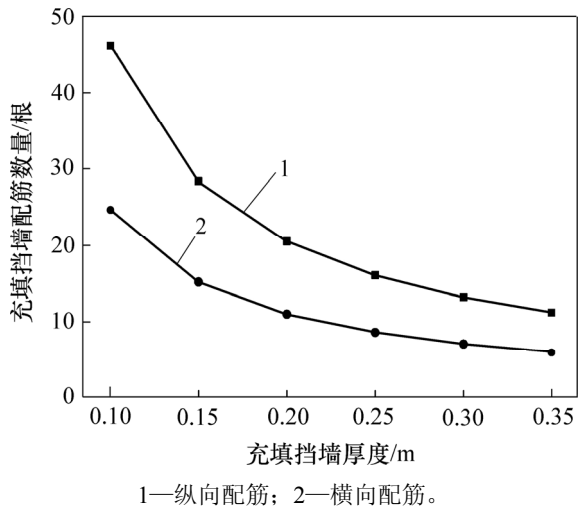


图 5 充填挡墙厚度与充填挡墙配筋数量的关系

Fig. 5 Relationship between thickness of filling retaining wall and number of steel wires of retaining wall

配筋结束后对最小配筋率  $\rho_1$  进行验算：

$$\rho_1 = \frac{A_{01}}{Bl_0}$$

式中： $l_0$  为单位长度，取 1 000 mm； $\rho_1=0.94\%$ 。满足混凝土结构设计规范中  $\rho_{min}>0.2\%$  的要求，表明充填挡墙纵向和横向的配筋合理。

#### 2.4 充填体物理力学参数与充填挡墙配筋数量研究

通过前面对充填挡墙厚度理论和充填挡墙配筋理论的分析，在充填挡墙尺寸一定的前提下，将得到的充填挡墙厚度与充填体强度理论关系式(15)代入式(21)和式(22)，即可得出充填体物理力学参数与充填挡墙配筋数量的关系。

$$n_1 = \frac{K_{1u} p_1}{K_1 p_1 - C_1} \quad (23)$$

$$n_2 = \frac{K_{2u} p_1}{K_1 p_1 - C_1} \quad (24)$$

综上所述, 工程中只需要确定充填挡墙的设计尺寸、充填体的物理力学参数、现场实测混凝土抗压和抗剪强度, 就可按照式(22)和式(23)计算出充填挡墙纵向和横向的配筋数量, 因此, 式(22)和式(23)对于工程实际具有一定的应用意义。

### 3 结论

1) 基于双向板塑性绞线理论, 建立钢混充填挡墙配筋力学模型, 并对其理论分析, 推导得出其充填挡墙配筋数量与充填荷载和充填挡墙厚度之间的关系式。

2) 在充填挡墙尺寸一定的前提下, 充填挡墙的厚度随着充填体强度的增大呈线性增长; 在充填挡墙尺寸和充填体强度一定的前提下, 充填挡墙的配筋数量与充填挡墙的厚度呈二项式相关; 在充填挡墙尺寸和充填挡墙厚度一定的前提下, 充填挡墙的配筋数量与充填体强度呈线性相关。

3) 以金川二矿区某充填挡墙为实例, 分别得出了充填挡墙厚度与充填体强度的理论关系和充填挡墙配筋数量与充填挡墙厚度及充填强度的理论关系, 导出充填体强度与充填挡墙配筋数量的关系式。在工程中, 只需要确定充填挡墙的设计尺寸、充填体的物理力学参数、现场实测混凝土抗压和抗剪强度, 就可利用推导出的公式确定充填挡墙的配筋数量。

#### 参考文献:

- [1] 王丽红, 李夕兵, 赵国彦, 等. 永平铜矿充填挡墙安全设计及工程应用[J]. 矿冶工程, 2013, 12(6): 6-12.  
WANG Lihong, LI Xibing, ZHAO Guoyan, et al. Safety design of backfilled retaining wall and its application in Yongping Copper Mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2013, 12(6): 6-12.
- [2] 汪海萍, 宋卫东, 张兴才, 等. 大冶铁矿浅孔留矿嗣后胶结充填挡墙设计[J]. 有色金属, 2014, 9(5): 14-26.  
WANG Haiping, SONG Weidong, ZHANG Xingcai, et al. Design for retaining wall of short-hole shrinkage subsequent cemented filling method in Daye Iron Mine[J]. Nonferrous Metals, 2014, 9(5): 14-26.
- [3] 袁世伦. 盘区大孔采矿采场全尾砂充填挡墙力学特性研究[J].

- 中国矿山工程, 2011, 8(4): 9-12.
- YUAN Shilun. Study on mechanical property of whole tailing filling retaining wall in panel large hole mining stope[J]. China Mine Engineering, 2011, 8(4): 9-12.
- [4] NORTJÉ A S, MEINTJIES H A C, JOUGHIN W C. Design of hydraulic backfill bulkheads at south deep gold mine[R]. Montreal: Minefill, 2007: 1-11.
- [5] KANOWNA B, OPERATION R. Assessment of 12 hour fibrecrete curing on raleigh paste bulkheads[R]. Victoria: Revell Resources Pty Ltd ATF Revell Family Trust, 2010: 1-13.
- [6] 黄建君. 充填法挡墙强度模型研究及应用[D]. 昆明: 昆明理工大学国土资源工程学院. 2014: 21-28.  
HUANG Jianjun. Research and application of filling method of retaining wall strength mode[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology. College of Land and Resources, 2014: 21-28.
- [7] 郑学敏. 大型采空区井下密闭墙设计[J]. 金属矿山, 2002(12): 56-57.  
ZHENG Xuemin. Large underground goaf seal design[J]. Metal Mine, 2002(12): 56-57.
- [8] YU Guangyun, BAI Yongsheng, SHENG Ping, et al. Mechanical performance of a double-face reinforced retaining wall in an area disturbed by mining[J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(1): 36-39.
- [9] 《建筑结构静力计算手册》编写组. 建筑结构静力计算手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 243-259.  
Editorial structure static calculation handbook. Architecture structure static calculation handbook[M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 1998: 243-259.
- [10] TAN Yunliang, YU Fenghai, NING Jianguo, et al. Design and construction of entry retaining wall along a gob side under hard roof stratum[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015, 77: 115-121.
- [11] ZHOU Baojing, XU Jinhai, ZHAO Maosen, et al. Stability study on naturally filling body in gob-side entry retaining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(3): 423-427.
- [12] HELINSKI M, FAHEY M, FOURIE A. Behavior of cemented paste backfill in two mine stopes: measurements and modeling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(2): 171-182.
- [13] STREUDERS S B. Rock engineering related experiences with the use of backfill on the deepest platinum mine[C]// Minefill 2011, 10th International Symposium on Mining with Backfill. Southern African: Euler De Souza Publications, 2011: 49-64.
- [14] JOUGHIN W C, BESTER W M, DU PLOOY M. Mining methods and backfill at south deep gold mine[C]// Minefill 2011, 10th International Symposium on Mining with Backfill.

- Southern African: Euler De Souza Publications, 2011: 69–78.
- [15] DUTTA S, GRICE T. Mining with backfill at Rajpura Dariba Mine[C]// Minefill 2011, 10th International Symposium on Mining with Backfill. Southern African: Euler De Souza Publications, 2011: 87–98.
- [16] 张葆春, 曹宗权, 赵永和, 等. 尾砂胶结充填挡墙受力分析及工程应用[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(5): 57–60.  
ZHANG Baochun, CAO Zongquan, ZHAO Yonghe, et al. Bulkhead stress analysis in filling cemented tailings and its practical application[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2011, 2(5): 57–60.
- [17] 张海波, 刘芳芳. 充填采矿法充填挡墙合理结构参数研究及应用[J]. 化工矿物与加工, 2014, 43(5): 33–35.  
ZHANG Haibo, LIU Fangfang. Research and application of reasonable structural parameters for filling retaining wall in cut-and-fill mining method[J]. Mineral and Chemical Processing, 2014, 43(5): 33–35.
- [18] 费东, 邓代强, 姚中亮. 哈图金矿采空区充填挡墙封堵实践[J]. 矿业研究与开发, 2013, 33(2): 28–29, 92.  
FEI Dong, DENG Daiqiang, YAO Zhongliang. Practice of bulkhead construction for the filling of mined-out area in Hatu Gold Mine[J]. Mining R&D, 2013, 33(2): 28–29, 92.
- [19] 刘斯宏, 薛向华, 樊科伟, 等. 土工袋柔性挡墙位移模式及土压力研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2267–2273.  
LIU Sihong, XUE Xianghua, FAN Kewei, et al. Earth pressure and deformation mode of a retaining wall constructed with soilbags[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2267–2273.
- [20] 周爱民, 甯瑜琳, 詹进, 等. 高大采空区充填隔离墙固定成形技术研究[J]. 矿业研究与开发, 2014, 34(4): 11–12, 20.  
ZHOU Aimin, NING Yulin, ZHAN Jin, et al. Study on fixing and forming technology of filling partition wall in high and large goaf[J]. Mining Research and Development, 2014, 34(4): 11–12, 20.
- [21] 程海勇, 吴爱祥, 罗淦华, 等. 轻型充填挡墙力学分析与构筑工艺[J]. 金属矿山, 2016, 45(9): 58–61.  
CHENG Haiyong, WU Aixiang, LUO Ganhua, et al. Mechanics analysis and construction process of light-weight retaining wall for backfill[J]. Metal Mine, 2016, 45(9): 58–61.

(编辑 刘锦伟)