

高水压矿山井下防水闸门硐室设计探讨

Discussion on Chamber Design of Underground Waterproof Gate in High Water Pressure Mine

王文忠(中国恩菲工程技术有限公司,北京 100038)

摘要:随着矿山开采深度的不断增加,高水压给矿山生产带来巨大的挑战,高水压防水闸门在工程中将越来越普遍,井下防水闸门作为防止透水事故的重要安全设施,被越来越多的企业重视并应用于生产。本文以7.5 MPa防水闸门硐室设计为例,进行了结构设计,泄水方式选择等问题的探讨,为后续相似工程积累了经验。

关键词:高水压;防水闸门硐室;水沟闸门

中图分类号: TD744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)04-0083-04

Abstract: With the continuous increase of mining depth, high water pressure brings great challenge to mine production, high water pressure waterproofing gate will be more and more popular in engineering, and underground waterproofing gate is an important safety facility to prevent water penetration accident, more and more enterprises pay attention to and apply in production. Taking the chamber design of 7.5 MPa waterproofing gate as an example, the author discusses the problems of structural design and the selection of discharge mode, and accumulates experience for the following similar projects.

Key words: high water pressure; water-proof gate chamber; water ditch gate

1 前言

矿产资源对国民经济发展和社会进步起着重大的推动作用。随着浅部资源逐渐枯竭,国内矿山逐渐向1500 m开采深度迈进。国内诸多在产金属矿山已转入深部开采,如金川镍矿、冬瓜山铜矿、铜绿山铜矿、会泽铅锌矿、三山岛金矿等,同时,诸多新建或拟建矿山直接进入深部开采,如思山岭铁矿、海域金矿、水旺庄金矿、岔路口铝矿、纱岭金矿、高地锰矿等^[1]。矿井水害作为常见的地下工程地质灾害,在深井开采中面临的风险非常突出,严重影响井下作业人员安全以及矿山日常生产。《金属非金属矿山安全规程》规定,水文地质条件复杂的矿山应在关键巷道内设置防水门,防止水泵房、中央变电所和竖井等井下关键设施被淹。防水门压力等级应高于其承受的静压且高于一个中段高度的水压。通往强含水带、积水区、有可能突然大量涌水区域的巷道和专用的截水、放水巷道应设置防水门,防水门压力等级应高于其承受的静压^[2]。深部开采因水压力的增大,对中段巷道防水闸门硐室的承压能力提出了更高的要求。在此背景下,防水闸门硐室承压能力与实际工程条件相匹配、能在突水情况出现时发挥应

有的防范作用对整个矿山生产系统的安全运行来说至关重要。本文在查阅相关文献的基础上,结合工程案例,对防水闸门硐室的设计工作进行探讨研究。

2 工程背景

某矿山防水闸门硐室所处绝对标高接近-1500 m,设计水压达7.5 MPa。该防水闸门硐室位于最低中段,发生水害时为人员紧急逃生、保护水泵房、中央变电所和竖井等井下关键设施以及工程灾后恢复生产均发挥着关键作用。

防水闸门硐室在基建期提前建设,需兼顾基建期及生产期的设备运输及管路布置的需求,结合现场实际情况,防水闸门设计净断面达4.5 m(W)×3.0 m(H)。

大断面、高承压是该防水门的两大特点,对防水闸门硐室的结构设计会产生直接影响。

3 硐室设计

3.1 硐室选址

防水闸门硐室应选择坚硬、稳定、完整致密的岩层中;避开岩溶、断层、节理、裂隙发育的破碎地带;所选位置应不受井下采动影响,符合通风、运输、行人、放水、安全等方面要求;应有利于施工和灾后

[作者简介]

[引用格式] 王文忠. 高水压矿山井下防水闸门硐室设计探讨[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(4): 83-86.

恢复生产,宜设在小断面和直线巷道内;硐室四周应留设保护岩柱^[3]。该防水闸门硐室位于有轨装矿硐室与排水变电所之间的联络道上,工程位置选择相对灵活,根据现场踏勘,可以满足规范要求。

3.2 硐室相关计算

1) 计算公式分析

规范^[4]要求,承受水压大于 1.6 MPa 的硐室应选用倒截锥形结构,具体如图 1 所示。防水闸门硐室的长度和基础嵌入深度按式(1)~(4)计算。

$$L_i = \frac{\ln(r_0 r_f r_d P) - \ln(f_t)}{0.9386} \quad (1)$$

$$E = \frac{-(\pi B + 2B + 4h_3) + \sqrt{(\pi B + 2B + 4h_3)^2 - 4(4 + \pi)(2Bh_3 + 0.25\pi B^2 - 2S_2)}}{2(4 + \pi)} \quad (4)$$

式中: L_i 为闸门墙体应力衰减段计算长度,m; r_0 为结构重要性系数,取 1.1; r_f 为作用的分项系数,取 1.3; r_d 为 1.2~2.0,水压大、硐室净断面大时,取大值,取 1.9; P 为防水闸门硐室设计承受的水压,取 7.5 MPa; f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值, N/mm^2 ; L 为闸门墙体长度,m; L_0 为闸门墙体应力回升段长度,取 1.0~2.0 m,取 2 m; S_2 为防水闸门硐室最大掘进断面积, m^2 ; r_{sd} 为作用不定性系数,取 1.2~2.0,水压大、围岩抗压强度较低者取大值,取 2.0; f_{cc} 为素混凝土的轴心抗压强度设计值,其值由混凝土轴心抗压强度设计值 f_c 乘以系数 0.85 确定,MPa; S 为闸门墙体前、后巷道净断面积, m^2 ; E 为闸门墙体嵌入围岩深度(含砌壁厚),m; B 为闸门墙体前、后巷道净宽,m; h_3 为闸门墙体前、后巷道墙高,m; β 、 γ 为闸门硐室支撑面与巷道中心线夹角,(°); β 值不小于 50°,取 60°~70°; γ 一般取 20°。

以上公式可知,确定 h_3 及 S 的取值,需先确定闸门墙体前、后巷道净断面,即需确定闸门墙体前、后巷道的高度及宽度。

2) 巷道高度的确定

闸门前巷道应满足防水闸门安装要求,防水闸门前应设置两根起重梁,其安装高度应满足:

$$h = h_1 + h_2 + h_3' + h_4 \quad (5)$$

式中: H 为巷道底板至起重梁高度,mm; h_1 为闸门起吊高度,一般为 360~500 mm,取 400 mm; h_2 为闸门高度,此处为门扇高度,取 3 500 mm; h_3' 为起吊设备的最小高度(3 t 葫芦为 710 mm,5 t 葫芦为 1 000 mm),取 1 000 mm; h_4 为门和葫芦、葫芦和梁间隙之和,一般取 200~400 mm,为尽量减少断面高度,取 200 mm。

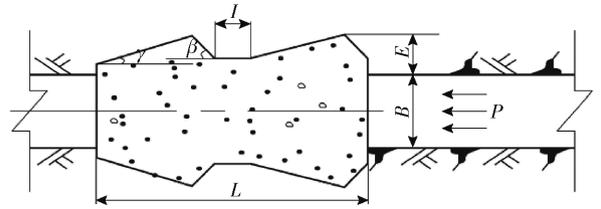


图 1 倒截锥形防水闸门硐室结构形式示意图

$$L = L_i + L_0 \quad (2)$$

$$S_2 = \frac{(r_0 r_f r_d r_{sd} P + f_{cc}) S}{f_{cc}} \quad (3)$$

巷道拱顶至起重梁距离为 200~400 mm。取 400 mm;另外为保证门扇顺利开启,门扇下沿高出巷道底板 200 mm,以上可计算出 $h = 5 700$ mm。

3) 巷道宽度的确定

防水闸门硐室内壁两侧应有保证闸门完全开启的空间,防水闸门完全打开后,门后应留有不小于 200 mm 的间隙。排水管路,风水管路,线缆预埋管等布置在水沟一侧,经优化后的巷道断面宽度 $B = 6 500$ mm。

4) 断面优化

由公式(3)、(4)可知, h_3 及 S 的取值直接影响到 E 的计算结果,对楔形体的工程量产生直接影响,因此巷道断面应在满足使用功能的前提下做到最小。为此,需将相关专业所需的预埋管路进行合理布置。其中电力专业需预留的电缆管数量较多,同时考虑适当多预留预埋管以备不时之需。因设置型钢起吊梁要求硐室高度较高,现场可以在硐室顶板施工起吊锚杆的方式来安装、检修防水闸门,最终为了有效降低硐室高度,取消了型钢起吊梁,改用起吊锚杆。起吊锚杆具有位置、数量灵活,单个抗拉拔力较大(一般可达 5 t),占用空间少,方便门框上部空间预埋管路等优点,可以满足防水闸门安装及后期检修的需要。最终确定断面高度为 5 700 mm,断面如图 2 所示。

5) 混凝土强度等级的确定

混凝土强度等级决定 f_t 、 f_{cc} 的取值;设计过程中分别取 C30~C55 强度等级的混凝土进行计算,得出 L 和 E 值,根据计算结果及预估工程单价计算出不同混凝土强度等级的防水闸门硐室的估价,具体见表 1。

由表 1 数据可知,随混凝土强度等级提高,楔形

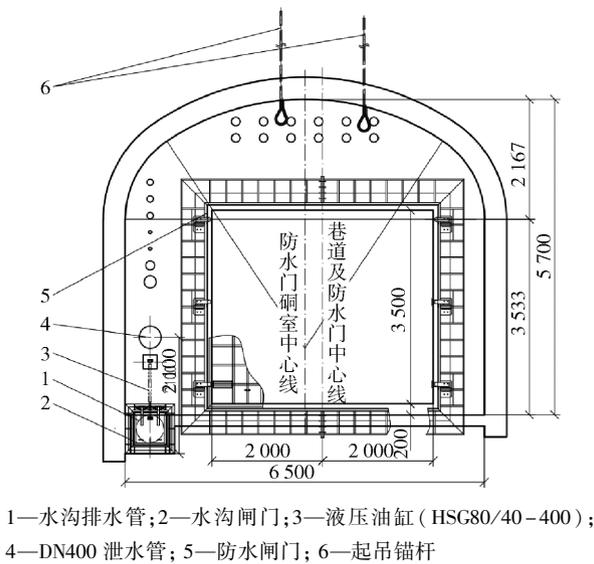


图2 防水门前硐室断面图

体嵌入深度 E 和楔形体长度 L 都将减小,掘进量和混凝土浇筑量也随之减小。考虑到井下混凝土制备、养护条件差,施工环境影响因素多,C55及以上混凝土强度可能难以保证,选择使用C50混凝土。价格相较于C30混凝土可减少23.61万元。

6) 参数计算

由图2可知 $B = 6.5 \text{ m}$, $h_3 = 3.533 \text{ m}$, $S = 34.08 \text{ m}^2$,混凝土强度等级C50, $f_{cc} = 19.64 \text{ MPa}$,代入式(1)~(4)可得

$$L_i = 5.966 \text{ m}, L = L_i + L_0 = 7.966 \text{ m}, \text{取 } L = 8.0 \text{ m};$$

$$S_2 = 104.817 \text{ m}^2, E = 2.089 \text{ m} \text{ 取 } E = 2.1 \text{ m}.$$

根据计算出的 E 值和 L 值、楔形体 α, β 的角度设置要求,可确定楔形体外形尺寸,具体如图3所示。

表1 不同混凝土强度等级的防水闸门硐室估价表

砼等级	f_t/MPa	f_{cc}/MPa	E/m	L/m	掘进量/ m^3	浇筑量/ m^3	掘进单价/ $\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$	砼单价/ $\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$	总价/ 万元
C30	1.43	12.16	3.2	9.0	708.4	401.8	800	430	73.95
C35	1.57	14.20	2.8	8.5	613.1	323.5	800	450	63.61
C40	1.71	16.24	2.5	8.5	572.7	283.2	800	470	59.13
C45	1.80	17.94	2.3	8.0	514.4	241.9	800	490	53.01
C50	1.89	19.64	2.1	8.0	490.4	217.9	800	510	50.34
C55	1.96	21.51	2.0	8.0	478.6	206.1	800	530	49.21

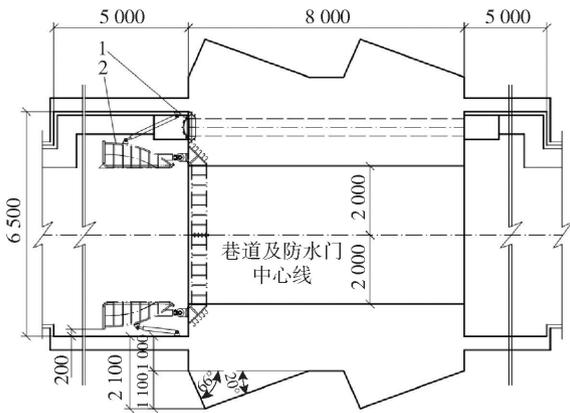


图3 防水闸门硐室平面图

4 防水闸门硐室的泄水方式

防水闸门硐室常用的泄水方式可分为水管泄水,水沟泄水和泄水巷放水三种方式。其中水管泄水最为常见,适用于涌水量不大的矿山。泄水巷放水泄水能力最大,适用于大水矿山,该方式需在防水

闸门硐室附近另开一条泄水巷,在泄水巷内,修筑一道水闸墙,安设几趟大直径放水管路。水沟泄水的泄水能力介于二者之间。结合实际情况,本工程选择水沟泄水的方式。

4.1 预埋泄水管能力

硐室内预埋泄水管的有效过水断面应满足最大涌水量,计算公式见(6)~(10)。

$$R = 0.25D \tag{6}$$

$$y = 2.5\sqrt{n} - 0.13 - 0.75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0.1) \tag{7}$$

$$C = \frac{1}{n}R^y \tag{8}$$

$$V = C\sqrt{R_i} \tag{9}$$

$$Q = VS \tag{10}$$

式中: D 为管路直径,取0.5 m; R 为水力半径,m; n 为管路或水沟的粗糙度,查表可知钢管 $n = 0.012$; C 为流速系数, $C = 62.117$; i 为管路坡度,按照实际水沟坡度取0.003; V 为水流速度, $V = 1.203 \text{ m/s}$; Q 为管路泄水流量, $Q = 0.24 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

中段推断最大涌水量为 $19\ 000 \text{ m}^3/\text{d}$,即

0.22 m³/s。预埋钢管直径为 500 mm, 经计算 $Q > 0.22 \text{ m}^3/\text{s}$, 满足防水闸门开启时巷道最大涌水量的要求。

防水闸门硐室设计须考虑基建期的各种管路系统, 包括通风管、供风、供水管等。在水沟入口处架设常开的水沟闸门, 并另设专门的泄水管和高压闸阀, 作为灾后恢复时打开水沟闸门前泄水之用。

4.2 防水闸门关闭时水沟闸门的开启

当矿井发生水害关闭水沟闸门后, 虽经专门泄水管泄水降压, 要打开水沟闸门也比较困难。该工程水沟闸门由液压油缸提供动力, 在设备正常运行的情况下, 可提供约 60 kN 的拉力。如果油缸所能提供的拉力大于水沟闸门所受的水压力, 则能开启水沟闸门, 反之, 则不能。

1) 动态平衡水位

闸门关闭时 DN400 泄水管的排水能力按照式(11)计算。可假设泄水管泄水过程中矿山涌水速度为最大涌水速度(0.22 m³/s), 泄水管泄水过程中随着水位降低, 泄水速度降低, 最终会与最大涌水速度达成一个动态平衡, 即泄水管泄水速度等于矿山最大涌水速度 0.22 m³/s, 此时防水门硐室外的水位即为动态平衡水位。

$$Q' = \mu A \sqrt{2gH} \text{ m}^3/\text{s} \quad (11)$$

动态平衡水位 H 的计算公式为

$$H = \frac{Q'^2}{2\mu^2 A^2 g} \quad (12)$$

式中: Q' 为排水流量, 取 0.22 m³/s; μ 为流量系数, 一般取 0.6 ~ 0.62, 取 0.62; A 为放水管断面积, DN400 管路 $A = 0.126 \text{ m}^2$; g 为重力加速度取 9.81 m/s²。

计算得 $H = 0.40 \text{ m}$; 即在矿山最大涌水时泄水, 稳定的水头高度为 0.4 m(高出泄水管 0.4 m)。由断面布置图可知, 此时水位高度高出水沟底板 2.5 m, 水沟闸门处的水压为 $P_{\text{底}} = \rho gh = 0.0245 \text{ MPa}$, 水沟门的尺寸为 600 mm(W) × 600 mm(H), 水沟闸门所受力为 $F = PS = 8.8 \text{ kN}$, 远小于油缸能提供的最大拉力 60 kN, 认为水沟闸门此时可打开。

2) 水沟闸门可开启时的最高水位

已知水沟闸门液压油缸可提供约 60 kN 的拉力, 已知水沟闸门尺寸, 可计算出液压油缸能打开的最高水位水压为 0.167 MPa, 此时水位高出水沟闸门底板 $H' = 16.99 \text{ m}$ 。按照公式(11)可计算出此时

DN400 泄水管的流量 $Q' = 1.43 \text{ m}^3/\text{s}$ 。在灾后恢复工作时, 一般无法测得实时水位高度, 可通过测量 DN400 泄水管流量的方法来确定能否打开水沟闸门。即当测得 DN400 泄水管流量 $\leq 1.43 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 可打开水沟闸门, 加快排水速度。

3) 管壁厚度计算:

泄水管外接高压闸阀, 需按照式(13)对管壁厚度进行验算。

$$\delta = 0.5d \left(\sqrt{\frac{R^2 + 0.4P}{R_2 - 1.3P}} - 1 \right) + d_{\Delta} \quad (13)$$

式中: δ 为管壁厚度, cm; d 为放水管内径, 取 40 cm; P 为水压力, 取 7.5 MPa; R_2 为管材许用压力, MPa, 无缝钢管 $R_2 = 80$; d_{Δ} 为附加厚度, 钢管取 0.1 ~ 0.2 cm, 此处取 0.2 cm;

计算得 $\delta = 1.94 \text{ cm}$; 取壁厚 20 mm, 可选用 DN450 × 20 无缝钢管。

5 结论

随着矿山开采深度不断加深, 高水压防水闸门硐室将会越来越常见。高水压矿山防水闸门硐室科学合理的设计为井下安全生产提供了可靠的安全保护。防水门硐室设计包含大量的前期工作, 相关专业之间应共同设计, 做好预留管路布置优化, 形成最终设计文件。本文通过硐室断面设计, 楔形体尺寸选择, 泄水方式的论证等对高水压防水闸门硐室的设计进行了探讨。优化防水闸门前后巷道断面设计, 在条件允许的情况下选择高强度等级混凝土, 减小了楔形体尺寸, 为减少硐室工程量提供了方法思路。水沟闸门的设置可保证生产期间水沟正常排水, 并且在可能发生的灾后恢复工作中加快排水速度, 为灾后恢复工作争取宝贵时间。文中提到的方法、观点可作为经验借鉴, 为以后的相似工程提供参考。

[参考文献]

- [1] 孙扬, 李金哲, 安建英, 等大深度大直径三山岛副井支护研究与创新探讨[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(1): 25-31.
- [2] 中华人民共和国国家标准. 金属非金属矿山安全规程[S]. GB 16423-2020:53.
- [3] 中华人民共和国能源行业标准. 矿用自动控制防水闸门第3部分: 工程设计、施工及验收规范[S]. NB/T 10522.3-2021:8.
- [4] 张荣立, 何国纬, 李铎, 等 采矿工程设计手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003:2502.