

# 竖井井筒排水管路管壁 计算厚度与附加厚度的 计算

魏国昌<sup>1,2</sup>, 刘荣弟<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中冶沈勘秦皇岛工程设计研究总院有限公司, 河北 秦皇岛

<sup>2</sup>河北省绿色智能矿山工程设计技术创新中心, 河北 秦皇岛

<sup>3</sup>唐山开滦勘察设计有限公司, 河北 唐山

收稿日期: 2022年12月4日; 录用日期: 2023年1月4日; 发布日期: 2023年1月11日

## 摘要

为便于按最大剪应力强度理论推导的竖井井筒排水管路壁厚计算公式的应用, 给出了在不同安装形式下管子自重折算系数 $f$ 的计算公式; 对《煤矿井下排水泵站及排水管路设计规范》中关于管壁附加厚度的计算公式进行了分析, 指出了其存在的问题, 提出了新的计算公式, 并通过实例进行了验证; 引入了有效厚度的概念, 提出了对有效厚度进行强度验算的建议。

## 关键词

竖井井筒排水管路, 自重折算系数, 附加厚度, 有效厚度

# Shaft Drainage Pipe Road Tube Wall Thickness and the Thickness of Additional Calculation

Guochang Wei<sup>1,2</sup>, Rongdi Liu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Shen Kan Qinhuangdao General Engineering Design & Research Institute Corporation, MCC, Qinhuangdao Hebei

<sup>2</sup>Hebei Province Green Intelligent Mine Engineering Design Technology Innovation Center, Qinhuangdao Hebei

<sup>3</sup>Tangshan Kailuan Survey and Design Co., Ltd., Tangshan Hebei

Received: Dec. 4<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jan. 4<sup>th</sup>, 2023; published: Jan. 11<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

For convenience of the maximum shear stress strength theory derivation of shaft shaft drainage pipe wall thickness calculation formula application, this paper gives the calculation formulas of the self-weight conversion factor  $f$  of the pipes under different installation forms, and analyzes the calculation formulas of the additional thickness of the pipe wall in the code for the design of underground drainage pump station and drainage pipeline in coal mine, this paper points out the existing problems, puts forward a new calculating formula, which is verified by an example, introduces the concept of effective thickness, and puts forward some suggestions for checking the strength of effective thickness.

## Keywords

Shaft Drainage Pipe, Self-Weight Conversion Factor, Additional Thickness, Effective Thickness

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 自重折算系数 $f$ 的计算

根据竖井井筒排水管路特殊的受力状态, 文章[1]给出了计入管子自重并按最大剪应力强度理论推导的管壁计算厚度的公式, 对于无缝钢管:

$$\delta_j = \frac{0.5PD_w}{[\sigma] - (f-1)P} \quad (1)$$

式中:  $\delta_j$ ——管子的计算厚度, cm;

$P$ ——计算点处最大工作压力, MPa;

$D_w$ ——管子外径, cm;

$[\sigma]$ ——许用应力, MPa;

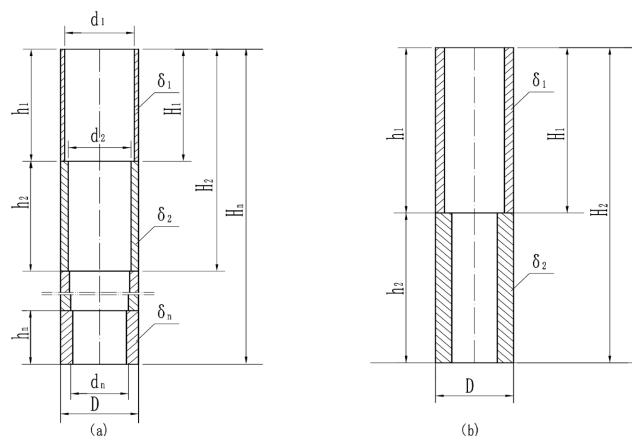
$F$ ——自重折算系数, 其数值为计算点处管壁中由管子自重产生的应力与最大工作压力的比值,  $f$  是无因次量。

对于自重折算系数文章[1]给出了表达式, 为便于使用公式(1), 本文将给出不同安装形式下的详细计算式, 首先做如下假定:

- (1) 排水管出口与竖井井口的高差以及出井口外管路长度可以忽略不计;
- (2) 不计入管路连接件如法兰、套管的质量;
- (3) 忽略两段壁厚不同的管子 in 连接处因壁厚差形成的环形水柱压力;
- (4) 防弯梁只起导向作用, 对管子的轴向位移无约束;
- (5) 中间支撑梁有足够的刚度, 该梁上部的管子质量不传递到梁下段管子。

图 1 是竖井井筒排水管路管子壁厚分级示意图。以(b)为例, 管子由两段不同的壁厚组成, 管子下端的最大工作压力为:

$$p = k\rho_s gH_2 \quad (2)$$



**Figure 1.** Vertical shaft drainage pipe wall thickness classification schematic diagram

**图 1.** 竖井井筒排水管路管子壁厚分级示意图

由管子自重产生的压强:

$$p_g = \frac{A_1 h_1 \rho_g g + A_2 h_2 \rho_g g}{A_2}$$

将上式中管子实体截面积  $A$  用外径  $D$  和壁厚  $\delta$  替代, 化简得:

$$p_g = \frac{\delta_1 h_1 (D + \delta_1) + \delta_2 h_2 (D + \delta_2)}{\delta_2 (D + \delta_2)} \rho_g g$$

对薄壁圆筒,  $D$  远大于  $\delta$ , 可认为  $D + \delta_1 = D + \delta_2$  上式化简为:

$$p_g = \frac{\delta_1 h_1 + \delta_2 h_2}{\delta_2} \rho_g g \quad (3)$$

根据定义, 用式(3)除以式(2), 得第二段的自重折算系数  $f_2$ :

$$f_2 = \frac{\delta_1 h_1 + \delta_2 h_2}{\delta_2 H_2} \frac{\rho_g}{k \rho_s}$$

令  $a = \frac{\rho_g}{k \rho_s}$ , 推广到第  $n$  段, 可得管子的自重折算系数  $f_n$  表达如下:

$$f_n = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i h_i}{\delta_n H_n} a \quad (4)$$

显然当壁厚不分级时  $f = a$ 。

式中:  $\rho_g$ ——管材密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$\rho_s$ ——矿井水密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$K$ ——计算点处最大工作压力与排水垂高的比值;

$\delta_i$ ——第  $i$  段管子壁厚,  $\text{cm}$ ;

$h_i$ ——第  $i$  段管子长度,  $\text{m}$ ;

$\delta_n$ ——第  $n$  段管子壁厚,  $\text{cm}$ ;

$H_n$ ——第  $n$  段管子排水高度,  $\text{m}$ 。

下面表 1 是依据公式(4)推出的几种常见竖井排水管路安装形式中某段管子底端  $f$  的简化式, 考虑到计算厚度是各种壁厚中受力状态最不利的, 故表中公式用计算厚度替代  $\delta$ 。表中只给出三段管子的  $f$  值, 其它安装形式和段数可参照表中公式扩展和派生。实际设计中可先根据样本确定第一段壁厚。若两道支撑梁之间的管子是同一壁厚,  $f$  可由表中公式直接求出; 若该段管子分若干种壁厚, 则应先联立式(1)和表中公式求出  $\delta_j$ , 然后再计算  $f$ 。表中符号的数字下标为管子段数。

**Table 1.** Expression of  $f$  value of each segment under different installation forms  
**表 1.** 不同安装形式下各段  $f$  值表

管子段数 支撑梁设置情况	不设中间支撑梁	仅第一、二段之间设支撑梁	各段之间均设支撑梁
第一段		$f_1 = a$	
第二段	$f_2 = \frac{\delta_{j1}h_1 + \delta_{j2}h_2}{\delta_{j2}H_2}a$	$f_2 = \frac{h_2}{H_2}a$	$f_2 = \frac{h_2}{H_2}a$
第三段	$f_3 = \frac{\delta_{j1}h_1 + \delta_{j2}h_2 + \delta_{j3}h_3}{\delta_{j3}H_3}a$	$f_3 = \frac{\delta_{j2}h_2 + \delta_{j3}h_3}{\delta_{j3}H_3}a$	$f_3 = \frac{h_3}{H_3}a$

## 2. 对目前管壁附加厚度计算公式的质疑和新公式的提出

《煤矿井下排水泵站及排水管路设计规范》[2]、工业金属管道设计规范[3] (以下简称《规范》) 中给出了管壁附加厚度的计算公式, 对于无缝钢管: 附加厚度  $c$  与计算厚度  $\delta'$  的关系如下:

$$c = 0.15(\delta' + 1) \quad (5)$$

计入附加厚度后的计算厚度  $\delta$  按下式计算:

$$\delta = \delta' + c \quad (6)$$

对于附加厚度的包含项和取值在《规范》的条文说明中给出, 附加厚度包括制造负偏差和腐蚀厚度, 无缝钢管制造负偏差最大为 15%; 年腐蚀量按 0.1 mm 计, 管路寿命按 15a 计, 则腐蚀厚度为 15 mm。以下的讨论均是依据这些规定进行的。对照公式(5)和条文说明分析, 不难发现计算公式与条文说明不符, 两者之间相互矛盾。本文就这一问题进行分析。

众所周知, 管壁的减薄过程是先形成制造负偏差而后产生腐蚀[4], 所以设计中遵循的准则应是: 所选管壁厚度(含计入附加厚度后的计算厚度  $\delta$ )即使已形成最大制造负偏差 15%, 且随时间推移腐蚀厚度也达到 0.15 cm 时, 此时管壁的剩余厚度也应大于或至少等于计算厚度  $\delta'$ , 用式子表达则为:

$$(1 - 15\%)\delta - 0.15 = \delta'$$

$$\text{去括号 } \delta - 0.15\delta - 0.15 = \delta'$$

$$\text{整理后得 } \delta - \delta' = 0.15\delta + 0.15 = 0.15(\delta + 1)$$

$$\therefore c = 0.15(\delta + 1) \quad (7)$$

由此可见, 附加厚度计算公式中应是包含附加厚度的计算厚度  $\delta$ , 而不应是计算厚度  $\delta'$ , 这是公式(5)和(7)的不同。由于  $\delta' < \delta$ , 所以由公式(5)较由公式(7)所得附加厚度要小, 进而导致管壁厚度计算结果偏小, 这在后面的计算中有所体现。

提出公式(7)只是为说明问题, 下面参照公式(5)的形式来推导附加厚度  $c$  的正确公式, 由条文说明可知  $0.85\delta - 0.15 = \delta'$

将(6)代入上式得:  $0.85(\delta' + c) - 0.15 = \delta'$

化简整理, 得:  $0.85c = 0.15(\delta' + 1)$

即:

$$c = 0.15/0.85(\delta' + 1) \quad (8a)$$

取小数点后两位, 得

$$c = 0.18(\delta' + 1) \quad (8b)$$

不难看出公式(8)才是与《规范》条文说明相符的附加厚度计算公式。

为验证《规范》给出的计算附加厚度计算公式和本文提出的公式正确与否, 下面用(5)、(8b)两个公式分别计算  $\delta$ 。设已有计算结果  $\delta' = 0.6 \text{ cm}$ ,

按公式(5)有:  $c = 0.15(0.6 + 1) = 0.24 \text{ cm}$

则:  $\delta = 0.6 + 0.24 = 0.84 \text{ cm}$

此时管子可能达到的剩余厚度为:

$$\delta' = 0.85 \times 0.84 - 0.15 = 0.564 < 0.6 \text{ cm}$$

即使将管子壁厚向上圆整到  $0.85 \text{ cm}$ 。此时管子可能达到的剩余厚度也只达到:

$$\delta' = 0.85 \times 0.85 - 0.15 = 0.5725 < 0.6 \text{ cm}$$

可见按公式(5)的计算结果, 可能达到的剩余厚度小于要求的计算厚度。

若按公式(8b)计算:

因  $\delta' = 0.6 \text{ cm}$ , 则:  $c = 0.18(0.6 + 1) = 0.288$

那么:  $\delta = 0.6 + 0.288 = 0.888$

此时管子可能达到的剩余厚度为:  $\delta' = 0.85 \times 0.888 - 0.15 = 0.6048 \text{ mm}$

可见按公式(8b)的计算结果, 可能达到的剩余厚度定能大于要求的计算厚度[5]。通过实例的计算结果印证了公式(5)与《规范》条文说明真实意图不符, 且偏于危险。为保证排水系统安全可靠地运行, 建议对本文提出的管壁附加厚度问题给以足够重视, 对于《规范》给出的公式(5)应当进行修改, 或以本文提出的公式(8)替代之。

### 3. 管壁强度的计算和验算

由于管壁厚度的计算过程进行了一些简化, 同时厚度的计算不仅要考虑到管子本身的自重, 还要考虑到管子与支撑梁之间的相互作用产生的附加轴向应力, 附加轴向应力与管子自重的叠加效应可能会恶化管壁的受力状态, 因此有必要对管壁强度进行验算, 搞清楚各段管壁强度储备。

为概念清晰, 参照文献[6] [7] [8], 引入如下概念: 按公式(1)计算出的数值称为计算厚度  $\delta_j$ ; 计算厚度加上附加厚度称为设计厚度  $\delta_s$ ; 将设计厚度向上圆整至产品标准规格的厚度称为名义厚度  $\delta_m$ ; 名义厚度减去附加厚度称为有效厚度  $\delta_x$ 。附加厚度为 15% 的壁厚制造负偏差与腐蚀裕量  $0.15 \text{ cm}$  之和。

某算例, 排水管为无缝钢管, 直径为  $\phi 273 \text{ mm}$ , 许用应力为  $100 \text{ MPa}$ , 排水垂高  $450 \text{ m}$ 。预定分为 3 段, 在每段之间设中间支撑梁, 底部设主支撑梁。按公式(1)和表 1 中公式计算管子壁厚, 再分别计算各管段的折算应力, 计算和验算过程及结果见表 2。本算例有三个特点:

- 1) 前后两个附加厚度含义相同数值不同;
- 2) 上面第一段管子不是先确定安装高度, 而是先选择名义厚度, 可充分利用管材的承载力;
- 3) 强度验算按管子的有效厚度进行, 内径按可能出现的最大直径, 这样比较接近实际情况[9]。

**Table 2.** Calculation table of pipe sectional wall thickness  
**表 2.** 管路分段壁厚计算表

序号	项目	公式或依据	第 1 段	第 2 段	第 3 段
1	确定 $k$ 值	$k = 1.1$		1.1	
2	计算 $a$ 值	$a = \rho_g/k\rho_s$		7.136	
3	确定第一段名义厚度 $\delta_m$ (cm)	按产品样本自定	0.65		
4	计算第一段有效厚度 $\delta_x$ (cm)	$\delta_x = 0.85\delta_m - 0.15$	0.40		
5	计算第一段计算压力 $p$ (MPa)	按公式(1)反推	2.48		
6	计算第一段排水高度 $H$ (m)	$H = 100P/k$	225		
7	确定安装高度 $h$	自定	150	150	150
8	计算压力 $p$ (MPa)	$P = kH/100$	1.65	3.30	4.95
9	计算厚度 $\delta_j$ (cm)	按公式(1)与表 1 联立		0.49	0.77
10	设计厚度 $\delta_s$ (cm)	$\delta_s = (\delta_j + 0.15)/0.85$		0.75	1.08
11	名义厚度 $\delta_m$ (cm)	按产品样本选		0.80	1.1
12	有效厚度 $\delta_x$ (cm)	$\delta_x = 0.85\delta_m - 0.15$		0.53	0.79
15	重力折算系数 $f$	按表 1	7.136	3.568	2.355
16	管子内径	$d = D - 2(\delta_x + 0.15)$	26.2	25.9	25.4
17	内压周向应力 $\sigma_{zx}$ (MPa)	$\sigma_{zx} = pd/2\delta_x$	54.0	80.8	79.6
18	自重轴向应力 $\sigma_{zh}$ (MPa)	$\sigma_{zh} = -fp$	-11.8	-11.8	-11.7
19	折算应力 $\sigma_z$ (MPa)	$\sigma_z = \sigma_{zx} - \sigma_{zh}$	65.8	92.6	91.3
20	与许用应力相比较		<100	<100	<100

#### 4. 结论

- 1) 计算壁厚时位于两支撑梁之间的管子只需计入本段管子自重, 不需考虑上面支撑梁传来的压力。
- 2) 管壁厚度的计算只计入了其自重轴向应力且进行了简化, 考虑到支撑梁的弹性变形产生的附加轴向应力与自重轴向应力的叠加效应, 建议对管壁强度进行验算[10]。
- 3) 通过上述分析以及计算实例, 可以证实《规范》给出的公式(5)是有待改进的, 按式(5)计算结果是管壁偏薄, 可能会带来安全隐患。
- 4) 通过对管道壁厚计算和分析, 在工程设计及建设过程中应按本文提出的公式进行校核。

#### 参考文献

- [1] 魏国昌, 刘荣弟. 矿井排水管路壁厚计算方法的修正[J]. 矿山机械, 2020, 48(7): 64-67.
- [2] 张晓四, 徐培镠, 邢国仓, 等. GB 50451-2008 煤矿井下排水泵站及排水管路设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [3] 郑茂鼎, 翁艳珠, 赵勇, 等. GB 50316-2000 工业金属管道设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2000.
- [4] 王欣. 市政排水管道运行维护及管理策略[J]. 住宅与房地产, 2019(36): 136.
- [5] 苏晓鹏. 工业给水排水管道布置施工技术[J]. 化工管理, 2018(25): 158-159.
- [6] 郭亮. 工业给水排水管道布置设计及施工技术[J]. 云南化工, 2018, 45(2): 114.
- [7] 张鹏, 李浩宇, 李永密. 竖井排水管道壁厚计算探讨[J]. 中国矿山工程, 2015, 44(5): 62-65.

- [8] 安晓宁. 垂直敷设管路壁厚计算公式的推导与讨论[J]. 武警工程学院学报, 1999, 15(2): 23-26.
- [9] 王致祥, 等. 管道应力分析与计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [10] 刘荣弟. 立井井筒排水管路管壁厚度计算公式探讨[J]. 煤炭工程, 2011(8): 21-23.