



管道及储罐强度设计

主讲:彭俊岭



课程主要内容及参照资料

一、主要内容：

本课程系统简介了立式钢油罐强度和稳定计算的理论和设计措施，以及地上管道、地下管道、海底管道的构造知识和强度设计措施。

二、教材及参照资料：

教材：帅健 于桂杰《管道及储罐强度设计》石油工业出版社2023，6

参照资料：

1、潘家华等《油罐及管道强度设计》石油工业出版社2023，8

2、GB50341—2023《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》

3、化工设备委员会《球罐和大型储罐设计》2023，6

4、期刊：油气储运、石油化工设备技术、中国油脂、天然气与石油、石油规划设计、石油工程建设、炼油技术与工程、石油工程建设

5、API650美国石油学会原则

6、BS2654英国油罐规范

7、JIS B8501日本工业原则



考核成绩评估

- 一、总成绩=考试成绩（90%）+平时成绩（10%）
- 二、考试形式：闭卷
- 三、试题类型：
 - 1、填空题（1*15=15分）
 - 2、选择题（2*20=40分）
 - 3、论述题（7*3=21分）
 - 4、计算题（12*2=24分）

总复习



教材目录

- 第一章 地下管道
- 第二章 地上管道
- 第三章 海底管道
- 第四章 管道的曲屈分析
- 第五章 管道抗震设计计算
- 第六章 含缺陷管道的剩余强度评价
- 第七章 立式储罐的基本尺寸和壁厚设计
- 第八章 立式油罐固定顶的设计
- 第九章 浮顶的设计计算
- 第十章 罐底和基础设计
- 第十一章 立式钢油罐的抗风设计
- 第十二章 立式钢油罐的抗震设计



第一章 地下管道

- 第一节 概述
- 第二节 地下管道的强度计算
- 第三节 曲管的强度和柔性计算
- 第四节 三通强度计算
- 第五节 地下管道稳定性分析
- 第六节 地下曲管道热胀弯矩和位移计算
- 第七节 固定支墩的设计计算
- 第八节 地下管道的抗震计算



第一节 概述

长距离油气管道和矿场集输管道一般都敷设在地下（占总长度的**98%**左右），油库管道有时也采用地下敷设。当经过沼泽、高地下水位和重盐碱土地域时，可采用土堤敷设。

特点：不影响交通，环境美观，施工简朴，节省投资，但不易检测、维修。

构造和材料：无缝管；有缝管（直缝管，螺旋管）。**Q235AF, 16Mn**

管道的埋深要求：管道的埋深要考虑农田耕作深度、地面负荷对管道强度及稳定性的要求、热油管道对土壤保温要求、土壤对管道的约束、管道防腐等原因综合考虑后决定。一般要求为：管顶覆土厚度**1-1.2m**，且不应不大于**0.6-0.8m**和管直径**D**；穿越铁路和公路时管道顶部距轨底应不大于**1.3m**，距公路路面应不大于**1m**；热油管道埋地越深，管道热损失越小，一般情况下管顶埋深取**1.2m**。

施工作业：挖掘管沟；焊接管路；试压；绝源；下沟；管沟回填



第一节 概述

管沟底宽度要求：当管沟深度不大于等于3米时，管沟底宽度**b**为：

$$b = D_g + K \quad \text{式中：} K \text{-----沟底加宽系数， [1]P284表11-1}$$

当管沟深度不小于3米且不小于5米时，管沟底宽度**b**按上式求得值再加宽0.2米。

管沟的边坡要求：根据土壤类别和土壤的物理力学性能拟定。 [1]P285表11-2

强度试验要求：管道在沟上或沟下焊接组装后，应进行分段试压。干线试压管段长度10-15公里，自然高差不超出30米，以1.25倍的管道工作压力作为强度试压压力。当管道最大操作压力不小于8kgf/cm²时，应以水作为试压介质，当管道最大操作压力不小于8kgf/cm²时，允许采用空气或其他气体作为试压介质。

分段接通焊接焊缝的检验：进行X射线摄影或超声波检测。

敷设工艺：管道下沟之前，应进行绝缘层的检验；管道下沟之时，应很好地与沟底相接触，管底与沟底之间不应存在间隙，一般在沟底回填细砂或软土；管道下沟之后应及时覆盖20cm左右的细土，以免热胀变形和大量土方回填时砸坏绝缘层；回填后的沟顶应形成30-40cm高的土堆，以防积水。



第二节 地下管道强度计算

一、载荷和作用力：永久载荷；可变载荷；偶尔载荷

1、永久载荷：

输送介质的内压力；

钢管及其附件、绝缘层、保温层、构造附件的自重；

输送介质的重量；

土壤的压力；

静水压力和水浮力；

温度应力以及静止流体因为受热膨胀而增长的力；

因为连接构建相对位移而产生的作用力。



第二节 地下管道强度计算

2、可变载荷：

试运营时的水重量；

附在管道上的冰雪载荷；

因为内部高落差或风、波浪、水流等外部原因产生的冲击力；

车辆载荷及行人；

清管载荷；

检修载荷。



第二节 地下管道强度计算

3、偶尔载荷

地震载荷；

振动和共振引起的载荷；

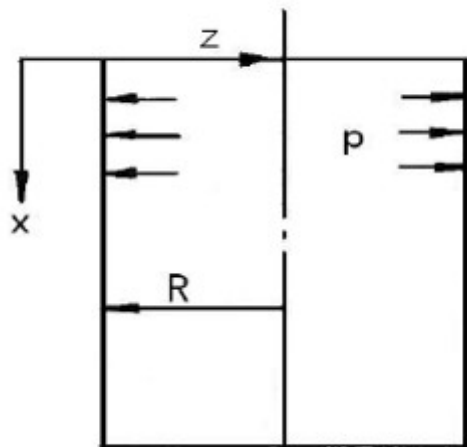
冻土或膨胀土中的膨胀压力；

沙漠中沙丘移动的影响；

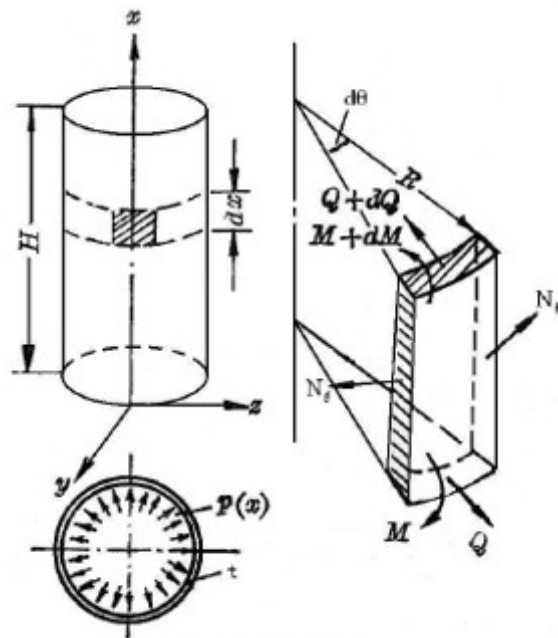
地基沉降附加在管道上的载荷。

第二节 地下管道强度计算

二、截面应力：受内压作用的圆柱壳内应力有环向应力和轴向应力



受内压作用的圆柱壳



罐壁受力关系图

环向应力：
$$\sigma_2 = \frac{P \cdot R}{t}$$

轴向应力：
$$\sigma_1 = \frac{P \cdot R}{2t}$$



第二节 地下管道强度计算

三、许用应力与管道壁厚设计

管材许用应力为： $[\sigma] = K \cdot \eta \cdot \sigma_s$

K ：强度设计系数。P7，表1-3

η ：焊缝系数，无缝管 $\eta=1$ ，直缝管 $\eta=0.8$ ，双面焊螺旋管 $\eta=0.9$ ，单面焊螺旋管 $\eta=0.7$

σ_s ：管材的屈服强度，P5，表1-1

第二节 地下管道强度计算

根据管道的环向应力计算壁厚，由薄壳应力公式得出：

1、液体管道直管段计算壁厚：

$$t_0 = \frac{P \cdot D}{2[\sigma]}$$

式中：P-----管道的工作压力

D-----管道的外直径

[σ]-----管材许用应力，

2、气体管道直管段计算壁厚：

$$t_0 = \frac{P \cdot D}{2[\sigma] \cdot t}$$

式中：t-----温度折减系数，当温度低于120度时，取t=1



第二节 地下管道强度计算

3、实际壁厚为： $t = t_0 + C$ 其值向上圆整至公称壁厚。

式中： C -----壁厚附加量，即腐蚀裕量，由输送介质的腐蚀性性能取**0-1mm**

第二节 地下管道强度计算

地下管道的壁厚一般按环向应力设计，与地上管道的壁厚设计措施相同。再用轴向应力或环向应力与轴向应力的合成应力进行强度校核。

一、管道所受轴向应力由不同情况拟定：

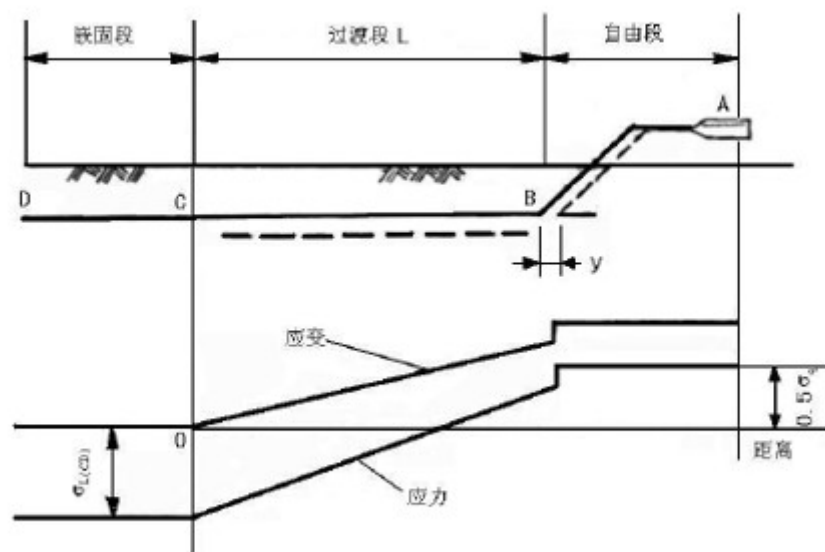
1、直线埋土管段：完全嵌固段

$$\sigma_1 = \nu \frac{PD}{2\delta} - \alpha E \Delta T$$

2、接近出土处的管截面：自由段

$$\sigma_1 = \frac{PD_i}{4\delta}$$

3、过渡管段：与自由端相距一段距离的埋土管段，管道所受轴向应力随土壤对管道的约束程度的不同而逐渐变化，介于1、2情况之间。



第二节 地下管道强度计算

4、埋土弹性敷设弯曲管段：完全嵌固 $\sigma_1 = \nu \frac{PD_i}{2\delta} - \alpha E \Delta T \pm \frac{ED}{2\rho}$

式中弯曲应力 $\frac{ED}{2\rho}$ 对与管道外侧为拉应力，取+号，管道内侧为压应力，

取-号。弯曲应力公式推导见 P16

二、强度校核：一般管道： $\sigma_1 \leq \sigma_s$

管道节点处或接近主要建筑物处： $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \leq \sigma_s$



第三节 曲管的强度和柔性计算

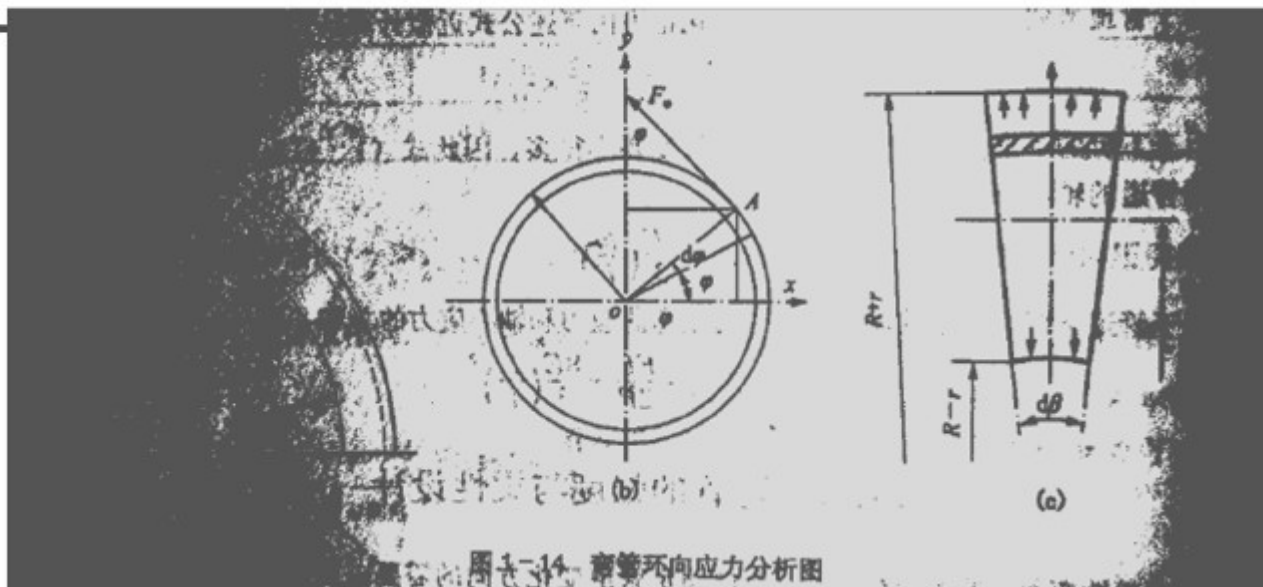
当管道敷设方向发生变化时，可采用弹性敷设或具有一定曲率半径的弯管。

弹性敷设：利用管道在外力或自重作用下产生弹性变形来变化管道的水平走向或高程的变化。最小弯曲半径满足 $\min R = \frac{E \cdot D}{2[\sigma]}$

弯管制作方式有直管冷、热弯，和由扇形短管焊接的虾米弯头。

一、曲管在内压作用下的应力计算：在内压作用下，直管的环向应力沿圆周是均匀分布的，而曲管内侧环向应力最大，外侧最小，中心线处与直管环向应力相等。

第三节 曲管的强度和柔性计算



在x轴到任意夹角的A处截取一小段管壁的面积为:

$$A_\phi = \delta (R + r \sin \phi) d\beta$$

该截面上的环向内力为: $F_\phi = A_\phi \sigma_2 = \sigma_2 \cdot \delta (R + r \sin \phi) d\beta$

在内压P作用下, 作用于微段上的力为: $p \cdot r \cdot d\phi (R + r \sin \phi) d\beta$

第三节 曲管的强度和柔性计算

二力在X轴方向平衡得：

$$\sigma_2 \cdot \delta (R + r \sin \varphi) d\beta \cdot \sin \varphi = \int_{\varphi_0} p \cdot r (R + r \sin \varphi) d\beta \cos \varphi d\varphi$$

整顿得曲管在内压作用下的环向应力：
$$\sigma_2 = \frac{P \cdot r}{t} \cdot \frac{2R + r \sin \varphi}{2(R + r \sin \varphi)}$$

中心线处 $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 180^\circ$

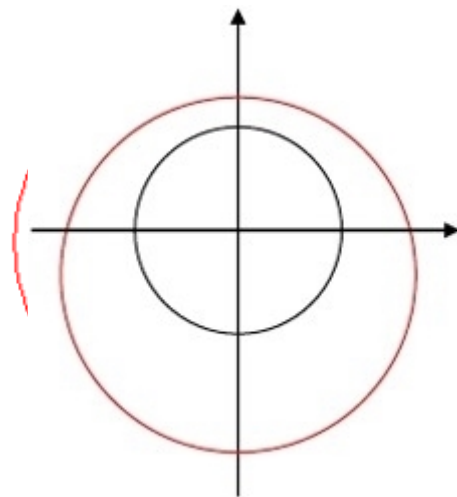
$$\sigma_2 = \frac{P \cdot r}{t} = \frac{P \cdot D}{2t}$$

曲管内侧 $\varphi = 270^\circ$

$$\sigma_2 = \frac{P \cdot r}{t} \cdot \frac{2R - r}{2(R - r)}$$

曲管外侧 $\varphi = 90^\circ$

$$\sigma_2 = \frac{P \cdot r}{t} \cdot \frac{2R + r}{2(R + r)}$$



第三节 曲管的强度和柔性计算

$$\begin{aligned}
 & \frac{2 - rR}{rRm} = \frac{2 \left(\frac{R}{r}\right)^{-1}}{2 \left(\frac{R}{r}\right)^{-1}} \quad \text{增强系数} = m \quad \text{缩减系数} \quad \frac{2 + rR}{rRm} = \frac{2 \left(\frac{R}{r}\right)^{+1}}{2 \left(\frac{R}{r}\right)^{+1}}
 \end{aligned}$$

增强系数是曲管曲率半径和曲管管子半径之比的函数。计算成果列表如下：

R/r	m ₁	m ₂
2	1.5	0.83
3	1.25	0.88
4	1.17	0.90
6	1.10	0.93
8	1.07	0.94
10	1.06	0.95
12	1.05	0.96

R/r比值越大，增强系数越小。当R=8 r时，曲管内侧环向应力比直管仅大7%，再增大曲管曲率半径时，增强系数减小量已不明显。

第三节 曲管的强度和柔性计算

由一种扇形短管构成的虾米弯头强度为同径同壁厚圆管弯头强度的**50%**，由两个扇形短管构成的虾米弯头强度为同径同壁厚圆管弯头强度的**70%**，由三个以上的扇形短管构成的虾米弯头强度为同径同壁厚圆管弯头强度的**90%**

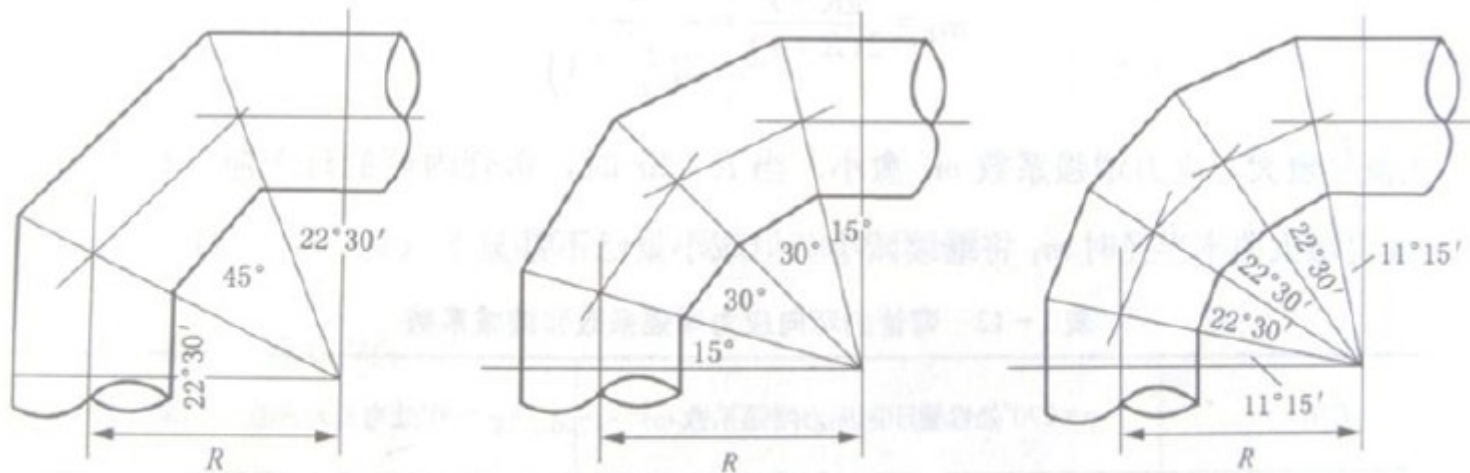


图 1-17 焊接弯头



第三节 曲管的强度和柔性计算

曲管在内压作用下的轴向应力： $\sigma_1 = \frac{P \cdot r}{2t} = \frac{P \cdot D}{4t}$

推导过程见P21。可见，曲管在内压作用下的轴向应力与直管相等。

曲管的壁厚一般按最大环向应力设计，所以它的壁厚比直管段要厚些。

$$t = \frac{m_1 \cdot P \cdot D}{2[\sigma]} + C$$



第三节 曲管的强度和柔性计算

二、曲管的柔性计算：曲管因为制造和热胀时受到纵向弯矩作用，在管子截面上出现扁率（椭圆形），所以截面抗弯刚度降低。

减刚系数
$$K = \frac{1 + 12\lambda_2}{10 + 12\lambda_2}$$

式中： λ ----- 曲管特征系数，
$$\lambda = \frac{t \cdot R}{r^2}$$

第三节 曲管的强度和柔性计算

三、曲管的强度校核：曲管因为热胀时受到纵向弯矩作用，环向应力出现增强问题。所以应校核由内压产生的环向应力和由纵向弯矩引起的环向应力之和是否在允许范围内，要求满足下式：

$$\frac{m_1 \cdot p \cdot D}{2t} + \frac{1}{3} \sigma_{q \max} \leq \sigma_s$$

式中： $\sigma_{q \max}$ -----热胀时受到纵向弯矩引起的最大环向应力

若不满足要求时，可增大曲管曲率半径R或设法减小作用于曲管上的弯矩（改进补偿器、增大管路系统的柔性）。



第四节 三通强度计算

三通用于管线分支，其构造形式有预制三通和割孔焊接三通。

一、预制三通：一般采用增长三通壁厚的措施来确保强度。

$$t = \frac{t_T}{\eta_B}$$

t_T $\Delta\Delta$ 完整干管的壁厚

η_B $\Delta\Delta$ 爆破压力折减系数，它是三通的爆破压力与干管的爆破压力之比。与管径、壁厚、管径比、径厚比有关。随径厚比增大而减小，支管壁厚增大而增大，支管管径增大而减小。

第四节 三通强度计算

二、割孔焊制三通：采用等截面积补强的方法。

$$A_1 + A_2 + A_3 \geq A_R$$

式中： A_1 -----在补强区内，主管富裕壁厚

形成的面积。 $A_1 = d(\delta_H - \delta_h)$

A_2 -----在补强区内，支管富裕壁厚

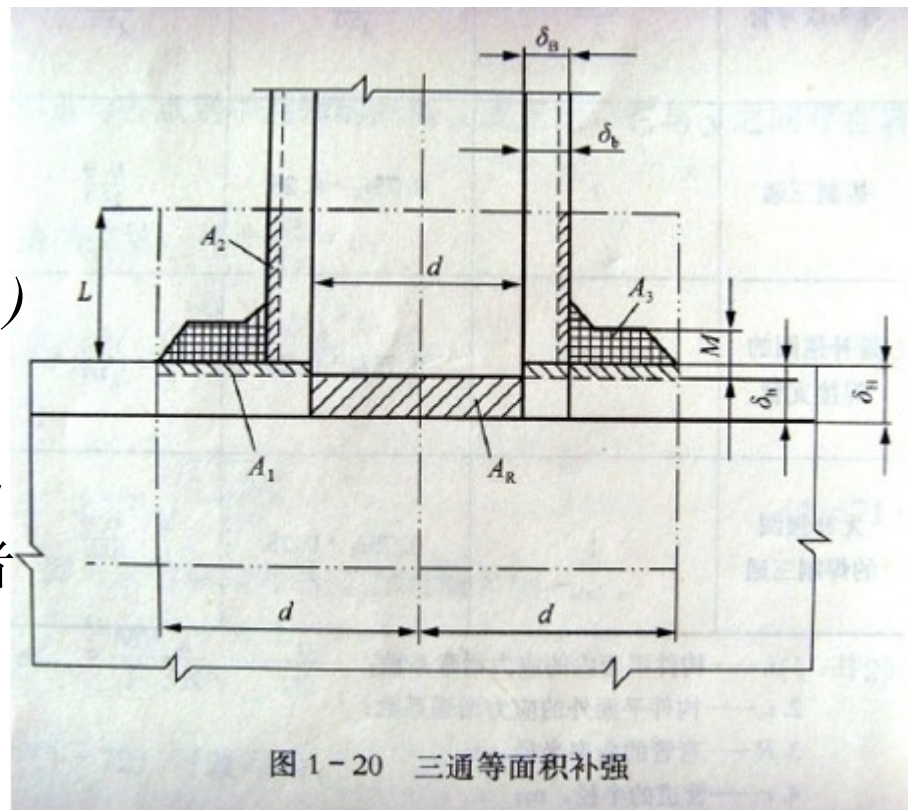
形成的面积。 $A_2 = 2(\delta_B - \delta_b)L$

$L = 2.5\delta_H$ 或 $L = 2.5\delta_B + M$ 的值小者

A_3 -----补强元件的面积。

A_R -----主管开孔面积。 $A_R = d\delta_h$

例题： P27例1-4



第四节 三通强度计算

P27例1-4例题：一支管直径为0.219m壁厚8.2mm接在直径0.400m壁厚10mm主管上。支管材料的屈服极限 $\sigma_s = 241\text{MPa}$ ，主管材料的屈服极限 $\sigma_s = 317\text{MPa}$ 。该管线的工作压力为10MPa，工作温度52℃，运营地域为一级地域。试设计补强圈的厚度。

解：强度设计系数查表得：K=0.72

支管的计算壁厚：

$$t_{0b} = \frac{P \cdot D}{2K\sigma_s} = \frac{10 \times 0.219 \times 10^3}{2 \times 0.72 \times 241} = 6.3\text{mm}$$

主管的计算壁厚：

$$t_{0h} = \frac{P \cdot D}{2K\sigma_s} = \frac{10 \times 0.4 \times 10^3}{2 \times 0.72 \times 317} = 8.8\text{mm}$$



第四节 三通强度计算

需要补强的面积：

$$A_R = d \cdot t_{oh} = (219 - 2 \times 8.2) \times 8.8 = 1786.4 \text{mm}^2$$

主管富裕壁厚形成的面积：

$$A_I = (t_H - t_{oh}) \cdot d = (10 - 8.8) \times 203 = 243.6 \text{mm}^2$$

支管富裕壁厚形成的面积：

$$A_2 = 2(t_B - t_{ob}) \cdot L = 2 \times (8.2 - 6.3) \times 25 = 95 \text{mm}^2$$

式中： $L = 2.5t_H$ 或 $L = 2.5t_B + M$ 的值小者

暂取： $L = 2.5t_H = 2.5 \times 10 = 25 \text{mm}$



第四节 三通强度计算

补强元件的面积:

$$A_3 = A_R - (A_1 + A_2) = 1786.4 - (243.6 + 95) = 1447.8 \text{mm}^2$$

$$\frac{d}{2}$$

补强元件的厚度:

$$M = \frac{A_3}{d - 2t_B} = \frac{1447.8}{203 - 2 \times 8.2} = 7.76 \text{mm}$$

第五节 地下管道稳定性校核

一、管道径向稳定性校核：当壁厚与外径之比不不小于1/110，埋地管道应进行径向稳定性校核。当壁厚与外径之比不小于1/110时，具有足够的径向稳定性。

$$P \leq \frac{1}{3} P_{cr}$$

管道所受径向外载荷 $P = \gamma_{so} h$

管道受外压失稳的临界压力 $P_{cr} = \frac{\sqrt{2K_0 EI}}{R}$

式中： K_0 -----土壤压缩抗力系数，又称基础系数。P123表4-1

γ_{so} -----土壤的比重。

第五节 地下管道稳定性校核

二、管道轴向稳定性校核：地下管道受轴向压力到达或超出临界值时，将发生轴向失稳，管道将发生波浪形或凸起弯曲而拱出地面造成管道破坏事故。

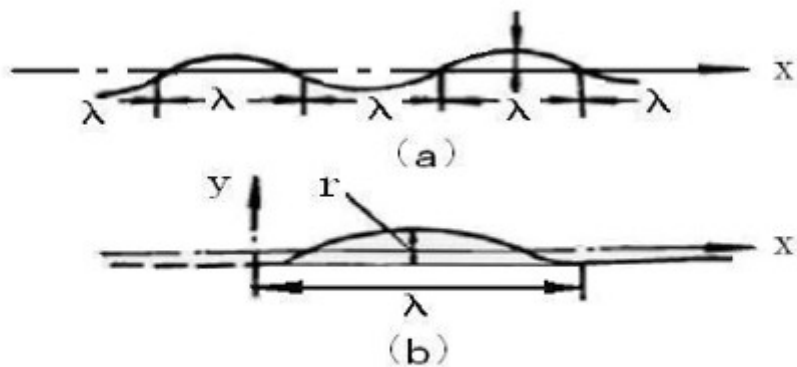
1、埋地直管发生失稳的临界压力为：
$$P_{cr} = 2 \sqrt{K_0 DEI}$$

产生波浪形弯曲的波长为：

$$\lambda_1 = \pi \sqrt[4]{\frac{EI}{K_0 D}}$$

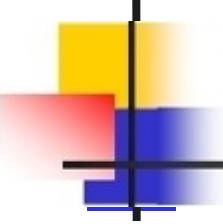
产生凸起弯曲的波长为：

$$\lambda_2 = 2\pi \sqrt[4]{\frac{EI}{K_0 D}} = 2\lambda_1$$



地下直线管道轴向失稳时出现的弯曲形状

式中： K_0 -----土壤压缩抗力系数，又称基础系数。P123表4-1



第五节 地下管道稳定性校核

2、向上弯曲的埋地管道的失稳临界压力为： $P_{cr} = 0.375q \cdot \rho_0$

式中： ρ_0 -----计算曲率半径

q -----管道向上作横向位移时的极限阻力，P124

轴向稳定性校核： $P = \sigma_L \cdot A < P_{cr}$

第六节 地下曲管道热胀弯矩和位移计算

埋地管道中的曲管在温度变化时和地上曲管一样受到热胀弯矩的作用，而且发生横向位移。有可能造成弯头的破裂或者发生严重的变形而影响清管器的经过。

但是，埋地管道中的曲管在温度变化时受到热胀弯矩不但与曲管的材料、构造尺寸、温度变化等原因有关，而且和周围土壤的性质、施工情况等因素有关。尚无精确的计算措施。简化计算措施是将埋地曲管的水平弯头看成一种点看待，弯头相当于弹性抗弯铰。有如下结论：

- 1、埋地弯头的热胀弯矩与拐角有关，拐角在 15° -- 35° 时，热胀弯矩较大；
- 2、回填土扎实，有利于降低弯头的热胀弯矩；
- 3、距弯头两端一定距离设置固定支墩。

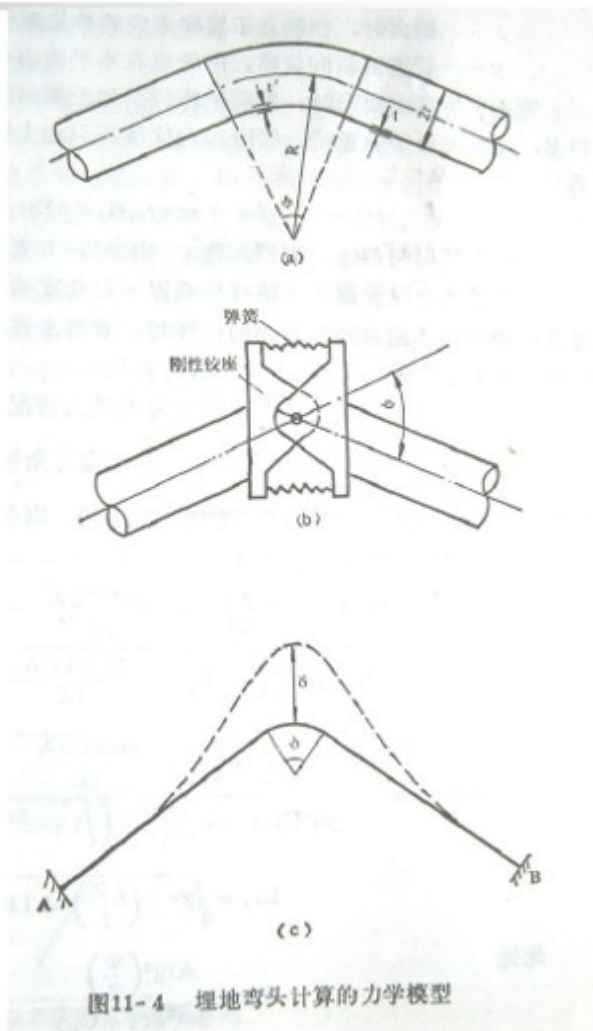


图11-4 埋地弯头计算的力学模型

第七节 固定支墩的设计计算

为了预防管道热胀推挤设备，在地下管道出土前和某些地下管道弯头的两侧常设置固定支墩加以保护。下面简介上托式固定支墩的计算措施。

一、固定支墩的受力计算：管道作用在支墩上的推力P靠支墩与土壤间的摩擦力来平衡。

管道作用在支墩上的推力为：

$$P = A\sigma_L = A\left[\frac{PD}{4\delta} - \nu \frac{PD}{2\delta} + \alpha E\Delta T\right] = A\left[0.2\frac{PD}{2\delta} + \alpha E\Delta T\right]$$

因为固定支墩不能绝对固定，稍有位移将使推力减小，所以由上式求得的推力值应乘一种折减系数来拟定。

第七节 固定支墩的设计计算

支墩与土壤间的摩擦力：支墩的上下左右四个面上的摩擦力之和

$$T = \gamma_0 \cdot \phi \cdot P$$

$$\frac{\phi}{2} \quad 02023$$

式中：-----支墩与土壤间的摩擦系数 μ

γ_0 -----支墩材料的比重

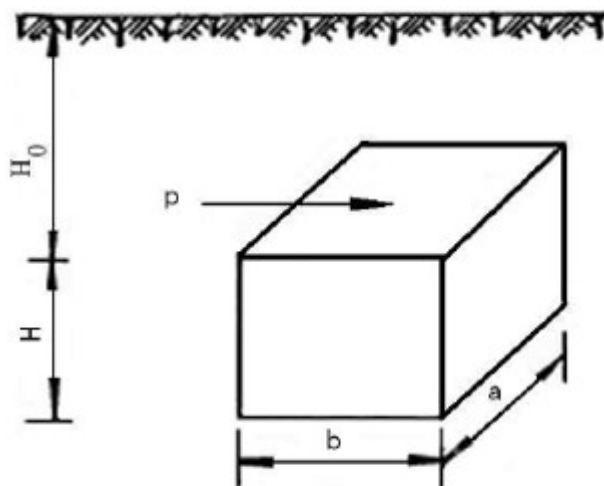
ϕ -----土壤的内摩擦角

二、力平衡校核：

$$T > K \cdot \phi \cdot P$$

式中：K-----安全系数，取1/2---1/3

ϕ -----推力折减系数



固定支墩尺寸

第八节 地下管道的抗震计算

地震对埋地管道的危害有三种情况。一是因为地震对土壤严重破坏使土壤失去整体连续性（**断层错动**），二是土壤液化使管道缺乏支承产生过大变形而破坏（**砂土液化**），三是地震波作用下**地基土的变形**。下面讨论地震波作用下管道的应力与应变。

沿横波方向的土壤位移可用波动方程表达为：
$$y(x, t) = a_0 \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

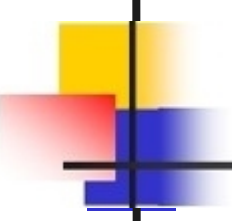
式中： a_0 -----横波振幅； T -----横波周期，P153，表5-13； v -----横波波速

则地基土体的应变为：

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{2\pi}{Tv} \cos \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

则地基土体运动的速度和加速度为：

$$\dot{y} = \frac{\partial y}{\partial t} = -a_0 \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad \ddot{y} = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -a_0 \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v} \right)$$



第八节 地下管道的抗震计算

则地基土体运动的最大加速度为：
$$a_{max} = -a_0 \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2$$

则地基土体的最大应变为：
$$\varepsilon_{max} = -a_0 \frac{2\pi}{Tv}$$

已知地震系数 $K = \frac{a_{max}}{g}$

则：
$$a_{max} = K \cdot g \qquad \varepsilon_{max} = \frac{K \cdot g \cdot T}{2\pi v}$$

第八节 地下管道的抗震计算

地震时若管道具有同周围土体一样的变形，从而求得地震时的附加应力：

$$\sigma_{\max} = \varepsilon_{\max} \cdot E = \frac{K \cdot g \cdot T}{2\pi\nu} E$$

考虑管道与土壤间有相对变形和管道本身刚性的作用，管道位移幅值要比同方向土壤的自由变位位移小些，所以引入传递系数，又引入安全系数得管道最大的轴向应变：

$$\varepsilon_{\max} = -1.2\xi \frac{K \cdot g \cdot T}{2\pi\nu}$$

则地震时管道的附加应力： $\sigma_{\max} = \varepsilon_{\max} \cdot E = 1.2\xi \frac{K \cdot g \cdot T}{2\pi\nu} E$

管道地震强度校核： $\sigma + \sigma_a \leq \sigma_s$



第一章复习题

- 1、管道的强度设计和强度校核的措施？
- 2、管道受内压作用时截面应力的计算？
- 3、管材的许用应力怎样拟定？
- 4、曲管受内压作用时截面应力的计算？
- 5、割孔三通的补强原则？补强区域怎样拟定？
- 6、管道的稳定性校核的内容？
- 7、地震对埋地管道的危害有几种情况？

[复习题解答](#)



第二章 地上管道

- 第一节 概述
- 第二节 管道壁厚设计
- 第三节 管架受力计算
- 第四节 管道跨度设计
- 第五节 管道热应力计算
- 第六节 常用补偿器的设计

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/608066011007006132>