

设计计算

地上敷设钢管的热应力计算

王金龙

河北省石油公司邢台分公司(河北省邢台市)

提 要 对于地上敷设钢管的大曲率半径非90°弯管的自体补偿能力及热应力问题, 笔者运用力法进行了理论分析, 提出了求解管系支座处弹性力的公式及其各项未知量的计算方法。文章还结合算例说明了求解管系最大热应力的计算步骤。

主题词 地上管道 *热应力 *〔大曲率半径弯管〕 热力计算 温度补偿 〔理论分析〕
结构力学 分析方法 *计算方法

在设计油气管道时, 常将工艺管道依山就势地敷设在地上, 这就自然地使管道形成许多直管和弯管的组合。显然, 弯曲管段对整条管道有一定的热补偿能力。但对于具有大曲率半径非90°弯管的自体补偿能力还是个有待探讨的问题, 笔者运用力法对该问题作如下分析讨论。

1 基本理论及公式的推导

1.1 基本理论

根据约束情况可把整个管道分成若干段。假设每段管路的两端为完全约束(这样假设偏于保守^[1,2]), 并讨论弯管所对圆心角 θ 限于 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围的管路(下称管系), 其力学简化模型如图1; 其弯管力学模型引入刚臂后的基本结构见图2。

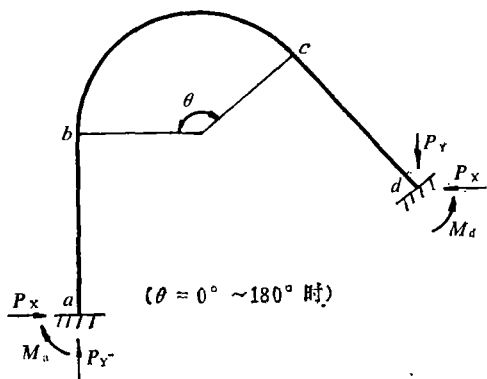


图1 弯管的力学简化模型

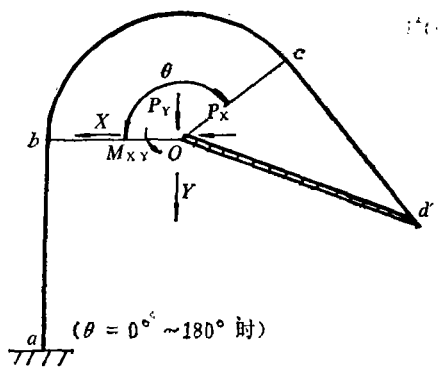


图2 弯管力学模型引入刚臂后的基本结构

要计算管系中的热应力,需首先求得支座处的弹性力。弯管力学模型引入刚臂后的力法方程为

$$\left. \begin{aligned} P_X \delta_{XX} + P_Y \delta_{XY} + M_{XY} \delta_{XM} &= \Delta X \\ P_X \delta_{YX} + P_Y \delta_{YY} + M_{XY} \delta_{YM} &= \Delta Y \\ P_X \delta_{MX} + P_Y \delta_{MY} + M_{XY} \delta_{MM} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

式中 δ_{XX} 、 δ_{XY} 、 δ_{XM} ——分别表示 P_X 、 P_Y 、 M_{XY} 等于1时,使 d 点在 X 方向产生的位移;
 δ_{YX} 、 δ_{YY} 、 δ_{YM} ——分别表示 P_X 、 P_Y 、 M_{XY} 等于1时,使 d 点在 Y 方向产生的位移;
 δ_{MX} 、 δ_{MY} 、 δ_{MM} ——分别表示 P_X 、 P_Y 、 M_{XY} 等于1时,使 d 点产生的角位移;
 ΔX 、 ΔY ——分别表示管系在 X 、 Y 方向上的热伸长量。

对于大曲率半径的弯管,以及带弯头的 Γ 型补偿器,只需要考虑它的弯曲变形^[3]。并可由材料力学的变形能原理得如下变形系数

$$\left. \begin{aligned} \delta_{XX} &= \frac{I_X}{EJ} \\ \delta_{YY} &= \frac{I_Y}{EJ} \\ \delta_{XY} &= \delta_{YX} = \frac{I_{XY}}{EJ} \\ \delta_{XM} &= \delta_{MX} = \frac{S_X}{EJ} \\ \delta_{YM} &= \delta_{MY} = \frac{S_Y}{EJ} \\ \delta_{MM} &= \frac{l}{EJ} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

式中 I_X 、 I_Y ——分别表示管系对 X 、 Y 轴的线惯性矩;

I_{XY} ——管系对 X 、 Y 轴的线惯性积;

S_X 、 S_Y ——分别表示管系对 X 、 Y 轴的线静矩;

l ——管系的长度;

E ——管材的弹性模数;

J ——管子截面的惯性矩;

EJ ——代表管子刚度,常数。

若将刚臂引至管系重心处,则 S_X 、 S_Y 为零,式(1)c得 $M_{XY} = 0$ 。变形系数的符

号^[4]依位移和作用力的方向来确定,主系数 δ_{XX} 、 δ_{YY} 恒为正值,副系数 δ_{XY} (δ_{YX})因力的方向 Y (X)与其力产生的位移方向 X (Y)相反,故为负值。对于热伸长量符号^[3],如果热伸长与坐标轴方向相同时取负值,反之取正。这时如将式(2)中的系数代入式(1)得

$$\left. \begin{aligned} P_X I_X - P_Y I_{XY} &= \Delta X EJ \\ -P_X I_{XY} + P_Y I_Y &= \Delta Y EJ \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

联立解式(3)得重心处的弹性力 P_X 、 P_Y (如果结果为负值,表示弹性力的方向与假设方向相反)

$$\left. \begin{aligned} P_X &= \frac{\Delta X I_Y + \Delta Y I_{XY}}{I_X I_Y - I_{XY}^2} EJ \\ P_Y &= \frac{\Delta Y I_X + \Delta X I_{XY}}{I_X I_Y - I_{XY}^2} EJ \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

1.2 弯管柔性的影响

对于弯曲管段,因受力的作用,截面发生变形,出现扁率,其刚度由 EJ 降到 KEJ 。称 K 为截面的减刚系数($K < 1$),如同管系增长了(倍数为 $1/K$)弹性长度^[1]。故凡与弯管展开长度发生关系时,一律用弹性长度,也称作折算长度,即为展开长度的 $1/K$ 倍。减刚系数的大小仅取决于弯管的特性系数 λ ,即

$$\left. \begin{aligned} \lambda > 0.3 \quad K &= \frac{12\lambda^2 + 1}{12\lambda^2 + 10} \\ \lambda \leq 0.3 \quad K &= \lambda / 1.65 \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

式中 λ ——弯管的特性系数, $\lambda = \delta R / r^2$;

δ ——管壁厚度;

R ——弯管的曲率半径;

r ——管子的平均半径。

1.3 热伸长量的计算

管系在坐标轴 X 、 Y 方向上的热伸长量 ΔX 、 ΔY , 就等于管系两端点的直线长度在 X 、 Y 轴方向上的投影与该管单位长度热伸长量的乘积^[1, 3]

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= \alpha \Delta t [R(1 - \cos \theta) \\ &\quad + l_2 \sin \theta] \\ \Delta Y &= \alpha \Delta t (l_1 + R \sin \theta \\ &\quad + l_2 \cos \theta) \end{aligned} \right\} \dots (6)$$

式中 α ——管材的线膨胀系数;

Δt ——工作或环境温度 t_1 (取其大者) 与安装温度 t_0 之差, $\Delta t = t_1 - t_0$;

l_1 、 l_2 ——分别表示弯管段所连的直管部分长度;

θ ——弯管所对的圆心角;

其余符号同前。

1.4 管系的重心位置

1.4.1 弯管段的重心位置^[5] (见图3)

由图3可得 $X = -R \cos \beta$, $Y = R \sin \beta$, $dS = R d\beta$ 。

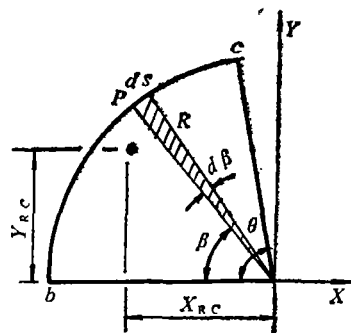


图3 弯管段重心示意图

这里考虑减刚系数后, 可得弯管段对 X 和 Y 轴的线静矩 S_X 和 S_Y , 进而可求出弯管段的重心位置 X_{Rc} 和 Y_{Rc}

$$S_X = \frac{1}{K} \int_s Y dS = \frac{R^2}{K} (1 - \cos \theta)$$

$$S_Y = \frac{1}{K} \int_s X dS = -\frac{R^2}{K} \sin \theta$$

$$X_{Rc} = \frac{S_Y}{R\theta} K = -\frac{R}{\theta} \sin \theta$$

$$Y_{Rc} = \frac{S_X}{R\theta} K = \frac{R}{\theta} (1 - \cos \theta)$$

1.4.2 管系的重心位置

参考图4, 以 X_0 和 Y_0 为坐标轴得到管系重心位置坐标 X_c 和 Y_c ^[6, 7]

$$\left. \begin{aligned} X_c &= \frac{\frac{R^2}{K} (\theta - \sin \theta) + l_2 [R(1 - \cos \theta) + \frac{1}{2} l_2 \sin \theta]}{l} \\ Y_c &= \frac{\frac{1}{2} l_1^2 + \frac{R\theta}{K} [l_1 + \frac{R}{\theta} (1 - \cos \theta)] + l_2 (l_1 + R \sin \theta + \frac{1}{2} l_2 \cos \theta)}{l} \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

式中 l ——管系的弹性长度,

$$l = l_1 + R\theta/K + l_2;$$

..... (8)

X_c 、 Y_c ——分别为管系重心到 Y_0 、 X_0 轴的距离;

其余符号同前。

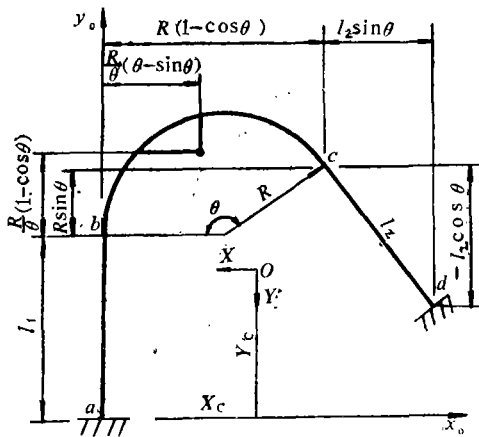


图4 管系的几何尺寸示意图

1.5 管系的固有线惯性矩和线惯性积

1.5.1 管系各管段的固有线惯性矩和线惯性积

参见图3可得

ab段:

$$\left. \begin{aligned} I_{abx} &= \frac{l_1^3}{12} \\ I_{aby} &= 0 \\ I_{abxy} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

bc段:

$$\left. \begin{aligned} I_{bcx} &= \frac{R^3}{4K} (2\theta - \sin 2\theta) \\ &\quad - \frac{R^3}{6K} (1 - \cos \theta)^2 \\ I_{bcy} &= \frac{R^3}{4K} (2\theta - \sin 2\theta) \\ &\quad - \frac{R^3}{6K} \sin^2 \theta \\ I_{bcxy} &= -\frac{R^3}{2K} \sin^2 \theta \\ &\quad + \frac{R^3}{K\theta} (1 - \cos \theta) \\ &\quad \times \sin \theta \end{aligned} \right\} (10)$$

cd段:

$$\left. \begin{aligned} I_{cdx} &= \frac{l_2^3}{12} \cos \theta \\ I_{cdy} &= \frac{l_2^3}{12} \sin^2 \theta \\ I_{cdxy} &= \frac{l_2^3}{12} \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \right\} \dots (11)$$

1.5.2 各管段重心对管系重心的坐标^[8]

ab段:

$$\left. \begin{aligned} X_{ab} &= X_c \\ Y_{ab} &= Y_c - l_1/2 \end{aligned} \right\} \dots (12)$$

bc段:

$$\left. \begin{aligned} X_{bc} &= X_c - R(\theta - \sin \theta)/\theta \\ Y_{bc} &= Y_c - [l_1 + R/\theta \\ &\quad \times (1 - \cos \theta)] \end{aligned} \right\} \dots (13)$$

cd段:

$$\left. \begin{aligned} X_{cd} &= X_c - [R(1 - \cos \theta) \\ &\quad + \frac{1}{2} l_2 \sin \theta] \\ Y_{cd} &= Y_c - (l_1 + R \sin \theta \\ &\quad + \frac{1}{2} l_2 \cos \theta) \end{aligned} \right\} \dots (14)$$

1.5.3 管系的固有线惯性矩和线惯性积

$$\left. \begin{aligned} I_x &= I_{abx} + l_1 Y_{ab}^2 + I_{bcx} \\ &\quad + \frac{R\theta}{K} Y_{bc}^2 + I_{cdx} \\ &\quad + l_2 Y_{cd}^2 \\ I_y &= I_{aby} + l_1 X_{ab}^2 + I_{bcy} \\ &\quad + \frac{R\theta}{K} X_{bc}^2 + I_{cdy} \\ &\quad + l_2 X_{cd}^2 \\ I_{xy} &= I_{abxy} + l_1 X_{ab} Y_{ab} \\ &\quad + I_{bcxy} + \frac{R\theta}{K} X_{bc} Y_{bc} \\ &\quad + I_{cdxy} + l_2 X_{cd} Y_{cd} \end{aligned} \right\} \dots (15)$$

1.6 弯曲力矩的计算^[9]

首先规定, 弯矩逆时针方向为正, 顺时针方向为负。

1.6.1 管系上某断面弯曲力矩表达式

$$M = (Y_c - y_0) P_x - (X_c - x_0) P_y$$

式中 x_0, y_0 ——分别为管系上任意一计算断面中心对 X_0, Y_0 轴的坐标。

其余符号同前。

1.6.2 几个特殊点及任意一点的弯曲力矩

$$\left. \begin{aligned} M_a &= Y_c P_x - X_c P_y \\ M_b &= (Y_c - l_1) P_x - X_c P_y \\ M_c &= [Y_c - (l_1 + R \sin \theta)] P_x \\ &\quad - [X_c - R(1 - \cos \theta)] P_y \\ M_d &= [Y_c - (l_1 + R \sin \theta \\ &\quad + l_2 \cos \theta)] P_x \\ &\quad - \{ X_c - [R(1 - \cos \theta) \\ &\quad + l_2 \sin \theta] \} P_y \\ M_p &= [Y_c - (l_1 + R \sin \beta)] P_x \\ &\quad - [X_c - R(1 - \cos \beta)] P_y \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中 M_p ——管系上任意一点的弯曲力矩;

M_a, M_b ——分别为图4中a、b点的弯曲力矩;

M_c, M_d ——分别为图4中c、d点的弯曲力矩;

β ——弯管上任意点对应的圆心角。

对式(16)中的 M_p 式求导数, 并令其等于零, 得到弯管部分弯曲力矩极值

$$\frac{dM_p}{d\beta} = +R \sin \beta P_y - R \cos \beta P_x = 0$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{P_x}{P_y}$$

分析可知, P_x/P_y 是推力线的斜率, 而斜率为 P_x/P_y 的直线与推力线垂直(两者相差 90°), 它与弯管部分的交点为其弯曲力矩的极值点。

1.7 最大弯曲应力

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W} f \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中 M_{max} ——管系中最大弯曲力矩;

W ——管子截面的抗弯系数;

f ——弯曲应力增强系数, 对于直管截面 $f = 1$, 对于弯管截面可用式(18)求解

$$\left. \begin{aligned} \lambda \geq 1.472 \text{ 时, } f &= \frac{12\lambda^2 - 2}{12\lambda^2 + 1} \\ 0.3 < \lambda < 1.472 \text{ 时, } f &= \frac{\sqrt{12\lambda^2 + 10}}{9K} \\ \lambda \leq 0.3 \text{ 时, } f &= 0.9\lambda^{-2/3} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

2 算例

某油库管道上安装有如图4的弯管, 试计算它的热应力分布情况。

2.1 已知条件

$l_1 = 34\text{m}$, $l_2 = 18.91\text{m}$, $R = 22.75\text{m}$,
 $\theta = 102^\circ (1.78\text{rad})$, $E = 2.0 \times 10^7 \text{N/cm}^2$,
 $J = 717.88\text{cm}^4$, $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} \text{1/}^\circ\text{C}$,
 $\Delta t = 40^\circ\text{C}$, $W = 90.3\text{cm}^3$, 管子规格为 $\phi 159 \times 5\text{mm}$ 。

2.2 求解(过程从略)

(1) 弹性长度 l 可先由 $\lambda = \delta R/r^2$ 得 $\lambda = 20.5$, 由式(5)得 $K = 0.998$, 再用式(8)求出 $l = 93.49(\text{m})$ 。

(2) 管系重心坐标可由式(7)求得: $X_c = 11.88(\text{m})$, $Y_c = 38.62(\text{m})$ 。

(3) 管系各管段的固有线惯性矩和线惯性积可由式(9)~(11)得:

$$ab\text{段: } I_{abx} = 3275.33(\text{m}^4),$$

$$I_{aby} = 0, I_{abxy} = 0;$$

$$bc\text{段: } I_{bcx} = 2031.62(\text{m}^4),$$

$$I_{bcy} = 2959.65(\text{m}^4),$$

$$I_{bcxy} = 2185.55(\text{m}^4);$$

cd段: $I_{cdx} = 24.3 (\text{m}^3)$,

$I_{cdy} = 539.19 (\text{m}^3)$,

$I_{cdxy} = -114.48 (\text{m}^3)$ 。

(4) 各管段重心对于管系重心的坐标可由式(12)~(14)得:

ab段: $X_{ab} = 11.8 (\text{m})$,

$Y_{ab} = 21.62 (\text{m})$;

bc段: $X_{bc} = 1.63 (\text{m})$,

$Y_{bc} = -10.82 (\text{m})$;

cd段: $X_{cd} = -24.84 (\text{m})$,

$Y_{cd} = -15.67 (\text{m})$ 。

(5) 管系的固有线惯性矩和线惯性积可由式(15)得: $I_x = 30\,617.36 (\text{m}^3)$, $I_y = 20\,073.17 (\text{m}^3)$, $I_{xy} = 17\,448.78 (\text{m}^3)$ 。

(6) 管系的热伸长量可由式(6)得: $\Delta X = 2.207 \times 10^{-2} (\text{m})$, $\Delta Y = 2.512 \times 10^{-2} (\text{m})$ 。

(7) 管系重心处的弹性力可由式(4)得: $P_x = 4.08 (\text{N})$, $P_y = 5.343 (\text{N})$ 。

(8) 管系各断面的弯曲力矩由式(16)计算得: $M_a = 94.1 (\text{N}\cdot\text{m})$, $M_b = -44.6 (\text{N}\cdot\text{m})$, $M_c = 11.4 (\text{N}\cdot\text{m})$, $M_d = 126.3 (\text{N}\cdot\text{m})$, $M_p = -76 (\text{N}\cdot\text{m})$ (此时 $\beta = 37.4^\circ$)。

(9) 管系各点的弯曲热应力由式(17)可得 $\sigma_a = 1.04 \times 10^5 (\text{Pa})$, $\sigma_b = -4.9 \times 10^5 (\text{Pa})$, $\sigma_c = 1.3 \times 10^5 (\text{Pa})$, $\sigma_d = 14.0 \times 10^5 (\text{Pa})$, $\sigma_p = -8.4 \times 10^5 (\text{Pa})$ 。 σ_p 算式中的 $f = 0.9994$, 其余的取 $f = 1$ 。管系弯曲热应力分布如图5所示。

综上所述之后还有以下几点说明:

(1) 本文导出的公式是由两段直管和一段弯管组合成的管系热应力计算公式。弯管所对的圆心角 90° 时, 是该计算公式的一种特殊形式。

当 $R = 0$ 时, 公式适用于计算两直管任意角 Γ 型补偿器的热应力, 此时 $\theta = 180^\circ$ 。

θ_0 (θ_0 为两直管间的夹角, 取 $\theta_0 = 0^\circ \sim 180^\circ$)。两直管 $90^\circ \Gamma$ 型补偿器热应力的计算是 $R = 0$ 时计算公式的一个特例。

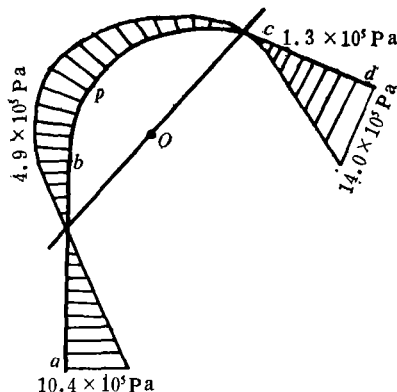


图5 管系弯曲热应力分布图

(2) 计算时, 将 l_1 作为长臂, l_2 作为短臂这样会给计算带来方便。

(3) 对于具有大曲率半径的管道, 因 $K \approx 1$, 可以不考虑减刚系数的影响, 但不能简化为两直管段来计算; 对于小曲率半径的管道, 则可简化为两直管段来进行计算。

(4) 图1是管系简化的力学模型, 实际上管系的“固定”支座并非力学上的固定支座那样完全约束, 由此管子截面产生的热应力比计算的要小, 这是有利于安全的, 这种简化反应了管路的热应力分布规律。

(5) 管系最大弯曲热应力发生在短臂固定支座处。

(6) 笔者在运用力法讨论问题时, 是先给出求解弹性力的公式, 然后找出其中各项的计算方法。而在实际应用(算例)时恰好相反, 大概步骤是: A. 找重心位置; B. 计算管系的惯性矩和惯性积; C. 计算热伸长量; D. 求解弹性力, 其中重心处 $M_{xy} = 0$; E. 计算弯曲力矩后即可求得最大热应力。

(下转31页)

运动粘度 $\nu = 30 \text{ mm}^2/\text{s}$

(1) 先由工艺给定的条件求 C 值

本设计选用吴忠仪表厂 V 型调节阀系列, 该系列是引进技术生产的, 故其流通能力 C_v 值是以英制单位定义的, 需用式 (11) 换成 C

$$C = C_v' = 1.17Q \sqrt{\frac{\lambda}{\Delta P}} \quad \dots (11)$$

代入数值 $C = C_v' = 4\ 307$ (计算略, 下同)。

(2) 求修正系数 K 值

先将有关数据代入式 (6) 求最小雷诺数 $Re = 5.9 \times 10^4$, 然后查图 3 得 $K \approx 1$, 再按式 (5) 计算调节阀的流通能力 $C = C_v' \times K = 4\ 307$ 。

由吴忠仪表厂提供的产品样本中选用该厂的 V 型调节球阀: $P_N 64\ DN 350\ C_v = 6\ 300$ 。

(3) 用式 (10) 验算最大流量时的 K_k 值

将有关数据代入式 (10) 得 $K_k = 30\%$, 显然, 选型偏大; 但产品样本中低一档的规格是 $P_N 64\ DN 300\ C_v = 3\ 000$ 型, 其 C_v 值不符合设计要求。因此, 考虑到将来输油量呈上升趋势这个因素, 所以, 原选用的型号是合理的。

2.2 铁抚线首站出站调节阀的选型与计算

铁抚线的工艺条件:

重量流量 $G_{m,x} = 739 \text{ t/h}$,

体积流量 $Q_{m,x} = 869 \text{ m}^3/\text{h}$,

阀前后压差 $\Delta P = 1.47 \times 10^4 \text{ Pa}$,

阻力比 $S = 0.01$,

原油密度 $\rho = 0.85 \text{ g/cm}^3$,

运动粘度 $\nu = 30 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。

(1) 先由工艺给定条件求 C 值

本设计仍选用吴忠仪表厂同类产品, 故需用式 (11) 求 C 。

将有关数据代入式 (11) 得 $C = C_v' = 2\ 420$ 。

(2) 求修正系数 K 值

先将有关数据代入式 (6) 求最小雷诺数 $Re = 2.9 \times 10^4$, 然后查图 3 得 $K \approx 1$, 再按式 (5) 计算调节阀的流通能力 $C = C_v' \times K = 2\ 420$ 。

用所求出的 C 值查吴忠仪表厂提供的产品样本, 选用该厂的 V 型调节球阀: $P_N 64\ DN 250\ C_v = 2\ 500$ 。

(3) 用式 (10) 验算最大流量时的 K_k 值

将有关数据代入式 (10) 得 $K_k = 69\%$, 显然, 该选型比较合理。

(收稿日期: 1991-06-22)

(上接 24 页)

参 考 文 献

- [1] H.V. 尤根生著, 张洪赢译. 管道弹性与强度. 北京: 中国工业出版社, 1964
- [2] 华东石油学院储运教研室. 油罐及管道强度设计. 山东东营, 1977
- [3] 炼油装置工艺管线安装设计手册. 北京: 石油工业出版社, 1978
- [4] 郭光臣等编. 油库设计. 北京: 石油工业出版社, 1980
- [5] 水利部北京电力设计院编. 发电厂管道手册 (第 7 册): 管道应力计算. 北京: 水力电力

出版社, 1959

- [6] 利普. 威瓦著, 石油工业部北京炼油设计研究院译. 工艺管线设计. 北京: 石油工业出版社, 1981
- [7] 大庆油田科学研究设计院. 油气集输储运设计手册. 大庆, 1975
- [8] 重庆建筑工程学院. 结构力学. 北京: 人民教育出版社, 1979
- [9] 石油化工部第一石油化工建筑公司设计研究所主编. 炼油厂油品储运工艺设计. 北京: 石油工业出版社, 1978

(修改稿收到日期: 1991-05-17)