

平面内热力管道的弹性分析与实例计算

徐正西¹ 黄继才² 鄢明¹

(1 广西华锐钢铁工程设计咨询有限责任公司 广西 柳州 545000; 2 广西柳州钢铁集团有限公司 广西 柳州 545000)

摘要: 文章通过具体计算实例,采用弹性中心法对平面管系两固定端处因热胀而产生的作用力及力矩进行了受力和应力验算。

关键词: 弹性中心法; 平面管系; 热胀; 应力

0 引言

在管道设计过程中,管道的受力计算及应力验算是一项基本的内容。一般是通过手册上的图表或一些简化公式进行直接查图或公式代入计算。这种计算方法过于简单,产生的结果误差较大,对于比较重要的管道计算是不合适的。本文采用弹性中心法,并结合具体计算实例对平面内热力管道进行了受力分析及应力验算。

1 弹性中心法基本思想

弹性中心法的基本思想为:假定管系的首端固定,尾端为自由端,在尾端加复原力矩,使之恢复到原始状态,再通过变形协调方程组求解复原力和力矩。其基本步骤为:

第一步,根据原始资料选择基础数据。包括:设计压力与设计温度、材料在设计温度下的线膨胀系数;在20℃时和设计温度下的弹性模数、材料许用应力、管道规格与元件尺寸等。按比例绘制管系的计算图并选取坐标系,然后把管系按直段及弧段划分成单个元件。从管系的一个端点开始,按顺序对元件编号,并注出所有元件尺寸。

第二步,通过管道规格和管件尺寸计算辅助数据。辅助计算数据包括:管道惯性矩、弯头的重心坐标、尺寸系数、柔性系数、应力加强系数、固有线惯性矩和固有线惯性积等。

第三步,通过计算元件的当量长度与对坐标轴的线惯性矩、线惯性积和静力矩,求出管系弹性中心坐标,再计算整个管系对中心坐标轴的线惯性矩和线惯性积。

第四步,将上述计算得出的相关数据与全补偿量代入相关方程式,计算管系尾端的复原力,并将该力按适当比例绘制在计算图中管段的弹性中心点上,做出零力矩线,找出最大热胀作用力矩点作为验算热胀当量应力的依据。

2 平面管系的计算步骤

2.1 建立管系坐标图

某实例的管系坐标见图1。图中A、B为固定点,编号1~5为管件编号,以mm为计算单位。

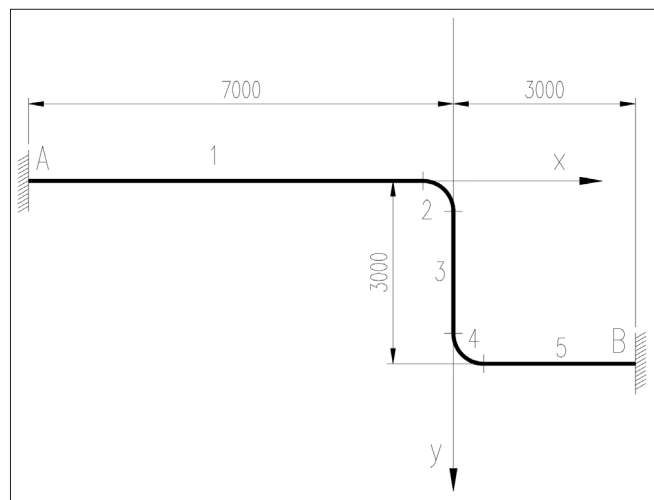


图1 管系坐标图

2.2 原始条件

管道工作介质为过热蒸汽,蒸汽设计温度为 $t=200\text{℃}$,压力为 $P=1.0\text{MPa}$,安装温度为 $t_0=20\text{℃}$,管道外径 D_0 为15.9cm,管道内径 $D_i=15.0\text{cm}$,壁厚为 $\delta=0.45\text{cm}$,钢材牌号为20[#],管道弯曲半径 $R=22.9\text{cm}$,弯头平均半径 $r_0=7.5\text{cm}$ 。固定点A、B的坐标分别为 $(-7\text{m}, 0\text{m})$ 、 $(3\text{m}, 3\text{m})$ 。

2.3 辅助数据计算

(1) 钢材在设计温度下的线膨胀系数 $\alpha=12.25\times 10^{-6}/\text{℃}$,钢材在设计温度下的弹性模量为 $E_t=1.86\times 10^5\text{MPa}$,在安装温度下的弹性模量为 $E_{20}=1.92\times 10^5\text{MPa}$,在设计温度下的许用应力为 $[\sigma]_t=123\text{MPa}$,在安装温度下的许用应力为 $[\sigma]_{20}=130\text{MPa}$ 。

(2) 根据原始计算数据对辅助数据进行计算,辅助

数据计算结果如表 1 所示。

表 1 辅助数据计算表

序号	名称	单位	符号	公式	数值
1	管道断面固有惯性矩	cm ⁴	I	$\pi(D_0^4 - D_i^4)/64$	652
2	管道截面系数	cm ³	W	$\pi(D_0^3 - D_i^3)/(32D_0)$	82
3	尺寸系数		h	$\delta R / r_o^2$	0.183
4	柔性系数		k	$1.65/h$	9.555
5	应力增大系数		i	$0.9/h^{2/3}$	2.902

2.4 相关参数的计算

2.4.1 全补偿量

全补偿量包括点 A、B 的位移和热胀位移，计算公式为：

$$\Delta X = \Delta X_B - \Delta X_A - \Delta X_{t,AB} \quad (1)$$

$$\Delta Y = \Delta Y_B - \Delta Y_A - \Delta Y_{t,AB} \quad (2)$$

式中： ΔX 、 ΔY —计算管系沿坐标轴 x 、 y 的线位移全补偿量 (m)；

ΔX_A 、 ΔY_A —点 A 沿坐标轴 x 、 y 的附加线位移 (m)；

ΔX_B 、 ΔY_B —点 B 沿坐标轴 x 、 y 的附加线位移 (m)；

$\Delta X_{t,AB}$ 、 $\Delta Y_{t,AB}$ —计算管系沿坐标轴 x 、 y 的热伸长量 (m)。

$\Delta X_{t,AB}$ 、 $\Delta Y_{t,AB}$ 的计算公式分别为：

$$\Delta X_{t,AB} = \alpha(X_B - X_A)(t - t_0) \quad (3)$$

$$\Delta Y_{t,AB} = \alpha(Y_B - Y_A)(t - t_0) \quad (4)$$

式中： X_B 、 Y_B —点 B 的坐标 (m)；

X_A 、 Y_A —点 A 的坐标 (m)。

不考虑固定支座 A、B 两点的附加线位移，代入原始数据计算得， x 、 y 两个方向的全补偿量分别为 $\Delta X = -0.0221\text{m}$ ， $\Delta Y = 0.00662\text{m}$ 。

2.4.2 管系元件的当量长度

对于直管段元件，其当量长度 L_{eq} 等于实际长度 L 。对于弯管元件，其当量长度 $L_{eq}=1.57KR$ 。

2.4.3 静力矩

元件对坐标轴的静力矩是元件当量长度与其重心坐标的乘积，即：

$$S_X = L_{eq} Y \quad (5)$$

$$S_Y = L_{eq} X \quad (6)$$

式中： S_X —元件对坐标轴 x 的静力矩 (m²)；

S_Y —元件对坐标轴 y 的静力矩 (m²)；

X 、 Y —元件在坐标轴 x 、 y 中的重心坐标 (m)。

2.4.4 管系的弹性中心坐标

管系的弹性中心坐标等于各元件对坐标轴静力矩的总和除以各元件的当量长度总和，即：

$$X_S = \sum_{i=1}^5 S_{Y_i} / \sum_{i=1}^5 L_{eq_i} \quad (7)$$

$$Y_S = \sum_{i=1}^5 S_{X_i} / \sum_{i=1}^5 L_{eq_i} \quad (8)$$

2.4.5 确定管系对弹性中心坐标轴的线惯性矩和线惯性积

计算管系对坐标轴的线惯性矩与线惯性积，是各元件对该坐标轴的线惯性矩与线惯性积之总和。要求出计算管系对弹性中心坐标轴的线惯性矩和线惯性积，必须首先算出管系元件对基本坐标轴的线惯性矩与线惯性积。

元件对基本坐标轴的线惯性矩与线惯性积按下式确定：

$$I_X = I_{XO} + L_{eq} Y^2 \quad (9)$$

$$I_Y = I_{YO} + L_{eq} X^2 \quad (10)$$

$$I_{XY} = I_{XYO} + L_{eq} XY \quad (11)$$

式中： I_X 、 I_Y —元件对基本坐标轴 x 、 y 的惯性矩 (m³)；

I_{XY} —元件对基本坐标轴 x 、 y 的惯性积 (m³)；

I_{XO} 、 I_{YO} —元件固有惯性矩 (即对通过元件重心坐标轴 x 、 y 的惯性矩) (m³)；

I_{XYO} —元件固有惯性积 (m³)。

直管元件的固有惯性矩和固有惯性积，按下列公式进行计算：

$$I_{XO} = L^3 \sin^2 \alpha / 12 \quad (12)$$

$$I_{YO} = L^3 \cos^2 \alpha / 12 \quad (13)$$

$$I_{XYO} = L^3 \cos \alpha \sin \alpha / 12 \quad (14)$$

式中： α —直管元件轴线与 x 轴的夹角。

90° 弯头的固有线惯性矩和固有线惯性积按下式进行计算：

$$I_{XO} = I_{YO} = 0.149KR^3 \quad (15)$$

$$I_{XYO} = \pm 0.137KR^3 \quad (16)$$

式 (16) 中的符号按下列原则确定：如果由圆弧中心角顶点向弧端引出两根射线，若其方向与采用的坐标轴方向均相同或均相反时，固有线惯性积用负号；否则用正号。

计算管系对弹性中心坐标轴的线惯性矩和线惯性积，用以下的平行移轴公式进行计算：

$$I_{XS} = \sum_{i=1}^5 I_{X_i} - \sum_{i=1}^5 L_{eq_i} Y_S^2 \quad (17)$$

$$I_{YS} = \sum_{i=1}^5 I_{Y_i} - \sum_{i=1}^5 L_{eq_i} X_S^2 \quad (18)$$

$$I_{XYS} = \sum_{i=1}^5 I_{XY_i} - \sum_{i=1}^5 L_{eq_i} X_S Y_S \quad (19)$$

式中： I_{XS} 、 I_{YS} —元件对弹性中心坐标轴 x 、 y 的惯性矩 (m³)；

I_{XYS} —元件对弹性中心坐标轴 x 、 y 的惯性积 (m³)，将原始数据代入式 (5) ~ 式 (19) 中，得到表 2 中的计算数据；

I_{XYS} —元件对弹性中心坐标轴 x 、 y 的惯性矩 (m³)，

将原始数据代入式 (5) ~ 式 (19) 中, 得到表 2 中的计算数据。

2.4.6 管系末端复原力 F_X 、 F_Y 的计算

管系末端 (即固定点) 复原力按下式进行计算:

$$F_X = \frac{\Delta X_{YS} + \Delta Y_{XYS}}{I_{XS} I_{YS} - I_{XYS}^2} \times E_t I \times 10^{-8} \quad (20)$$

$$F_Y = \frac{\Delta Y_{XS} + \Delta X_{YXS}}{I_{XS} I_{YS} - I_{XYS}^2} \times E_t I \times 10^{-8} \quad (22)$$

式中: F_X 、 F_Y —因热胀或冷紧产生弹性变形, 所引起的在坐标轴 x 、 y 方向上的力 (N);

E_t —材料在计算温度下的弹性模量 (Pa);

I —管道断面固有惯性矩 (cm^4)。

将已知数据代入式 (20)、(21) 中得出:

$$F_X = -1056\text{N} \quad F_Y = -262\text{N}$$

当算出固定端作用力和弹性中心坐标后, 管段任一断面上的弯曲力矩可按下式确定:

$$M = (Y - Y_S)F_X - (X - X_S)F_Y = 262X - 1056Y + 1525.658 \quad (22)$$

式中: X 、 Y —任意管段断面坐标 (m);

M —管段任一断面弯曲力矩 (Nm)。

根据式 (22) 做出零力矩线图, 如图 2 所示。此时最大的弯矩产生于距此零力矩线最远的一点, 并由下式求得:

$$M_{\max} = Fh_{\max} \quad (23)$$

式中: $F = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2}$ —作用力的合力 (N);

$M_{\max}$ —断面最大合成力矩 (Nm);

$h_{\max}$ —最大力臂 (m)。

由零力矩线图可知, 管件 4 处有最大力臂 $h_{\max} = 1.509\text{m}$, 代入式 (22) 得出:

$$M_{\max} = -1642\text{Nm}$$

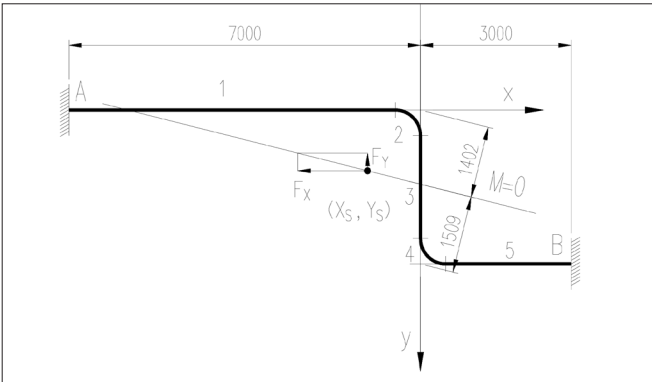


图 2 零力矩线图

表 2 计算数据表

元件 编号	直管长或弯曲半径	当量长度	重心坐标		静力矩				
	L	L_{eq}	X	Y	S_x	S_y			
	m	m	m	m	m ²	m ²			
1	6.771	6.771	-3.615	0.000	0.000	-24.477			
2	0.229	3.435	-0.083	0.083	0.285	-0.285			
3	2.542	2.542	0.000	1.500	3.813	0.000			
4	0.229	3.435	0.083	2.917	10.020	0.285			
5	2.771	2.771	1.615	3.000	8.313	4.475			
总和		18.954			22.431	-20.002			
$X_S = \sum_{i=1}^5 S_y / \sum_{i=1}^5 L_{eq} = -1.055 \quad Y_S = \sum_{i=1}^5 S_x / \sum_{i=1}^5 L_{eq} = 1.183$									
元件 编号	线惯性矩						线惯性积		
	$L_{eq} Y^2$	I_{XO}	I_X	$L_{eq} X^2$	I_{YO}	I_Y	$L_{eq} XY$	I_{XYO}	I_{XY}
	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³
1	0.000	0.000	0.000	88.485	25.869	114.354	0.000	0.000	0.000
2	0.024	0.017	0.041	0.024	0.017	0.041	-0.024	0.016	-0.008
3	5.720	1.369	7.089	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	29.228	0.017	29.245	0.024	0.017	0.041	0.832	0.016	0.848
5	24.939	0.000	24.939	7.227	1.773	9.000	13.425	0.000	13.425
总和			61.314			123.436			14.265
$I_{XS} = \sum_{i=1}^5 I_x - \sum_{i=1}^5 L_{eq} Y_S^2 = 34.788 \quad I_{YS} = \sum_{i=1}^5 I_y - \sum_{i=1}^5 L_{eq} X_S^2 = 122.323 \quad I_{XYS} = \sum_{i=1}^5 I_{xy} - \sum_{i=1}^5 L_{eq} X_S Y_S = 37.921$									

2.5 验算

根据相关标准 2 的要求, 由热胀引起的管系应力需符合下式要求:

$$\sigma_E = \frac{|iM_{20}|}{W} \leq 1.2\sigma_{20} + 0.2\sigma_t \quad (24)$$

式中: σ_E —热胀应力 (Pa);

M_{20} —按全补偿量与钢材热胀引起的合成力矩 (Nm)。

将已知数据代入式 (24) 中得, $\sigma_E = 58.1\text{MPa} < 12\sigma_{20} + 0.2\sigma_t = 180.6\text{MPa}$, 故管系的最危险断面处热胀应力合格。

3 结语

笔者另外通过专业的应力分析软件对该管系进行了受力分析, 得出固定点的复原力与本文计算结果较为相近, 且最大应力点也发生在管件 4 处。故采用弹性中心法分析计算平面内管道受力是可行、合理的。

与目前一些设计手册上给出的计算图表及简化计算公式相比, 手册上复原力的计算结果普遍偏大, 且手册上均没有给出最大应力点位置的确定方法, 无法确定整个管系的合理性。

参考文献:

[1] 赵廷元, 岳学文, 孙振安. 热力管道设计手册 [M]. 太原: 山西科学技术出版社, 1986.
[2] DL/T 5366-2006, 火力发电厂汽水管道应力计算技术规程 [S].
[3] 《动力管道设计手册》编写组. 动力管道设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.