

蒸汽管道中 π 型补偿器的应用

刘锐, 宋桢

中国昆仑工程有限公司沈阳分公司, 辽宁 沈阳 110167

DOI:10.61369/ERA.2026050014

摘 要 : 蒸汽管道是管道设计中最常见的管道之一, 也是石化装置中较为重要的管道之一, 其应力设计是否合理, 直接影响装置的运营安全和经济成本。通常, 蒸汽管道温度较高、管线较长, 于是在设计时需要考虑管线热膨胀。由于 π 型补偿器具有结构简单, 运行可靠, 经济实用等优点, 所以被广泛应用于实际管道设计中。下面以相关标准规范为基础, 对 π 型补偿器在蒸汽管道中的设计和应用列出了一些体会。

关 键 词 : 蒸汽管道; π 型补偿器; 石化装置

Application of π -type compensator in steam pipeline

Liu Rui, Song Shen

China Kunlun Contracting & Engineering Corporation Shenyang Company,
Shenyang, Liaoning 110167

Abstract : Steam pipeline is one of the most common pipelines in pipeline design, and also one of the most important pipelines in petrochemical plant. Whether the stress design is reasonable directly affects the safety of operation and the economic cost of the device. In general, the temperature of steam pipeline is higher and the pipeline is longer, so the thermal expansion of the pipeline needs to be considered in design. The π -type compensator is simple in construction and reliable in operation. It is the most common type of compensation in practical design. The design and application of π -type compensators in steam pipelines are listed below based on relevant standards and specifications.

Keywords : steam pipeline; π -type compensator; petrochemical plant

一、蒸汽管道的一般布置要求

(1) 在石化装置及炼油装置中, 蒸汽管道一般被架空敷设, 常布置在管廊的上层。由于其敷设长度一般较长, 且温度高、位移大, 因此需要在合适的位置设置补偿器。管道补偿器有 π 型补偿器(自然补偿)、波型补偿器、套管式补偿器和球形补偿器等。由于蒸汽管道具有压力较高, 易产生凝液的特点, 所以 π 型补偿器在蒸汽管道的设计中最为普及。

(2) 蒸汽支管应从蒸汽主管道的上部引出, 并按工艺要求设置切断阀, 且切断阀应水平设置以免产生凝液。

(3) 在要求严格的蒸汽支管上(如动力、加热及工艺管道), 不得再引出用于消防、吹扫等用途的蒸汽分支管道。

(4) 尽量避免在 π 型补偿器上及附近引出分支管道, 以免主管道位移过大而对分支管道造成破坏, 或者分支管道限制主管道的热膨胀。

(5) 饱和蒸汽管道进入装置时, 需要在装置侧边界的附近增设汽水分离设备, 并在汽水分离器下部设置输水装置。过热蒸汽一般可不设分水器。

(6) 在装置内布置的蒸汽管道, 特别是与泵等动设备相连接时, 需要通过应力分析校核管道柔性及设备管口的载荷;

(7) 当管廊上同时布置多根蒸汽管道时, π 型补偿器应集中设置, 且管径大、温度高的管线的 π 型补偿器应布置在外侧;

(8) 严禁使用波纹管膨胀节来增加工艺装置内蒸汽管道的柔性, 原因是波纹管膨胀节的价格昂贵且容易损坏^[1]。

国内常用的蒸汽系统压力见表1。

表1 国内常用的蒸汽系统的压力 Table 1 Pressure of steam system commonly used in China			
系统	蒸汽 (MPa)	排汽 (MPa)	用途
高压	10.0	4.0	动力、汽轮机、发电机
中压	4.0	1.0	动力、汽轮机、发电机
低压	1.0	0.3	动力、加热、吹扫
	0.3		加热、灭火

二、几种常用补偿器的比较

常用的管道补偿器有 π 型补偿器(自然补偿)、波型补偿器、套管式补偿器和球形补偿器^[2], 其优缺点及应用列于表2中。

作者简介: 刘锐(1985-), 男, 辽宁省抚顺市人, 职称: 工程师, 学历: 研究生, 邮箱: liurui10@cnpc.com.cn

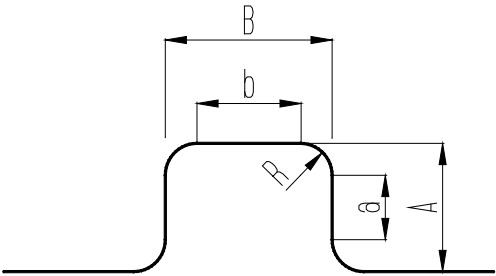
表2 常用管道补偿器的特点
Table 1 The characteristics of common pipe compensators

名称	优点	缺点	应用
π 型补偿器	结构简单, 安全可靠, 补偿能力好, 不需要维修	需要较大的安装空间	装置中热位移较大的管道
波型补偿器	承压能力好, 结构紧凑, 便于配管安装, 耐腐蚀性好	补偿能力有限	有多个方向热位移可串联安装; 安装空间受限的管道
套管式补偿器	补偿能力好, 结构简单, 占用空间小, 施工方便	易渗漏, 不适用于有径向位移的管道, 需要维修	主要用于直线管道补偿热位移; 铺设于地沟中的管道
球形补偿器	补偿能力好, 占用空间小, 流体阻力小, 施工方便	易渗漏, 易产生侧向位移	热力管道; 冶金设备等

三、π 型补偿器

π 型补偿器也被称为方形补偿器, 属于自然补偿。是利用管道自然弯曲的形状所具有的柔性以补偿器自身的热膨胀和端点位移的一种补偿形式。由于其结构简单、运行可靠、投资少等特点, 而被广泛采用。

π 型补偿器由4个90°弯头组成, 弯头半径 $R=1.5DN$, 补偿器两端直管自由长度不小于40倍管径长度^[3], 常见的 π 型补偿器有以下四种类型:



1型($b=2a$) 2型($b=a$) 3型($b=0.5a$) 4型($b=0$)

图1 π 型补偿器

Figure 1 The π-type compensator

π 型补偿器根据其空间结构不同又分为平面 π 型补偿器和立体 π 型补偿器, 由于蒸汽管道的 π 型补偿器多布置在管廊上, 为了便于管道布置, 立体 π 型补偿器的应用较为普遍, 见下图。

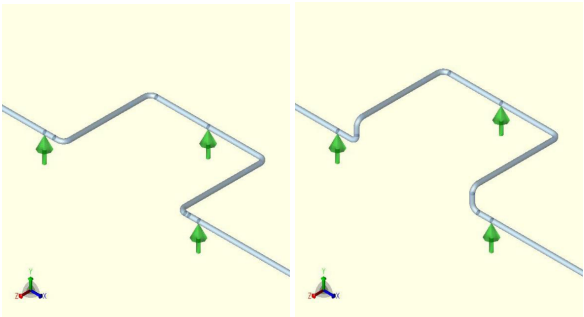


图2 平面 π 型补偿器 (左) 和立体 π 型补偿器 (右)

Figure 2 Plane π-type compensator (left) and stereoscopic π-type compensator (right)

四、管道热伸长量计算

如管道为直管, 由安装温度 $T_1(^{\circ}C)$ 到介质温度 $T_2(^{\circ}C)$ 受热后, 管道将沿着其轴线方向进行热膨胀, 管道的膨胀量可按以下公式计算:

$$\Delta L=L\cdot\alpha\cdot(T_2-T_1)$$
 (1)

式中 ΔL ——管道热伸长量, cm;

L ——计算管长, m;

α ——管道的线膨胀系数, $cm/(m\cdot^{\circ}C)$;

安装温度 T_1 一般设定为 $-5^{\circ}C$, 管道的线膨胀系数可通过《动力管道设计手册》表6-1 查询^[4]。

五、π 型补偿器在应用中的比较

为考察 π 型补偿器臂长和臂宽在实际应用中对补偿作用的影响, 本文运用 CAESAR II 软件, 建立蒸汽管道的模型, 在管道两端设置固定支架, 中间设置 π 型补偿器, 在不改变 π 型补偿器及管道总长度的前提下, 分析 π 型补偿器的变化对固定端受力的影响, 管道规格及介质工艺参数见下表。

表3 管线规格及工艺参数
Table 3 Pipeline specifications and process parameters

外径 × 壁厚	长度	材质	介质密度	设计温度 T_1	操作温度 T_2	设计压力 P
mm	m		Kg/m^3	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	MPa
219 × 8.18	90	A106 B	0.001	325	195	1.6

根据图1 中的描述, 设定 π 型补偿器的臂长为 A , 臂宽为 B , π 型补偿器的总长 $L=B+2A=18m$, 令 L 保持不变, T_1, T_2 温度下, 固定端受力随 B/A 改变的变化情况的见下表。

表4 π 型补偿器宽长比对固定端受力的影响
Table 4 The effect of the ratio of width to length of π-type compensator on the force at fixed end

B/A	温度 $/^{\circ}C$	FX/KN	FY/KN	FZ/KN	MX	MY	MZ
0.5	325	-12327	-1813	-25	117	306	-1815
	195	-9870	-1814	-5	66	132	-1816
0.75	325	-12569	-1812	-21	70	207	-1812
	195	-10188	-1813	-5	39	139	-1813
1	325	-13079	-1811	-18	34	135	-1811
	195	-10706	-1812	-4	12	144	-1812
1.25	325	-13908	-1811	-14	9	69	-1809
	195	-11082	-1811	-4	-16	145	-1810
1.5	325	-15086	-1810	-14	-13	64	-1808
	195	-11540	-1811	-4	-49	143	-1809
1.75	325	-16193	-1810	-10	-74	-12	-1808
	195	-12041	-1811	-5	-95	134	-1810
2	325	-17225	-1810	-7	-132	-99	-1807
	195	-12582	-1811	-6	-146	124	-1809

以 B/A 为横坐标, 固定端轴向 (X 方向) 受力 F 为纵坐标, 考察 π 型补偿器 B/A 的变化对其受力的影响, 绘制下图。

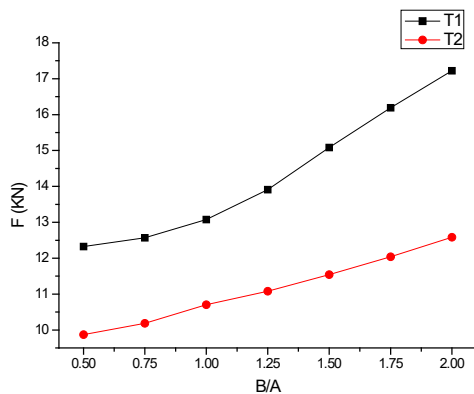


图3 π 型补偿器长宽比对固定端受力的影响

Figure 3 The effect of the ratio of length to width of π -type compensator on the force at fixed end

由图3可以看出，在保持管道总长度和 π 型补偿器总长度保持不变的情况下，固定端的轴向力 F 随着 B/A 的增大而增加，并

且随着温度的升高，增加趋势越发明显。由此可以看出， π 型补偿器的宽长比 B/A 越小，即臂长 A 越大，其补偿能力越好。但是在实际应用中，每个 π 型补偿器的补偿作用是有限的，因此需综合考虑管廊的安装空间、管道跨距、支撑条件及经济性等因素，合理设置的 π 型补偿器。

六、总结

(1) 在蒸汽管道中设置 π 型补偿器可降低固定端推力，同时为便于管道布置和支撑，立体 π 型补偿器的应用更常见；

(2) 在 π 型补偿器中发挥主要作用的是臂长，补偿器的臂长越长，其补偿能力就越好，因此应根据现场实际情况合理设置 π 型补偿器；

(3) 每个 π 型补偿器的补偿能力是有限的，在实际应用中，若管线膨胀量较大，单个补偿器无法满足需求，可增加补偿器数量。

参考文献

- [1] SH 3012-2011, 石油化工金属管道布置设计规范 [S]. 中国石化出版社, 2011: 11-12.
- [2] 宋元华. 蒸汽管道热应力分析及补偿装置的安装 [J]. 铜业工业, 2012 (4): 64-67.
- [3] 《动力管道设计手册》, 编写组编. 动力管道设计手册 [M]. 机械工业出版社, 2006: 446-447.
- [4] 彭荣杰. π 型补偿器的设计和应用 [J]. 广东化工, 2013 (8): 151-153.