



沧州力瑞管道设备有限公司 0317-8510072

无锡市金龙波纹补偿器厂

WXJL

波纹补偿器的设计与应用



企业微信订阅号



负责人微信号

无锡市金龙波纹补偿器厂

二零零五年



目录

1. 前言
2. 波纹补偿器的定义、类型及工作原理
 - 2.1 波纹补偿器定义
 - 2.2 波纹补偿器型式和工作原理
3. 波纹元件设计及波纹补偿器作用力计算公式
 - 3.1 无强 U 形波纹元件计算公式
 - 3.2 波纹补偿器位移及其作用力计算
4. 波纹补偿器在管系中的配置和应用
 - 4.1 波纹补偿器在简单管系中的配置
 - 4.2 波纹补偿器在管系中的应用示例
5. 补偿器设计与应用中的几个问题
6. 附图

补偿器的设计与应用

1. 前言

补偿器又称膨胀节，在管系中采用波纹补偿器可以在吸收系统压力的同时，吸收因温差引起的热膨胀，这种产品在冶金装置、炼油设备、化工设计，火电厂或核电站，供热和制冷系统，以及低温设备中获得了成功的应用。其典型的工作条件为：压力从真空至 6.4Mpa，温度从-200℃至 1350℃。波纹补偿器属于技术性很强的产品，对于在设施中所应用的每一个波纹管都必须全面考虑系统的工作特性，波纹管的设计特点和制做质量，以及安装、测试和运行规程。

与一般的管道元件不同，波纹管是用相当薄的材料制作而成的，以便使它具有足够的柔性，可以吸收在使用中预期出现的机械位移和热位移，也能起到吸振降噪的作用。在设计、制造、运输、安装和测试各个环节中，都必须注意这种产品的独特之处。一般说来，要使波纹补偿器成为高度安全可靠的装置，用户、设计者和制造厂家相互之间的充分了解是必不可少的。根据这个基本原则，本文准备向用户和设计人员介绍成功地对装有波纹补偿器的管系进行设计、选型和使用的要点。多年的经验表明，这些要求是行之有效的，供各位参考。

2. 波纹补偿器的定义，类型及工作原理

2.1 波纹补偿器的定义

由一个或多个波纹管及结构件组成，用来吸收由于热胀冷缩等原因引起的管道和设备尺寸变化的装置。波纹补偿器的类型很多，不同类型波纹管所吸收位移的方式和能力有较大差异。只有充分了解各种类型补偿器的结构特点、工作原理后，才能理解其选型和应用的方法，下面分别介绍各种波纹补偿器的结构特点及工作原理。

2.2 波纹补偿器的型式和工作原理

(1) 单式轴向型补偿器

由一个波纹管及结构件组成，主要用于吸收轴向位移而不能承受压力推力的波纹补偿器。其结构示意图如图 2.1 所示：

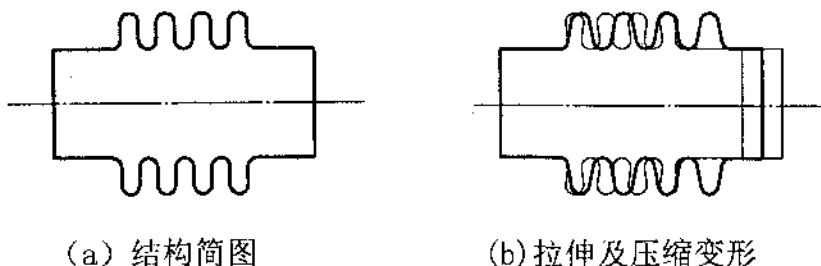
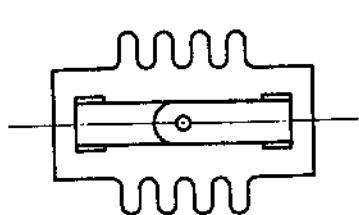


图 2.1 轴向型补偿器

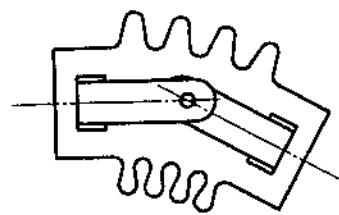
这种型式补偿器也可以用于吸收在管段上的三种基本位移，即轴向、径向和角向位移，但主要是轴向位移。

(2) 单式铰链型波纹补偿器

由一个波纹管及销轴、铰链板和立板等结构件组成，只能吸收一个平面内的角位移并能承受波纹管压力推力的补偿器。其结构示意图如图 2.2 所示：



(a) 结构简图



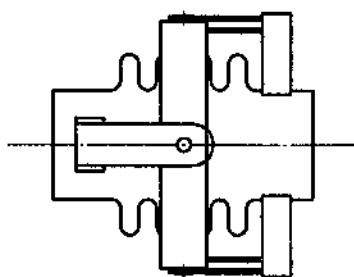
(b) 角变形

图 2.2 单式角各型波纹补偿器

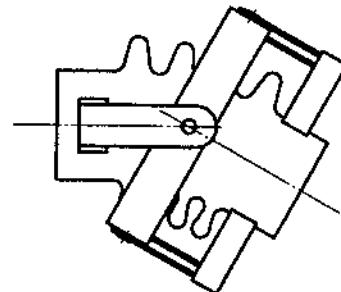
角向型波纹补偿器只能以两个或三个组合在一起使用才能恰当地发挥作用。其组合方式和计算方法在以后的章节中予以介绍。

(3) 单式万向铰链型波纹补偿器

由一个波纹管及销轴、铰链板、万向环和立板等结构件组成，能吸收任一平面内的角位移并能承受波纹管压力推力的波纹补偿器。结构示意图如图 2.3 所示：



(a) 结构简图

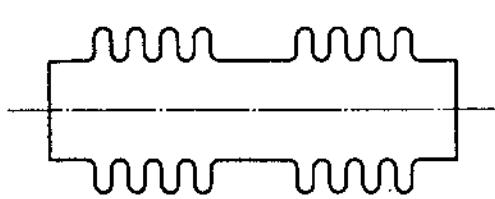


(b) 角变形

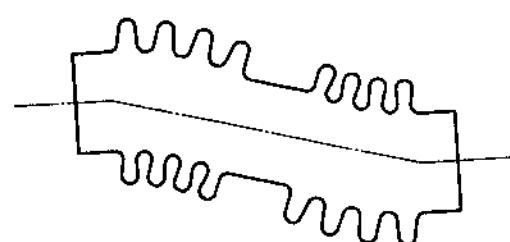
图 2.3 万向铰链型波纹补偿器

(4) 复式自由型波纹补偿器

由中间管所连接的两个波纹管及结构件组成，主要用于吸收轴向与横向组合位移而不能承受波纹管压力推力的补偿器，这种补偿器也能吸收角位移。如图 2.4 所示：



(a) 结构简图



(b) 组合变形

图 2.4 复式自由型波纹补偿器

(5) 复式拉杆型波纹补偿器

由中间管所连接的两个波纹管及拉杆、端板和球面与锥面垫圈等结构件组成，能吸收任一平面内的横向位移并能承受波纹管压力推力的膨胀节。如图 2.5 所示：

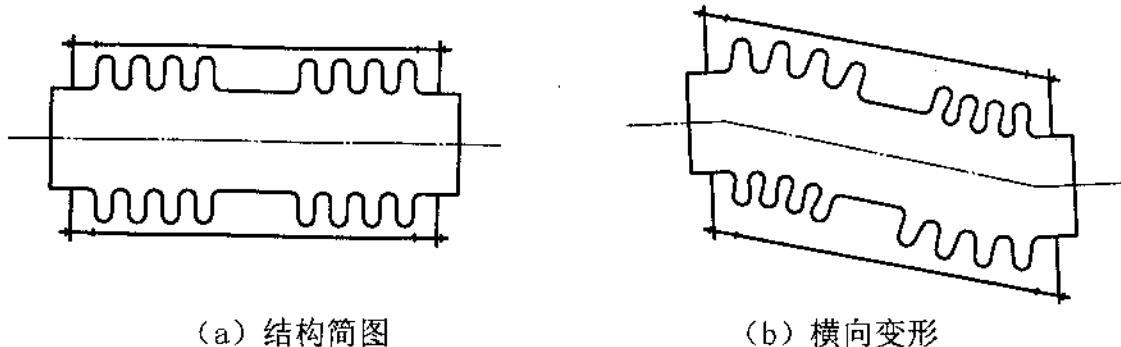


图 2.5 复式拉杆型波纹补偿器

(6) 复式铰链型波纹补偿器

由中间管所连接的两个波纹管及销轴、铰链板和立板等结构件组成，只能吸收一个平面内的横向位移并能承受波纹管压力推力的补偿器，这种补偿器端部可以在一个平面内转角，从而可吸收角向位移，与一个单式铰链型补偿器组合使用，能吸收平面内所有位移。如图 2.6 所示：

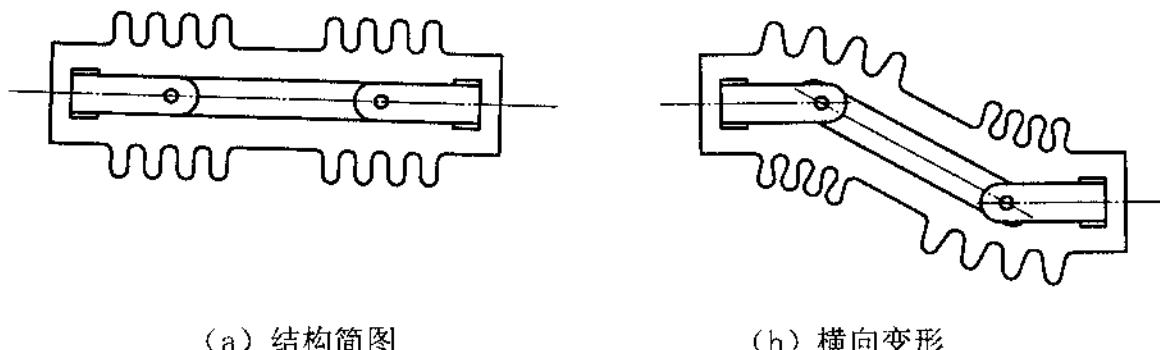
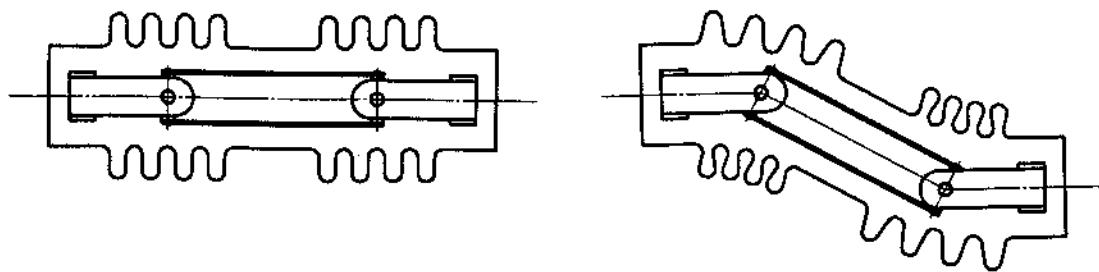


图 2.6 复式铰链型波纹补偿器

(7) 复式万向铰链型波纹补偿器

由中间管所连接的两上波纹管及十字销轴、铰链板和立板等结构件组成，能吸收任一平面内的横向位移并能承受波纹管压力推力的波纹补偿器。这种补偿器端部可以在任一平面内转动，从而吸收角向位移，可以与一个单式铰链型波纹补偿器结合使用，构成三铰链组合系统，能吸收空间位移。如图 2.7 所示：



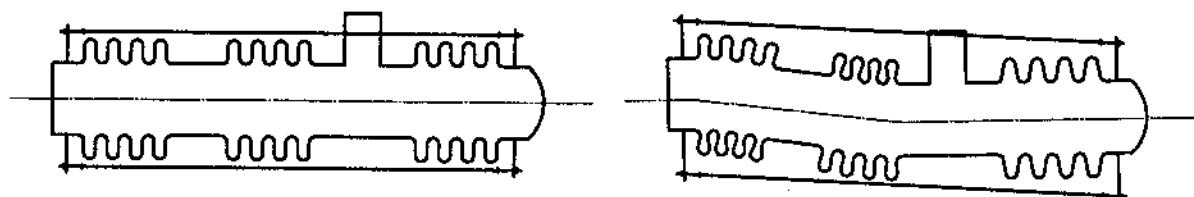
(a) 结构简图

(b) 横向变形

图 2.7 复式万向铰链型波纹补偿器

(8) 弯管压力平衡型波纹补偿器

由一个工作波纹管或中间管所连接的两个波纹管与一个平衡波纹管及弯头或三通、封头、拉杆、端板和球面与锥面垫圈等结构件组成，主要用于吸收轴向与横向位移并能平衡波纹管压力推力的波纹补偿器，如图 2.8 所示：



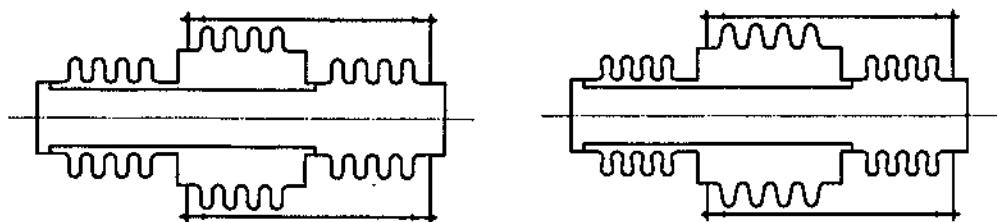
(a) 结构简图

(b) 组合变形

图 2.8 弯管压力平衡型波纹补偿器

(9) 直管压力平衡型波纹补偿器

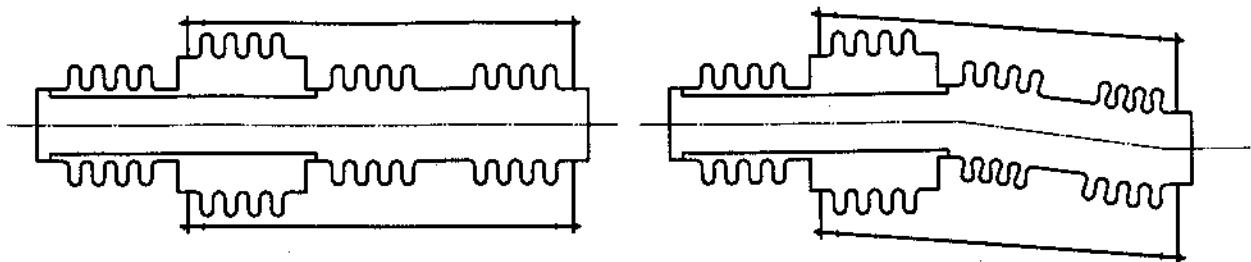
由位于两端的两个工作波纹管和位于中间的一个平衡波纹管及拉杆和端板等结构件组成，主要用于吸收轴向位移并能平衡波纹管压力推力的波纹补偿器。如果让一组工作波组成复式型波纹管，并在相应处拉杆端部设置球面、锥面垫圈，则这种波纹补偿器既能吸收轴向位移，也能吸收横向位移。如图 2.9、图 2.10 所示：



(a) 结构简图

(b) 轴向变形

图 2.9 直管压力平衡型波纹补偿器



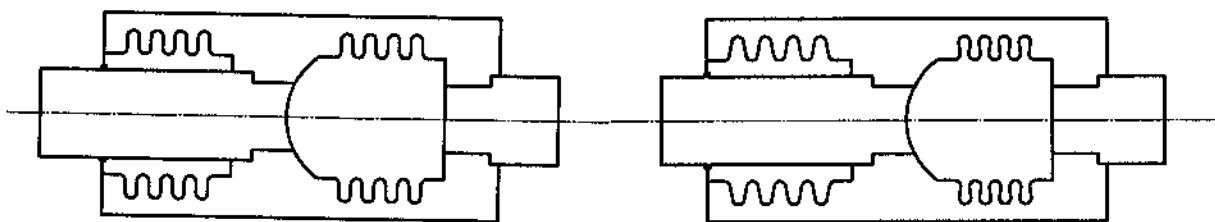
(a) 结构简图

(b) 组合变形

图 2.10 复式型直管压力平衡型波纹补偿器

(10) 旁通压力平衡型波纹补偿器

由一个工作波纹管与一个平衡波纹管及工作管、旁通管和相应结构件组成，主要用于吸收轴向位移并能平衡波纹管压力推力的波纹补偿器。与直管压力平衡型波纹补偿器相比较，其吸收位移功能一致，刚度要小三分之一以上，但流速造成的阻力损失较大。如图 2.11 所示：



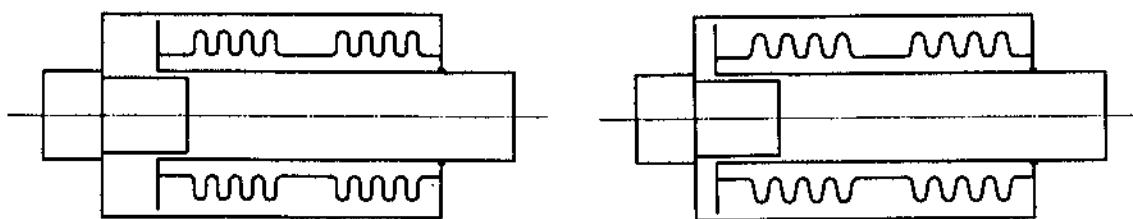
(a) 结构简图

(b) 轴向变形

图 2.11 旁通压力平衡型波纹补偿器

(11) 外压轴向型波纹补偿器

由承受外压的一组或多组波纹管及外管和端环等结构件组成，只能用于吸收轴各向位移而不能承受波纹管压力推力的波纹补偿器。这种波纹补偿器由于承受外压的作用，工作时波纹管处于拉伸状态，可以由多个波纹管串联使用而不会产生柱失稳，所以吸收轴向位移能力较大。如图 2.12 所示：



(a) 结构简图

(b) 轴向变形

图 2.12 外压轴向型波纹补偿器

(12) 轴向串式波纹补偿器

轴向串式补偿器是由两组波纹管和一个中间管及可与相邻管道、设备相接的端管、以及稳定用外套管（或稳定杆）等结构件组成的挠性部件。这种补偿器只能吸收轴向位移而不能承受压力推力。其轴向补偿能力比外压轴向型小，但比普通轴向型要大。稳定用套管（或稳定拉杆）主要用于防止波纹管工作时产生柱失稳，也可作为补偿器直埋时的外保护管。如图 2.13 所示：

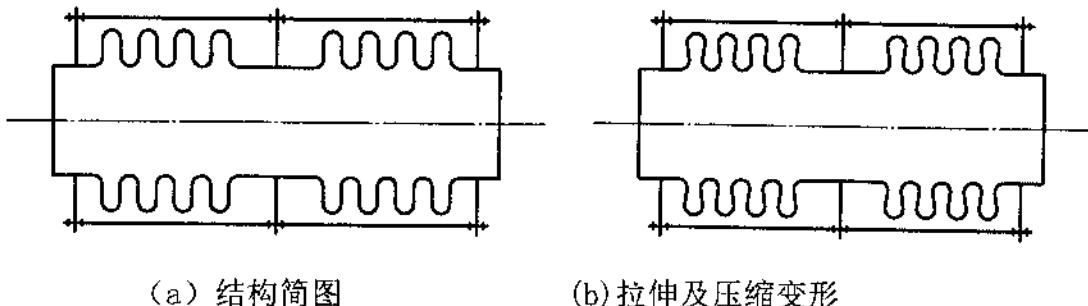


图 2.13 轴向串式波纹补偿器

以上介绍了十几中常用的波纹补偿器的结构形式，从各自的结构总图可以看出，其共同之处在于均是通过波纹管与接管相连，但不同的连接方式构成了不同的补偿器类型，它们吸收管道位移的能力和方式也有很大差别。下面几个章节分别介绍波纹元件的设计依据和不同类型波纹补偿器在管系中的应用以及固定支架推力的计算方法。

3. 波纹元件设计及波纹补偿器作用力计算公式

如果要一个补偿器安全可靠地发挥其预定的作用，就必须首先牢记补偿器是一种很具体的、很特定的产品，补偿器很少有互换性。事实上，几乎每一个补偿器产品都是为某个需要进行热补偿的管段定制的，由于许多设计条件相互制约，因此，必须向补偿器的制造厂商提供关于补偿器应用中要达到预定设计条件的全部确切资料。比如：通径、介质、压力、温度、位移、疲劳寿命等等，有了这些条件，根据标准中的计算公式就可以首先确定波纹元件的单波补偿量 e 和单波刚度 f_{w0} ，再由这些参数转换为各种类型波纹补偿器的总体轴向刚度、横向刚度、角向刚度、轴向补偿量、横向补偿量及角向补偿量。目前，我国已有自己的设计标准，这一标准基本等效采用美国《EJMA》标准，应该说美国波纹元件设计标准在世界上具有很大影响力，因此是世界大多数国家制定标准时的沿用依据。下面分别列出了无加强环型波纹元件的计算公式和作用力计算方法。

3. 1 无加强 U 形波纹管元件计算公式

3. 1. 1 波纹管结构及零部件名称如图 3.1 所示

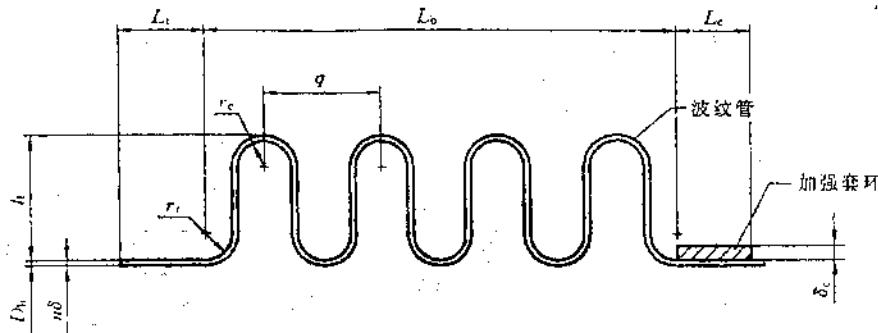


图 3.1 无加强 U 形波纹管元件

3.1.2 应力计算及其校核公式：

(1) 内压在波纹管直边段中所产生的环向膜应力：

$$\sigma_1 = \frac{p(D_b + n\delta)^2 L_b E_b k}{2[n\delta E_b L_b (D_b + n\delta) + \delta_c k E_c L_c D_c]} \leq C_{wb} [\sigma]_b$$

(2) 内压在套环中所产生的环向膜应力：

$$\sigma_2 = \frac{P(D_b + n\delta)^2 L_b E_b k}{2[n\delta E_b L_b (D_b + n\delta) + \delta_c k E_c L_c D_c]} \leq C_{wb} [\sigma]_b$$

(3) 内压在波纹管中所产生的环向膜应力：

$$\sigma_3 = \frac{PD_m}{2n\delta_m (0.571 + 2h/q)} \leq C_{mb} [\sigma]_b$$

(4) 内压在波纹管中所产生的子午向膜应力：

$$\sigma_4 = \frac{Ph}{2n\delta_m}$$

(5) 内压波纹管中所产生的子午向弯曲应力：

$$\sigma_5 = \frac{Ph^2 C_p}{2n\delta_m^2}$$

$$\sigma_3 + \sigma_4 \leq C_n (\sigma)_b$$

(6) 位移在波纹管中所产生的子午向膜应力：

$$\sigma_6 = \frac{E_b \delta_m^2 \ell}{2h^3 C_f}$$

(7) 位移在波纹管中所产生的子午向弯曲应力：

$$\sigma_7 = \frac{5E_b \delta_m \ell}{3h^2 C_d}$$

$$\sigma_1 = 0.7(\sigma_3 + \sigma_4) + \sigma_5 + \sigma_6$$

(8) 疲劳寿命及单波位移:

$$N_c = \left(\frac{12820}{C_t \sigma_t - 370} \right)^{3.4} \quad [N_c] = N_c / n_f$$

(9) 单波轴向刚度:

$$f_{uv} = \frac{1.7 D_m E_b' \delta_m^2 n}{h^3 C_f}$$

(10) 波纹管柱失稳计算公式:

$$P_{sc} = \begin{cases} \frac{0.34 \pi f_i u}{N^2 q} & \text{当 } L_b / D_b \geq C_2 \text{ 时} \\ \frac{0.58 A_c \sigma_{0.2}'}{D_b q} \left(1 - \frac{0.6 L_b}{C_2 D_b}\right) & \text{当 } L_b / D_b < C_2 \text{ 时} \end{cases}$$

(11) 波纹管平面失稳计算公式:

$$P_{si} = \frac{1.4 n \delta_m^2 \sigma_{0.2}'}{h^2 C_p}$$

(12) 扭转剪应力及扭转角:

$$\tau = \frac{2000 T}{\pi n \delta D_b^2} \leq 0.2 [\sigma]_p'$$

$$\Phi = \frac{4000 T L d N}{\pi n \delta G D_b^3}$$

从上述波纹管的设计公式中可以看出, 有 6 大应力 (σ_i) 参数需要计算, 其中, $\sigma_1 \sim \sigma_4$ 与工作压力有关, 需满足工作状态下的强度指标要求, $\sigma_5 \sim \sigma_6$ 与工作位移 (e) 有关, 但不作强度要求。这些应力参数与波形参数、材料性能、工作温度、工作压力及通径和壁厚等基本技术条件相关。 $\sigma_3 \sim \sigma_6$ 所构成的总应力 σ_t 与疲劳统计曲线 ($N_c \sim \sigma_t$) 有直接关系。通过 $N_c \sim \sigma_t$ 统计曲线可确定给定疲劳寿命 N_c 条件下的单波纹补偿量 (e) 要求。规范中规定, 许用疲劳寿命 (N_e) 与计算疲劳寿命 N_c 之比有 10 倍左右的安全系数 n_r , 这是解决数据离散度的重要参数。工程上通常所给定的 1000 次或 3000 次疲劳寿命系指许用疲劳寿命 (N_e), 参与计算时需乘以系数 $n_r \approx 10$ 。

对于许用疲劳寿命 (N_e) 的确定问题, 工程上通常假定 (N_e) 为 1000 次或 3000 次, 这是不确切的, 但已具有多年的使用经验。对 (N_e) 的确定, 应该根据所设计的

产品在正常工作条件下和在所使用的年限内，统计各种压力和温度的波动幅值和次数，并换算成相应的疲劳次数 N_i ，然后根据疲劳累计损伤理论所给出的经验公式 $\sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1$ 来最终确定许用疲劳寿命 (N_e) 。事实上，这种确定也是近似的。

上述公式中可以看出，波纹管的设计除满足上述强度指标和疲劳寿命外，还需进行波纹管的稳定性及抗扭能力计算，在给定的压力条件和波形参数情况下，波数是控制柱失稳的主要参数，因此，不能仅靠无限制的增加波数来增加补偿量。如果增加波高来增加位移，也是不行的，过大波高易造成波纹管的平面稳定性问题，规范中对此也有控制指标。事实上，对波纹管的设计，规范中的规定是很细致的，也是很严格的，这是波纹补偿器大量成功用于工程的重要因素。

3.2 波纹补偿器位移及其作用力计算

3.2.1 各类补偿器的单波位移

(1) 轴向位移 X 引起的单波轴向位移：

$$e_x = \begin{cases} \frac{X}{N} & (\text{单式波纹管}) \\ \frac{X}{2N} & (\text{复式波纹管}) \end{cases}$$

N 为一个波纹管的波数。

(2) 横向位移 Y 引起的单波最大当量轴向位移：

$$e_y = \begin{cases} \frac{3D_m y}{N(L_b \pm x)} & (\text{单式波纹管}) \\ \frac{K_u D_m y}{N(L_u - L_h \pm x/2)} & (\text{复式波纹管}) \end{cases}$$

(3) 角位移 θ 引起的单波当量轴向位移：

$$e_\theta = \frac{\pi \theta D_m}{360N}$$

当波纹管同时承受几种位移时，其单波总的当量轴向位移（矢量和）：

$$e = e_x + e_y + e_\theta \leq (e)$$

3.2.2 各类补偿器的整体刚度

(1) 轴向刚度:

$$K_x = \begin{cases} \frac{f_{iu}}{N} & (\text{单式波纹管}) \\ \frac{f_{iu}}{2N} & (\text{复式波纹管}) \end{cases}$$

(2) 横向刚度:

$$K_y = \begin{cases} \frac{1.5 D_m^2 f_{iu}}{N(L_b \pm x)^2} & (\text{单式波纹管}) \\ \frac{K_u D_m^2 f_{iu}}{4NL_u(L_u - L_b \pm x/2)} & (\text{复式波纹管}) \end{cases}$$

(3) 角向刚度:

$$K_\theta = \frac{\pi D_m^2 f_{iu}}{1.44 \times 10^6 N}$$

(4) 扭转刚度:

$$k_t = \frac{\pi^2 G_n \delta D_b^2}{7.2 \times 10^5 N L_d}$$

3.2.3 波纹管压力推力、位移反力和位移反力矩:

(1) 波纹管压力推力(盲板力):

$$F_p = \frac{\pi D_m^2}{4} \cdot P$$

(2) 轴向位移反力:

$$F_x = k_x \cdot x$$

(3) 横向位移:

$$F_y = K_y \cdot y$$

(4) 横向位移反力矩:

$$M_y = \frac{f_{iu} D_m \ell y}{4000}$$

(5) 角位移反力矩:

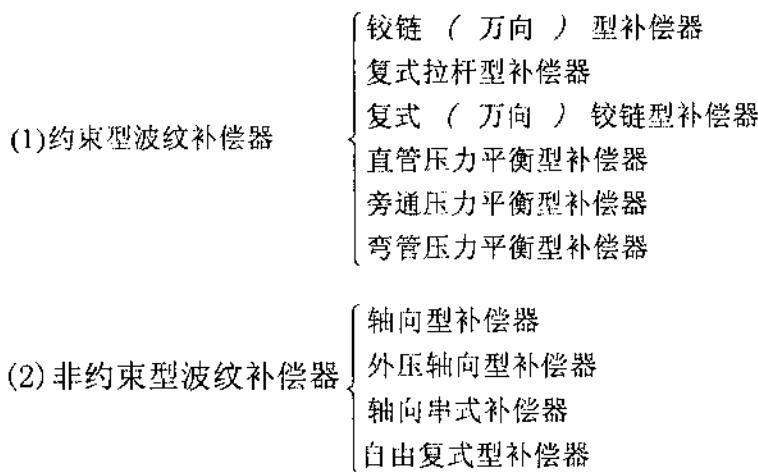
$$M_\theta = K_\theta \cdot \theta$$

(6) 扭转反力矩:

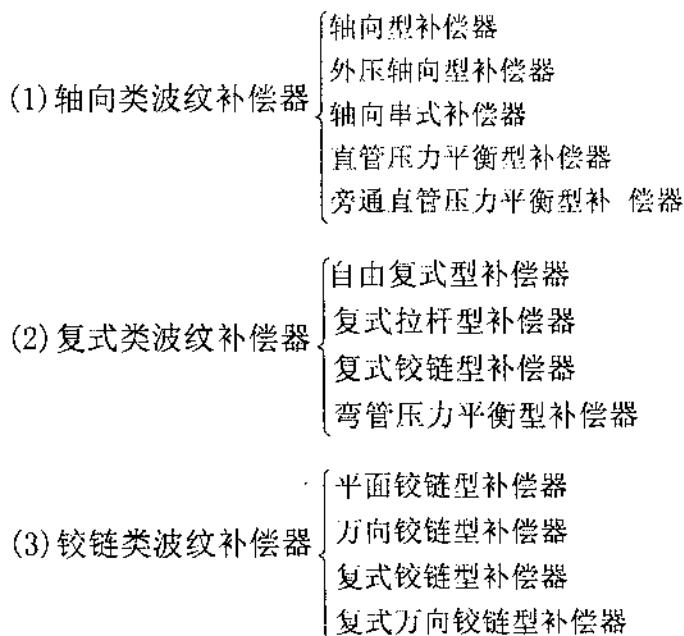
$$T = \frac{180\Phi K_t}{\pi}$$

4. 波纹补偿器在管系中的配置和应用

前一章节介绍了波纹元件的设计公式和基本作用力计算，第二节介绍了波纹补偿器的种类和结构形式，那么，这么多种类补偿器在管系中是如何应用的呢？要介绍各种补偿器在管系中的应用和推力计算方法，首先我们将波纹补偿器进行分类。有按补偿器能否承受压力推力来分类的，也有按在管系中的使用特点来分类。如果按前一种原则分类，则第二节介绍的十几种补偿器可分为两类，即约束性（能承受压力推力）补偿器和非约束型（不能承受压力推力）补偿器。结果如下：



如果按使用特点分类，则补偿器可简单分为三类，即轴向类波纹补偿器，复式类波纹补偿器和铰链类波纹补偿器。结果如下：



为便于说明补偿器在管系中的配置情况和推力计算情况，这里，我们以补偿器的

使用特点来分类说明。

4.1 波纹补偿器在简单管系中的配置

本节我们准备介绍轴向类，复式类及铰链类波纹补偿器在简单管系中的配置及推力计算情况。这里先将各类波纹补偿器和管架名称符号予以说明，如下表所示。

表 1、补偿器和支架名称及符号

1. 补偿器结构形式及管架

	单式补偿器		万向铰链型补偿器
	带连杆的单式补偿器		四连杆万能型补偿器
	带中间固定支架的复式补偿器		主固定支架
	带通风连杆的复式拉杆型补偿器		导向主固定支架
	带短连杆的万能式补偿器		中间固定支架 (次固定支架)
	弯管压力平衡型补偿器		直线导向支架
	万能式弯管压力平衡型补偿器		带导向支架的导向中间固定支架
	直管压力平衡型补偿器		平面可调导向支架
	铰链补偿器		弹簧吊架

2. 管系管架名称、符号

名称	主固定管架	次固定管架	导向管架	平面托架	平面可调导向管架	定向主固定管架	定向次固定管架	弹簧吊架
符号								

4.1.1 轴向类波纹补偿器的配置

上节已介绍了轴向类波纹补偿器的种类，这类补偿器通常用于直管段上。主要吸收轴向位移，也可吸收小量横向位移和角位移，如果需要综合补偿，必须进行核算方能保证所设计的许用疲劳寿命。轴向类补偿器的典型布置图如图 4.1 所示：

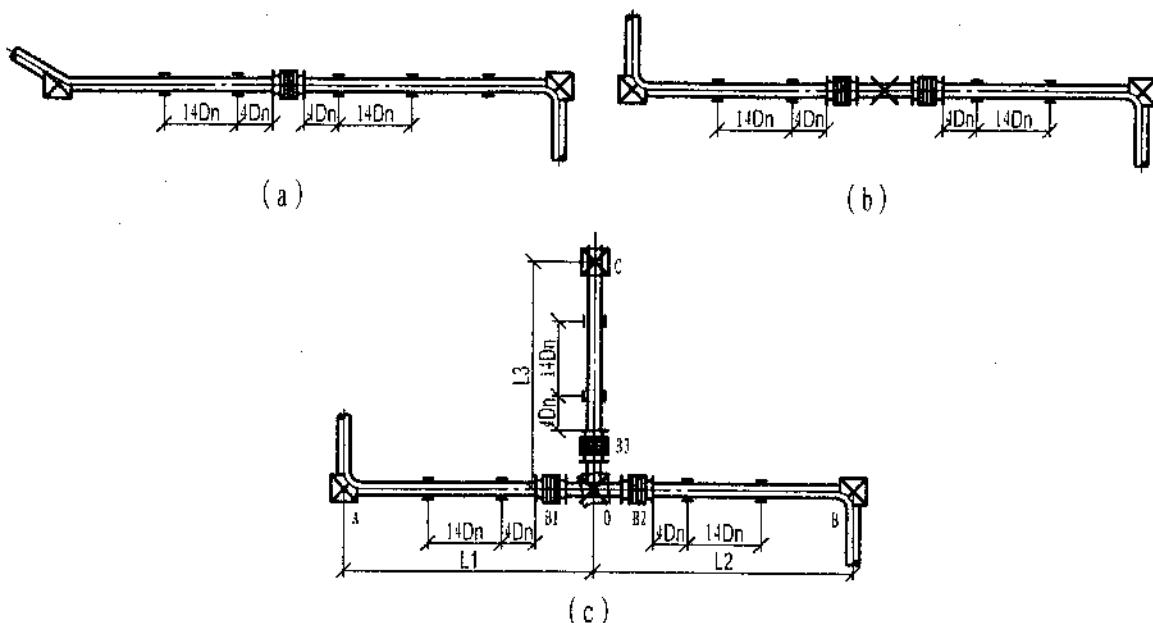


图4.1 轴向类补偿器的配置图

图 4.1(a)、(b)、(c) 是轴向类波纹补偿器的典型配置图，在各补偿器的位置处可以是普通轴向型，外压轴向型，轴向串式补偿器，也可以是直管压力平衡型补偿器和旁通压力平衡型补偿器，如果是压力平衡型补偿器，则图示的主固定管架改为次固定支架。应该选用哪种补偿器，应根据补偿量，管道直径及介质压力情况确定，支架设计时应考虑补偿器邻近的第一个导向支架与补偿器间距离为 $4D_n$ ，第二与第一导向支架间距为 $14D_n$ ，其余可按正常管道支架设计。

对于其推力计算，我们以图 4.1(c) 为例进行说明。假定该管道和介质每米重量为 M ，管道波纹管平均直径为 D_m ，介质压力为 P ，支架摩擦系数为 μ ，轴向型补偿器 B_1 、 B_2 和 B_3 的补偿量分别为 X_1 、 X_2 、 X_3 ，其轴向刚度分别为 K_{x1} 、 K_{x2} 、和 K_{x3} 。则对各固定支架的矢量和为：

$$\text{固定支架 A: } F_x = - \left(K_{x1} \cdot X_1 + L_1 M \mu + \frac{\pi D_m^2}{4} P \right)$$

$$\text{固定支架 B: } F_y = K_{x2} \cdot X_2 + L_2 M \mu + \frac{\pi D_m^2}{4} P$$

$$\text{固定支架 C: } F_x = K_{x3} \cdot X_3 + L_3 M \mu + \frac{\pi D_m^2}{4} P$$

$$\text{固定支架 0: } F_x = K_{x_3} \cdot x_3 + L_3 M \mu - 0.7(K_{x_1} \cdot X_1 + L_1 M \mu)$$

$$F_y = -\left(K_{x_2} \cdot X_2 + \frac{\pi D_m^2}{4} P \right)$$

式中“—”号表示支架所受拉力与座标正向相反。

如果图 4.1(C)不是配置的无约束轴向型波纹管，而是配置压力平衡型补偿器，则所算推力中，仅去掉第三项压力推力(盲板力)即可。

4.1.2 复式类波纹补偿器的配置

复式类补偿器以吸收横向位移为主，但自由复式和弯管压力平衡型补偿器可以吸收轴向位移，其典型布置图如图 4.2 所示

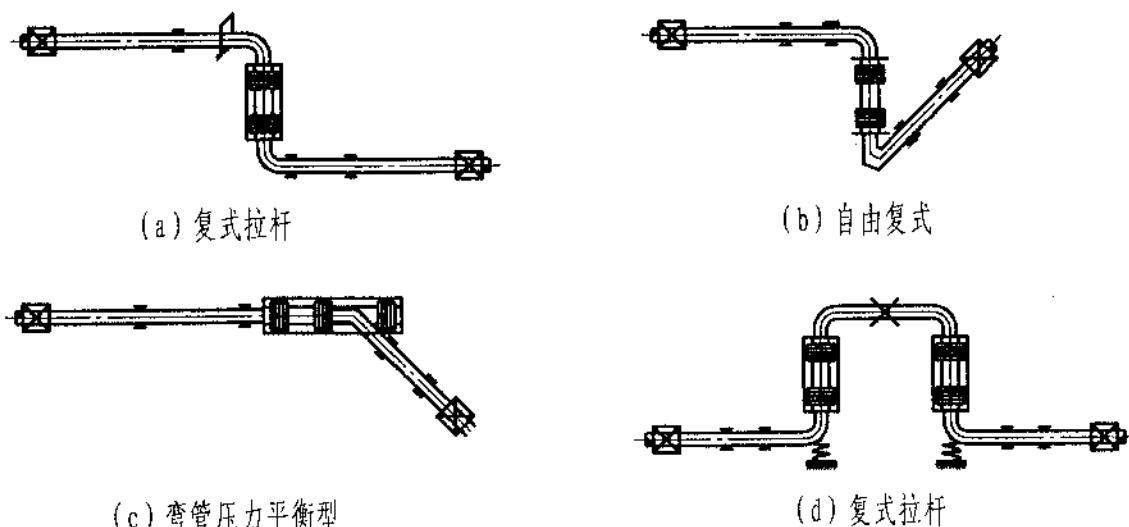


图4.2 复式类补偿器的配置

当主要是横向位移，工作压力又比较高时，通常配置复式拉杆型补偿器，也可配置复式铰链(复式万向铰链)补偿器，图(a)和(d)所示；如果包括轴向位移，压力又较高，则配置弯管压力平衡型补偿器，如图(c)所示；管有两种位移存在，但工作压力很低，则可配置自由复式型补偿器，如图(d)所示。对于推力计算，与轴向型的方式相同，其弹性反力由波纹管的刚度和所补偿的位移确定，即 $F=Ky$ 。对计算摩擦力时要考虑的是固定支架到补偿器之间管段重量所产生的摩擦力，如果为自由复式型补偿器，还应考虑盲板力的作用，还要说明的是，复式补偿器的波纹管之间的中间管越长，能补偿的横向位移就越大，若两个弯头不在同一平面内时，其补偿量的计算应采用矢量和的方法。

4.1.3 铰链类波纹补偿器的配置

铰链类波纹补偿器主要吸收角向位移，铰链板及销轴能承受压力推力(盲板力)，因此固定支架不需考虑盲板力作用问题，该补偿器不能单独使用，通常由两个或两个组合在一起使用，图 4.3 为铰链型补偿器的典型配置图。

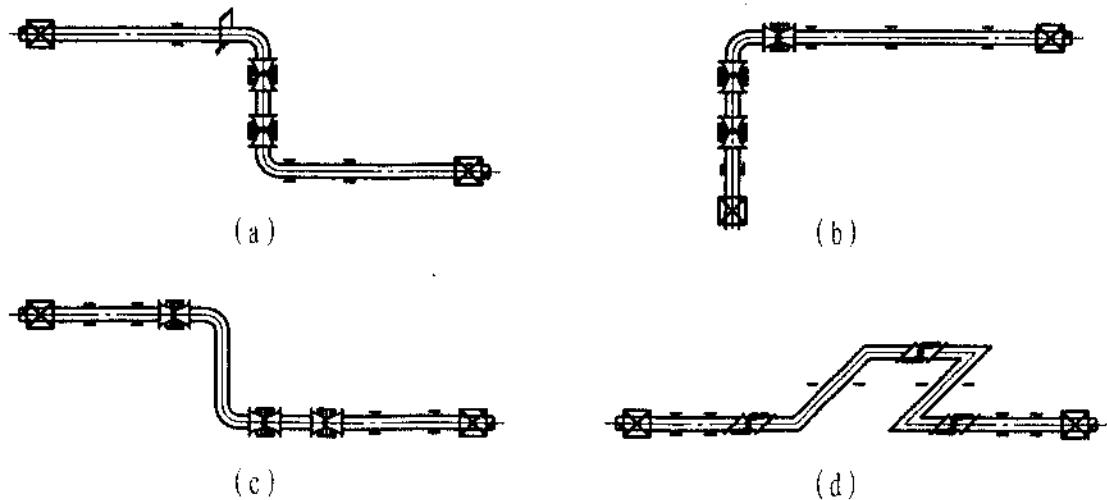


图4.3 铰链类补偿器的配置

由于铰链型补偿器为组合使用，其配置方式很多，一个单式铰链型可以与一个复式（或复式万向）铰链型配合使用，也可以与一个或两个单式（或单式万向）铰链型配合使用，组合使用时，其相互间的安装位置对补偿器的补偿能力和固定支架弹性反力影响很大，因此，应按计算程序确定其相互间的安装位置。对其弹性反力计算，不能简单按波纹管的角向刚度和角位移来确定，还应考虑相互间的相对位置。计算方法和公式较为复杂，这里不再说明。如有必要我们可提供计算程序。

4.2 波纹补偿器在管系中的应用示例

上节给出了简单管系波纹补偿器的配置情况，事实上，不论管系多么复杂，都可以通过固定管架将其分割为简单管系，在配置补偿器后分别计算出各管段固定支架受力情况，然后进行矢量迭加即可计算出各固定支架构力。附图中给出了各种管系波纹补偿器的配置情况，这些管系配置大多数在工程式中得到广泛应用。

5. 补偿器设计与应用中的几个问题

5.1 疲劳寿命

波纹管的工作能力由承压能力和补偿能力构成，而疲劳性能则是这两种能力的全面反映。

关于疲劳寿命的说法很多，选用补偿器时一定要弄清不同样本中关于疲劳寿命的说明。

实际上，EJMA 和 DB/T12777-1999 标准中关于疲劳寿命只有两个概念。第一个概念就是平均疲劳寿命 N_c ，这是由实验数据的拟合曲线得来的。但是，由于制造厂家的不同，表面粗糙度的不同，材料性能的差异以及试验设备等的差异，疲劳寿命的实测值有较大的分散性。所以保证产品安全可靠工作的疲劳寿命必须要在平均疲劳寿命 N_c 的基础上除以一个适当的安全系数来得到，即所谓的许用疲劳寿命 [N_c]。选用产品时必须明确产品的许用疲劳寿命，特别是在样本中只给出疲劳寿命或对应疲劳寿命的情况下，更应明确这个问题，只有在同一许用疲劳寿命的基础上，才能比较补偿量的大小。

5.2 补偿量

补偿量的大小决定了波纹管的应力范围，应力范围的大小直接关系到疲劳寿命的多少。这是因为补偿器的疲劳寿命是由内压和位移引起的应力变化范围之和的函数。样本中各型号的补偿量指的是产品在指定许用疲劳寿命下产品的最大变形能力。波纹管完整的一次循环寿命就是在波纹管从初始位置变形到最大位移后再返回到初始位置。波纹管正向和反向变形之和才是波纹管的最大位移范围。这个位移范围不能超过波纹管的最大变形能力。若产品的额定补偿量为 100mm，则产品的变形范围可以从 -100mm 变到 0 或从 0 变到 100mm，也可以从 -50mm 变到 +50mm，一定不能从 -100mm 变到 +100mm。

有些样本中列出的补偿量为±20mm，选用时应弄清这种写法的真正含义，即其变形能力是在+20mm 到-20mm 之间，还是在-20mm 到 0 或是 0 到+20mm。

5.3 多层波纹管的设计与应用

无论是出于安全的考虑还是出于减小推力的原因，越来越多地采用多层设计的波纹管。

多层波纹管有多种用途，与单层波纹管相比具有刚度小、补偿量大、安全性好等优点，但也不能片面强调多层波纹管的好处，应该结合具体的工作条件和制作成本来确定是否选用多层结构形式的波纹管。

当多层波纹管的总厚度与单层波纹管厚度一致时，采用多层结构设计的波纹管有利的一面是：波纹管的疲劳寿命有所提高，刚度有所降低，弹性反力有所下降。不利的一面是承压能力下降，柱稳定性和平面稳定性降低，制作工艺复杂、成本提高。

出于腐蚀因素的考虑，希望使用不同的材料制作波纹管的内层和外层，以适应管道内外不同的环境。在进行波纹管设计时，可以用较高级的材料作内层来防止腐蚀的发生，其它各层则可采用价格相对低廉的材料制作，内层防腐，外层保证强度，以降低补偿器的成本。

可以在层间的环形空间内对泄漏进行监测，以便及时发现内层是否有破坏，避免系统意外停车，造成损失。

多层波纹管通常使用在：①有腐蚀介质的场合，如冶金行业的煤气管道、热风管道、烟气管道等。②需要降低波纹管刚度和弹性反力的场合，如高架的管道。③需要提高设计裕度的场合。

5.4 预变位和冷紧

管道变形在补偿器给定的许用补偿范围内时，补偿器是否预变位并不影响补偿器的补偿量或寿命。补偿器的预变位不能增大补偿量。当补偿器变形后产生的位移反力较大时，可以采用预变位的方法达到减小设备或管道支架所受载荷的目的。轴向型补偿器的预变位可在补偿器制造完成后由补偿器制造厂家进行，其它形式补偿器的预变位通常在安装现场进行，即所谓的冷紧。冷紧的方法是预先在管道上预留等于冷紧量的间隙，待补偿器一端与管道连接固定并将运输拉杆拆除后，将补偿器朝向热变形相反的方向变形，填满预留间隙后再将补偿器与管道连接。采用 50%变形量的冷紧，可使设备或管道支架受到的补偿器变形反力减小一半。

5.5 管道支架的设置

固定支架分为主固定支架和次固定支架。主固定支架要承受补偿器产生的压力推力(盲板力)、补偿器变形反力、管道摩擦力、风载、重量等载荷以及它们产生的力矩等。而次固定支架则只要承担除压力推力以外的其它力的作用。

在设有轴向型补偿器的管段中，管道的拐弯处、阀门、变径、分支管和盲端等地方均应设置主固定支架。补偿器产生的压力推力为 $F = P A$, A 为波纹管的有效面积, P 为介质压力。管径越大, 即使压力不高, 压力推力也会很大; 若管径不大, 但压力较高, 压力推力也会很大。因此压力推力在管道支架设置时是不能疏忽的。若轴向型补偿器两端连接有设备或容器时, 这些容器和设备必须考虑此压力推力的作用。在特殊情况下, 也可使用定向固定支架。

另外, 在管道的拐弯处, 主固定支架还应当考虑流体产生的离心力的作用。

导向支架的设置对轴向型补偿器的使用尤为重要, 必须按照样本或使用手册进行设置。

5.6 波纹管的材料选用

波纹管材料的选用主要取决于波纹管的工作条件、工作环境和经济性。

金属波纹管多用奥氏体不锈钢薄板制造, 管道用波纹管的厚度一般在 0.4~3mm。这是因为波纹管在压力和位移作用下, 应力水平相当高, 波峰和波谷部分基本上处在塑性范围内工作, 如果处于腐蚀环境, 则高应力部位是很危险的。若壁厚太厚, 在同样位移作用下波纹管的应力反而会升高, 波纹管材料更加容易产生腐蚀作用, 所以, 波纹管宜选用较薄的耐蚀材料。

常用的奥氏体不锈钢有 304, 304L, 316, 316L, 321 等, 这些材料在一般的工况条件下, 都具有优良的耐蚀性, 适用于很多行业。波纹管常用材料的化学成分见表 1, 机械性能见表 2。表 3 为各种介质条件下波纹管的推荐材料。

管道补偿器通常多选用 SUS316L, SUS304 不锈钢, 当温度大于 600℃, 则多用镍基合金、钴基合金, 但其价格很高。300 系列不锈钢也可用于高温环境, 如 SUS316、SUS316L 可用于 450~600℃, SUS321 可用于 450~650℃, 对高温腐蚀环境可选用 Incoloy800H 或 Inconel600, 625。

表 1 波纹管常用材料的化学成分

牌号	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S
SUS304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	8.00-10.50	18.00-20.00	—	≤0.045	≤0.03
SUS304L	≤0.03	≤1.00	≤2.00	9.00-13.00	18.00-20.00	—	≤0.045	≤0.03
SUS316	≤0.08	≤1.00	≤2.00	10.00-14.00	16.00-18.00	2.00-3.00	≤0.045	≤0.03
SUS316L	≤0.03	≤1.00	≤2.00	12.00-15.00	16.00-18.00	2.00-3.00	≤0.045	≤0.03
SUS321	≤0.08	≤1.00	≤2.00	9.00-13.00	17.00-20.00	—	≤0.045	≤0.03

表 2 波纹管常用材料的机械性能

牌 号	固熔处理温度 ℃	拉 伸			硬 度		
		$\sigma_{0.2}$, MPa	σ_b , MPa	$\delta 5$, %	HB	HRB	HV
SUS304	1010-1150	≥206	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200
SUS304L		≥177	≥481				
SUS316		≥206	≥520				
SUS316L		≥177	≥481				
SUS321	920-1150	≥206	≥520				

表 3 各种介质条件下波纹管的推荐材料

介质	推荐材料	介质	推荐材料
水	SUS316,SUS304	煤气	SUS316L
海水	Incoloy825	烟气	SUS316L
蒸汽	SUS316L,SUS316	空气	SUS304
原油	SUS316L	氧气	SUS316L
轻质油	SUS316L, SUS316	氮气	SUS316L
重油	SUS316, SUS304	焦炉气	SUS316L, SUS316
低温锅炉气	SUS316L	炼油厂催化裂化 高温装置	Inconel600,625
高温锅炉气	Incoloy825,SUS316L		Incoloy800H,SUS321

对低温低压腐蚀环境和海水环境，亦可用含铜镍合金材料 B30、B10。

近年，由铁素体与奥氏体双相混合的双相不锈钢的应用也日趋广泛，这种材料具有较好的耐应力腐蚀和晶间腐蚀的性能。

5.7 固熔处理

波纹管的成形过程，是其基材产生塑性大变形的过程，它使结构材料（通常为奥氏体不锈钢）经历了塑性范围的加载与卸载。因此结构材料的性能（主要是指屈服强度）发生了很大的变化，这就是所谓的硬化现象。一般地，波纹管成形完成后，材料的屈服强度会成倍地提高。

虽然 18-8 系列不锈钢具有优异的成型性、较高的疲劳强度、高温强度和耐多种腐蚀的能力，被大量地用于制造波纹管，并且应用得十分成功。但人们也发现应力腐蚀或晶间腐蚀对 18-8 系列不锈钢的破坏问题还是大量存在的。为了克服上述两类腐蚀，常用的方法有两种：选择新型的高镍波纹管材料（如 Incolloy800, Inconel625 等）或对成型后的波纹管进行固溶处理。固溶处理后的波纹管材料晶粒细化、组织单一，可消除成型应力，提高耐蚀性能。固溶处理后，应进行酸洗、钝化。

研究表明，固溶处理后的波纹管有以下几个特点：

①固溶处理后的波纹管弹性初始刚度变化并不大，但波纹管弹性工作范围与成形态波纹管相比明显减小。这种差异，有利于改善管道支架的受力情况。

②固溶处理后的波纹管承压能力大幅度下降，通常只有成型态波纹管的一半左右。因此在进行波纹管设计时，需要增加波纹管的厚度，保证波纹管的柱稳定性和平面稳定性。

③固溶处理对波纹管的疲劳寿命影响较小，只要充分考虑波纹管承压能力的减小量，成型态波纹管的疲劳寿命计算公式可用于固溶态波纹管的寿命计算。

④固溶处理只能消除波纹管成形过程中和焊接过程中产生的残余应力，无法消除波纹管吸收位移时由变形产生的局部应力，因此不能用固溶处理的方法来消除波纹管的应力腐蚀问题。

5.8 腐蚀问题

出现腐蚀会显著缩短补偿器的工作寿命。由于补偿器在设计上和使用中所具有的特点，某些条件虽然不会对用同样材料制成的管道和管件造成影响，却会使补偿器遭到腐蚀而失效。

补偿器在使用中最常见的腐蚀类型有以下几种：①应力腐蚀。表现为裂纹，是在应力和腐蚀环境同时作用的产物。②晶间腐蚀。其特点是沿金属晶粒的边界进行侵蚀。③点蚀。金属材料上的局部腐蚀。④一般性腐蚀。即有规律地逐步将金属腐蚀掉。⑤磨蚀。由液体或气体（含尘）介质冲击材料表面所致。⑥高温氧化。在热气中、排气管道中最为常见。

虽然有时需要对奥氏体不锈钢制作的管件进行热处理（通常所说的固熔处理），以增强其抵抗腐蚀的能力，但对波纹管一般不这样作。补偿器中的波纹管在使用中要吸收较大的位移量，不可避免地会造成很大的工作应力，并常常在塑性范围内工作。因此，波纹管的工作应力很快就会使为消除成形产生的残余应力的努力变得毫无意义。用 EJMA 的话说，采用热处理或通过减小波纹管的位移量都不能消除不锈钢波纹管发生应力腐蚀的可能性。

对装有补偿器的管道系统进行设计时，人们一般较多地关注其内部的条件和介质的影响，对外部条件即使有所注意也很少给予重视。忽视这一因素可能会缩短系统的工作寿命，因为接触到烟雾的波纹管、积存水的烟道等都会从外部发生腐蚀。如包裹波纹管的外保温材料就有可能含有有害元素而使波纹管发生腐蚀。沿海地区的空气中也含有氯离子，也会使波纹管发生腐蚀。

5.9 波纹补偿器的失效

波纹管补偿器是压力管道系统中最常用的补偿元件，与其它受压元件如阀门、弯头、法兰等相比，它是管道系统中最薄弱的部分，同样也是最容易出事故的部位。几乎每年都有因波纹管补偿器失效而引起的财产损失，甚至人员伤亡的报道。正因如此，补偿器制造与安装单位安全注册工作已经开始运作。

所有波纹补偿器的失效现象都可划分到设计、制造、安装、使用四个环节中，表 1 为近几年来补偿器失效统计比例。

表1 补偿器失效统计

	所占比例 %	失 效 原 因	失 效 现 象
设计	40-50	受压及受力件应力校核失误、选材失误、技术要求不正确	柱失稳、平面失稳、受压及受力件损坏、腐蚀
制造	20-30	生产和设备条件不具备、质量管理失控	补偿器渗漏、焊缝开裂、装配尺寸不合格
安装	10-20	不具备安装资格、未按规程安装	固定支架破坏，波纹管扭曲，超过额定补偿量
使用	10-20	使用温度、压力、介质与原设计不符合	应力腐蚀、孔蚀、超压破坏、超温破坏

波纹管补偿器的非正常失效是可以预防的。这就要求设计、制造、安装及使用单位严格按照国家有关法规认真执行。

①设计认证。为加强对压力管道的质量监督和安全监察，保障压力管道安全运行，国家质量技术监督局于1999年12月16日颁发了《压力管道设计单位资格认证与管理办法》。从事压力管道设计的单位应按要求进行资格认证，禁止无证设计。

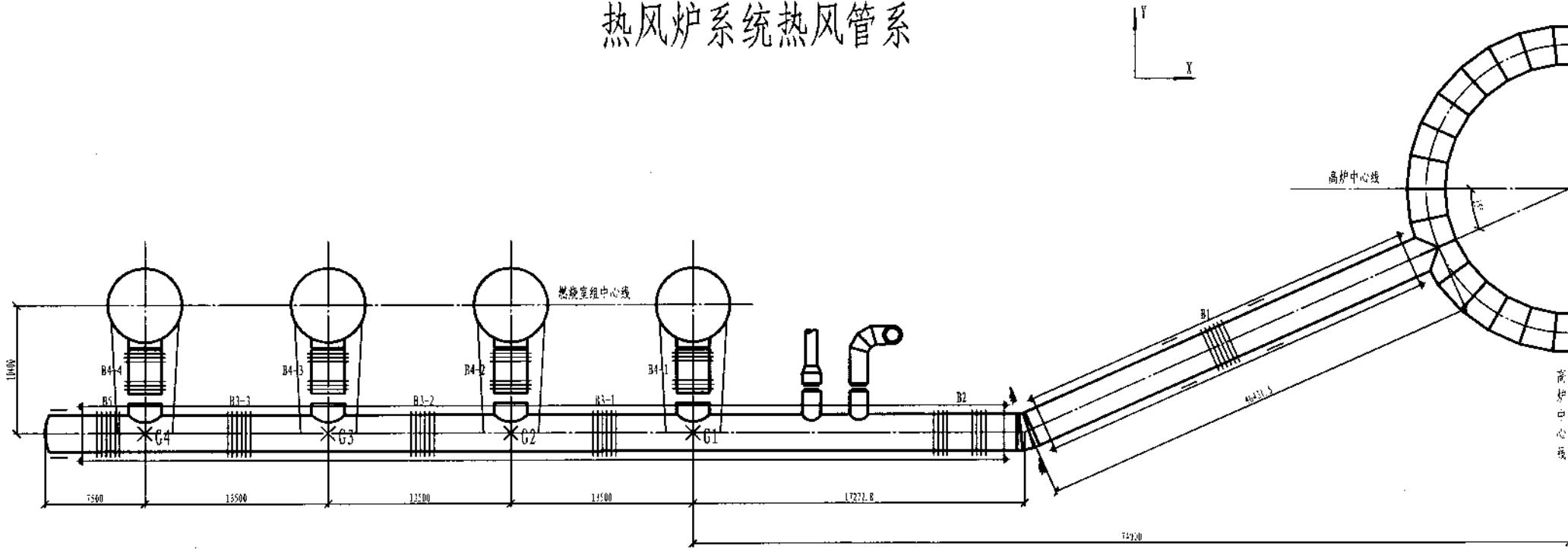
②制造认证。为规范压力管道元件制造单位的安全注册工作，加强综合管理，国家质量技术监督局于2000年1月7日颁发了《压力管道元件制造单位安全注册与管理办法》。从事波纹管补偿器制造的单位应按要求进行安全注册，禁止无证制造。《压力管道元件制造单位安全注册与管理办法》中对制造单位技术力量、生产人员、厂房、场地、生产设备、检验设备、外购外协采购均作出了明确规定。安全注册将迫使波纹补偿器制造单位具备应有的条件，原劳动部门在压力容器安全监察方面积累了一整套行之有效的管理经验，将其移植于受压元件的安全管理与监察过程中，可从根本上治理行业的散、乱、差局面。

③安装认证。1996年4月23日，原劳动部以劳部发(1996)140号文件颁发了“压力管道安全管理与监察规定”，其中第三章第十二条对安装单位的安全注册作出了规定。从事波纹管补偿器安装的单位应按要求进行安全注册，禁止无证安装。

④定期进行型式试验。目前波纹补偿器制造单位均执行GB/T 12777及参照执行美国EJMA标准。标准中所提出的图表和经验公式是前人多年来的研究经验及工程经验积累，但正如EJMA标准前言中指出的“……本标准的任何条款均不提供任何明确的或暗含的保证，因此，也不承担任何责任。”因此，必须通过型式试验取得第一手数据，以保证其设计质量和制造质量。

⑤加强使用维护。在使用过程中应尽量避免腐蚀性介质的侵蚀。值得注意的是补偿器在停用过程中更容易发生腐蚀，其原因是管道中的介质随着水份的挥发，有害介质的浓度越来越高，因此在停用时应尽量将液体放净，必要时应进行清洗。

热风炉系统热风管系



符号说明:

- 自由复式型补偿器
- 轴向型补偿器
- 导向支架
- 平面滑动支架
- ×— 固定支架

工作条件: 管壁 $T=200^{\circ}\text{C}$ $P=0.51\text{MPa}$ (表压)

管 径: 总管 $\phi 2828 \times 14$ 支管 $\phi 2628 \times 14$ 内保温(砌砖)

内部介质: 热空气 温度 1420°C

设计选型:

B1: 轴向型 SDZ6-2800-1220 $[X]=130\text{mm}$ $[K_x]=2000\text{N/mm}$

共1台

B2: 自由复式型 SXF6-2800-2800 $[X]=130\text{mm}$ $[Y]=80\text{mm}$ $[K_x]=2000\text{N/mm}$ $[K_y]=1300\text{N/mm}$

共1台

B3: 轴向型 SGZ6-2800-1000 $[X]=50\text{mm}$ $[K_x]=3000\text{N/mm}$

共3台

B4: 自由复式型 SXF6-2600-2500 $[X]=36\text{mm}$ $[Y]=30\text{mm}$ $[K_x]=3050\text{N/mm}$ $[K_y]=2050\text{N/mm}$

共4台

B5: 轴向型 SDZ6-2800-1100 $[X]=90\text{mm}$ $[K_x]=2000\text{N/mm}$

共1台

各固定管架受力计算:

G1: $F_x=55\text{KN}$

$F_y=50\text{KN}$

G2: $F_x=350\text{KN}$

$F_y=50\text{KN}$

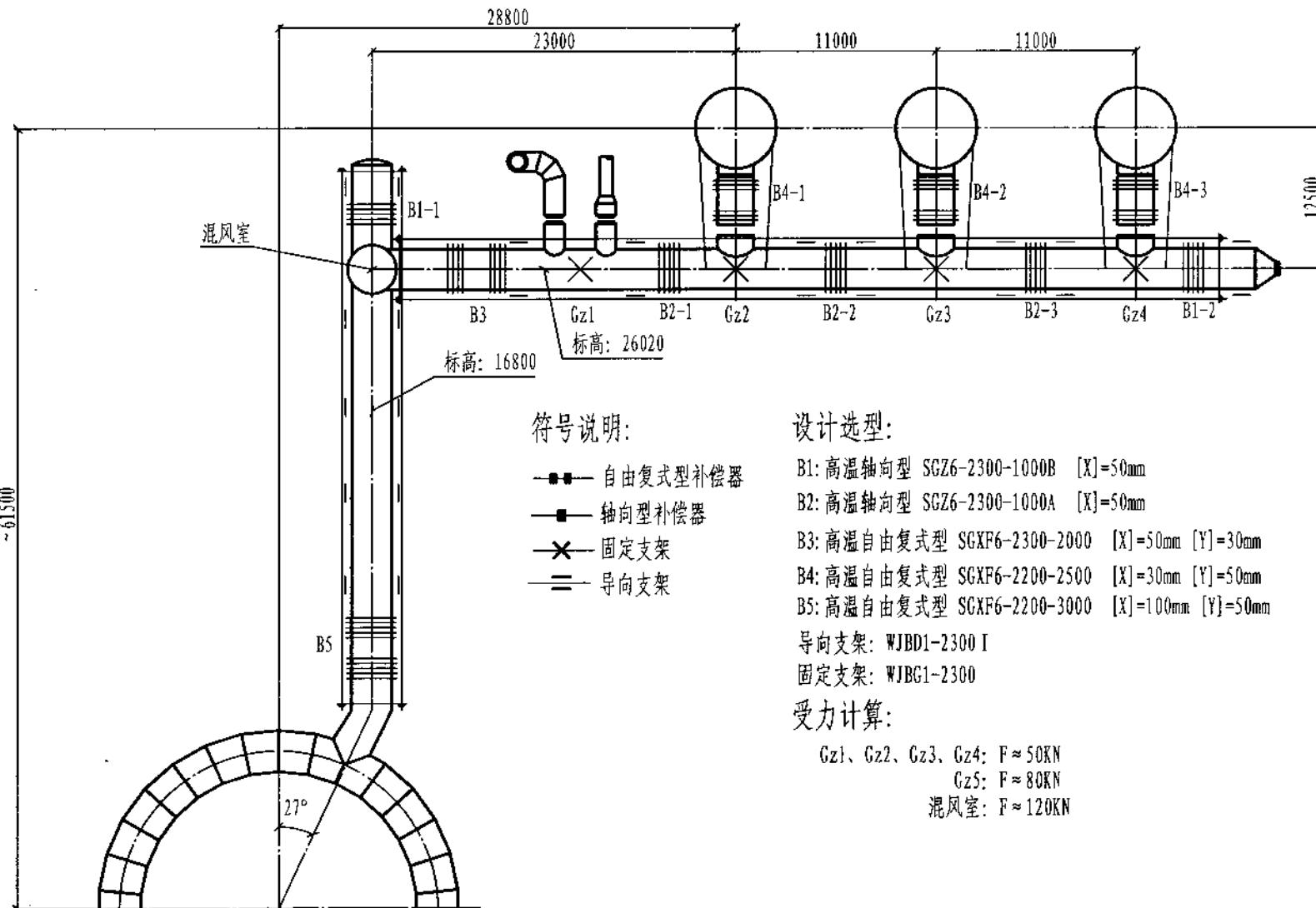
G3: $F_x=35\text{KN}$

$F_y=50\text{KN}$

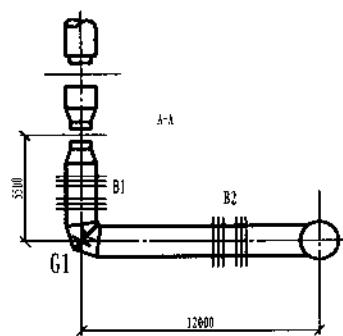
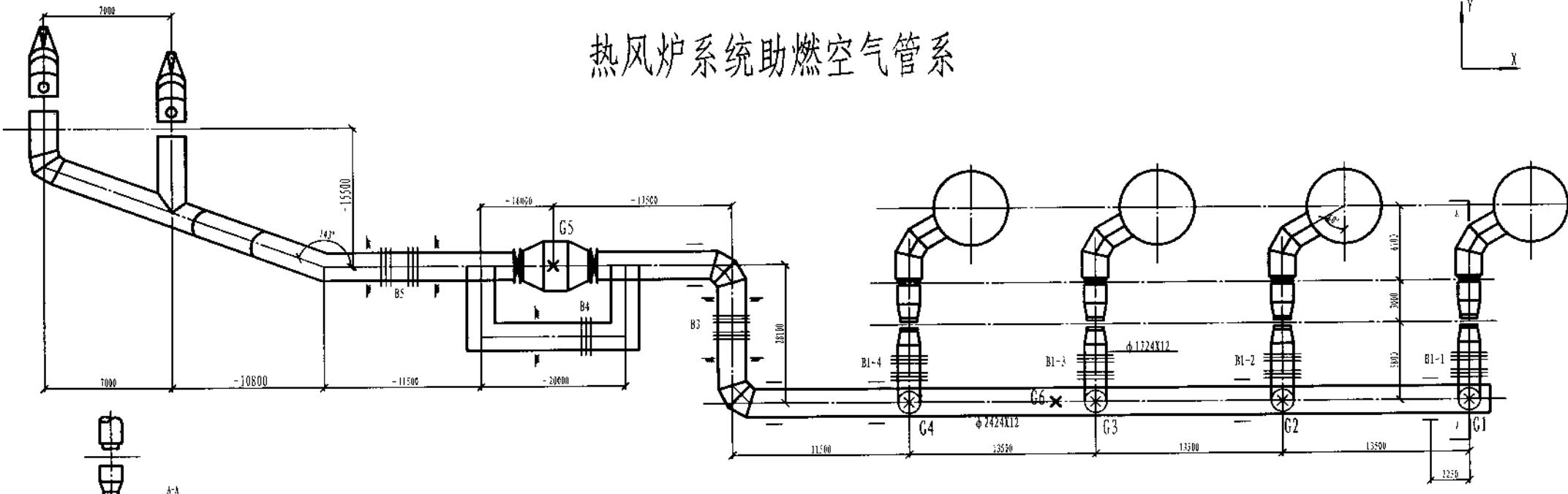
G4: $F_x=50\text{KN}$

$F_y=50\text{KN}$

说明: 1. 计算受力时没有考虑盲板力;
2. 计算受力时未计摩擦力及重力;



热风炉系统助燃空气管系



助燃空气管道:

工作条件: $T=200^{\circ}\text{C}$ (最大 $T=250^{\circ}\text{C}$) $P=0.01\text{MPa}$

设计选型:

- B1: 自由复式型 SXF1-1700-1500 [X]=50mm [Y]=35mm [Kx]=250N/mm [Ky]=300N/mm 共4台
- B2: 自由复式型 SXF1-1700-2000 [X]=50mm [Y]=100mm [Kx]=250N/mm [Ky]=210N/mm 共4台
- B3: 自由复式型 SXF1-2400-2800 [X]=80mm [Y]=100mm [Kx]=170N/mm [Ky]=390N/mm 共1台
- B4: 轴向型 SDZ1-2000-500 [X]=60mm [Kx]=320N/mm 共1台
- B5: 自由复式型 SXF1-2000-2800 [X]=100mm [Y]=70mm [Kx]=250N/mm [Ky]=130N/mm 共1台

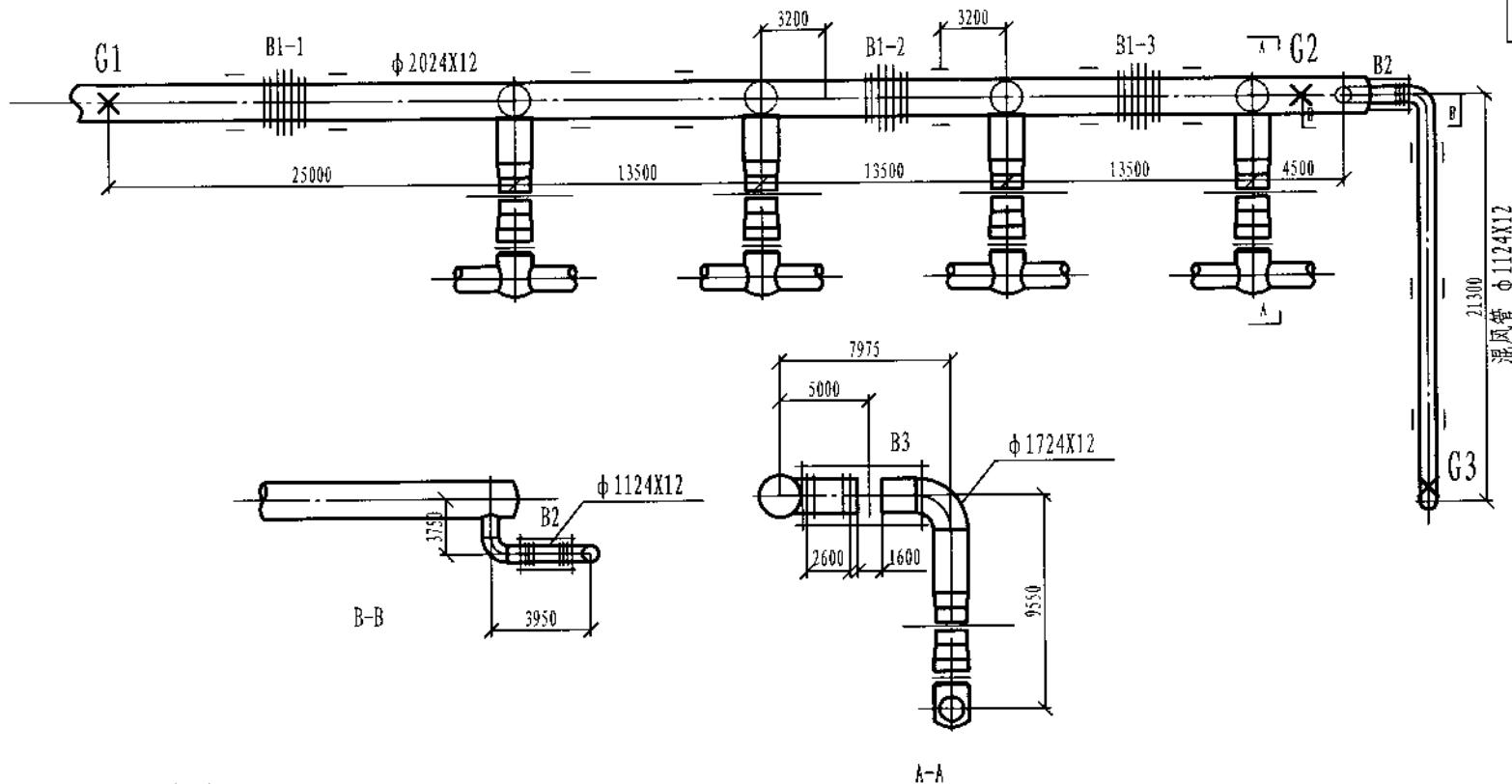
符号说明:

- 自由复式型补偿器
- 轴向型补偿器
- ×—固定支架
- 导向支架
- ↑—平面滑动支架

各固定管架受力计算 (未计摩擦力及重力):

G1: $F_x=30\text{KN}$	G2: $F_x=30\text{KN}$
$F_y=50\text{KN}$	$F_y=50\text{KN}$
G3: $F_x=30\text{KN}$	G4: $F_x=30\text{KN}$
$F_y=50\text{KN}$	$F_y=50\text{KN}$
G5: $F_x=40\text{KN}$	G6: $F_x=30\text{KN}$
$F_y=60\text{KN}$	$F_y=70\text{KN}$

热风炉系统冷风管系



符号说明:

- 直管压力平衡型补偿器
- 自由复式带大拉杆型补偿器
- 复式拉杆型补偿器
- ×— 固定支架
- =— 导向支架
- ↑— 平面滑动支架

冷风管道:

工作条件: $T=250^\circ$ $P=0.51\text{MPa}$ (表压)

设计选型:

B1: 直管压力平衡型 SPZ6-2000-3000 $[X]=100\text{mm}$ $[K_x]=4795\text{N/mm}$

共3台

B2: 复式拉杆型 SDF6-1100-2600 $[X]=25\text{mm}$ $[Y]=100\text{mm}$ $[K_x]=920\text{N/mm}$ $[K_y]=290\text{N/mm}$

共1台

B3: 自由复式带大拉杆型 SXF6-1700-2600 $[X]=25\text{mm}$ $[Y]=40\text{mm}$ $[K_x]=860\text{N/mm}$ $[K_y]=350\text{N/mm}$

共4台

各固定管架受力计算(未计摩擦力及重力):

G1: $F_x=250\text{KN}$

$F_y=50\text{KN}$

G2: $F_x=105\text{KN}$

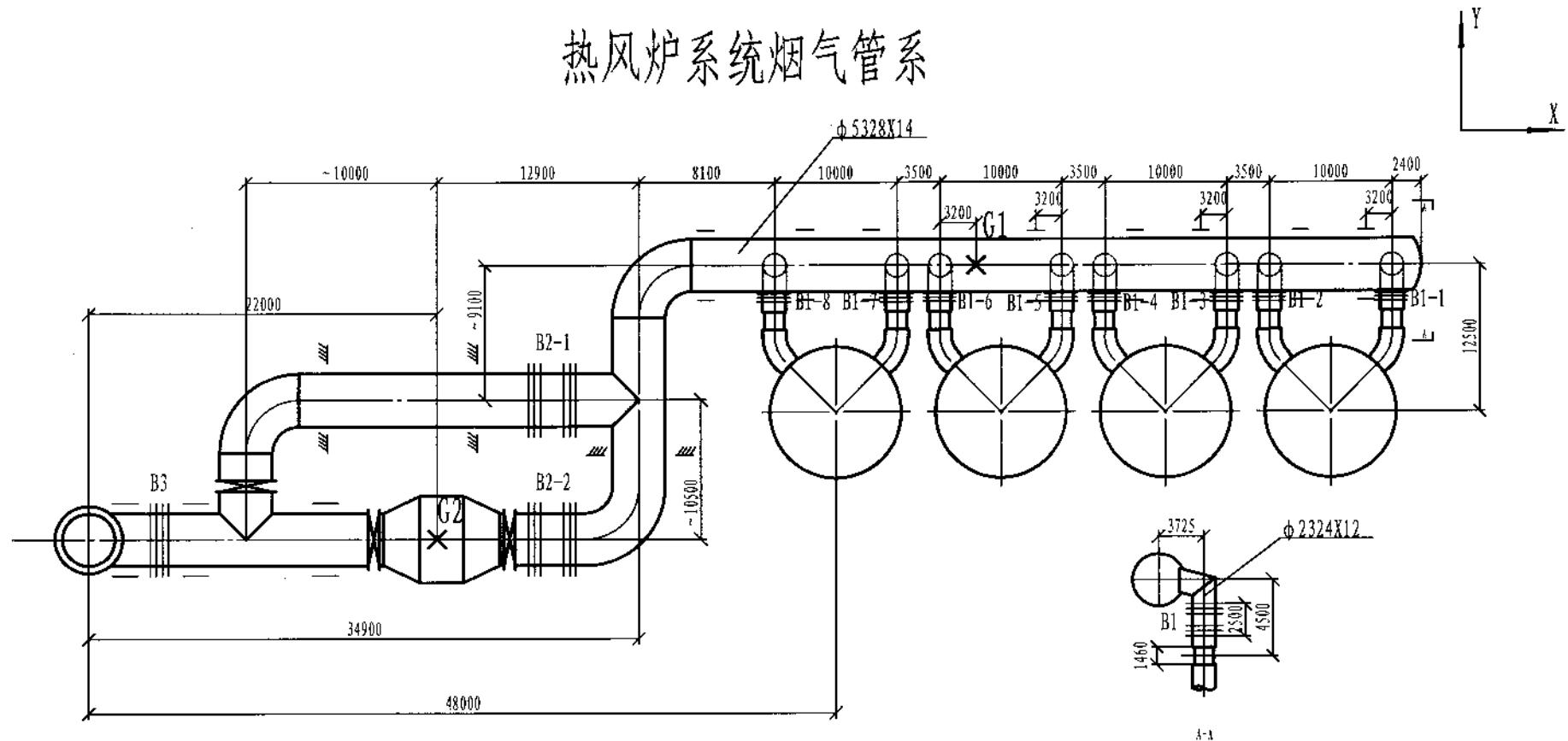
$F_y=50\text{KN}$

G3: $F_x=0$

$F_y=50\text{KN}$

37
E&G

热风炉系统烟气管系



符号说明:

- 自由复式型补偿器
- 轴向型补偿器
- ×— 固定支架
- =— 导向支架
- ↑— 平面滑动支架

烟气管道:

工作条件: 管壁 $T=200^{\circ}\text{C}$ $P=0.01\text{MPa}$ 内保温(喷涂)

内部介质: 烟气 温度 450°C

设计选型:

B1: 自由复式型 SXF1-2300-2000 $[X]=35\text{mm}$ $[Y]=100\text{mm}$ $[K_x]=250\text{N/mm}$ $[K_y]=160\text{N/mm}$

共8台

B2: 自由复式型 SXF1-5300-2800 $[X]=125\text{mm}$ $[Y]=50\text{mm}$ $[K_x]=2130\text{N/mm}$ $[K_y]=2200\text{N/mm}$

共2台

B3: 轴向型 SDZ1-5300-800 $[X]=70\text{mm}$ $[K_x]=1800\text{N/mm}$

共1台

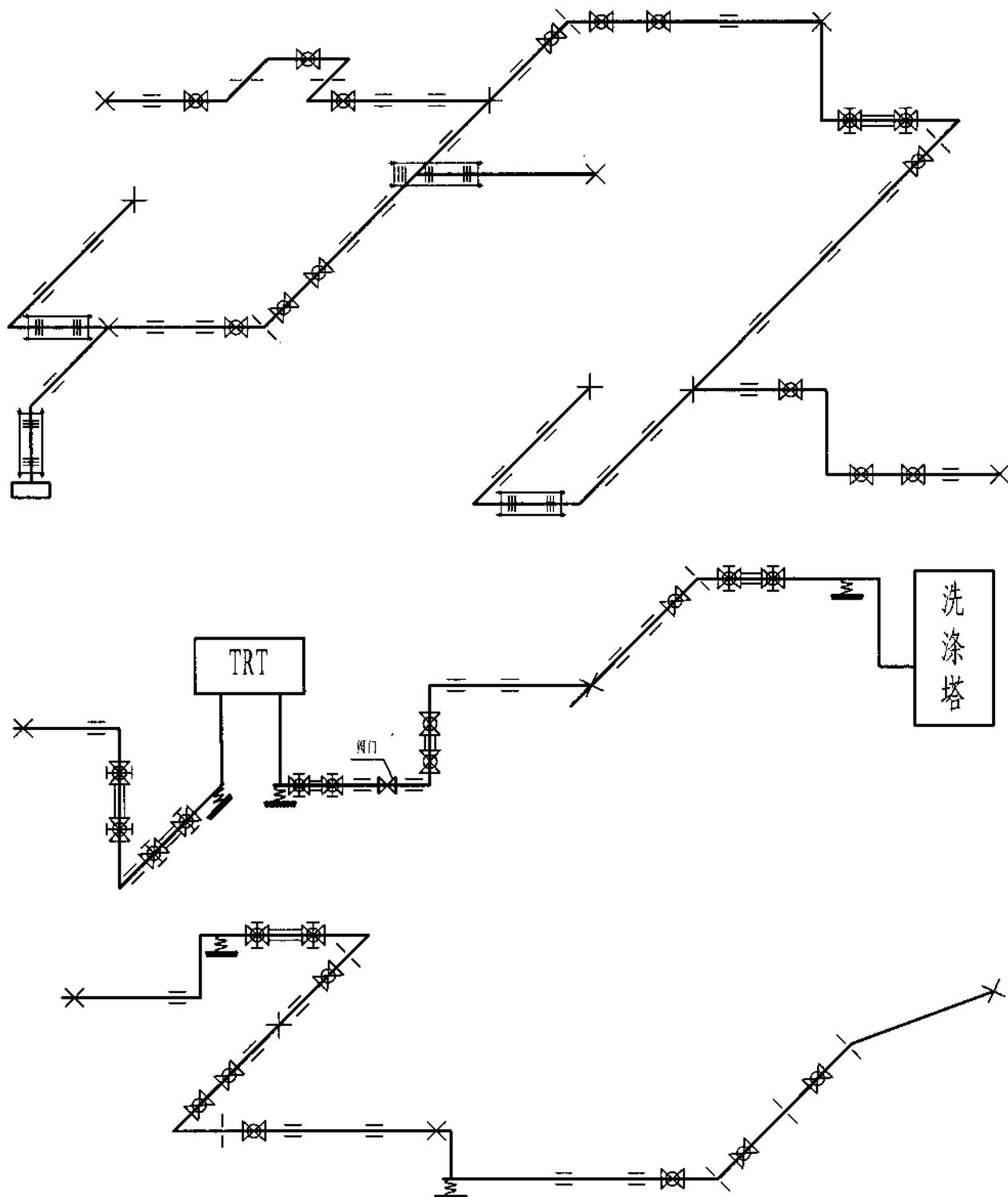
各固定管架受力计算:

$$\begin{aligned} G1: F_x &= 360\text{KN} \\ F_y &= 60\text{KN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G2: F_x &= 250\text{KN} \\ F_y &= 150\text{KN} \end{aligned}$$

说明: 1. 计算受力时没有考虑盲板力;
2. 计算受力时未计摩擦力及重力;

示意图

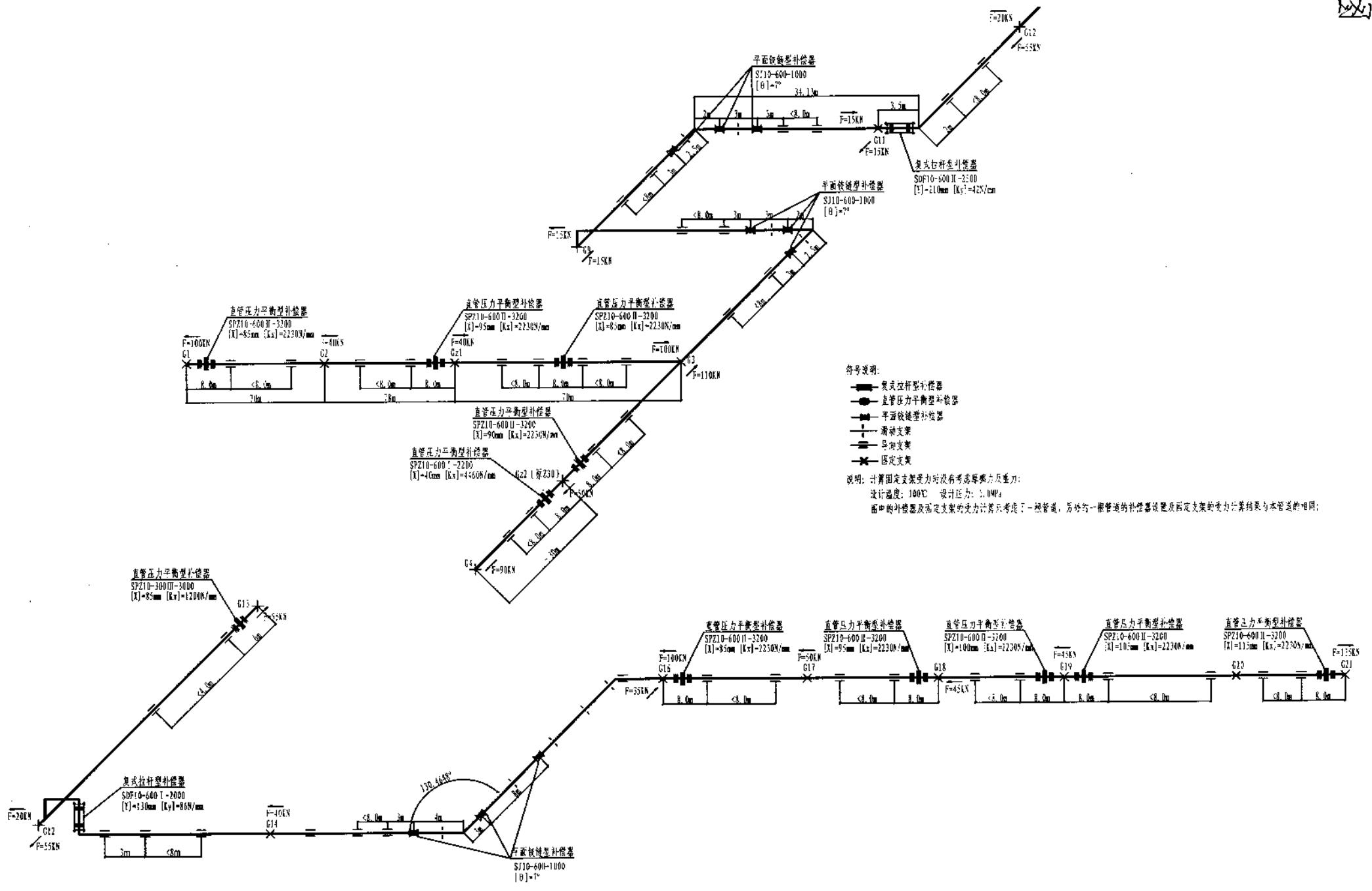


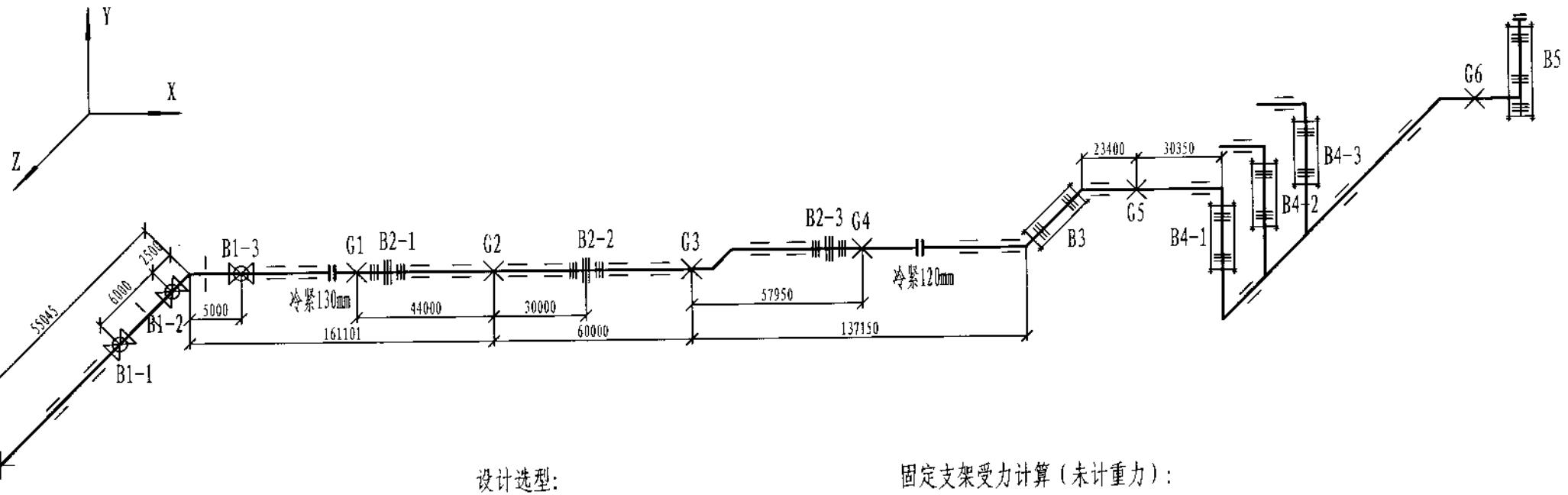
符号说明:

- 复式拉杆型补偿器
- 平面铰链型补偿器
- 复式铰链型补偿器

- 弯管压力平衡型补偿器
- 复式万向铰链型补偿器
- =— 导向支架

- +— 平面滑动支架
- X— 固定支架
- M— 弹簧支架





符号说明:

- 复式拉杆型补偿器
- 直管压力平衡型补偿器
- 平面铰链型补偿器
- 弯管压力平衡型补偿器
- |— 平面滑动支架
- ||— 导向支架
- ×— 固定支架

设计条件: $P=0.6 \text{ MPa}$ $T=200^\circ\text{C}$ 摩擦系数 $f=0.1$ $Dn1200: 440 \text{ kg/m}$ $Dn1000: 310 \text{ kg/m}$

设计选型:

- B1: SJ6-1200-1200 3只
 $[\theta]=8^\circ$
 B2: SPZ6-1200 II-4200 3只
 $[X]=140 \text{ mm}$ $[K_x]=1740 \text{ N/mm}$
 B3: SDF6-1200-3500 1只
 $[Y]=240 \text{ mm}$ $[K_y]=61 \text{ N/mm}$
 B4: SDF6-1000-2500 3只
 $[Y]=130 \text{ mm}$ $[K_y]=89 \text{ N/mm}$
 B5: SPW6-1000 1只
 $[X]=20 \text{ mm}$ $[K_x]=2550 \text{ N/mm}$
 $[Y]=20 \text{ mm}$ $[K_y]=208 \text{ N/mm}$
 $X_0=3500 \text{ mm}$ $Y_0=1020 \text{ mm}$

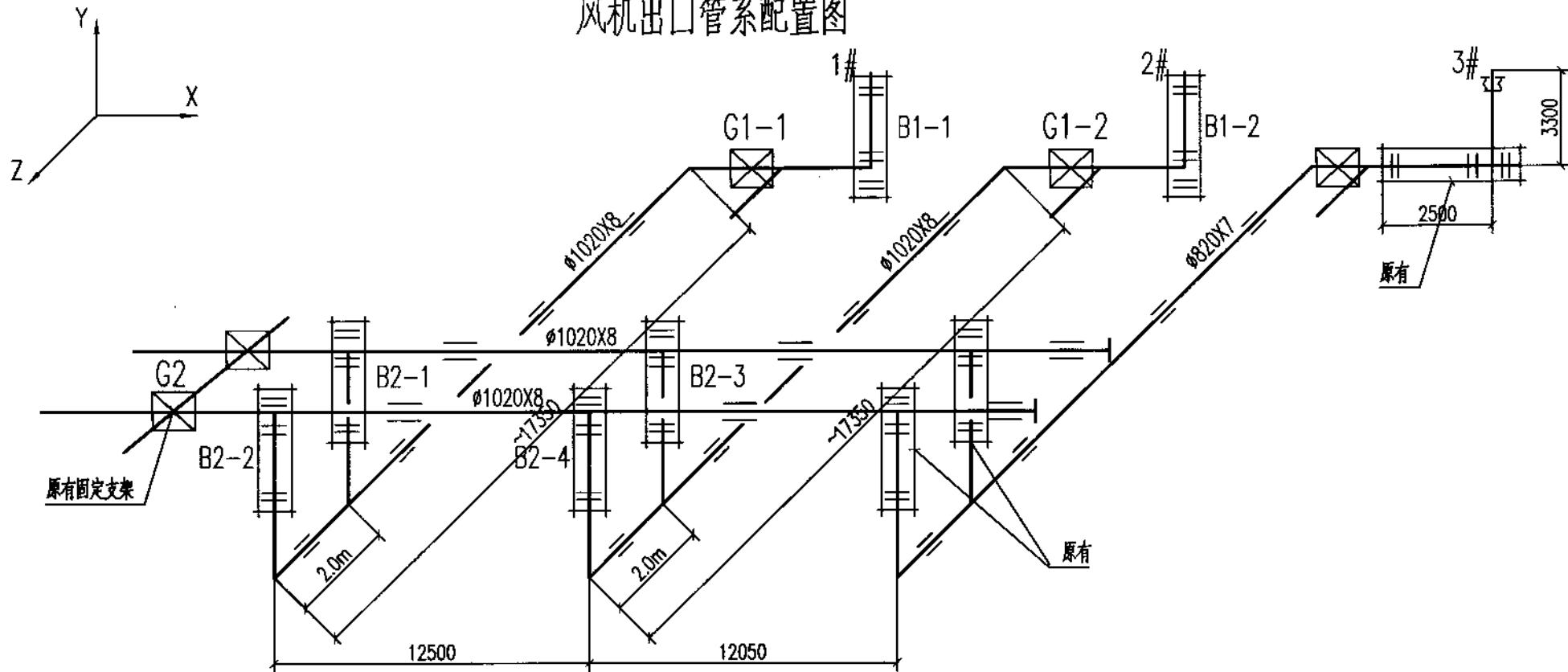
固定支架受力计算(未计重力):

- | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| G1: $F_x=-55 \text{ kN}$ | G2: $F_x=-60 \text{ kN}$ | G3: $F_x=50 \text{ kN}$ |
| $F_y=0$ | $F_y=0$ | $F_y=0$ |
| $F_z=-30 \text{ kN}$ | $F_z=0$ | $F_z=0$ |
| G4: $F_x=75 \text{ kN}$ | | G5: $F_x=30 \text{ kN}$ |
| $F_y=0$ | | $F_y=0$ |
| $F_z=0$ | | $F_z=15 \text{ kN}$ |
| A: $F_x=-40 \text{ kN}$ | | G6: $F_x=-10 \text{ kN}$ |
| $F_y=0$ | | $F_y=-30 \text{ kN}$ |
| $F_z=40 \text{ kN}$ | | $F_z=-35 \text{ kN}$ |

经计算风机出口的力及力矩满足要求;

注: 第一导向支架距离补偿器的距离小于 $4D$ (D ——管道通径),
第二导向支架距离第一导向支架的距离小于 $14D$ (D ——管道通径);

风机出口管系配置图



设计条件: $T=250^{\circ}\text{C}$ $P=0.6\text{MPa}$

设计选型:

符号说明:

- 弯管压力平衡型
- 导向支架
- 固定支架
- 弹簧吊架

B1: 弯管压力平衡型
SPW6-1000 I 2只
[X]=10mm [Kx]=1417N/mm
[Y]=10mm [Ky]=289N/mm
 $X_0=2500$ $Y_0=1020$

B2: 三通压力平衡型
SPW6-1000 I 4只
[X]=20mm [Kx]=1417N/mm
[Y]=100mm [Ky]=310N/mm
 $X_0=2200$ $Y_0=1020$

支架推力计算(未计摩擦力及重力):

G1: $F_x=-10\text{KN}$ G2: $F_x=-75\text{KN}$
 $F_y=-20\text{KN}$ $F_y=50\text{KN}$
 $F_z=-20\text{KN}$ $F_z=60\text{KN}$

经核算满足风机出口要求。