



指导性文件  
GUIDANCE NOTES  
GD05-2017

中国船级社

# 低温管路应力分析指南

(2017)

生效日期：2017年5月1日

# 目录

前言 .....	1
第 1 章 通 则 .....	2
1.1 适用范围 .....	2
1.2 定义 .....	2
1.3 图纸资料 .....	2
第 2 章 管路应力分析内容 .....	4
2.1 一般要求 .....	4
2.2 载荷 .....	5
2.3 工况 .....	6
2.4 工况与载荷 .....	7
2.5 模型 .....	8
2.6 边界条件 .....	8
第 3 章 管路应力计算与衡准 .....	9
3.1 应力计算 .....	9
3.2 应力分析还应满足的要求 .....	12
第 4 章 管路应力分析报告的主要内容 .....	13
4.1 基本参数 .....	13
4.2 分析模型的主要节点清单 .....	13
4.3 应力分析模型的管路单线图 .....	14
附件 1: 管部件应力增强系数 .....	15

# 前言

对低温管系，我社《散装运输液化气体船舶构造与设备规范》第 5 章处理用压力容器及液体，蒸气和压力管路系统规定中第 5.11.5 条规定“当设计温度为  $-110^{\circ}\text{C}$  或更低时，对管系的每一分支，应向 CCS 提交一份考虑到由于管子的重量，包括较大的加速度载荷、内部压力、热收缩以及船舶中拱和中垂引起的载荷等所产生的所有应力的完整的应力分析资料。”同时，《液化天然气燃料加注船舶规范》、《天然气燃料动力船舶规范》及《液化天然气燃料加注趸船规范》等规范也有相关要求。本指南对载荷作出了具体定义和要求，确定了几种基本工况及相应的载荷加载。

低温管路应力分析的采用标准直接决定了其计算方法和评判衡准，本指南中规定的计算方法和评判衡准主要是基于美国标准 ASME 压力管道规范 B31.3《工艺管道》进行编制的。注意到美国标准 ASME 压力管道规范 B31.3《工艺管道》对管路应力分析从业人员的资质作了相应要求，其要求管路应力分析工程师应获得相关专业（机械工程、工程力学等）学士及以上学位，并在资深应力分析工程师指导下最少有 5 年的专业培训和专业设计工作经验。对于学历低于本科的管路应力分析工程师，则需要 10~15 年的专业设计实践和主管经验。虽然本指南对人员资质不作强制性要求，但相关方应对此予以关注和重视。

# 第1章 通 则

## 1.1 适用范围

- 1.1.1 本指南适用于液化天然气运输船(LNG 运输船)、液化天然气燃料加注船、天然气燃料动力船、液化天然气燃料加注趸船等。
- 1.1.2 本指南适用于设计温度为-110℃或更低的低温管路。
- 1.1.3 本指南规定了低温管路应力分析过程中建模、载荷、工况、边界条件、计算方法、衡准等方面的要求。
- 1.1.4 本指南仅为规范的补充，低温管路应力分析除满足本指南要求外，还应满足 CCS《钢质海船入级规范》、《材料与焊接规范》、《散装运输液化气体船舶构造与设备规范》、《液化天然气燃料加注船舶规范》、《天然气燃料动力船舶规范》和《液化天然气燃料加注趸船规范》的有关要求。

## 1.2 定义

- 1.2.1 位移应变：由于设备热胀冷缩和船体中垂中拱等原因使得管道约束点发生位移所产生的应变以及因温度变化所产生的应变。
- 1.2.2 持久应力：由重量、压力等持久载荷引起的正应力和剪应力。
- 1.2.3 位移应力：管道组成中由于位移应变引起的正应力和剪应力。
- 1.2.4 峰值应力：局部应力集中或局部结构不连续或局部热应力等所引起的应力。
- 1.2.5 正应力：垂直于基准平面的应力分量，见 CCS《散装运输液化气体船舶构造与设备规范》第 4.28.3.2 条的定义。
- 1.2.6 剪应力：作用在基准平面内的应力分量，见 CCS《散装运输液化气体船舶构造与设备规范》第 4.28.3.5 条的定义。

## 1.3 图纸资料

- 1.3.1 应将下列图纸资料提交批准
  - (1) 低温管路布置图。

1.3.2 应将下列图纸资料提交备查

(1) 低温管路完整应力分析报告。

## 第2章 管路应力分析内容

### 2.1 一般要求

#### 2.1.1 管路应力静力分析应考虑下列内容：

- (1) 应对重力、压力等持久载荷作用下的持久应力进行计算，以防止塑性变形破坏；
- (2) 应对管路热胀冷缩以及端点附加位移等位移载荷作用下的位移应力进行计算，以防止疲劳破坏；
- (3) 应对管路设备的作用力进行计算，以防止作用力太大，保证设备正常运行，见 3.2.1 的要求；
- (4) 应对管路支吊架的受力进行计算，为支吊架设计提供依据；
- (5) 应对管路上法兰的受力进行计算，以防止法兰泄漏。

#### 2.1.2 在系统设计过程中，通常应考虑管路应力的动载分析，如：

- (1) 考虑风载荷、加速度载荷、安全阀起跳载荷、ESD 阀关闭诱发液击力载荷带来的应力影响；
- (2) 对具有往复压缩机（泵）的管路，通常还应考虑：
  - ① 管路自振频率分析，以防止管路系统共振；
  - ② 管路强迫振动响应分析，以控制管路振动及应力；
  - ③ 气（液）柱频率分析，以防止气柱共振；
  - ④ 压力脉动分析，以控制压力脉动值。

## 2.2 载荷

- 2.2.1 重力载荷：包括管路自身重量、保温重量、介质重量等；
- 2.2.2 压力载荷：压力载荷包括内压力和外压力；
- 2.2.3 位移载荷：位移载荷包括管路热胀冷缩位移（温度载荷）、端点附加位移、船体中拱和中垂以及甲板面热胀冷缩引起的支撑位置变化等；
- 2.2.4 集中载荷：如装卸臂引起的集中载荷、弹簧吊架载荷等；
- 2.2.5 偶然载荷：如加速度载荷、风载荷等。加速度载荷，见 CCS《散装运输液化气体船舶构造与设备规范》第 4.28.2 条的要求；
- 2.2.6 其他动力载荷：安全阀起跳载荷、ESD 阀关闭诱发液击力载荷等。
- 2.2.7 对于 2.2.1~2.2.6 所述的主要载荷列表概括见表 2.2.7。

应力分析主要载荷

表 2.2.7

载荷类型	符号	对应的具体载荷
重力载荷 W	W1	管路重力载荷 <sup>①</sup>
	W2	货物介质重力载荷
	W3	强度试验介质重力载荷
压力载荷 P	P	管路设计压力
温度载荷 T	T1	最低温度载荷
	T2	最高温度载荷
附加位移载荷 D	D1	最低温度下的端点附加位移载荷 <sup>②</sup>
	D2	最高温度下的端点附加位移载荷 <sup>②</sup>
	D3	装载工况 1 船体变形附加位移载荷 <sup>③</sup>
	D4	装载工况 2 船体变形附加位移载荷 <sup>③</sup>
	D5	装载工况 3 船体变形附加位移载荷 <sup>③</sup>
集中载荷 F	F	装卸臂引起的集中载荷
	H	弹簧吊架载荷
风载荷 Wind	Wind1	纵向风载
	Wind2	横向风载
加速度载荷 U <sup>④</sup>	U1	垂向加速度载荷
	U2	横向加速度载荷
	U3	纵向加速度载荷
其他动力载荷 R	R1	安全阀起跳载荷
	R2	ESD 阀关闭诱发液击力载荷

- 备注：①管路重力载荷包括管子、阀附件、绝缘等部件的重量。
- ②端点附加位移主要考虑大型设备、液罐等热胀冷缩的管口位移。
- ③除考虑满载、轻载工况外，还应考虑其他引起较大船体变形的装载工况。
- ④加速度载荷主要是由船舶的升沉、纵摇、横摇引起的。

## 2.3 工况

2.3.1 设计温度为-110℃或更低的管系,应根据基本工况对应的环境按照表 2.3.1 考虑载荷因素。

基本工况及载荷示例

表 2.3.1

载荷		W			D			T		P		F	U	Wind
		W1	W2	W3	D1	D2	D3	T1	T2	P1	P2			
基本 工况		管路重力	货物介质重力	试验介质重力	低温端点附加位移	高温端点附加位移	船体变形附加位移	最低温度	最高温度	管路设计压力	强度试验压力	集中载荷	各向加速度	风载荷
	强度试验	×		×							×			
	装卸货	罐外	×	×		×		×	×	×		×		
		罐内 <sup>①</sup>	×	×				×						
其他 营运	露天	×	×		×	×	×	×	×	×		×	×	×
	室内	×	×				×	×	×	×		×	×	
	罐内 <sup>①</sup>	×	×					×					×	

备注：①应根据管系实际布置情况，确定液罐内管系进行应力分析的范围。

②符号“×”表示适用。

2.3.2 对工况和载荷进行合理的必要组合，满足实际项目相应资料中对工况的具体要求。

2.3.3 货罐内管路，可以考虑表 2.3.3 的工况组合。

货罐内管路典型工况组合

表 2.3.3

序号	工况组合	工况描述
L1	W1+W3+P2	强度试验
L2	W1+W2+P1	考虑重量、压力等持久载荷的情况
L3	W1+W2+P1 +T1	装卸货，操作状态
L4	W1+W2+P1+U	其他营运中，偶然载荷状态
L5	L3- L2	低温收缩工况，计算位移应力

2.3.4 露天甲板管路，可以考虑表 2.3.4 的工况组合。

露天甲板管路典型工况组合 表 2.3.4

序号	工况组合	工况描述
L1	W1+W3+P2	强度试验
L2	W1+W2+P1	考虑重量、压力等持久载荷的情况
L3	W1+W2+P1+F	考虑重量、压力、装卸臂等持久载荷的情况
L4	W1+W2+D1+D3+P1 +T1	其他营运中，调驳或者再液化
L5	W1+W2+D1+D3+P1+F+T1	码头装卸货，操作状态
L6	W1+D1+D3+P1+T2	相关管路处于最高温度
L7	L4- L2	其他营运中，低温收缩工况，计算位移应力
L8	L5- L3	装卸货，低温收缩工况，计算位移应力
L9	L6- L2	管路高温膨胀工况，计算位移应力
L10	W1+W2+P1+Wind+U	其他营运考虑风载、加速度的偶然状态

2.3.5 舱室内管路，可以考虑表 2.3.5 的工况组合。

舱室内管路典型工况组合 表 2.3.5

序号	工况组合	工况描述
L1	W1+W3+P2	强度试验
L2	W1+W2+P1	考虑重量、压力等持久载荷的情况
L3	W1+W2+P1+D3+T1	装卸货、调驳、再液化等操作状态
L4	W1+W2+P1+D3+T2	其他营运中管路高温
L5	L3-L2	低温收缩工况，计算位移应力
L6	L4-L2	高温膨胀工况，计算位移应力
L7	W1+W2+P1+U	其他营运考虑加速度的偶然状态

## 2.4 工况与载荷

2.4.1 对于具体项目，还应结合实际情况考虑可能存在的工况及载荷，如结冰、积雪等等。

## 2.5 模型

- 2.5.1 根据具体布置和约束情况对管路系统建立梁系有限元计算模型。
- 2.5.2 直管模型应包括长度、直径、壁厚、材料型号、绝缘特性、设计温度、设计压力、介质特性等基本参数。
- 2.5.3 弯管模型在直接模型的基础上，需明确弯曲半径、弯管类型、各分节点处的转弯角度等。
- 2.5.4 异径管模型对应的若干递减直管模型应与异径实际类型相符。
- 2.5.5 三通模型的平面内应力增强系数和平面外应力增强系数应与所选的三通类型相匹配，加强板的厚度和长度尺寸应与管路布置图保持一致。
- 2.5.6 阀门和法兰模型可以按刚性元件处理，模型中明确长度和重量。
- 2.5.7 膨胀节模型的轴向刚度、横向刚度或弯曲刚度、扭转刚度应与膨胀节规格书保持一致。

## 2.6 边界条件

- 2.6.1 对管路进行约束的边界主要有支吊架、穿舱件、设备管口等。
- 2.6.2 普通支吊架在各方向上允许的线位移量和角位移量由支架规格书予以明确。
- 2.6.3 弹簧支吊架各方向上的集中力和集中力矩应与系统设计要求保持一致。
- 2.6.4 固定在船体结构上的支吊架以及穿舱件，需考虑船体变形带来的附加位移。
- 2.6.5 设备管口对管路的约束根据设备的实际情况予以确定。对于低温容器接管，一般应按全固定约束处理，同时考虑容器热胀冷缩带来的附加位移。

## 第3章 管路应力计算与衡准

### 3.1 应力计算

3.1.1 应对管路由于持久载荷引起的持久应力、由位移和温度引起的位移应力以及偶然载荷引起的峰值应力进行计算和分析。

3.1.2 持久应力  $\sigma_1$  按下式计算：

$$\sigma_1 = \sqrt{(|S_a| + S_b)^2 + (2S_t)^2}$$

式中： $S_a = I_a \frac{F_a}{A_p}$

$$S_b = \frac{\sqrt{(i_i M_{i,d})^2 + (i_o M_{o,d})^2}}{W}$$

$$S_t = I_t \frac{M_t}{2W}$$

其中： $\sigma_1$ ——由重力、压力等持久载荷产生的持久应力， $N/mm^2$ ；

$S_a$ ——由持久纵向力产生的应力， $N/mm^2$ ；

$S_b$ ——由持久弯矩合成的应力， $N/mm^2$ ；

$S_t$ ——持久扭矩产生的应力， $N/mm^2$ ；

$A_p$ ——管壁横截面积， $mm^2$ ；

对于管材，管壁横截面积  $A_p = \pi\delta(D_o - \delta)$

$F_a$ ——由重力、压力等持久载荷产生的纵向力， $N$ ；

$I_a$ ——持久纵向力指数，通常情况下  $I_a = 1.0$ 。

$I_i$ ——平面内弯矩指数， $0.75i_i$  或  $1$ ，取大者；

$I_o$ ——平面外弯矩指数， $0.75i_o$  或  $1$ ，取大者；

$i_i$ ——平面内应力增强系数，见附件 1：管部件应力增强系数

$i_o$ ——平面外应力增强系数，见附件 1：管部件应力增强系数

$M_i$ ——由压力、重力等持久载荷产生的平面内弯矩， $N \cdot mm$ ，其方向见图 3.1.2 (1) 和图 3.1.2 (2)；

$M_o$ ——由于压力、重力等持久载荷产生的平面外弯矩， $N \cdot mm$ ，其方向见图 3.1.2 (1) 和图 3.1.2 (2)；

$W$ ——抗弯截面模量， $mm^3$ ；

对于管材，抗弯截面模量计算公式为：

$$W = \frac{\pi}{32D_o} (D_o^4 - D_i^4)$$

$D_o$ ——管子外径， $mm$ ；

$D_i$ ——管子内径， $mm$ ；。

$I_t$ ——持久扭矩指数，通常情况下  $I_t = 1.0$ ；

$M_t$ ——由压力、重力等持久载荷引起的扭矩， $N \cdot mm$ ；

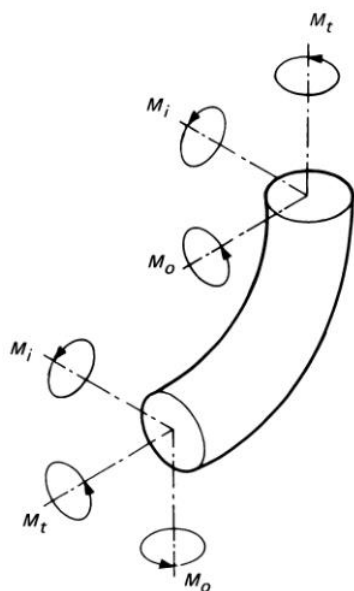


图 3.1.2 (1) 弯头弯矩方向

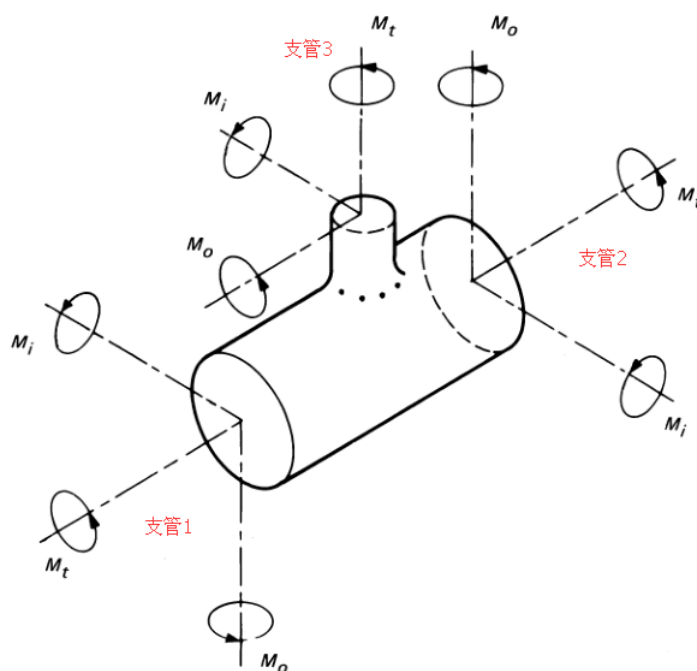


图 3.1.2 (2) 支管弯矩方向

3.1.3 持久应力  $\sigma_1$  应满足下列要求:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_h} \leq 1$$

式中:  $\sigma_h$ ——材料在设计温度下的许用应力,  $\text{N}/\text{mm}^2$ 。

3.1.4 位移应力  $\sigma_2$  按下式计算:

$$\sigma_2 = \sqrt{(|S_a| + S_b)^2 + (2S_t)^2}$$

式中:  $S_a = i_a \frac{F_a}{A_p}$

$$S_b = \frac{\sqrt{(i_i M_{i,d})^2 + (i_o M_{o,d})^2}}{W}$$

$$S_t = i_t \frac{M_t}{2W}$$

其中:  $\sigma_2$ ——由位移和温度引起的位移应力,  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;

$S_a$ ——由位移应变产生的轴向应力,  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;

$S_b$ ——由位移应变产生的弯曲应力,  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;

$S_t$ ——由位移应变产生的扭矩应力范围,  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;

$A_p$ ——管壁横截面积,  $\text{mm}^2$ ;

$F_a$ ——由交变位移荷载产生的轴向力,  $\text{N}$ ;

$i_a$ ——扭转应力增强系数, 当没有更可应用的数据时, 对弯头  $i_a = 1.0$ , 对其他组成件  $i_a = i_o$ ;

$i_i$ ——平面内应力增强系数, 见附件 1: 管部件应力增强系数

$i_o$ ——平面外应力增强系数, 见附件 1: 管部件应力增强系数

$M_{i,d}$ ——由交变位移荷载产生的平面内弯矩范围,  $\text{N} \cdot \text{mm}$ , 其方向见图 3.1.2 (1) 和图 3.1.2 (2);

$M_{0,d}$ ——由交变位移荷载产生的平面外弯矩范围,  $N \cdot mm$ , 其方向见图 3.1.2 (1) 和图 3.1.2 (2) ;

$W$ ——抗弯截面模量,  $mm^3$ ;

$i_t$ ——扭矩应力增强系数, 通常情况下  $i_t = 1.0$ ;

$M_t$ ——由交变位移荷载产生的扭矩范围,  $N \cdot mm$ ;

如无特殊说明, 则基于  $21^\circ C$  的参考环境温度对位移应力进行计算。

3.1.5 位移应力应满足下列要求:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_A} \leq 1$$

式中:  $\sigma_A$ ——许用应力,  $N/mm^2$ , 按下式计算:

$$\sigma_A = f(1.25\sigma_c + 0.25\sigma_h)$$

其中:  $\sigma_c$ ——在环境温度下材料的许用应力,  $MPa$ ;

$f$ ——应力减小系数, 对于 LNG 船低温管路, 一般取 1。

当材料在设计温度下的许用应力  $\sigma_h$  大于持久应力  $\sigma_1$  时, 则:

$$\sigma_A = f(1.25\sigma_c + 1.25\sigma_h - \sigma_1)$$

3.1.6 对于偶然应力, 由于持续久荷和偶然载荷引起的持久应力总和应不超过  $\sigma_h$  的 1.33 倍。

3.1.7 管路应力分析也可按 CCS 可接受的其他标准和/或相关规范进行。

## 3.2 应力分析还应满足的要求

3.2.1 管路对设备管口的推力和力矩应在设备允许的范围內。

3.2.2 管路的最大位移量应考虑管路布置的间距要求。

3.2.3 对于有动力应力分析的管路, 压缩机(泵)的相关计算应满足行业标准, 其工作频率应避开管路的固有频率。

## 第4章 管路应力分析报告的主要内容

### 4.1 基本参数

4.1.1 应力计算分析所采用的标准。

4.1.2 工况载荷情况及考虑的具体因素。

4.1.3 管路的设计压力、设计温度、安装温度、材料型号、材料许用应力、管子规格、管路绝缘特性以及管路介质参数均需要予以明确。

4.1.4 包含尺寸、质量等信息的相应阀件、附件清单。

4.1.5 以上参数应与下列资料保持一致

- (1) 管材技术规格书；
- (2) 管路绝缘技术规格书；
- (3) 管支架（包括吊架）技术规格书；
- (4) 膨胀节技术规格书（如有时）；
- (5) 管路设计压力和壁厚计算书；
- (6) 相应管路原理图；
- (7) 货品清单。
- (8) 包含货物操作工况的相关资料；
- (9) 典型工况下船体变形量（包括中垂、中拱、甲板热胀冷缩等）相关资料。

### 4.2 分析模型的主要节点清单

4.2.1 节点建立的顺序和类型及相应管路编号；

4.2.2 节点的相对尺寸；

4.2.3 节点对应 4.1.3 的参数。

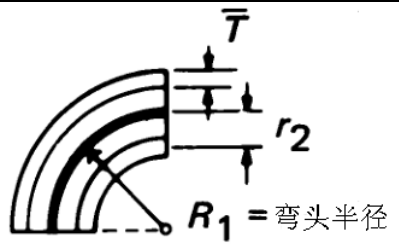
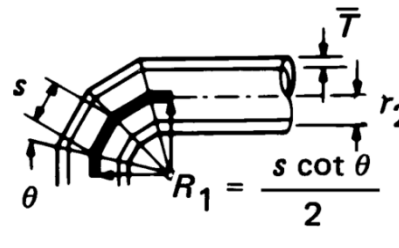
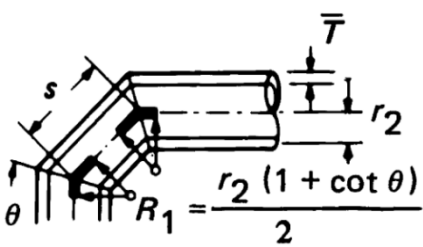
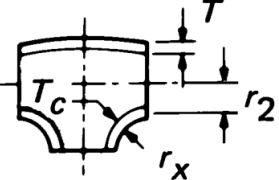
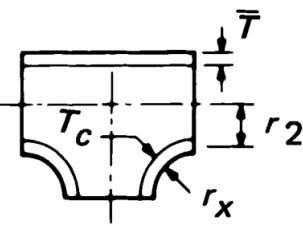
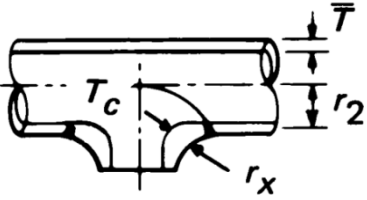
### 4.3 应力分析模型的管路单线图

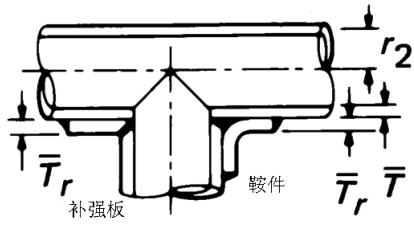
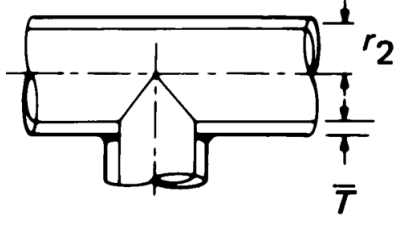
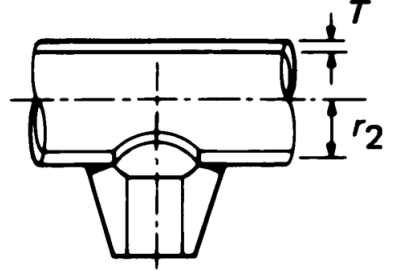
4.3.1 编号节点对应的具体管路走向和布置；

4.3.2 图中还应包括管子规格、管附件规格、支吊架规格、管路绝缘特性等技术说明；

4.3.3 “低温管路布置图”应与应力分析模型的管路单线图保持一致。若无单独的“低温管路布置图”，该批准的管路单线图可以作为等效图纸。

## 附件 1: 管部件应力增强系数

说明	应力增强系数 【注】(1)(2)		柔性特性 h	图示
	平面外 $i_o$	平面内 $i_i$		
焊接弯头或管子弯头 【注】 (1)(3)~(6)	$\frac{0.75}{h^{2/3}}$	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{\bar{T}R_1}{r_2^2}$	
窄间距斜接弯头 $s < r_2(1 + \tan \theta)$ 【注】 (1)(3)(4)(6)	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{\cos \theta}{2} \left( \frac{s\bar{T}}{r_2^2} \right)$	
单弯斜接弯头或 宽间距斜接弯头 $s \geq r_2(1 + \tan \theta)$ 【注】 (1)(3)(6)	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{1 + \cos \theta}{2} \left( \frac{\bar{T}}{r_2} \right)$	
普通焊接三通 其中 $r_x \geq D_b/8$ $T_c \geq 1.5\bar{T}$ 【注】 (1)(3)(5)(7)(8)	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{3i_o}{4} + \frac{1}{4}$	$3.1 \frac{\bar{T}}{r_2}$	
挤压成形的焊接三通 其中 $r_x \geq D_b/20$ $T_c < 1.5\bar{T}$ 【注】 (1)(3)(8)	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{3i_o}{4} + \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{r_x}{r_2} \right) \frac{\bar{T}}{r_2}$		
插入式焊接管座 其中 $r_x \geq D_b/8$ $T_c \geq 1.5\bar{T}$ 【注】 (1)(3)(7)(8)	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{3i_o}{4} + \frac{1}{4}$	$3.1 \frac{\bar{T}}{r_2}$	

说明	应力增强系数 【注】(1)(2)		柔性特性 h	图示
	平面外 $i_o$	平面内 $i_i$		
带补强圈或鞍件的增强制造三通 【注】 (1)(3)(8)(9)(10)	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{3i_o}{4} + \frac{1}{4}$	$\frac{(\bar{T} + \frac{\bar{T}_r}{2})^{2.5}}{\bar{T}^{1.5} r_2}$	
未补强的预制三通 【注】 (1)(3)(8)(10)	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{3i_o}{4} + \frac{1}{4}$	$\frac{\bar{T}}{r_2}$	
整体加强的座焊支管 【注】 (1)(3)(10)(11)	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	$3.3 \frac{\bar{T}}{r_2}$	

备注:

上表中应力系数的计算方法及相应备注说明均来源于 ASME 压力管道规范 B31.3 《工艺管道》“附录 D 柔性系数和应力增强系数”。

上表中的应力增强系数是用于缺少更直接的应用数据的情况下,对于  $D_o/\bar{T} \leq 100$ , 已证实是有效的。

(1) 应力增强系数应不小于 1, 其应用于圆弧和斜接弯管的有效弧长 (图示中粗中心线表示) 上面和三通的交点上。

(2) 如需要时, 对于  $i_o$  和  $i_i$  都可以使用单一的增强系数  $\frac{0.9}{h^{2/3}}$ 。

(3) 表中符号如下:

$i_i$ =平面内应力增强系数

$i_o$ =平面外应力增强系数

h=管部件柔性特性值

$D_o$ =管路外径, mm。

$D_b$ =支管外径, mm。

$R_1$ =焊接弯头或管道弯管的平均半径, mm。

$r_x$ =引出口外轮廓部分的曲率半径，在集管和支管轴线的平面上测得，mm。

$r_2$ =相配管道的平均半径，mm。

$s$ =斜接弯管在中心线上的间距，mm。

$\bar{T}$ =对于弯头和斜接弯管，为管件的公称壁厚；对于三通，为与其相配的管道的公称壁厚，mm。

$T_c$ =三通叉口处厚度，mm。

$\bar{T}_r$ =补强圈和鞍件的厚度，mm。

$\theta$  =相邻斜接弯管轴线夹角之半。

- (4) 当法兰装在一端或者两端时，上表中的应力增强系数应乘以系数  $C_1$  来修正。

一端带法兰： $C_1 = h^{1/6}$

二端带法兰： $C_1 = h^{1/3}$

- (5) 设计者须注意对接焊的铸造管件壁厚可能比连接管道的壁厚大得多，如不考虑这些较大壁厚的影响，可能出现较大的误差。

- (6) 对于大口径薄壁的弯头或者弯管，压力会明显影响应力增强系数，上表中的应力增强系数应除以系数  $C_2$  来修正。

$$C_2 = 1 + 3.25 \left( \frac{P_j}{E_j} \right) \left( \frac{r_2}{\bar{T}} \right)^{5/2} \left( \frac{R_1}{r_2} \right)^{2/3}$$

压力单位为 kPa，尺寸单位为 mm。

- (7) 如果  $r_x \geq \frac{D_b}{8}$  和  $T_c \geq 1.5\bar{T}$ ，可以用柔性特性  $h = 4.4 \frac{\bar{T}}{r_2}$ 。

- (8) 支管连接的应力增强系数是用于在支管中心线两侧长度  $\geq 2$  倍主管直接进行试验而得。间距更小的支管可能需要特殊考虑。

- (9)  $\bar{T}_r > 1.5\bar{T}$  时， $h = 4 \frac{\bar{T}}{r_2}$ 。

- (10) 支管与主管直径比为  $0.5 < d/D < 1.0$  时，其平面外的应力增强系数可能是不保守的，有内凹且平滑过渡的焊缝轮廓可减小应力增强系数。选择适当的应力增强系数是设计者的责任。

- (11) 设计者必须保证制作的弯头有与直管相同的压力级。