

管道应力分析和设计软件

CSiPlant

GB 50251-2015 设计手册

(版本: 2022 年 05 月)



VIBRATION 万博瑞升 (天津) 科技有限公司
Vibration(Tianjin)Technology Co.,Ltd.

版 权

计算机程序 CSiPlant™及所有相关文档均是受专利法和版权法保护的产品。全球范围的所有权属于 Computers & Structures, Inc.（中文版版权同属于万博瑞升（天津）科技有限公司）。未经 CSI 和万博瑞升（天津）科技有限公司预先书面授权，未经许可的程序使用或任何形式的文档复制一律禁止。

未经出版商预先明确书面许可，不得以任何形式或方式复制或分发本出版物的任何部分，或将其存储在数据库或检索系统中。

获得更多信息和本文档的副本请联络：

万博瑞升（天津）科技有限公司

地址：天津滨海高新区华苑产业区海泰华科三路 1 号 6 号楼-803

电话：022-86422566

邮箱：csiplant@pipevibration.com

网址：www.pipevibration.com

Computers & Structures, Inc.

邮箱：support@csiamerica.com

网址：www.csiamerica.com/

Copyright © Computers & Structures, Inc., 1978-2021

All rights reserved.

The CSI Logo® and SAP2000® are registered trademarks of Computers & Structures, Inc.

CSiPlant™ and Watch & Learn™ are trademarks of Computers & Structures, Inc.

Windows® is a registered trademark of the Microsoft Corporation.

Adobe® and Acrobat® are registered trademarks of Adobe Systems Incorporated.

免责声明

本程序的开发和测试花费了大量的时间、精力和费用。然而，在程序使用方面，使用者接受并理解开发者或经销商在程序的准确性或可靠度上没有做任何直接或间接或暗示性的担保。

本程序是一款实用且功能强大的结构设计工具。然而，使用者必须清晰地理解程序在如下方面的基本假设：建模、分析和设计算法，以及没有提及的方面。

程序生成的信息必须由有资质且经验丰富的工程师来校核。工程师必须独立地核查结果，并对所使用的信息承担专业责任。

目录

1. 简介	5
2. 符号	5
3. 方法和基础	7
3.1 约束状态	7
3.2 设计分类	7
3.3 压力校核	7
3.4 持续应力和偶然应力校核	8
3.5 水压试验校核	11
4. 设计属性(Design Properties)	11
5. 应力增大系数和柔性系数	15
6. 设计首选项 (Design Preferences)	15
7. 使用局限	17
8. 更多内容	17
9. 参考文献	18

1. 简介

本手册介绍了在 CSiPlant 中使用 GB 50251-2015 进行管道应力校核。

2. 符号

α	管道材料的热膨胀系数
α	薄壁弯头应力增大系数修正系数
A_g	管道公称横截面积
A	用于计算设计应力的管道横截面积
β_q	环向应力增强系数
c	腐蚀、侵蚀和螺纹沟槽的材料余量总和
δ	计算壁厚
δ_b	公称壁厚
D_o	管道外径
d	管道内径
E	操作温度下的杨氏模量
φ	焊缝系数
E_a	环境温度下的杨氏模量
F	基于地区等级的强度设计系数
κ	SIF调整系数, 默认值=1.0
i_i	平面内弯曲应力增大系数 (附录 E)
i_o	平面外弯曲应力增大系数 (附录 E)
i_t	扭转应力增大系数 (附录 E, 默认值为 1.0)
I_b	弯头截面的惯性矩
I_i	平面内弯曲应力增大系数 (持续、偶然或水压试验应力类别), κi_i 或 1.0 中的较大值
I_o	平面外弯曲应力增大系数 (持续、偶然或水压试验应力类别), κi_o 或 1.0 中的较大值
I_t	扭转应力增大系数 (持续、偶然或水压试验应力类别), κi_t 或 1.0 中的较大值
IM_R	考虑 I_i, I_o, I_t 和 M_i, M_o, M_t 的合成力矩

λ 计算弯头 βq 的参数

M_i 持续、偶然或水压试验设计类别的平面内弯矩（包括压力和重量），对于位移设计类别代表力矩范围

M_o 持续、偶然或水压试验设计类别的平面外弯矩（包括压力和重量），对于位移设计类别代表力矩范围

M_t 持续、偶然或水压试验设计类别的扭转力矩（包括压力和重量），对于位移设计类别代表力矩范围

M_R 仅使用弯矩或所有力矩的合力矩

ν 泊松比

r 管道的平均半径

r_i 管道的内半径

r_o 管道的外半径

R 弯头曲率半径

σ_{hoop} 基于材料最小强度、设计系数和折减系数的许用应力

$\sigma_{combined}$ 基于材料最小强度、设计系数和折减系数的许用应力

σ_o 总弯矩作用下弯头的纵向弯曲应力

σ_s 规范指定的最小屈服强度

S_B 弯曲产生的纵向应力

S_H 环向应力

S_{Hmax} 热胀弯矩产生的最大环向应力

S_L 纵向应力

S_P 基于规范的内压引起的纵向应力

S_T 基于规范的轴向热伸长引起的纵向应力

S_X 管道中轴向力产生的纵向应力

σ_b 规范指定的最小抗拉强度

τ_t 扭矩产生的剪应力

t 折减系数

t_1 管道安装时的温度，连头或埋设时

t_2 运行期间最高或最低的管道温度

tol 以百分比表示的制造公差

Z 弹性截面模量

3. 方法和基础

3.1 约束状态

CSiPlant 将管道的约束状态区分为“完全约束”和“非完全约束”。在完全约束的系统中，热伸长和泊松收缩应力的产生是由于系统不能自由地吸收与荷载相关的轴向应变。埋地管道在弯头处有良好的土壤压实，以抵抗轴向伸长就是完全约束的一个例子。相反，对于非完全约束的系统，由于热伸长和泊松收缩带来的轴向应变可以自由膨胀或收缩，因此产生很少或没有应力。

3.2 设计分类

GB 50251-2015 根据荷载来源和相应的系统响应对荷载进行分类。管道应力校核的类别如下：

压力 (Pressure)

压力类别用于评估由内部或外部压力引起的管道环向应力，并考虑腐蚀、侵蚀和机械加工深度等材料余量。

持续应力 (Sustained)

持续应力评估因自重、压力和任何其他持续荷载产生的组合应力。

偶然应力 (Occasional)

偶然应力评估因自重、压力、其他持续荷载和偶然荷载（包括地震）产生的组合应力。

水压试验 (Hydrostatic Test)

水压试验类别评估由于试验压力和自重的影响而产生的组合和环向应力。

3.3 压力校核

GB 50251-2015 的压力校核给出了需求能力比 (Demand Capacity ratio, DCR)。DCR 是设计压力下的环向应力与规范中规定的许用环向应力之比。

CSiPlant 中有四种方法计算环向应力。公式 (1) 为采用外径的巴洛公式 (Barlow equation)。公式 (2) 为采用平均直径的巴洛公式 (当 $Do/\delta < 30$ 时)。公式 (3) 是截面上的

平均环向应力，对应于泊松收缩效应受约束引起的内部轴向力。公式（4）是采用内径的拉梅公式（Lame Equations），该公式给出了沿管道壁厚的最大环向应力，更精确地考虑了厚壁管道和内外压力。

$$S_H = \frac{(P_i - P_e)D_o}{2\delta} \quad (1)$$

$$S_H = \frac{(P_i - P_e)(D_o - \delta)}{2\delta}, \text{ when } \frac{D_o}{t} < 30 \quad (2)$$

$$S_H = \frac{P_i d - P_e D_o}{2\delta} \quad (3)$$

$$S_H = \frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_e}{(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{(P_i - P_e)r_o^2}{(r_o^2 - r_i^2)} \quad (4)$$

压力校核的许用应力根据公式（5）计算：

$$\sigma_{hoop} = \sigma_s \varphi F t \quad (5)$$

DCR 是环向应力与规范中的许用应力的比值，根据公式（6）计算：

$$DCR = \frac{S_H}{\sigma_{hoop}} \quad (6)$$

3.4 持续应力和偶然应力校核

GB 50251-2015 的持续应力和偶然应力校核是将持续荷载（如压力和重量）及非永久荷载产生的组合应力与许用应力进行比较。

组合应力

组合应力的计算取决于管道的约束状态。GB 50251-2015 附录 B 给出了直管段完全约束时管道的组合应力计算公式，附录 E 给出了直管段非完全约束时管道附件的组合应力计算公式，附录 C 给出了弯头组合应力的特殊考虑因素。

管道中的纵向应力具有公式（7）的一般形式。附录 B 默认忽略了弯曲应力，纵向应力的贡献仅考虑温度和压力引起的泊松收缩，因此，公式（7）简化为公式（8）。附录 E 默认管道可以自由膨胀和收缩，因此，温度应力和泊松收缩应力为零，考虑由压力推力、其他轴向力和弯曲应力引起的纵向应力。

$$S_L = S_P + S_T + S_X \pm S_B \quad (7)$$

$$S_L = S_P + S_T \quad (8)$$

$$S_L = S_P + S_X \pm S_B \quad (9)$$

启用压力延长时, S_P 包含在管道单元报告的轴向力中。当禁用压力延长时, CSiPlant 采用公式计算 S_P 对纵向应力的贡献。公式 (10) 给出了完全约束的管道的计算公式。公式 (11) 给出了非完全约束管道的近似计算公式, 该公式更适用于薄壁管道。公式 (12) 给出了适用于所有壁厚的非完全约束管道的计算公式。

$$S_P = \nu S_H \quad (10)$$

$$S_P = 0.5 S_H \quad (11)$$

$$S_P = \frac{P_i d^2 - P_e D_o^2}{D_o^2 - d^2} \quad (12)$$

启用温度延长时, S_T 包含在管道单元报告的轴向力中。当禁用温度延长时, CSiPlant 采用公式计算 S_T 对纵向应力的贡献。公式 (13) 给出了完全约束的管道的计算公式。对于非完全约束的管道, $S_T=0$ 。

$$S_T = \alpha E_a (t_1 - t_2) \quad (13)$$

在某些荷载下, 例如陡坡管道或启用压力/温度延长时, 可能会累积轴向荷载。由轴向力引起的纵向应力根据公式 (14) 计算。注意, 当启用压力延长时, $S_P=0$, 当启用温度延长时, $S_T=0$, S_P 和 S_T 已包含在 S_X 中。

$$S_X = \frac{F_a}{A} \quad (14)$$

弯曲应力采用公式 (15) 计算, 考虑应力增大系数的合成力矩的计算可采用公式 (16) (仅考虑平面内和平面外弯矩分量) 或公式 (17) (所有力矩分量)。

$$S_B = \frac{IM_R}{Z} \quad (15)$$

$$IM_R = \sqrt{(I_i M_i)^2 + (I_o M_o)^2} \quad (16)$$

$$IM_R = \sqrt{(I_i M_i)^2 + (I_o M_o)^2 + (I_t M_t)^2} \quad (17)$$

组合应力的校核因附录而异。公式 (18) 给出了附录 B 中的组合应力计算, 公式 (19) 为相应的许用应力。公式 (20) 给出了附录 E 中的组合应力计算, 公式 (22) 为相应的许用应力。

$$S_e = \max(|S_H - S_L|, |S_H|, |S_L|) < \sigma_{combined} \quad (18)$$

$$\sigma_{combined} = 0.9\sigma_s \quad (19)$$

$$S_e = \max \left(\begin{array}{l} 2 \sqrt{\left(\frac{S_L - S_H}{2}\right)^2 + \tau_t^2} \\ \left| \frac{S_L + S_H}{2} - \sqrt{\left(\frac{S_L - S_H}{2}\right)^2 + \tau_t^2} \right| \\ \left| \frac{S_L + S_H}{2} + \sqrt{\left(\frac{S_L - S_H}{2}\right)^2 + \tau_t^2} \right| \end{array} \right) < \sigma_{combined} \quad (20)$$

附录 E 默认忽略 S_H ，因此：

$$S_e = \sqrt{S_L^2 + 4\tau_t^2}$$

$$\tau_t = \frac{I_t M_t}{2Z} \quad (21)$$

$$\sigma_{combined} = 0.72\sigma_s \quad (22)$$

注意，如果采用公式 (17) 计算弯曲应力，则公式 (21) 中的剪切应力为零，因为公式 (17) 已经考虑了扭转项。

GB 50251-2015 的组合应力默认基于最大剪应力强度计算，CSiPlant 还可以使用 Von Mises 应力强度计算。公式 (18) 和 (20) 采用 Von Mises 应力强度计算见公式 (23) 和 (24)。

$$S_e = \sqrt{S_L^2 - S_L S_H + S_H^2} \quad (23)$$

$$S_e = \sqrt{S_H^2 - S_L S_H + S_L^2 + 3\tau_t^2} \quad (24)$$

附录 E 默认忽略 S_H ，因此：

$$S_e = \sqrt{S_L^2 + 3\tau_t^2}$$

当使用公称壁厚计算的平均环向应力小于公式 (5) 中的许用应力时，附录 C 要求对弯头的组合应力进行特殊处理。环向应力增量， S_{Hmax} ，是由于受弯曲影响的薄壁管道中存在的周向应力引起的，需叠加到由于压力引起的环向应力上。许用应力是材料的最小抗拉强度， σ_b 。

附录 C 的组合应力使用公式 (25) ~ 公式 (30)。公式 (30) 中的力矩项是弯头中给定位置处的总力矩, 包含所有荷载的贡献。一般来说, 热膨胀对力矩的贡献最大, 因此应启用温度伸长, 以考虑温度对弯矩的影响。

$$S_e = S_H + S_{Hmax} < \sigma_b \quad (25)$$

$$S_H = \frac{P_i d}{2\delta_b} < \sigma_{hoop} \quad (26)$$

$$S_{Hmax} = \beta_q \sigma_o \quad (27)$$

$$\beta_q = 1.8 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \left(\frac{1}{\lambda} \right)^{\frac{2}{3}} \geq 0 \quad (28)$$

$$\lambda = \frac{R\delta_b}{r^2} \quad (29)$$

$$\sigma_o = \frac{Mr}{I} \quad (30)$$

$$\sigma_{combined} = \sigma_b \quad (31)$$

DCR 是组合应力与规范许用应力的比值, 如公式 (32) 所示。

$$DCR = \frac{S_e}{\sigma_{combined}} \quad (32)$$

3.5 水压试验校核

GB 50251-2015 的水压试验校核将压力校核和持续应力校核合并为一种校核类型。所涉及的计算完全遵循上述内容, 环向应力的许用值为:

$$\sigma_{hoop} = 0.9\sigma_s \quad (33)$$

4. 设计属性(Design Properties)

根据GB 50251-2015进行设计校核时, 有必要提供以下信息。

- 材料属性设计属性 (Material Property Design properties)
- 荷载工况设计属性 (Load case Design Properties)

- 管道截面设计属性 (Pipe Section Design Properties)
- 管道对象设计属性 (Pipe Object Design Properties)

材料属性设计属性

Material Type (Default = Steel)

用于应力校核的材料类型。目前只使用钢材料。

荷载工况设计属性

Design Factor Mode (Default = From Request Settings)

指定是否需要覆盖特定荷载工况的设计系数。不适用于操作工况。

Pressure (Default = Varies)

设置压力校核的设计系数。可用于压力和水压试验设计类别。可通过模式 (Mode) 设置为用户值进行编辑。

Restrained (Default = 0.9)

设置完全约束的管道组合应力校核的设计系数，仅用于当前荷载工况。如果模式 (Mode) 设置为用户值，则可用于以下设计类别：持续、偶然和水压试验。

Unrestrained (Default = 0.72)

设置非完全约束的管道组合应力校核的设计系数，在持续、偶然和水压试验设计类别时可见。可通过将模式 (Mode) 设置为用户值进行编辑。

管道截面设计属性

Material Allowance (Default = Basic – (0in, 0in))

管道内外壁所需的材料余量。用户可以选择指定腐蚀、侵蚀和加工对材料余量的不同贡献。CSiPlant允许用户在设计要求设置 (Design Request settings) 中包含额外的材料余量。

Pipe Tolerance (Default = 0%)

用于计算的管道壁厚的公差。由于制造公差，计算壁厚可能小于公称壁厚。

管道对象设计属性

默认情况下，各个管道对象的设计属性在设计要求中定义。可通过将每个对象上的设计属性的设计设置从“从设计要求设置 (From Request Settings)”更改为“用户值 (User Value)”进行覆盖。

Tee Type (Default = As Defined)

指定是否采用建模时的三通类型计算SIFs。

Overridden Tee Type

用于覆盖建模时的三通类型的可用的三通类型。仅当三通类型设置为“覆盖 (Overridden)”时可见。

Flanged Elbow Locations (Default = None)

指定编号（如果弯头上有法兰）。

Elbow Thickness Overwrite (Default = As Defined)

指定在SIF/Flex计算中使用的厚度是来自截面指定还是来自覆盖值。

Custom Elbow Thickness (Default = from section assignment)

如果“弯头厚度覆盖 (Elbow Thickness Overwrite)”设置为“覆盖”，则输入在SIF/Flex计算中所用弯头壁厚的值。

Flexibility Factor Mode

指定用于确定平面内、平面外和扭转柔性系数k的方法。

SIF Mode

指定用于确定平面内、平面外和扭转应力增大系数i的方法。

Flexibility Factor

如果模式 (Mode) 设置为用户, 这些字段将变为可编辑字段, 可以输入用户指定的值, 否则这些值将是只读的。

Stress Intensification Factor

如果模式 (Mode) 设置为用户, 这些字段将变为可编辑字段, 可以输入用户指定的值, 否则这些值将是只读的。

Design Factor Source Overwrite

指定管道是使用设计要求中设置的设计系数还是局部指定的设计系数。

Design Factor Source

指定环向应力校核的设计系数使用“表4.2.3”或“表4.2.4”, 仅当“设计系数源覆盖”设置为“用户值”时可见。

Location Class Overwrite

指定管道的地区等级是使用设计要求中的设置还是进行局部指定。仅当“设计系数源覆盖 (Design Factor Source Overwrite)”设置为“用户值 (User Value)”时可见。

Location Class

指定用于管道对象环向应力校核的地区等级。仅当“地区等级覆盖 (Location Class Overwrite)”设置为“用户值 (User Value)”时可见。

Crossing Class Overwrite

指定管道的穿越等级是使用设计要求中的设置还是进行局部指定。仅当“设计系数源 (Design Factor Source)”设置为“表4.2.4”时可见。

Crossing Class

指定用于管道对象环向应力校核的穿越等级。仅当“穿越等级覆盖 (Crossing Class Overwrite)”设置为“用户值 (User Value)”时可见。

Pipe Restraint Overwrite

指定管道的约束状态是使用设计要求中的设置还是进行局部指定。

Pipe Restraint Condition

指定用于设计校核的管道的约束状态是完全约束还是非完全约束。仅当陆上管道“管道约束状态覆盖 (Pipe Restraint Overwrite)”设置为“用户值 (User Value)”时可见。

Supplemental Checks

提供补充设计属性。

5. 应力增大系数和柔性系数

GB 50251-2015 没有要求在分析过程中对管道对象的刚度进行修改，以反映实验中观察到的与理论刚度的差异。在设计要求设置中，用户可以包含柔性系数的影响。GB 50251-2015 未提供柔性系数，因此，所有元件默认的柔性系数为 1.0。

GB 50251-2015 要求在应力校核中，考虑应力增大以反映局部应力的影响。应力增大系数 (SIF) 用于修改应力结果。

在没有其他信息的情况下，GB 50251-2015 附录 E 提供了在设计和分析中考虑的应力增大系数的计算公式。除 GB 50251-2015 附录 E 外，CSiPlant 还支持 ASME B31.3 附录 D 和 B31J-2017“金属管道元件应力增大系数、柔性系数及其确定”。通过选择 ASME 的方法或使用用户值指定自定义柔性系数，可以进行考虑柔性系数的分析。

CSiPlant 根据所选方法和对象的必要设计信息自动确定柔性系数和应力增大系数。也可以为所有相关的应力增大系数和柔性系数指定用户值。

6. 设计首选项 (Design Preferences)

除了管道对象设计属性外，还有设计首选项允许控制设计要求中包含的管道对象。由于每个设计要求都有自己的设计首选项，因此有必要更新适用的设计要求而不是使用默认首选项。

Unrestrained Longitudinal Pressure Equation (Default = Ignore)

指定用于手动计算非完全约束的管道压力引起的纵向应力的方法。该设置仅当禁用压力延长时适用。

Hoop Stress Basis (Default = Barlow)

指定用于计算环向应力和组合应力的方法。

Combined stress criterion (Default = Tresca)

指定计算组合应力时使用的强度基准。

Restraint condition (Default = Restrained)

指定陆上管道纵向应力校核中用于计算许用应力的管道约束状态。对于附录B设置为“Restrained”，对于附录E设置为“Unrestrained”。

Resultant Moment Method (Default = In-plane and Out-of-plane Only)

指定用于计算合成力矩的方法。

Include axial stresses (Default = Yes)

指定组合应力的计算是否包含轴向应力。附录B设置为“是”，附录E设置为“否”。

Include bending stresses (Default = No)

指定组合应力的计算是否包含弯曲应力。附录B设置为“否”，附录E设置为“是”。注意，当设置为“是”时，在计算 S_L 时分别加和减弯曲应力 S_b ，以确保得到最大应力。

Include hoop stresses (Default = Yes)

指定组合应力的计算是否包含环向应力。附录B设置为“是”，附录E设置为“否”。

Include additional combined check (Default = Yes)

指定是否对弯头进行附录C的组合应力计算。

Non-displacement SIF Factor (Default = 1.0)

指定是否应缩放SIF值以反映荷载的非循环性质。

SIF Mode (Default = GB 50251-2015)

指定当前设计要求用于计算SIFs的方法。

Flexibility Factor Mode (Default = GB 50251-2015)

指定当前设计要求用于计算柔性系数的方法。GB 50251-2015缺省的柔性系数为1.0。

Connection SIF Mode (Default = GB 50251-2015)

指定当前设计要求用于计算连接处SIFs的方法。

Consider pressure correction (Default = Yes)

指定是否在分析中考虑弯头的压力修正。

Consider Material Allowance (Default = no)

指定材料余量是否用于应力校核。默认不考虑材料余量。

7. 使用局限

在 CSiPlant 中使用 GB 50251-2015 进行设计校核存在以下局限：

- 目前未考虑轴向应力增大系数（SIF）
- 弯头半径或斜接弯头未进行修正
- 仅对钢管进行设计校核
- 未对整体屈曲进行设计校核
- 未对径向稳定性进行设计校核

8. 更多内容

更多内容请了解 CSiPlant 帮助文档中的以下部分：

荷载工况定义

设计要求定义

设计属性定义

弹簧定义

补充校核

9. 参考文献

GB 50251-2015, 输气管道工程设计规范, 中国计划出版社, 2015

L.C. Peng and T.L. Peng, "Pipe Stress Engineering". ASME Press, June 2009