

# 核电厂管道局部壁厚减薄快速评定方法研究

覃全宁<sup>1</sup>, 吴海辉<sup>1</sup>, 刘波<sup>1</sup>, 陈明亚<sup>2</sup>

(1.台山核电合营有限公司, 广东 江门 529200; 2.苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215008)

**摘要:** **目的** 解决核电厂实际运行中管道壁厚局部减薄缺陷快速评定的需求。**方法** 基于RCC-M规范的设计基本要求和核电厂管道评估的实践经验, 基于3个工程化的分析假设, 提出一种管道壁厚减薄的快速评定方法。其包含三部分内容: 1) 最小壁厚计算; 2) 结构完整性评价; 3) 功能性评价。分别采用管道壁厚减薄快速评定方法和SYSDPIPE软件有限元分析方法对管道减薄案例进行分析。**结果** 1) 最小壁厚满足要求; 2) 管道完整性分析中, 正常工况下应力比偏差最大值为0.26, 设计工况应力比偏差为0, 扰动工况应力比偏差为0.03, 紧急工况应力比偏差为0.04, 事故工况应力比偏差为0.03; 3) 管道功能性分析中, 一次应力比偏差为0, 二次应力比偏差为0.27。在管道正常工况下的完整性评定和管道功能性分析中, 开发的管道壁厚减薄快速评定方法分析结果较SYSDPIPE软件分析更安全和保守, 在其他工况下两者计算结果基本一致。**结论** 管道壁厚减薄快速评定方法是一种通用的工程实践方法, 并在国内多个核电机组得到工程实践应用, 为电厂实际运行提供了一种快速、可靠的技术分析方法。

**关键词:** 管道; 局部减薄; RCC-M; 结构完整性; 功能性; 快速评估

中图分类号: TG146 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2022)01-0107-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.01.016

## Study of the Rapid Evaluation Method for Locally Wall-Thinned Pipe of Nuclear Power Plant

QIN Quan-ning<sup>1</sup>, WU Hai-hui<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>1</sup>, CHEN Ming-ya<sup>2</sup>

(1. Taishan Nuclear Power Joint Venture Co., Ltd., Jiangmen 529200, China;

2. Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China)

**ABSTRACT:** The purpose of this paper is to get a rapid and reliable engineering method to evaluate the safety of local thinned pipeline in nuclear power plants. The research method of this paper is based on the basic requirements in the design code of RCC-M and the experience of engineering practical, and three engineering hypotheses are assumed. A method of rapid evaluation for local thinned pipeline is proposed which includes three parts: 1) calculation of minimum wall thickness; 2) structural in-

收稿日期: 2021-06-21; 修订日期: 2021-07-29

Received: 2021-06-21; Revised: 2021-07-29

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0702200); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)面上项目(BK20181177); 国家自然科学基金(U1867215); 江苏省政策引导类计划(BZ2020057)

Fund: Supported by National Key Research and Development Program of China (2017YFB0702200), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20181177), National Nature Science Foundation of China (U1867215), Policy Guidance Program of Jiangsu Province (BZ2020057)

作者简介: 覃全宁(1988—), 男, 工程师, 主要研究方向为核电厂工程评价。

Biography: QIN Quan-ning (1988—), Male, Engineer, Research focus: nuclear power station evaluation.

通讯作者: 陈明亚(1985—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向金属部件结构完整性评价。

Corresponding author: CHEN Ming-ya (1985—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: structure integrity assessment.

引文格式: 覃全宁, 吴海辉, 刘波, 等. 核电厂管道局部壁厚减薄快速评定方法研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(1): 107-112.

QIN Quan-ning, WU Hai-hui, LIU Bo, et al. Study of the Rapid Evaluation Method for Locally Wall-Thinned Pipe of Nuclear Power Plant[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(1): 107-112.

tegrity evaluation; 3) functional evaluation. Both the rapid evaluation method for locally thinned pipe and the finite element analysis method of SYSPIPE software are used to analyze the study case. The results show that: 1) the minimum wall thickness meets the requirements; 2) the maximum stress ratio deviation is 0.26 under the normal condition, 0 under design condition, 0.04 under emergency condition, 0.03 under disturbance condition, and 0.03 under accident condition, respectively; 3) In the pipeline functional analysis, the deviation of primary stress ratio is 0 and the deviation of secondary stress ratio is 0.27, respectively. The rapid assessment method of pipe wall thickness thinning is safer and more conservative than the SYSPIPE software analysis in the normal working conditions of the pipeline integrity assessment and the secondary stress assessment of the pipeline functional analysis. And the calculation results of the two methods are basically consistent in other conditions. The method proposed in this paper is a general engineering practice, and it has been applied in many nuclear power stations in China, and it provides a rapid and reliable technical analysis method for the actual operation of power plants.

**KEY WORDS:** pipe; local thinning; RCC-M; integrity; functionality; rapid evaluation

核电厂存在各种高温、高压、高流速的水、汽两相介质的压力管道<sup>[1]</sup>。运行经验表明,由于管道内壁长期受到介质的冲刷,在管道焊缝、弯管等局部区域常常会发生减薄的现象<sup>[2-3]</sup>。在核电机组运行状态下,如果检测到压力管道壁厚减薄现象,需要快速评估壁厚减薄的管道是否仍然满足安全稳定运行的要求,并判断是否需要更换管道<sup>[4-5]</sup>。通常,压力管道的更换或维修操作需要在停机状态下进行。因此,发展一种压力管道壁厚减薄的快速评定方法对满足工程实际需要具有重要意义<sup>[6]</sup>。

法国 RCC-M 规范<sup>[7]</sup>、美国 ASME 规范<sup>[8]</sup>、欧洲 EN 规范<sup>[9]</sup>、英国 API579 规范<sup>[10]</sup>均给出了压力管道设计的准则和缺陷(管道局部减薄属于体积型缺陷)的评价要求。基于相关规范开发的管道工程设计软件 SYSPIPE<sup>[11]</sup>、CAESAR<sup>[12]</sup>等,多是基于管道均匀壁厚的设计假设进行开发的。对于局部减薄的管道,存在局部刚度降低引起的管系应力集中问题,通常需要建立三维有限元模型进行详细的分析评估<sup>[13-14]</sup>。此方法分析复杂,难以快速提供技术评估结论。

通过梳理 RCC-M 设计规范的基本要求和工程分析假设,提出了一种管道壁厚减薄的快速评定方法,该方法能满足不同工况下管道设计准则的要求。

## 1 快速评估方法理论模型

根据工程实践经验,快速评定管道壁厚减薄后的应力时,需做以下三个方面的工程假设。

1) 压力管道设计中,首先需要保证满足最小设计壁厚的要求。在计算最小壁厚时,假设管壁是均匀减薄,可以计算出管壁减薄后的截面模量<sup>[15-17]</sup>。

2) 局部减薄后,在管道的结构完整性评价前应进行光滑打磨,并尽可能使管壁均匀过渡。评价中认为,管壁减薄处的应力增强系数<sup>[18-20]</sup>与临近节点的应力增强系数相同,或设定一个增加比例(可根据壁厚实际较少量和打磨后的结构计算出应力增强系数的

增加比例)。

3) 在小范围内的壁厚减薄,可假设管道外部载荷未发生变化,认为管壁减薄后的载荷与减薄前的载荷保持不变<sup>[21]</sup>。

基于上述假设,文中提出的管道完整性设计要求评定流程如图 1 所示,主要包含三个方面的内容:1) 最小壁厚计算;2) 结构完整性评价;3) 功能性评价。

### 1.1 管道最小壁厚设计要求

以法国 RCC-M 设计规范为例,介绍核电厂规范 2 级管道直管段最小壁厚  $t_m$  的计算方法。受内压直管要求的最小壁厚(包括机械强度裕量),不应小于式(1)和式(2)所确定的值。

$$t_m = \frac{Pd + 2SA + 2yPA}{2(S + yP - P)} \quad (1)$$

$$t_m = \frac{PD_0}{2(S + yP)} + A \quad (2)$$

式中: $t_m$  为所需最小壁厚,mm,如果管道按公称壁厚定义,应考虑壁厚的制造公差,公称壁厚至少应由式(1)、式(2)确定的值加上制造公差; $P$  为设计内压,MPa; $D_0$  为管道外径,mm; $S$  为管道材料在设计温度下的许用应力,MPa; $A$  为附加厚度<sup>[22]</sup>,腐蚀发生时,管道壁厚的裕量应与管道寿命保持一致,主要考虑管道寿命和腐蚀速率等的影响,对碳钢管一般取 1.6 mm,不锈钢取 0 mm; $y$  为系数,取值 0.4,但对  $D_0/t_m < 6$  的管道,其值由下式确定:

$$y = \frac{d}{(d + D_0)} \quad (3)$$

对于弯管,最小壁厚不应小于直管所要求的壁厚乘式(4)或式(5)的系数。

$$\text{在内腹区,该系数为: } K - 0.5/K - 1 \text{ (增厚)} \quad (4)$$

$$\text{在外背区,该系数为: } K + 0.5/K + 1 \text{ (减薄)} \quad (5)$$

式中: $K$  为弯头的弯曲半径与管道内径之比。

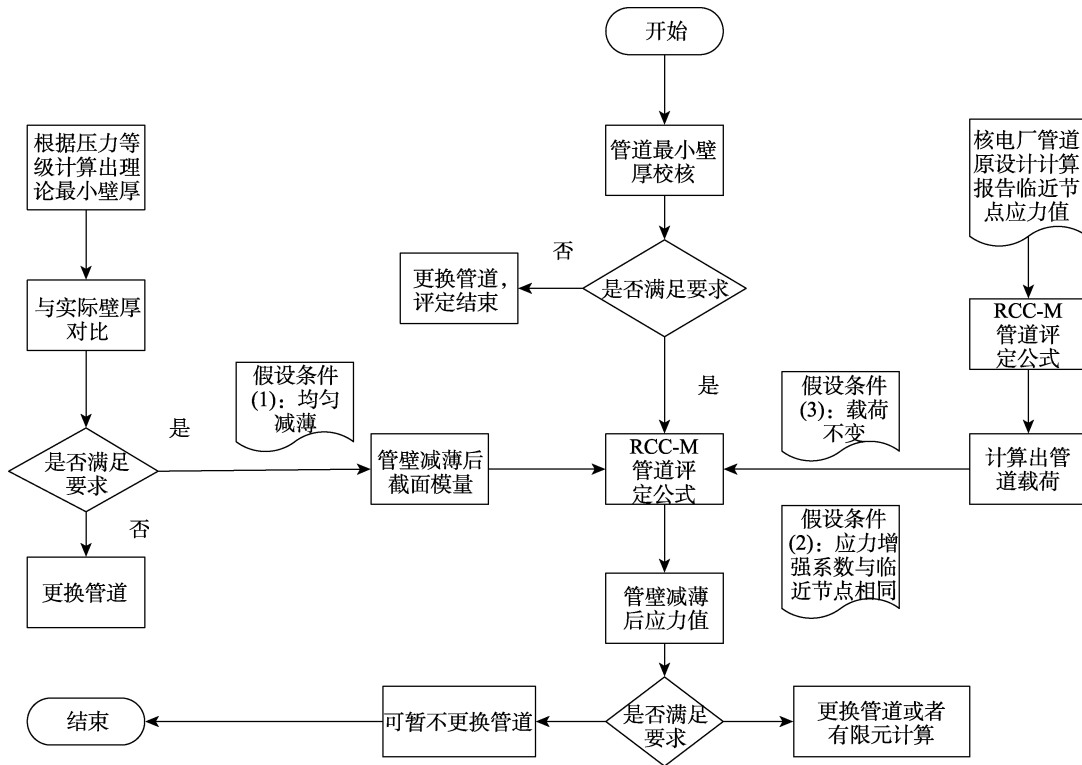


图 1 管道完整性/功能性评定流程

Fig.1 Flow chart of pipe integrity and functionality estimation

如果实测壁厚值不大于最小壁厚，则需要进行管道更换；如果实测壁厚不小于最小壁厚，需进行后续的管道完整性评定等内容。

### 1.2 管道完整性设计要求

1) 设计工况 (O 级准则)。设计工况主要考虑设计压力、质量和其他设计机械载荷在管道上产生的应力总和，其不能超过许用应力  $S_h$ ，应力计算公式和评价准则如式 (6) 所示。

$$S_{SL} = \frac{PD_0}{4t_n} + \frac{0.75iM_A}{Z} \leq S_h \quad (6)$$

式中： $t_n$  为管道壁厚； $i$  为应力增强系数； $M_A$  为永久性载荷作用在管道上的力矩； $Z$  为截面模量， $Z = (\pi/4)(D_0 - t_n)^2 t_n$ ； $P$  为设计压力； $S_h$  为设计温度下材料的许用应力。

2) 正常工况 (A 级准则)。正常工况主要考虑热膨胀产生的应力变化范围  $S_E$ ，其不能超过许用应力  $S_A$ ，应力计算公式和评价准则如式 (7) 所示。

$$S_E = \frac{iM_C}{Z} \leq S_A \quad (7)$$

式中： $M_C$  为热膨胀和其他循环载荷作用下的弯矩范围， $N \cdot mm$ ； $S_A$  为热疲劳下的许用应力变化范围， $MPa$ 。

如式 (7) 校验不通过，根据 RCC-M 的要求，可选择式 (8) 进行评定，如若式 (8) 通过，也可视为满足要求。由压力、质量、其他持续载荷产生的应力和热膨胀产生的应力变化范围的总和应满足式 (8)。

$$S_{TE} = \frac{PD_0}{4t_n} + \frac{0.75iM_A}{Z} + \frac{iM_C}{Z} \leq S_A + S_h \quad (8)$$

3) 异常工况 (B 级准则)。异常工况主要评定扰动、紧急、事故工况下的最大工作压力和管道、介质质量、地震等载荷在管道上产生的应力总和，其不能超过许用应力，应力计算公式和评价准则如式 (9) 所示。

$$S_a = \frac{P_{max}D_0}{4t_n} + \frac{0.75i(M_A + M_B)}{Z} \leq kS_h \quad (9)$$

4) 事故工况 (D 级准则)。事故工况时，若压应力很低， $P_{max}D_0/2t_n \leq S_h$ ，则应满足式 (10)。

$$\frac{0.75i(M_A + M_B)}{Z} \leq 1.9S_h \quad (10)$$

式中： $P_{max}$  为最大压力， $MPa$ ； $S_h$  为最高设计温度下的许用应力， $MPa$ ； $M_A$  为永久性载荷作用下的弯矩， $N \cdot mm$ ； $M_B$  为偶然机械载荷作用下的弯矩， $N \cdot mm$ ； $k$  为限值系数，B 级准则取 1.2，紧急工况 (C 级准则) 取 1.8，事故工况 (D 级准则) 取 2.4。

5) 锚固点位移应力。锚固点位移应力主要评定由非往复锚固点位移 (地基沉降等) 等载荷在管道上产生的应力总和不能超过许用应力，根据 RCC-M 规范 C3653 节内容，应力计算公式和评价准则如式 (11)。

$$S_E = \frac{iM_D}{Z} \leq 3S_C \quad (11)$$

式中： $M_D$  为由非往复锚固点位移产生的弯矩， $N \cdot mm$ ； $S_C$  为室温下的基本许用应力， $MPa$ 。

### 1.3 管道功能性设计要求

在事故工况下,管道不仅要满足压力边界完整性的要求,而且要保证一定的最低流速<sup>[23]</sup>。对于一次应力的做法是:用C级准则的许用应力校验,保证其功能性的实现<sup>[24]</sup>,即一次应力不超过 $1.8S_h$ 。对于二次应力,比如热膨胀和厂房位移<sup>[25]</sup>,在管道设计标准中未给出在紧急和事故工况下保证管道完整性的评价准则,基于国外核电站的经验,设定二次应力不超过 $3S_c$ ,以满足功能性要求。

## 2 工程实践

为了验证上述核电站核岛管道壁厚减薄快速评定方法的可靠性,选取国内某核电站核岛某管道,分别采用快速评定方法和SYSPIPE软件进行计算<sup>[26]</sup>,并对比研究分析结果。

### 2.1 输入数据

某核电站管道相关设计参数见表1,壁厚减薄后管道实际测量的参数见表2。管道外径、最大内压不变,仅管道壁厚发生改变。

表1 管道相关设计参数

Tab.1 Design parameters of the pipe

材料	外径/mm	壁厚/mm	RCC-M 等级	抗震类别	运行温度/°C	$S_c$ /MPa	$S_h$ /MPa	$P$ /MPa
TU42C	273.0	6.35	2	1F	80	103	103	0.05

表2 壁厚减薄后管道参数

Tab.2 Parameters after pipe wall thinning

材料	外径/mm	壁厚/mm	减薄宽度/mm	壁厚减薄比率	直管最小壁厚/mm	弯管最小壁厚/mm
TU42C	273.0	4.00	8.00	0.37	1.67	3.67

表3 管道未减薄前应力分析结果

Tab.3 Stress results of the pipeline before wall-thinning

工况类型	设计工况	正常工况		扰动工况	紧急工况	事故工况
准则级别	O	A	A	B	C	D
计算应力/MPa	2.10	99.56	73.88	12.99	23.88	74.88
许用应力限值/MPa	103.00	154.50	309.00	123.60	185.40	247.20
应力比	0.02	0.64	0.24	0.11	0.13	0.30

表4 管道减薄后应力分析结果

Tab.4 Stress results of the pipeline after wall-thinning

工况类型	设计工况	正常工况		扰动工况	紧急工况	事故工况	
准则级别	O	A	A	B	C	D	
计算应力/MPa	快速评定方法	3.31	155.30	115.25	20.30	37.28	87.96
	SYSPIPE 软件	2.84	115.31	81.53	16.25	29.66	80.35
许用应力限值/MPa	103	154.5	309	123.6	185.4	247.2	
应力比	快速评定方法	0.03	1.01	0.37	0.16	0.20	0.36
	SYSPIPE 软件	0.03	0.75	0.26	0.13	0.16	0.33
应力比偏差	0.00	0.26	0.11	0.03	0.04	0.03	

### 2.2 最小壁厚校核

基于式(1)~(6)计算最小壁厚,结果见表2,直管段和弯管段的最小壁厚仍满足规范要求,安全裕量分别为2.40和1.09。

### 2.3 管道完整性分析

分别采用管道壁厚减薄快速评定方法和SYSPIPE软件有限元分析方法对管道减薄后的应力和功能性进行评定。壁厚未发生减薄前,管道分析位置(服役中发生冲刷减薄点)的应力校核结果见表3,管道安全裕度最低有36%。

管道外径、内压不变,原壁厚为6.35 mm,减薄量为2.35 mm,壁厚减薄比例为37%,减薄点的应力计算结果见表4。快速评定方法获得的各个评价准则结果均偏保守,两种方法计算得到的应力比最大偏差为0.26。快速评定方法是基于较为安全的假设条件,因此计算得出的结果较安全。在正常工况下,采用快速评定方法计算得到的应力比为1.01,采用SYSPIPE软件有限元分析方法计算得到的应力比为0.75,两者计算偏差为0.26。

## 2.4 管道功能性校核

事故工况下，未发生减薄前，分析位置管道功能性校核结果见表 5，管道设计功能性具有较大的安全裕度。

表 5 管道未减薄前分析点管道功能性校核结果  
Tab.5 Pipe functionality analysis before wall-thinning

应力	一次应力	二次应力
计算应力/MPa	10.97	205.01
许用应力限值/MPa	185.4	309
应力比	0.06	0.66

壁厚减薄比例达 0.37 后，减薄点的管道功能性评定结果见表 6。两种计算方法的应力比最大偏差是 0.27，二次应力采用快速评定方法计算得到的应力比为 1.03，采用 SYSPIPE 软件有限元分析方法计算得到的应力比为 0.76，两种方法计算结果偏差为 0.27。快速评定方法获得的结果仍是偏保守的。

表 6 管道减薄后管道功能性评定结果  
Tab.6 Pipe functionality analysis after wall-thinning

应力	一次应力	二次应力	
计算应/MPa	快速评定方法	17.14	319.80
	SYSPIPE 软件	17.20	233.37
许用应力限值/MPa		185.4	309
应力比	快速评定方法	0.09	1.03
	SYSPIPE 软件	0.09	0.76
应力比偏差		0.00	0.27

## 3 结论

1) 基于所提的 3 个分析假设，提出了管道完整性设计要求评定流程，主要包含最小壁厚计算、结构完整性评价、功能性评价这三个方面的内容。

2) 快速评定方法是一种偏安全的计算方法，计算得出的应力比不小于 SYSPIPE 软件计算得出的应力比。在管道的功能性评定中，各公式下的计算应力比不小于 SYSPIPE 软件的计算应力比。

3) 管道壁厚减薄快速评定方法是一种通用工程实践方法，并在国内多个核电机组得到工程实践应用，为电厂实际运行提供了一种快速、可靠的技术分析方法。

### 参考文献：

[1] NB/T 20472—2017, 压水堆核电厂核岛工艺系统管道布置设计准则[S].  
NB/T 20472—2017, Design Criterion of Process System Piping Layout for Nuclear Island in Pressurized Water

Reactor Nuclear Power Plant[S].  
[2] 李海荣, 巩小杰, 乔利敏, 等. 电厂工业水管道腐蚀原因分析[J]. 全面腐蚀控制, 2018, 32(11): 98-102.  
LI Hai-rong, GONG Xiao-jie, QIAO Li-min, et al. Cause Analysis for Industrial Water Pipe Corrosion in a Power Plant[J]. Total Corrosion Control, 2018, 32(11): 98-102.  
[3] 张加军, 王兆辉. 核电厂核岛工艺管道腐蚀防护措施浅析[J]. 全面腐蚀控制, 2013, 27(3): 11-13, 33.  
ZHANG Jia-jun, WANG Zhao-hui. Analysis of Corrosion Prevention Technology for Nuclear Power Plant Process Piping[J]. Total Corrosion Control, 2013, 27(3): 11-13, 33.  
[4] 束国刚, 薛飞, 遆文新, 等. 核电厂管道的流体加速腐蚀及其老化管理[J]. 腐蚀与防护, 2006, 27(2): 72-76.  
SHU Guo-gang, XUE Fei, TI Wen-xin, et al. Flow Accelerated Corrosion and Aging Management in Nuclear Power Plants[J]. Corrosion & Protection, 2006, 27(2): 72-76.  
[5] 马娜, 尹昌耕, 秦金光. 核电厂碳钢管道壁厚减薄原因分析[J]. 核动力工程, 2013, 34(2): 123-125.  
MA Na, YIN Chang-geng, QIN Jin-guang. Wall Thinning Analysis of Carbon Steel Pipes in Nuclear Power Plants[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, 34(2): 123-125.  
[6] DL/T 982-2005, 核电厂汽水管道与支吊架维修调整导则[S].  
DL/T 982-2005, Maintenance & Adjustment Guide for Nuclear Power Plant Steam-Water Piping and Supports[S].  
[7] AFCEN, Design and Construction Rules for Mechanical Components of Pwr Nuclear Islands[S].  
[8] ASME B31, Power Piping ASME Code for Pressure Piping[S].  
[9] EN 13480, Metallic Industrial Piping[S].  
[10] API 579, Fitness-for-Service[S].  
[11] Framatome, SYSPIPE 234D User's Manual[S].  
[12] 周勇, 马斌, 王会. CAESARII 在核级管道应力分析中的应用[C]//中国核科学技术进展报告. 北京: 中国核学会, 2019: 328-333.  
ZHOU Yong, MA Bin, WANG Hui. Application of CAESAR in Nuclear Pipelines Stress Analysis[C]// Progress Report on China Nuclear Science & Technology. Beijing: Chinese Nuclear Society, 2009: 328-333.  
[13] 陆杰, 刘广东, 刘鹏亮, 等. 大亚湾核电厂辅助给水系统 RCC-M2 级疏水管道的改进[J]. 核安全, 2013, 12(4): 6-9.  
LU Jie, LIU Guang-dong, LIU Peng-liang, et al. Modification for the RCC-M2 Pipeline in Daya Bay Nuclear Power Plant[J]. Nuclear Safety, 2013, 12(4): 6-9.  
[14] 宁庆坤, 田金梅. 二代改进型核电站管道系统应力分析与评定[J]. 核技术, 2013, 36(4): 62-66.  
NING Qing-kun, TIAN Jin-mei. Stress Analysis and Evaluation of Improved Second-Generation Nuclear Power Plant Piping Systems[J]. Nuclear Techniques, 2013, 36(4): 62-66.

- [15] GB 50764—2012, 电厂动力管道设计规范[S].  
GB 50764—2012, Design Code of Power of Piping for Power Plant[S].
- [16] GB 50316—2000, 工业金属管道设计规范[S].  
GB 50316—2000, Design Code for Industrial Metallic Piping[S].
- [17] SH 3012—2011, 石油化工金属管道布置设计规范[S].  
SH 3012—2011, Specification for Design of Metallic Piping Layout in Petrochemical Engineering[S].
- [18] 高建林, 宋光红, 章军, 等. 关于弯头应力增大系数的计算[J]. 化工设备与管道, 2016, 53(3): 81-83.  
GAO Jian-lin, SONG Guang-hong, ZHANG Jun, et al. Calculation of Stress Intensity Factor for Bends[J]. Process Equipment & Piping, 2016, 53(3): 81-83.
- [19] 张国清, 余建星. 关于大直径管道系统的应力增强系数 SIF 的计算[J]. 化工设备与管道, 2006, 43(5): 54-55.  
ZHANG Guo-qing, YU Jian-xing. Calculation of Stress Intensification Factor for Large Diameter Piping System[J]. Process Equipment & Piping, 2006, 43(5): 54-55.
- [20] 郭永伟, 周小兵. 基于弯头弯曲半径的管道柔性和应力分析[J]. 化肥设计, 2017, 55(2): 27-29.  
GUO Yong-wei, ZHOU Xiao-bing. Analysis for Pipe Flexibility and Stress Based on Curvature Radius of Elbow[J]. Chemical Fertilizer Design, 2017, 55(2): 27-29.
- [21] 张光源, 盛小明. 基于有限元的内压载荷管道应力研究[J]. 工程建设与设计, 2020(14): 149-151.  
ZHANG Guang-yuan, SHENG Xiao-ming. The Stress Research of Pipeline under Internal Pressure Based on Finite Element Method[J]. Construction & Design for Engineering, 2020(14): 149-151.
- [22] 王品贤, 夏俏健, 牛志勇, 等. 国内外管道设计标准中管道壁厚计算方法差异[J]. 石油化工设备, 2020, 49(2): 53-57.  
WANG Pin-xian, XIA Qiao-jian, NIU Zhi-yong, et al. The Difference in Calculation Method of Pipeline Wall Thickness in Domestic and Foreign Pipeline Design Standards[J]. Petro-Chemical Equipment, 2020, 49(2): 53-57.
- [23] 沈乐, 夏阳, 钮钊钰, 等. 核电厂管道系统安全性的等几何分析[J]. 压力容器, 2018, 35(8): 47-51, 69.  
SHEN Le, XIA Yang, NIU Shan-xian, et al. Safety Assessment of Piping System in Nuclear Power Plant by Isogeometric Analysis[J]. Pressure Vessel Technology, 2018, 35(8): 47-51, 69.
- [24] 雷俊杰. 工艺管道一次应力校核方法分析[J]. 石油工程建设, 2017, 43(2): 39-42.  
LEI Jun-jie. Analysis of Sustained Stress Checking Method for Process Piping[J]. Petroleum Engineering Construction, 2017, 43(2): 39-42.
- [25] 唐永进. 石化管道二次应力校核条件的来源[J]. 石油化工设备技术, 2001, 22(1): 14-16, 3.  
TANG Yong-jin. The Source of Secondary Stress Check Condition for Petrochemical Pipe Line[J]. Petro-Chemical Equipment Technology, 2001, 22(1): 14-16, 3.
- [26] 刘浪, 张周红, 吴高峰, 等. CPR1000 核电厂一级管道应力分析[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(S2): 500-504.  
LIU Lang, ZHANG Zhou-hong, WU Gao-feng, et al. Class 1 Piping Stress Analysis for CPR1000 Nuclear Power Plant[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(S2): 500-504.