

文章编号: 0258-0926(2016)S2-0096-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S2.0096

不锈钢管道抗冲击分析应力折减因子研究

陈学德, 刘梓才, 张 鲲, 林 松, 李朋洲, 李锡华

中国核动力研究设计院反应堆工程研究所, 成都, 610213

摘要: 为分析不锈钢管道抗冲击弹塑性设计时应力折减因子的保守裕量, 采用自重、内压以及冲击载荷, 并运用不同的载荷放大因子及线弹性和弹塑性两种计算方法, 分别得到了 3 种载荷独立作用下不锈钢管道的名义弹性应力和实际塑性应变。通过比较分析结果, 发现规范中对冲击载荷引起的应力折减因子取为 0.25 较为保守, 提出冲击载荷的应力折减因子取 0.2 既能满足规范保守性要求又能降低评定标准的过度保守性。

关键词: 不锈钢管道; 冲击分析; 应力折减因子; 裕量

中图分类号: TB122 **文献标志码:** A

Research on Shock Stress Reduction Factor in Shock Stress Evaluation of Stainless Steel Piping

Chen Xuede, Liu Zicai, Zhang Kun, Lin Song, Li Pengzhou, Li Xihua

Reactor Engineering Research Institute, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: To study the over conservative margin of shock stress reduction factor in stainless steel piping designed by elasto-plastic rules, a method is used by carrying out elastic and elasto-plastic calculations for stainless steel piping with scaled three kinds of independent loads of gravity, pressure and shock loads, respectively, to obtain nominal stress and actual total strain for manifesting shock load's less damage effect on stainless steel piping. Comparative analysis results show that shock stress reduction factor 0.25 stipulated in shock codes is of conservative margin, and a new value of 0.2 is proposed for elasto-plastic design. Conclusion is that a new shock stress reduction factor of 0.2 by elasto-plastic design can not only meet the code requirements of conservatism but also reduce the over conservative margin in shock stress evaluation.

Key words: Stainless steel piping, Shock analysis, Shock stress reduction factor, Margin

0 前 言

依据 ASME 规范设计的核级管道系统需要考虑动载荷的作用^[1]。ASME 规范的动载荷主要指地震及阀门排放等载荷。但对于冲击载荷, 其载荷量级和频率特性都不同于 ASME 规范中的一般动载荷。管道系统冲击载荷作用下的应力值很大, 难以通过规范评定, 因而会引入大量的阻尼器或改变管道的尺寸规格, 导致设计变更、影响上游设计、延误设计工程周期, 或承受容易产生的阻尼器卡死和增大人员在役检查辐照剂量的弊端。

冲击试验表明, 不锈钢管道在高强度冲击产生大塑性变形的情况下, 仍能保持压力边界完整, 但无法通过规范冲击应力评定, 说明管道的冲击应力评定有过度的保守裕量^[2]。动载荷引起的应力对结构的破坏作用明显低于由持久机械载荷引起的应力, 因而 ASME 规范及 GJB 1060.1^[3]在评定动载荷引起的应力时, 引入了折减因子。ASME 规范主要在于防止结构的塑性坍塌和疲劳破坏, 处理动载荷时过于保守。在 ASME 规范修改管道应力评定准则前, 美国电力研究协会 (EPRI) 对

收稿日期: 2016-10-09; 修回日期: 2016-12-25

作者简介: 陈学德 (1965—), 男, 研究员, 学士, 现从事结构力学研究

管道系统地震试验的研究表明,管道在地震载荷作用下的失效载荷量级在 ASME 规范许可值的 15~30 倍区间^[4]。冲击载荷对不锈钢材料的应变率效应明显,材料强度在冲击载荷作用下大幅提升,进一步增强了现有冲击应力评定准则的保守裕量。已开展的承压管道极限冲击试验表明,冲击载荷作用下管道的实际承载能力至少 9 倍于现有规范允许的应力限值^[2]。为降低冲击载荷评定的过分保守性,探索合适的冲击分析应力折减因子,本文对典型管道进行抗冲击分析,并初步提出一个冲击分析应力折减因子。

1 现有应力折减因子

ASME 规范管道应力评定公式将动载荷以管道弯矩载荷的形式处理,并结合应力指数进行各级工况的应力评定。采用 B_2 作为不考虑冲击载荷的 B 级工况的应力指数,采用 B'_2 作为考虑冲击载荷的 C 级工况的应力指数。不论对于三通还是弯头均有 $B'_2 = \frac{2}{3} B_2$ 。即有冲击载荷作用时,ASME 规范通过应力指数的形式将冲击应力折减了 2/3。

GJB 1060.1 规定了其他机械载荷和冲击引起应力的组合方式。仅有弯曲应力时:

$$\sigma_b = 2\sigma_{b,s} + \sigma_{b,shock} \quad (1)$$

仅有剪应力时:

$$\tau = 2\tau_s + \tau_{shock} \quad (2)$$

式中, σ_b 为弯曲应力; τ 为剪应力; 下标 s 代表持续工作的机械载荷引起的应力分量,下标 shock 代表冲击载荷引起的应力分量。

既有正应力又有剪应力,应将冲击弯曲应力和剪应力减半后代入密赛斯强度准则应力分量组合方式:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij,s} + 0.5\sigma_{ij,shock} \quad (3)$$

式中, σ_{ij} 为组合应力分量; $\sigma_{ij,s}$ 为由持久机械载荷引起的应力分量; $\sigma_{ij,shock}$ 为由冲击载荷引起的应力分量。

因此, GJB1060.1—1991 规范弹性分析时对冲击载荷引起的应力折减因子取为 0.5,且又将抗冲击设计塑性载荷取值为弹性分析载荷的 0.5 倍,因而,在进行塑性抗冲击分析评定时, GJB1060.1—1991 规范对冲击载荷评定的应力折减因子实际为 0.25。

2 数值计算

为探索合理的冲击载荷应力折减因子,对典型直管模型采用代表性载荷自重、内压和冲击载荷进行计算分析。将同样载荷作用下线弹性分析得到的名义弹性应力对应于弹塑性分析得到的塑性应变,通过比例放大计算载荷,可以得到名义弹性应力和塑性应变对应的关系曲线,并基于不同载荷下该关系曲线的比较,提出降低保守裕度的冲击应力折减因子,并进行了 3 种方案的计算。

分析模型为悬臂梁管道,尺寸规格为 $\Phi 57 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$,材料为不锈钢。计算压力为 13.7 MPa,自重取为 9.81 m/s^2 ,冲击载荷采用 BV043-85 德国军标的时程载荷^[5],计算时材料特性数据与温度相关,其中弹塑性计算时不锈钢材料本构数据取自 RSE-M^[6]。管道计算模型见图 1,材料随温度变化的本构曲线见图 2。

表 1 计算方案

Table 1 Calculation Scheme

方案	载荷	计算方法	计算结果
1	比例放大自重	线弹性分析和弹塑性分析	名义弹性应力与塑性应变对应关系曲线
2	比例放大内压		
3	恒定内压自重下的比例放大冲击载荷		

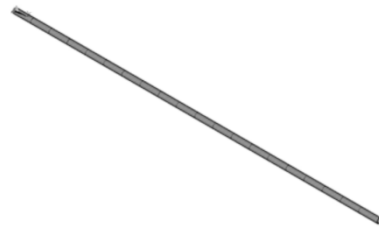


图 1 悬臂管道模型

Fig. 1 Catilever Pipe Model

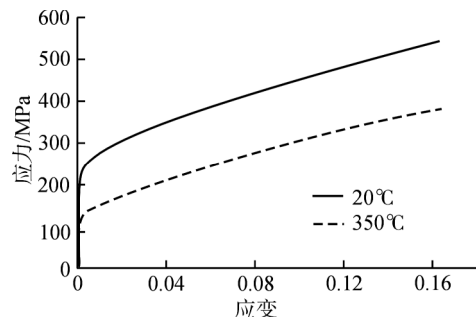


图 2 不锈钢管道材料本构曲线

Fig. 2 Constitutive Curve for Stainless Steel Pipe Material

3 结果分析

提取 3 种方案的计算结果,位置为悬臂管道

固定处根部,得到了线弹性分析时的名义应力和弹塑性分析时的应变。将名义弹性应力和应变对应关系数据点进行数据拟合。方案3与方案1的比较结果见图3,方案3与方案2的比较结果见图4。载荷性质不一样,结构对其响应行为也不一样,计算数据点的分布规律体现了这一特点。

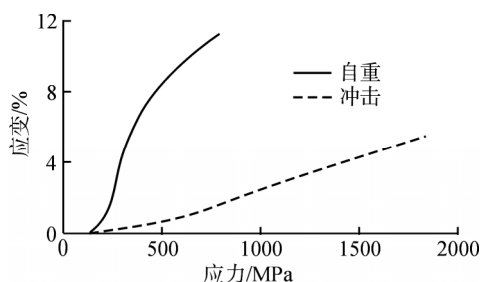


图3 方案3与方案1计算结果对比

Fig. 3 Results Comparison between Scheme 3 and Scheme 1

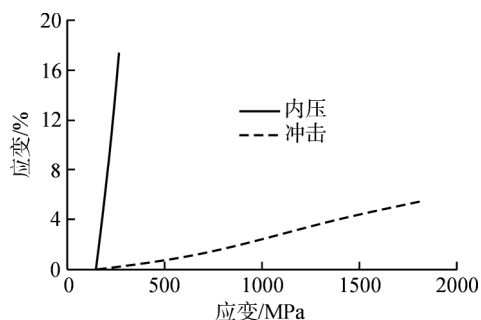


图4 方案3与方案2计算结果对比

Fig. 4 Comparison of Results between Scheme 3 and Scheme 2

从图3和图4可知,在产生同样名义应力的情况下,冲击载荷产生的塑性应变要比自重和内压产生的塑性应变小;或同样的应变水平下,冲击载荷的名义弹性应力大。换言之,冲击载荷对管道结构造成的损伤远小于持久机械载荷产生的损伤。冲击载荷结果曲线斜率要比自重或内压的数据曲线斜率小,表明将冲击载荷的应力进行折减还有很大的空间。

4 新折减因子

已有冲击载荷的应力折减因子,ASME为 $2/3$,GJB1060.1—1991为 0.25 。将冲击应力折减因子取值为 0.2 ,其结果见图5,结果表明,折减因子取 0.2 仍然具有合理的保守性。鉴于计算分析时采用的材料本构曲线未考虑冲击载荷的应变

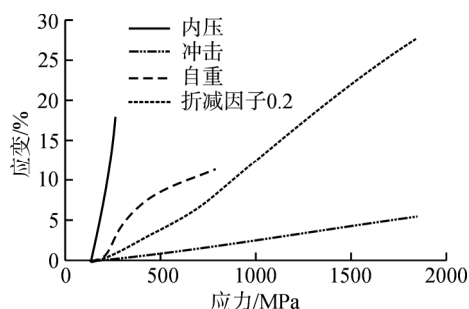


图5 冲击载荷冲击应力折减因子取0.2的对比

Fig. 5 Comparison of Results between Shock Load and Other Loads

率效应,计算结果已包含了额外的保守裕量,因而 0.2 的折减因子既能满足规范保守性要求,又能降低评定标准的过度保守性。

按新的冲击应力折减因子取值时,冲击应力与持久机械载荷引起的应力组合形式如下:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij,s} + 0.2\sigma_{ij,shock} \quad (4)$$

5 结论

基于自重、内压和冲击载荷的线弹性以及弹塑性计算结果,比较了各种载荷的破坏效应,基于已有评定规范的冲击折减因子,初步提出了弹塑性抗冲击设计分析时新的冲击应力折减因子为 0.2 。冲击应力按 0.2 折减后,其对应的管道损伤程度(塑性应变)依然小于持久机械载荷引起的损伤,因而本文提出的冲击应力折减因子既降低了已有评定规范的保守性又满足规范的保守性要求。

参考文献:

- [1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code,2010 edition. Rules for construction of nuclear facility components [S]. 2010.
- [2] 陈学德,崔颖昕.核动力装置管道系统抗冲击试验报告:ZHJL-1-005 [R].成都:中国核动力研究设计院,2005.
- [3] 国防科学技术工业委员会.舰船环境条件要求—机械环境:GJB 1060.1 [S].北京:国防科学技术工业委员会,1991.
- [4] Tagart Jr Sam W, Tang Y K, Guzy Daniel J, et al. Piping dynamic reliability and code rule change recommendations[J]. Nuclear Engineering And Design, 1990,123:373-385.
- [5] BV043. Shock security. Naval vessel fabricate criterion of German defense army[S]. 1985.
- [6] RSE-M,2000. In service inspection rules for the mechanical components of PWR nuclear islands[S]. 2000.

(责任编辑:马蓉)