

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0347-06

异径弯管在扭矩作用下的应力及极限扭矩验证

陈孙艺

(茂名重力石化机械制造有限公司, 广东 茂名 525024)

摘 要: 通过有限元分析和实验对异径弯管在扭矩作用下的弹性应力及极限扭矩解析解进行了验证。有限元分析表明, 端面扭矩在异径弯管中的作用一定程度上类似面内弯矩在异径弯管中的作用, 证实了扭矩在弯管中传递过程的弯矩化效应。小端受扭的有限元分析表明, 最大环向应力位于异径弯管模型小端的外拱处, 误差不超过 5%, 与解析解的结论一致, 但解析解略偏危险。大端受扭的实验表明, 小端的应力水平高于大端, 但极限扭矩解析解较大多数实测的结果明显偏保守。

关键词: 弯头; 异径弯管; 弹性应力; 等效应力; 名义应力; 扭矩; 极限扭矩; 实验验证

中图分类号: TB125 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.04.S030

TESTING OF STRESSES AND LIMIT TWISTING MOMENTS OF REDUCING ELBOWS SUBJECT TO TWISTING MOMENTS

CHEN Sun-yi

(The Challenge Petrochemical Machinery Corporation of Maoming, Maoming, Guangdong 525024, China)

Abstract: The formula solutions of elastic stresses and the limit torque of reducing elbows subject to twisting moments were validated according limit element analysis (LMA) and testing. The results of LMA shows that the effect of twisting moment on the end of reducing elbows is just similar to that of reducing elbows subject to in-plane close-bending moments. The effect of a twisting moment turns to be a bending moment during transferring along a bend pipe was validated gradually. The results of LMA with a smaller end subject to a twisting moment are show that the most stresses lie on outside the arch of the smaller end of reducing elbows, and the error is not overrun with 5 percent. It is mean that the testing result is consistent with formula solutions but it is a little dangerous. The testing results of a larger end subject to a twisting moment show that the stress level of a smaller end is higher than that of the larger end of reducing elbows. The formula solutions of limit torques are safety than that of most testing results clearly.

Key words: pipe elbows; reducing elbows; elastic stress; equivalent stress; nominal stress; twisting moments; limit twisting moment; proof test

异径弯管是等径弯管和直的异径管两种传统管件融二为一的新结构, 可替代两者端面连接一起的组合焊接结构, 一定程度上具有两者的功能特性, 但与两者又不完全相同而具有自己独特的特征^[1]。前人对外来载荷作用下弯管的应力水平及其承力能力进行了一定的研究分析^[2-4], 在此基础上, 文献[5]求取了内压作用下异径弯管的无力矩环向应力解析解, 文献[6]对弯管在面内开弯矩作用下的弹性应力进行了解析求解, 文献[7]对异径弯管在面

内闭弯矩作用下的弹性应力及极限闭弯矩进行了解析求解, 文献[8]对偏心异径管在扭矩作用下的弹性应力及极限扭矩进行了解析求解。按 Mises 等效应力及其屈服条件推导得异径弯管小端受扭时的极限扭矩为^[9]:

$$M = 1.15\pi r_2^2 t \sigma_f \quad (1)$$

异径弯管大端承受扭矩时的极限扭矩为^[9]

$$M = 0.71\pi r_2^2 t \sigma_f \quad (2)$$

式中: M 为扭矩; r_2 为异径管小端截面的平均半

径; t 为管件壳壁厚度; σ_f 为材料的流变应力。本文通过有限元数值分析和实验对上述两条公式的正确性进行验证。

1 异径管的有限元计算模型

1.1 计算模型

异径弯管有限元模型的几何尺寸见表 1。为消除内压在连接处几何变形不协调产生的边缘应力,

在大、小口两端分别加长直管段最短长度 $l_1 = 2.5\sqrt{r_{1i}}t$ 、 $l_2 = 2.5\sqrt{r_{2i}}t$ 来消除附加应力。单元采用 ANSYS 提供的 6 面体 20 节点实体等单元,壁厚网格划分为 3 层以达到计算所需的精度。端部约束对结果有显著影响,模型大端固定,小端自由。材料均采用理想弹塑性材料,但是为了满足有限元计算的条件要求,一般设材料有微弱的强化,强化模式为双线性随动强化,异径管段材料特性见表 2。

表 1 异径弯管的有限元模型尺寸 /mm
Table 1 Size of limit element model of reducing elbow

模型规格	大端外/内半径 r_{1o}/r_{1i}	大端管长 l_1	弯曲半径 R	小端外/内半径 r_{2o}/r_{2i}	小端管长 l_2
$\phi 168/\phi 89 \times 9.5$	84/74.5	500	$1.0D_{10}=168$	44.5/35	270

表 2 模型材料性能 /MPa
Table 2 Material performance of limit element model

屈服强度 R_{eL}	抗拉强度 R_m	流变应力 σ_f	弹性模量 E^{20}	强化模量 E_1	波松比 ν
250	410	330	200000	2000	0.3

表中 $\sigma_f = 0.5(R_{eL} + R_m)^{[10]}$, 但假设相连的直管段 $\sigma_f = 2000 \text{ MPa}$, 以确保异径弯管段在达到极限状态前, 相连的直管段不会因面载荷作用而使计算程序发散。

管件端面扭矩的有限元模型有多种加载方法, 本文把端面扭矩 M 转化到中径为 r 的端面所有节点的平均切向力。先确认所选端面节点的状态正确, 同时读取节点总数 n , 为计算节点平均力提供依据; 将端面坐标系转为极坐标系, 进入前处理程序旋转节点, 检阅节点的旋转状态正确与否; 在极坐标系端面每一节点上施加 M/rn 的均等切向力。

1.2 异径弯管小端受扭的位移分析

图 1~图 2 是同一异径弯管模型的有限元运算结果, 图 1 是模型小端受到开弯矩作用时内表面的环向位移云图, 图 2 是模型小端受到扭转作用时内表面的环向位移云图。

比较图 1 和图 2, 两者的云纹分布及走向相同, 均是从内拱螺旋过渡到外拱, 越近大端其位移量越小; 但两者的云纹形状略有差异, 图 1 的螺旋过渡线较短, 从异径弯管小端到大端经过 6 个云纹色块的过渡, 位移量值从大到小, 而图 2 的螺旋过渡线较长, 从异径弯管小端到大端只有 3 个云纹色块过渡, 且大端接管、异径弯管大端及其内拱的云纹为相同的色块, 位移量值很小。由此可见, 端面扭矩在异径弯管中的作用一定程度上类似面内弯矩在异径弯管中的作用, 证实了文献[9]提出的扭矩在异径弯管中传递过程的弯矩化效应, 但是扭矩在弯矩

化过程中并不像文献[9]提出的转化得那么彻底。几项有限元分析均表明, 90° 异径弯管的一端承受扭矩时, 另一端面上的剪应力并不等于零, 而是比受扭端面的剪应力低一数量级的值。

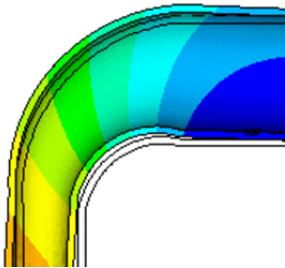


图 1 模型开弯矩的环向位移
Fig.1 Circumferential displacement of model under open bending

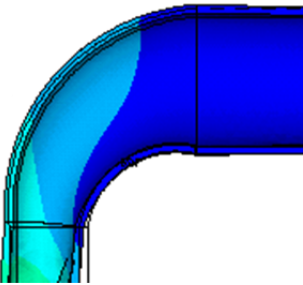


图 2 模型扭转内面环向位移
Fig.2 Circumferential displacement of model under twist moment

1.3 异径弯管小端受扭的应力分析

异径弯管模型小端在 $2.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 扭矩作用下的环向应力云图见图 3, 密赛斯等效应力见图 4。由

图3可见,最大环向应力4428 MPa位于异径弯管模型小端的外拱处,与文献[9]在小端面 $\varphi=0.5\pi$ 处有最大等效应力的结论一致,最大等效应力解析解^[9]为图4所示最大密赛斯等效应力4402 MPa也位于异径弯管模型的小端处,它们与最大等效应力解析解^[9]的误差分别有-3.7%、1.5%,解析解偏危险。

$$\sigma_{eq}^{max} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{M}{\pi r_2^2 t} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{2.5}{\pi \times 39.75^2 \times 9.5} \approx 4591 \text{ MPa} \quad (3)$$

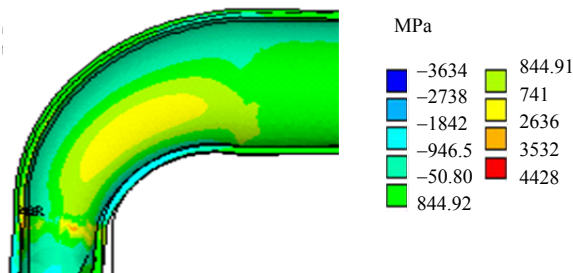


图3 模型扭转的环向应力

Fig.3 Circumferential stress of model under twist moment

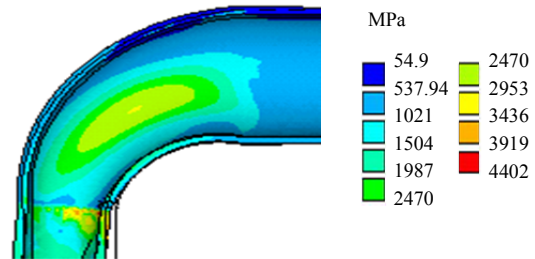


图4 模型扭转的密赛斯等效应力

Fig.4 Mises equivalent stress of model under twist moment

2 异径弯管大端受扭的实验分析

2.1 实验试件

有关数据见表3,表中强度值是按GB1172《黑色金属硬度及强度换算值》中的经验公式 $\sigma_b \approx 3.5378 \text{ HB(MPa)}$ 换算而得,较实测强度稍低。异径管的实验见图5。由于各应力曲线图中的应力值由所测应变按弹性应力公式计算,而实际应变已可能包括塑性应变,因此,曲线中的应力均称为名义应力。

表3 实验试件的主要尺寸及表面硬度检测值、强度推算值

Table 3 Testing results of surface hardness and main dimension and calculating strength of sample

大小端公称口径× 壁厚-弯曲半径/mm	大端外径/mm	大端壁厚/mm	小端外径/mm	小端壁厚/mm	轴长/mm	大端		小端	
						硬度/HB	强度/MPa	硬度/HB	强度/MPa
φ168/φ89×9.5-229.2	165.5	8.25	87.9	9.36	360	95	336	123	435

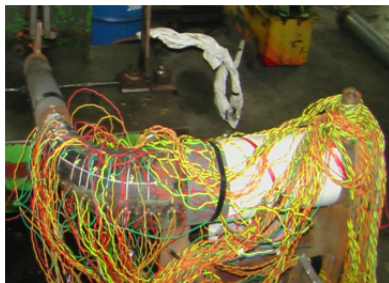


图5 异径弯管扭转实验

Fig.5 Twisting test of reducing elbow

2.2 最大主应力分析

异径弯管大端受扭时名义最大主应力曲线见图6~图8,分析如下。

最大主应力。分析结果:1)不同经线上的最大主应力曲线区别较大,除内拱上的最大主应力曲线外,均显出大端的应力曲线较集中,小端的应力曲线较分散;内拱上的最大主应力曲线随扭矩的增大先陡峭后缓和。2)从大端到小端,中性线上的最大主应力曲线由集中到分散,向外拱扭转的中性线应力曲线与向内拱扭转的中性线应力曲线有差别。

3)从大端到小端,外拱上的最大主应力曲线集中成

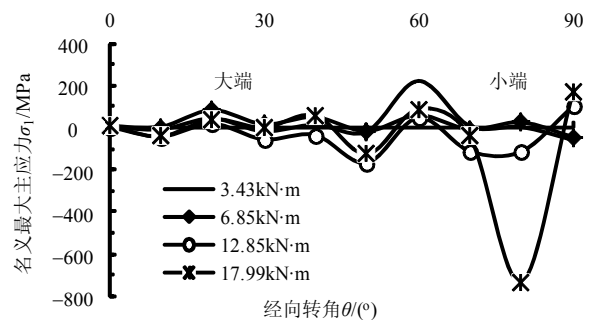


图6 向外拱扭转的中性线处最大主应力

Fig.6 Max. principal stress at tend-to-outside flank

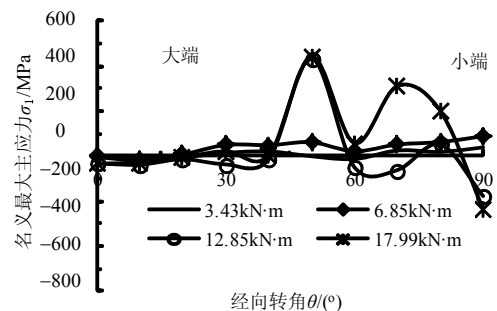


图7 向内拱扭转的中性线处最大主应力

Fig.7 Max. principal stress at tend-to-inside flank

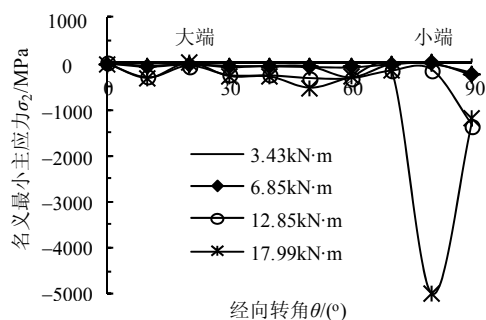


图 8 向外拱扭转的中性线处最小主应力

Fig.8 Mini. principal stress at tend-to-outside flank

一条零应力线,较大扭矩下靠近小端才向压应力分散。4)内拱上最大主应力水平较低,外拱上靠近小端最大主应力水平较大。

2.3 最大剪应力分析

名义最大剪应力曲线见图 9~图 12,分析如下。最大剪应力分析结果:1)最大剪应力曲线与主应力曲线区别较大,除曲线形状走势不同外,最大剪应力均为拉应力。2)从 $0^\circ \sim 40^\circ$ 经向转角范围内,各经线上最大剪应力曲线是较平缓的拉应力曲线,除了向外拱扭转的中性线上的最大剪应力曲线在该段经向转角范围内较集中外,其他各经线上的最大剪应力曲线均随扭矩载荷的增大而分散。3)外拱上最

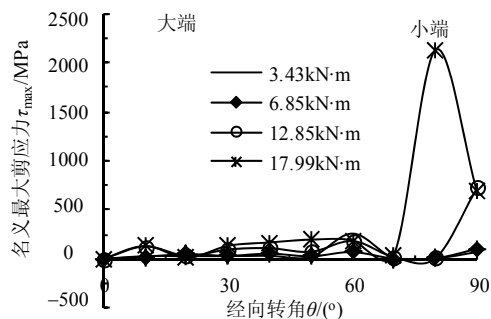


图 9 向外拱扭转的中性线处最大剪应力

Fig.9 Max. shear stress at tend-to-outside flank

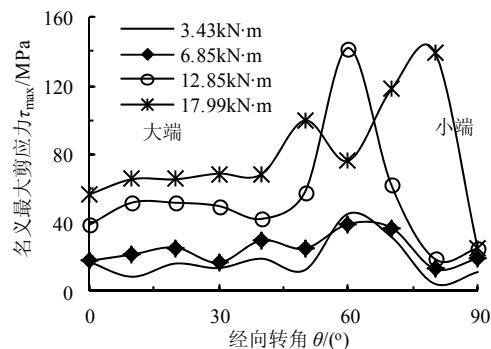


图 10 外拱处最大剪应力

Fig.10 Max. shear stress at extrados

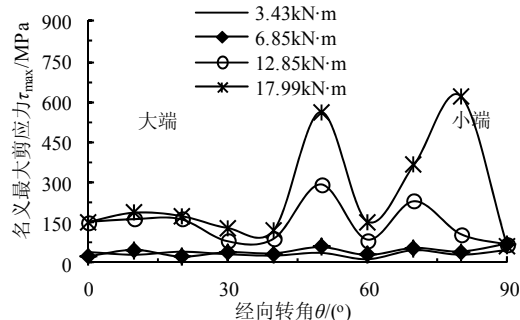


图 11 向内拱扭转中性线处最大剪应力

Fig.11 Max. shear stress at tend-to-inside flank

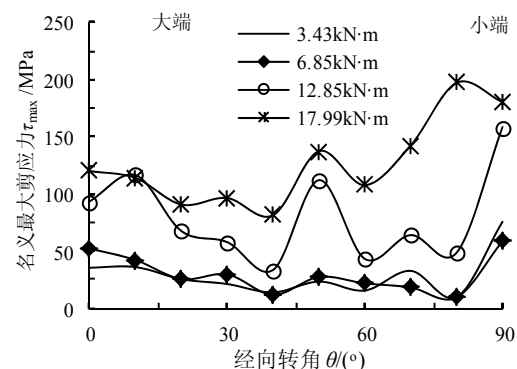


图 12 内拱处最大剪应力

Fig.12 Max. shear stress at intrados

大剪应力曲线的应力水平较低,内拱的较外拱的略大,向外拱扭转的中性线上靠近小端 80° 经向转角处的最大剪应力水平较大。4)越靠近大端,曲线越集中和缓和。

2.4 极限扭矩分析

分析各应力曲线,小端的应力水平高于大端,与式(2)表达的异径弯管大端承受扭矩时其极限扭矩由小端口截面控制的结论一致。由小端的应力绘制得扭矩应力曲线如图 13 和图 14 所示,求得异径弯管的极限扭矩分别为 $14.1 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 和 $14.6 \text{ kN}\cdot\text{m}$,由其他扭矩应力曲线求得的结果均列于表 4。

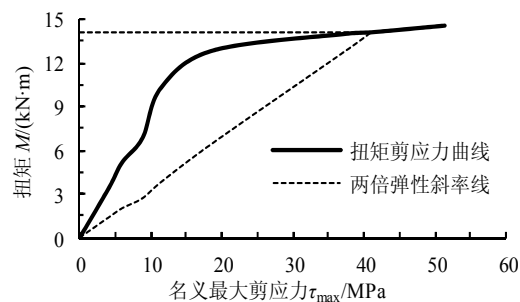


图 13 外拱线小端的扭矩最大剪应力

Fig.13 Relation between twisting moment with max. shear stress at extrados

表 4 异径弯管极限扭矩实验结果

Table 4 Testing results of limit twisting moment of reducing elbow

图号及结果/(kN·m)	不考虑误差时与解析解相差/(%)	考虑误差时与解析解相差/(%)	应力及测定位置
图 10 和图 13 得 14.1	19.6	2.8	外拱小端的最大剪应力
图 11 和图 14 得 14.6	28.7	6.4	内扭中性线小端的最大剪应力
15.5	26.8	13.0	内扭中性线小端的最小主应力
12.4	8.5	-9.6	外扭中性线小端的最大剪应力
14.9	23.9	8.6	外扭中性线小端的最小主应力
10.3	-10.1	-24.9	外拱小端的最大主应力
10.3	-10.1	-24.9	外拱小端的最小主应力

式(2)不考虑误差时解析解 11.34kN·m, 考虑误差时解析解 13.72kN·m, 其中 $\sigma_f = 358 \text{ MPa}$

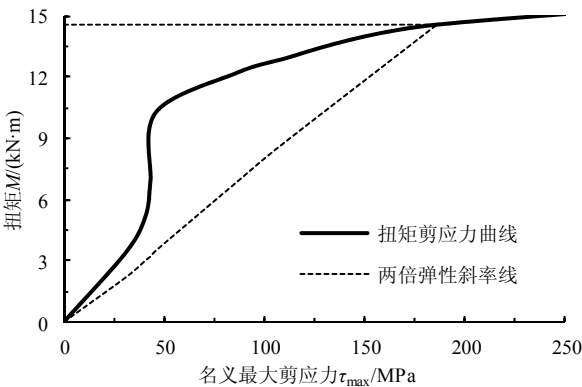


图 14 向内拱扭转的中性线小端的扭矩最大剪应力
Fig.14 Relation between twisting moment with max shear stress at tend-to-inside flank

分析可得, 异径弯管大端受扭矩加载作用下, 极限扭矩解析解较大多数实测的极限扭矩实验结果明显偏保守, 最大相差达 28.7%, 与外拱处小端实测的最大主应力、最小主应力求取的结果相比则误差减小但偏危险。可以测算, 如果应用小端受扭时的极限扭矩式(1)来计算大端受扭时异径管的极限扭矩, 也是误差减小但是解析解偏危险。

实验误差与图 6 实验装置精度、试件精度及加载方式有关。试件强度性能不均匀, 小端强度偏高, 主要是管件组焊焊缝的高强度带来了影响。把焊缝余高和焊缝强度按小端壁厚为 1.1t、流变应力 $1.1\sigma_f$ 代入式(2)再计算, 则得解析解 13.72 kN·m, 实验测得剪应力计算结果的误差在 $\pm 10\%$ 内。

3 结论

(1) 有限元分析表明, 端面扭矩在异径弯管中的作用一定程度上类似面内弯矩在异径弯管中的作用, 证实了扭矩在弯管中传递过程的弯矩化效应, 但是扭矩在弯矩化过程中并不像解析解理论分析提出的转化得那么彻底。90°异径弯管的一端承受扭矩时, 另一端面上的剪应力并不等于零, 而是比受

扭端面的剪应力低一数量级的值。
(2) 小端受扭的有限元分析表明, 最大环向应力位于异径弯管模型小端的外拱处, 与解析解的结论一致。有算例表明, 最大环向应力、最大密赛斯等效应力、最大等效塑性应力与最大等效应力解析解的误差不超过 5%, 但解析解略偏危险。
(3) 大端受扭的实验表明, 极限扭矩解析解较大多数实测的极限扭矩实验结果明显偏保守, 但主要是管件组焊焊缝的高强度所致。去除操作因素后, 误差在工程许可的 $\pm 10\%$ 内。小端的应力水平高于大端, 与解析解所表达的异径弯管大端承受扭矩时其极限扭矩由小端口截面控制的结论一致。

参考文献:

[1] 陈孙艺. 异径管特点的研究及其设计选用[J]. 石油化工设计, 2005, 22(3): 52—54.
Chen Sunyi. Study on the characteristics of reducer and its selection in engineering [J]. Petrochemical Design, 2005, 22(3): 52—54. (in Chinese)
[2] 潘家华, 郭光臣, 等. 油罐及管道强度设计[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986: 238—246.
Pan Jiahua, Guo Guangchen, et al. Strength design of oil tank and pipeline [M]. Beijing: Petroleum Industry Publishing Company, 1986: 238—246. (in Chinese)
[3] [苏]阿英宾杰尔 А Б, 卡麦尔什捷英 А Г 著. 干线管道强度及稳定性计算[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986: 368—370.
[Russia]А.Б.Аинбиндер, А.Г.Камерштеин. Calculation of trunk-line strength and stability [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986: 368—370. (in Chinese)
[4] Yahiaoui K, Moffat D G, Moreton D N. Piping elbows with cracks. Part 1: A parametric study of the influence of crack size on limit loads due to pressure and opening bending [J]. J. Strain Analysis, 2000, 35(1): 35—46.
[5] 陈孙艺, 柳曾典. 异径弯管的无力矩经向应力解析解[J]. 塑性工程学报, 2005, 12(2): 48—51.
Chen Sunyi, Liu Cengdian. Meridian membrane stress of bend reducer [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005,

- 12(2): 48—51. (in Chinese)
- [6] 陈孙艺. 弯管在面内开弯矩作用下的弹性应力解析解[J]. 工程力学, 2010, 27(增刊 II): 163—166.
Chen Sunyi. Elastic stresses for pipe elbows subjected to in-plane open-bending moments [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(Suppl II): 163—166. (in Chinese)
- [7] 陈孙艺, 柳曾典, 陈进, 何录武. 异径弯管在面内闭弯矩作用下的弹性应力及极限闭弯矩解析解[C]//压力管道技术研究进展精选集. 北京: 化学工业出版社, 2010: 37—41.
Chen Sunyi, Liu Cengdian, Chen Jin, He Luwu. Elastic stresses and limit close-bending moments of reducing bends subject to in-plane close-bending moments[C]// Omnibus of Technology Study Development on Pressure Piping, Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2010: 37—41. (in Chinese)
- [8] 陈孙艺. 偏心异径管在扭矩作用下的弹性应力及极限扭矩解析解[C]//第 19 届全国结构工程学术会议论文集. 北京: 工程力学杂志社, 2011(I): 255—258.
Chen Sunyi. Elastic stresses and limit twisting moments of eccentric reducers subject to twisting moments [C]// Proceedings of the 19th National Conference on Structural Engineering (No. I), Beijing: Engineering Mechanics Publishing House, 2011(I): 255—258. (in Chinese)
- [9] 陈孙艺, Liu Cengdian, Chen Jin, He Luwu. Elastic stresses and limit twisting moments of reducing elbows subject to twisting moments [C]// Proceedings of the 12th International Conference on Pressure Vessel Technology. Korea, 2009, SA4-3: 538—543.
- [10] 陈孙艺. 屈服极限和流变应力以及塑性极限载荷的确定方法综述[C]//压力管道技术研究进展精选集. 北京: 机械工业出版社, 2006: 60—66.
Chen Sunyi. Method summarize to obtain the yield limit and the flow stress and the plastic limit load of structure [C]// Omnibus of Technology Study Development on Pressure Piping, Beijing: Machine Industry Publishing House, 2006: 60—66. (in Chinese)

(上接第 346 页)

- [3] Aronsen K H, Larsen C M. Hydrodynamic coefficients for in-line vortex induced vibrations [C]// Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering 2007, ASME (COR), 2007, 3: 949—956.
- [4] 孟昭瑛, 杨树耕, 王仲捷. 水下管道涡激振动的实验研究[J]. 水力学报, 1994, 7: 43—50.
Meng Zhaoying, Yang Shugeng, Wang Zhongjie. An experimental study on vortex-excited vibration of subwater pipeline [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 7: 43—50. (in Chinese)
- [5] 余建星, 罗延生, 方华灿. 海底管线管跨段涡激振动响应的实验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(4): 93—97.
Yu Jianxing, Luo Yansheng, Fang Huacan. A test study on dynamic response of submarine pipeline spans[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(4): 93—97. (in Chinese)
- [6] Datta T K, Mashaly E A. Transverse response of offshore pipelines to random ground motion [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1990, 19(2): 217—228.
- [7] 周晶, 李昕, 马恒春, 等. 地震时海底悬跨管道动力特性试验研究[J]. 水利学报, 2003(1): 12—16.
Zhou Jing, Li Xin, Ma Hengchun, et al. Experiment study on dynamic characteristics of free spanning submarine pipelines due to earthquake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(1): 12—16. (in Chinese)
- [8] 董汝博, 周晶, 冯新. 部分悬跨海底管道多点输入地震反应分析[J]. 振动工程学报, 2008, 21(2): 146—151.
Dong Rubo, Zhou Jing, Feng Xin. Multi-input seismic analysis of partly spanning submarine pipelines [J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(2): 146—151. (in Chinese)
- [9] 李明高. 基于水动力模型的海底悬跨管道地震反应分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
Li Minggao. Seismic response analysis of free spanning submarine pipelines based on hydrodynamic force model suitable for earthquake [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [10] GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011-2010, Code for seismic design of building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)