

# 玻璃钢 - 不锈钢衬里复合管道应力变形数值模拟

范成磊<sup>1</sup> 方洪渊<sup>1</sup> 万鑫<sup>1</sup> 杨建国<sup>1</sup> 侯贤忠<sup>2</sup>

(1 哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室,哈尔滨 150001)

(2 大庆油化焊接研究所,大庆 163712)

**文 摘** 主要就内径为 200 mm 玻璃钢 - 薄壁不锈钢衬里复合管道在工作载荷和过载条件下的应力变形情况进行了数值模拟。数值模拟的结果表明:在设计工作压力下管道是安全的,并且应力、应变和径向位移在玻璃钢壳层和不锈钢衬里的界面处是连续分布的,这保证了载荷在界面处的连续传递;当管道内部压力达到设计工作载荷的 2.2 倍时,不锈钢衬里几乎达到全面屈服,但玻璃钢壳层中的应力还远远小于其断裂极限,管道仍然具有进一步承载能力;进一步加大载荷至 7.4 倍的设计压力,玻璃钢壳层达到断裂极限,管道破坏。计算结果与实验结果吻合良好,说明这种复合管道具有较高的承受过载的能力,管道的设计具有较大的安全系数。当内径 200 mm 长度达 6 m 充满水的复合管道在距端部 1 m 处支撑时,管道的最大挠曲产生在管道的中部,最大挠度为 0.3 mm,这与实验结果也是一致的。

**关键词** 复合管道,应力,变形,数值模拟

## Numerical Simulation of Stress and Distortion for GFRP Compound Conduit with Stainless Steel Liner

Fan Chenglei<sup>1</sup> Fang Hongyuan<sup>1</sup> Wan Xin<sup>1</sup> Yang Jianguo<sup>1</sup> Hou Xianzhong<sup>2</sup>

(1 Harbin Institute of Technology, State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin 150001)

(2 Oil-chemwelding Institute, Daqing 163712)

**Abstract** Numerical simulation of stress and strain under working load and overload is conducted for a 200 mm interior diameter compound conduit of fiberglass-reinforced-plastics with stainless steel liner. The results show that the conduit is safe under design working pressure, and the stress, strain and radial displacement are of continuous distribution at interface of crust and stainless steel liner, which guarantees continuous transfer of load at the interface. When interior pressure of the conduit is 2.2 times of design working load, the stainless steel liner almost reaches complete yield. However, the stress of the fiberglass-reinforced-plastics crust is far less than breaklimit, remaining bearing capacity. The conduit can endure 7.4 times of working load before break, and this result fits well with that of the experiment, which indicates that the conduit has good ability to bear overload, and its design safety factor is larger. When support a 6 m length compound conduit is at 1 m from the conduit end, peak value of flexure distortion of the conduit is at the middle and a maximum flexibility is 0.3 mm, which also accords well with that of the experiment.

**Key words** Compound conduit, Stress, Distortion, Numerical simulation

收稿日期:2003-10-24;修回日期:2003-12-08

范成磊,1976 年出生,博士研究生,主要从事焊接力学与可靠性方面的研究工作

宇航材料工艺 2004 年 第 4 期

— 51 —

## 1 前言

普通碳钢管道具有成本高、质量大、耐蚀性低的缺点<sup>[1,2]</sup>,针对这些问题,我们设计出一种新型的玻璃钢-薄壁不锈钢衬里复合管道。其设计思想是利用较厚的玻璃钢壳层承受工作载荷,非常薄的不锈钢衬里作为耐腐蚀材料。这种管道具有密度小、比强度大、成本低、制造连接方便以及对所输送的介质没有二次污染等优点<sup>[1~5]</sup>。

本文的目的在于用数值模拟的方法,明确管道工作时应力和变形分布状态和管道的承载极限,验证管道的设计思想,也为这种新型管道的安全使用和进一步挖掘潜能奠定基础。

## 2 管道的规格和有限元分析

就一种典型规格的复合管道进行了分析,其内径为 200 mm,长度为 6 m,玻璃钢壳层的厚度为 12 mm,不锈钢衬层的厚度为 0.8 mm。管道的具体结构见图 1。管道工作载荷是内部高达 6 MPa 的水压,其有限元计算模型如图 2 所示,水压载荷均匀作用于管道内壁上。

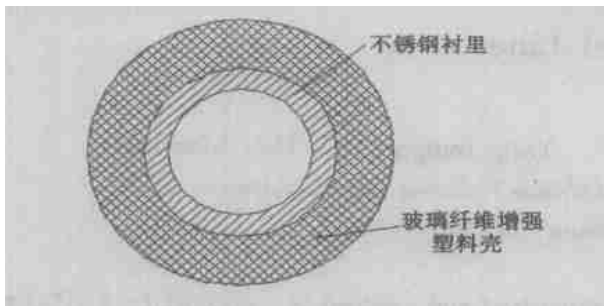


图 1 复合管道结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of the compound conduit

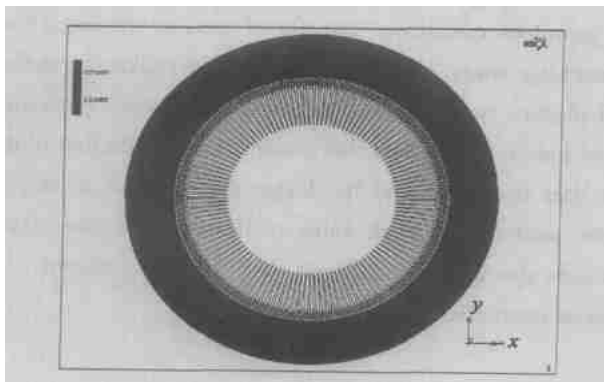


图 2 复合管道有限元计算模型

Fig. 2 FEM model of the compound conduit

由于在工作载荷作用下,管道有径向扩张、长度缩短的变形趋势,所以进行数值计算时设定约束边界条件为:位于垂直于  $x$ 、 $y$  方向的半径截面上的节点在  $x$ 、 $y$  方向位移为零,而在长度方向上管道自由收缩。管道横截面的径向、周向尺寸与其长度方向尺寸相差悬殊,这是一个平面应变问题<sup>[6]</sup>。

## 3 结果和讨论

图 3 和图 4 分别表示的是管道在工作载荷作用下,管道横截面中等效应变和等效应力的分布。

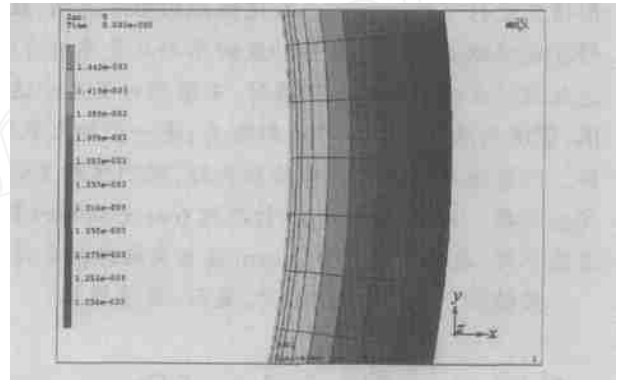


图 3 在工作载荷作用下管壁中的应变分布  
(局部放大)

Fig. 3 Strain distribution of the conduit wall under working load (locally magnified)

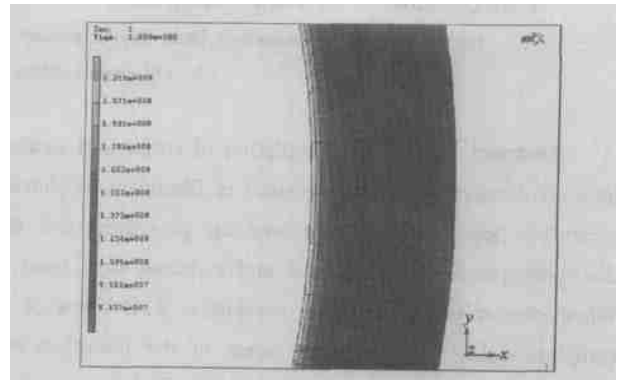


图 4 在工作载荷作用下管壁中的应力分布(局部放大)

Fig. 4 Stress distribution of the conduit wall under working load (locally magnified)

图 5 所示是等效应力沿管道壁厚分布曲线。从图 3~图 5 可以看出,应力和应变在玻璃钢壳层和不锈钢衬里的界面处是连续分布的,而不是事先认为的在界面处会出现应力集中的情况。

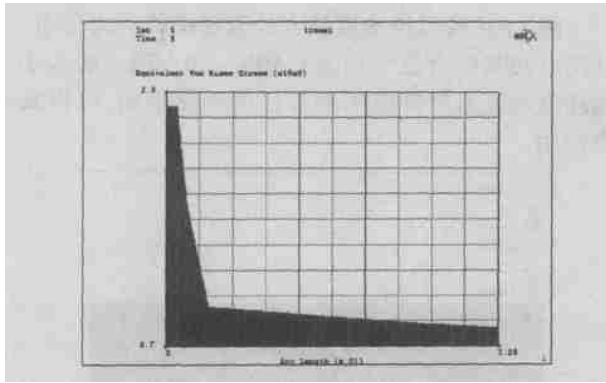


图5 沿管壁厚应力分布曲线

Fig. 5 Stress distribution curve along the conduit wall thickness

图6是管壁中 $x$ 方向的位移分布图。由图可以看出尽管在管壁不同部位 $x$ 方向的位移有大小和符号的变化,但在任一处 $x$ 方向位移沿径向分布是连续的,在玻璃钢壳层和不锈钢衬里的界面处没有出现位移间断现象; $y$ 方向的位移情况亦然,不过方向要偏转 $90^\circ$ 。综合 $x$ 、 $y$ 方向的位移情况,说明管壁中径向位移是连续分布的。

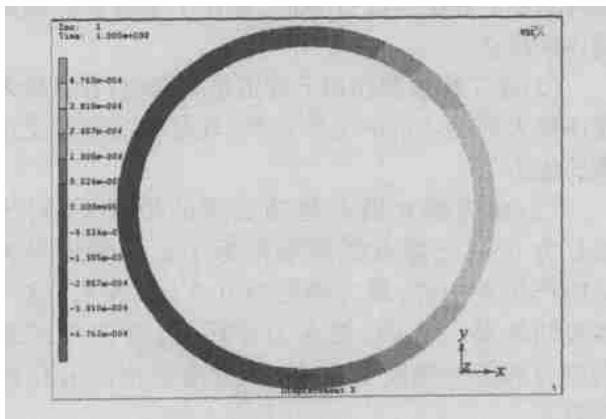


图6 管壁中 $x$ 方向位移分布

Fig. 6 Displacement distribution of the  $x$ -direction in the conduit wall

图7表明当玻璃钢壳层单独承受44 MPa的内压力时(为复合管道额定工作载荷的7.33倍),玻璃钢壳层中的最大应力达到玻璃钢的断裂极限(412 MPa)。图8表示的是当不锈钢衬里单独承受1.2 MPa的内压时(仅为复合管道设计工作载荷的20%),不锈钢衬里在整个横截面上几乎全面屈服(屈服应力221 MPa)。而从图9可以看出,当玻璃钢外壳和不锈钢衬里组合成为复合管道后,当内压力

达到2.2倍工作载荷(13.2 MPa)时,管壁中不锈钢衬里才达到全面屈服状态。这也充分证明大部分载荷由玻璃钢外壳层承担。

综合图4、图5、图7、图8可以看出,当复合管道承受工作载荷时,有一半左右的不锈钢衬里达到屈服极限,由于大部分的载荷由玻璃钢壳层承担,而这时玻璃钢壳层中的应力还远小于其断裂极限,所以管道是安全的。当载荷进一步增大至不锈钢衬里全面屈服时(图8),玻璃钢壳层中的应力仍然远小于其断裂极限,管道依然是安全的。如果内压继续增大,不锈钢衬里中的应力维持不变,而玻璃钢壳层中的应力持续上升直到其达到断裂极限后破裂,整个管道破坏。

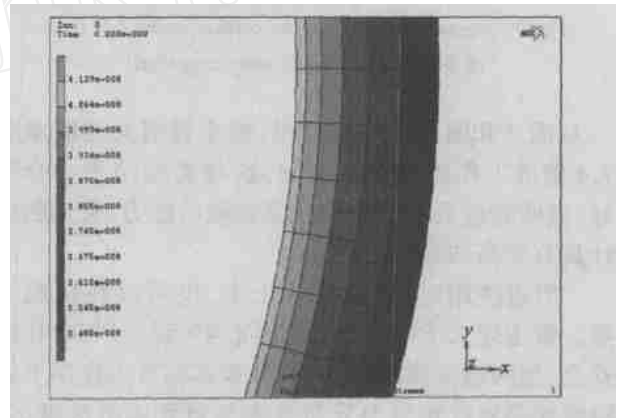


图7 当玻璃钢外壳单独承受44 MPa内压时壳壁中应力分布(局部放大)

Fig. 7 Crust wall stress distribution under an interior pressure of 44 MPa (locally magnified)

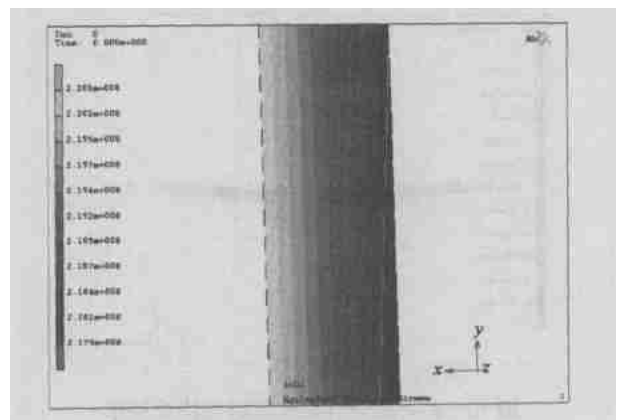


图8 当不锈钢衬层单独承受1.2 MPa内压管壁中的应力分布(局部放大)

Fig. 8 Stress distribution of the conduit wall under an interior pressure of 1.2 MPa (locally magnified)

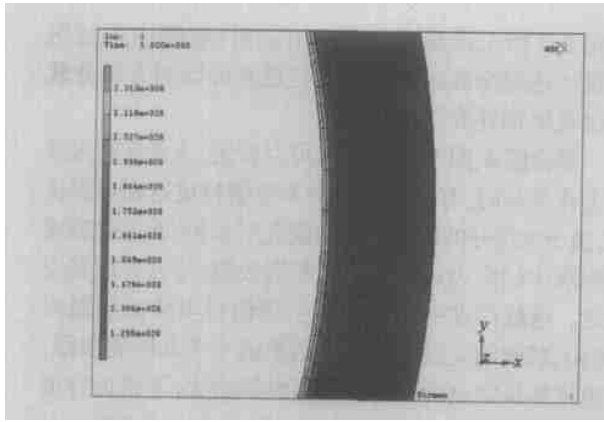


图9 当复合管道承受 2.2 倍工作载荷时其中的应力分布(局部放大)

Fig. 9 Stress distribution of the conduit under 2.2 times of the working load (locally magnified)

从图 7 和图 8 还可以得出,整个管道大约能承受 7.4 倍的工作载荷(44 MPa),这与实验结果吻合良好,说明管道具有较强的承受过载的能力,管道的设计具有较高的安全系数。

管道使用时,可以埋入土中,也可以在两端支撑。管道埋入土中,沿长度方向均匀受力,相对比较安全,当两端支撑时,就需要考察其在重力作用下的挠曲变形程度和应力分布是否会对管道造成破坏。图 10 是 6 m 长的管道当内部充满水,两端支撑时的挠度分布(支撑点距离端部 1 m)。从图中可以看出,管道的最大挠曲产生在中部,最大向下挠曲量为 0.3 mm 左右,这与实验结果也是一致的。

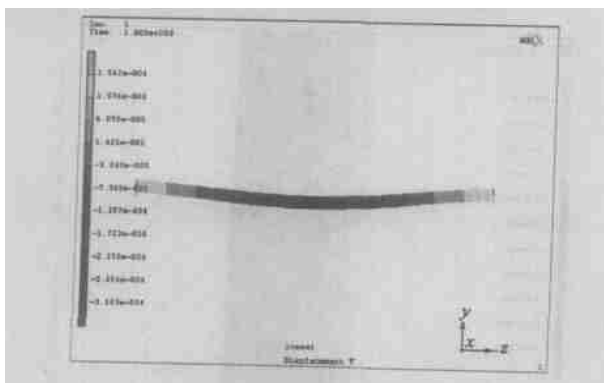


图 10 6 m 长管两端支撑时的挠曲变形(变形放大 500 倍)

Fig. 10 Flexure distortion at two-end support of 6 m length conduit (magnification of 500 times)

图 11 是管道挠曲度最大处管壁中的应力分布,从图可知其应力值大约为 6 MPa ~ 10 MPa。这么小的挠度和应力对管道不会有任何不良影响,可以安全使用。

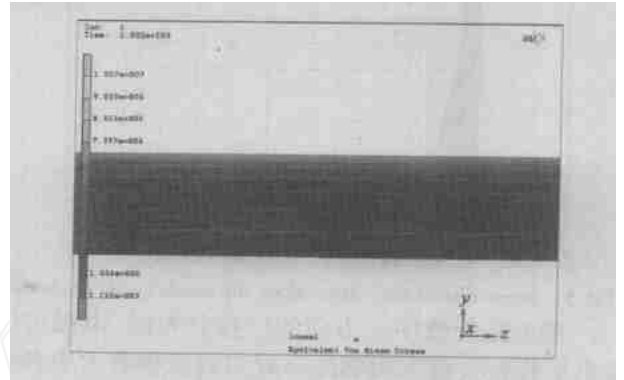


图 11 挠度最大处的应力分布

Fig. 11 Stress distribution in the part of the maximum flexibility

#### 4 结论

(1) 应力、应变和径向位移在玻璃钢壳层和不锈钢衬里界面处是连续分布的,保证了载荷在界面处的连续传递。

(2) 在工作载荷作用下管道是安全的;管道最大能承受大约 7.4 倍的工作载荷,具有较强的承受过载的能力。

(3) 在内部充满水两端支撑的情况下,对于管长为 6 m,支撑点距离端部为 1 m 的管道最大挠曲产生在中部,最大挠度为 0.3 mm 左右,这与实验结果是一致的;在重力作用下,管道中的最大应力和最大挠度都很小,对管道使用没有任何影响。

#### 参考文献

- 1 张晓波,侯贤忠,孙树涛,罗震. 不锈钢防腐衬里专利技术在大庆油田的应用. 国外油田工程, 2000;(1): 50 ~ 53
- 2 罗震,单平,易小林,侯贤忠. 油田储罐再制造技术的研究与应用. 中国表面工程, 2001;51(2): 40 ~ 42
- 3 解红军,罗震,卢东风. 不锈钢-玻璃钢复合管在油田上的应用. 油气田地面工程, 2000;19(1): 43
- 4 王嘉林,侯贤忠. 球形储罐焊接工程技术. 机械工业出版社, 1999
- 5 秦晓钟等. 世界压力容器用钢手册. 机械工业出版社, 1995
- 6 MARC 中文手册,北京:MSC 公司,1999