

# Finite Element Analysis on Large-Diameter Pipe Tee Reinforcing in Ethylene Project

Yongchao Bai<sup>1</sup>, Daojing Qu<sup>1</sup>, Xuanyu Sheng<sup>2</sup>, Yitong Shang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Daqing Oilfield Construction Group, Daqing

<sup>2</sup>Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing

<sup>3</sup>School of Automation, Qingdao Technological University, Huangdao Campus, Qingdao  
Email: shxyzjh@126.com

Received: Aug. 10<sup>th</sup>, 2013; revised: Sep. 8<sup>th</sup>, 2013; accepted: Sep. 17<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Yongchao Bai et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Yongchao Bai et al. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian.

**Abstract:** For major pipeline system in large-scale ethylene project, through finite element analysis checking, we prove that pipe tee structure needs to be strengthened. Under the condition that actual construction had already been completed in the field, we proposed online enhancement method for the large-scale pipeline tee combined with finite element analysis. According to the difficulty of construction and personnel reachability, we selected the inside additional reinforcement ring, additional liner pipe, as well as the enhancement circle and liner pipe together with the angular enhancement circle again. Through the enhanced processing, finite element analysis proved that pipe tee enhancement can meet the material allowable strength requirement.

**Keywords:** Pipe Tee; Strength Analysis; Reinforcement Method

## 乙烯工程大口径管道三通的补强有限元分析

白永超<sup>1</sup>, 曲道晶<sup>1</sup>, 盛选禹<sup>2</sup>, 尚奕彤<sup>3</sup>

<sup>1</sup>大庆油田建设集团, 大庆市

<sup>2</sup>清华大学核能与新能源技术研究院, 北京

<sup>3</sup>青岛理工大学黄岛校区自动化学院, 青岛市

Email: shxyzjh@126.com

收稿日期: 2013年8月10日; 修回日期: 2013年9月8日; 录用日期: 2013年9月17日

**摘要:** 对大型乙烯工程中的大型管道系统, 通过有限元分析验算, 证明管道三通结构位置需要进行加强处理。在实际施工已经完成的情况下, 结合有限元分析, 提出了大型管道三通的在线加强方法, 根据施工的难易程度和人员可达程度, 分别选取了内侧加补强圈、增加内衬管, 以及在加强圈和内衬管的基础上, 再增加角形加强圈。通过这样的加强处理后, 有限元分析证明, 管道三通位置能够满足材料的许用强度要求。

**关键词:** 三通管道; 强度分析; 补强方法

### 1. 引言

三通结构常用于工业设计中。本文研究的三通结构是应用于大型乙烯工程中的地下循环水系统, 其结

构和普通工业使用三通基本相同, 区别在于本文中所研究的管道口径大, 地下工作条件恶劣。

在对大型乙烯工程地下循环水管道进行打压试

验时发现，压力试验后，在三通焊接位置应力很大。除部分焊缝是由于施工中的焊接质量问题，经过超声波无损检测，发现是焊缝未焊透外，其余焊缝焊接质量并无问题。管道规格和焊缝质量统计情况见表 1。针对现场发现的情况，我们利用 CATIA (Computer Aided Tri-Dimensional Interface Application)软件建立了各个规格管道的三通模型，然后采用有限元方法对模型进行了强度验证。发现在设计中，没有考虑对大口径管道的三通位置进行补强。我们根据现场实际情况提出了补强方案，并对修改后的补强方案，再次使用有限元方法进行了计算分析。证明：大口径管道在进行三通补强处理后，三通开孔位置能够满足强度要求。

实际上，有很多已经发表的文献证明<sup>[1-3]</sup>，在三通管与主管道联接内壁的上下顶点位置，结构应力最大。作者本人也曾经对油田地面设备中的三通管道进行计算和改进设计<sup>[4]</sup>，对于管道内压很高的三通结构，这个问题更加严重。设计上，对于管道结构设计者来

说，在设计阶段，就必须考虑管道三通结构的加强措施，否则，对于大口径或内压高的管道三通结构，很容易在使用时发生管道破裂事故。

本文拟采用有限元方法对设计方案进行验证，说明设计存在的缺陷，并提出合理的修改方案。文中所涉及到的有限元方法，作者之一曾出版专门的教材进行讲解<sup>[5-8]</sup>，同时，清华大学的庄茁老师，也曾出版 ABAQUS 有限元方面的著作进行论述<sup>[9]</sup>。

## 2. 大口径三通未补强时的计算分析

在进行几何建模时，为了避免开孔位置对整体结构上的应力分布产生影响，把主管道模型取的长度比较大，一般主管道长度取 6 m。而对于三通的支管，由于发现主要是焊接部位开裂，因此支管长度没有取得太长，一般为支管末端到主管中心轴线的距离为 1.5 m。软件的模型采用 CATIA 软件建立，本文的有限元分析采用该软件内的创成式结构分析工作台。

管道所使用的材料为 Q235 钢，许用应力值为 157

Table 1. Circulating water pipe weld inspection methods summary

表 1. 循环水管道焊缝检查情况处理方法汇总

管道号	规格 (公称直径 × 主管道壁厚)	三通直径(mm)	数量(道)	焊缝形式	存在问题 数量	检查情况	处理方式
CWS	D2020 × 20	1620	1	角焊缝	1	焊缝较大	支管内测衬管，主管内侧加强
	D2220 × 20	1220	8	角焊缝	8		支管内测衬管，主管内侧加强
	D2220 × 20	914	2	角焊缝	2	焊缝较大	支管内测衬管，主管内侧加强
	D2020 × 20	813	1	角焊缝	1	成形较好	内侧打磨、补焊
	D2220 × 20	1620	1	角焊缝	1	成形较好	内侧打磨、补焊
	累计			13		13	
	D2020 × 20	1220	2	角焊缝	2		支管内测衬管，主管内侧加强
CWR	D1820 × 18	914	9	角焊缝	9	插入式支管，成形较差	主管外侧加强
	D2020 × 20	813	1	角焊缝	1	插入式支管，成形较好	内侧打磨、补焊
	D1820 × 18	610	6	角焊缝	6	插入式支管道，安放式 3 道，成形较好	内侧打磨、补焊
	D2020 × 20	610	1	角焊缝	1	插入式支管，成形较好	内侧打磨、补焊
	D1820 × 18	273	1	角焊缝	1	插入式支管，成形较差	内侧打磨、补焊
	D1220 × 14	914	4	角焊缝	4	插入式支管，成形较好	主管外侧加强
	D1220 × 14	610	2	角焊缝	2	插入式支管，成形较好	内侧打磨、补焊
累计			26		26		

MPa, 屈服强度值为 235 MPa。在有限元分析计算中, 采用的密度值为  $7860 \text{ kg/m}^3$ , 杨氏模量为  $2 \times 10^{11} \text{ Pa}$ , 泊松比为 0.266。

### 2.1. 有限元边界条件

主管两端固定, 不加封堵板。承受内压为  $9 \times 10^5 \text{ Pa}$  的水压, 所有零件承受重力作用, 重力加速度  $g$  取  $9.8 \text{ m/s}^2$ 。忽略土壤的压力作用。主管和支管之间的焊缝采用固支连接。在主管与支管相对的位置上, 考虑水流速造成的压力。采用水的流速冲击管壁, 速度变为 0, 水的全部动量变为冲击力, 作用在主管的内壁上。估算作用在内壁上的压强为  $12,553 \text{ Pa}$ 。强度校核采用最保守的工况将水压试验的压力和水冲击压力合并考虑。模型的边界条件如图 1 所示。

### 2.2. 有限元网格

对结构划分的网格类型为四面体网格, 网格尺寸为  $100 \text{ mm}$ , 几何形状与网格最大误差值为  $10 \text{ mm}$ 。其中一个管道模型的有限元网格如图 2 所示。

### 2.3. 计算结果

对于没有进行补强处理的原设计模型, 计算结果如表 2 所示。从表中可以看出, 前三种管道三通, 最大 Von Mises 应力值都没有超过材料的许用限制  $157$

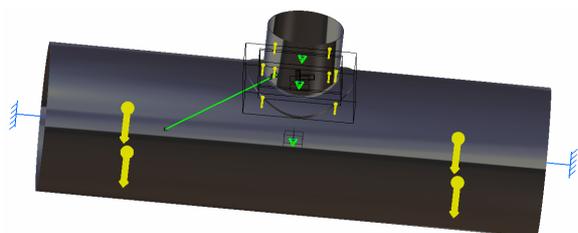


Figure 1. Boundary conditions for finite element analysis  
图 1. 有限元分析的边界条件

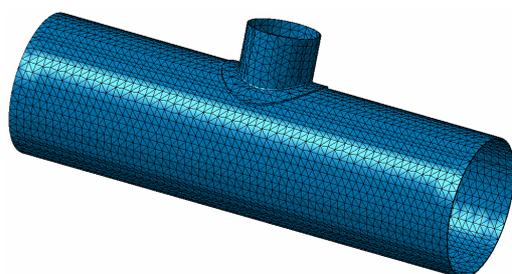


Figure 2. The finite element mesh of pipe model  
图 2. 管道模型的有限元网格

MPa。但是最后一种主管道为  $D2220 \times 20$ , 支管直径为  $D1620$ , 管道的最大应力已经超出材料的许用极限。那么即使不存在焊接问题, 也需要对该规格管道的三通焊缝位置进行加强处理。而对于其他规格的管道, 则是由于焊接质量问题, 需要对管道三通焊缝附近进行加强处理, 提出合理的补强措施。

## 3. 补强措施及补强验算分析

### 3.1. 补强方法

根据工程现场实际情况和应力分析结果, 对不同的管道提出了不同的补强处理方法。对于  $D2220 \times 1220$ 、 $D2220 \times 914$ 、 $D2020 \times 1220$  三通, 采用的补强结构是在支管内部加补强圈, 同时在主管三通开孔位置的内侧加补强圈, 具体方法见图 3 所示。

对于  $D2220 \times 1620$  三通, 所采用的补强结构是在采用上述第一种加强措施, 即在增加内衬管、内加强圈的基础上, 在加强圈和內衬管内侧增加一个角形內加强圈  $160 \times 160 \times 16$ , 结构如图 4 所示。

对于主管直径较小的三通,  $D1820 \times 610$ 、 $D1820 \times 914$  的补强措施是在主管內无內加强圈结构, 而在支管內有內衬管结构, 结构如图 5 所示。

Table 2. The calculation results of pipeline without reinforcement  
表 2. 无补强措施的管道计算结果

序号	主管道规格 (mm)	支管道直径 (mm)	管道最大 Von Mises 应力(MPa)
1	D1820 × 18	D620	71.8
2	D1820 × 18	D914	83.7
3	D2220 × 20	D1220	107
4	D2220 × 20	D1620	194

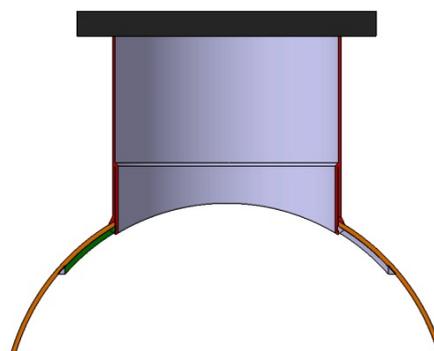


Figure 3. Three-way pipe reinforcement for  $D2220 \times 1220$ ,  $D2220 \times 914$  and  $D2020 \times 1220$   
图 3.  $D2220 \times 1220$ 、 $D2220 \times 914$ 、 $D2020 \times 1220$  三通补强

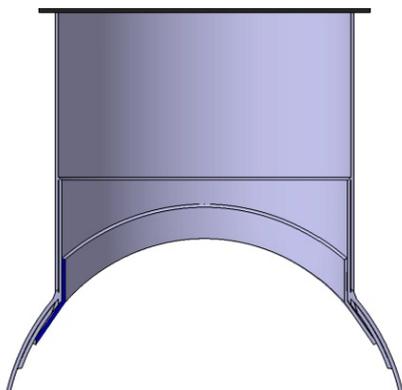


Figure 4. Three-way pipe reinforcement for D2220 × 1620  
图 4. D2220 × 1620 三通补强

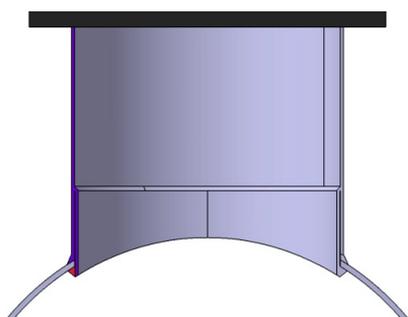


Figure 5. Three-way pipe reinforcement for D1820 × 610 and  
D1820 × 914  
图 5. D1820 × 610、D1820 × 914 的补强

对于 D1820 × 914 的三通结构，采用外补强加强结构，即在主管道三通开孔位置的外侧，增加补强圈；在支管的外侧，增加外衬管，结构如图 6 所示。

所有这些补强措施，考虑了三个因素，一是管道施工的方便和难易程度，二是补强后能否满足材料的强度要求，三是能否完全通过这样的措施把之前施工中的焊接缺陷给补救，满足工程要求。

### 3.2. 管道补强后的强度

对于所有补强后的管道三通结构，我们采用 CATIA 软件的有限元分析功能，对结构强度进行了分析计算，所使用的材料参数和边界条件与前面未加补强结构时的有限元计算条件相同。

D1820 × 610 三通补强结构的计算结果如图 7(a) 所示。Von Mises 应力最大应力值为 80 MPa，远小于结构材料的许用应力值 157 MPa 和屈服强度值 235 MPa，结构是安全的。

D1820 × 914 三通补强结构的校核结果如图 7(b) 所示。Von Mises 应力最大应力值为 99 MPa，远小于

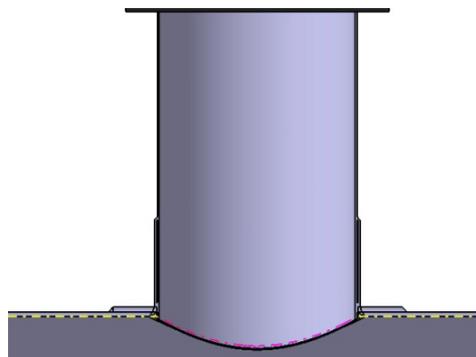


Figure 6. Three-way pipe reinforcement for D1820 × 914  
图 6. D1820 × 914 的补强

结构材料的许用应力值 157 MPa 和屈服强度值 235 MPa，结构是安全的。

D2220 × 1220 三通补强结构的校核结果如图 7(c) 所示。Von Mises 应力最大应力值为 180 MPa，三通补强结构的整体应力水平比较低，在 70 MPa 左右，低于许用应力值 157 MPa 和屈服强度值 235 MPa，只有支管插入主管内的部分局部应力较高，我们可以采用火焰切割缩短插入深度，同时利用焊道将插入部分与加强圈内壁进行圆滑过渡，结构应力将得到降低，结构整体符合要求。

D2220 × 1620 三通内补强结构的校核结果图 7(d) 所示。采用加内角形补强圈结构的 Von Mises 应力最大应力是 100 MPa，远小于结构材料的许用应力值 157 MPa 和屈服强度值 235 MPa，结构是安全的。

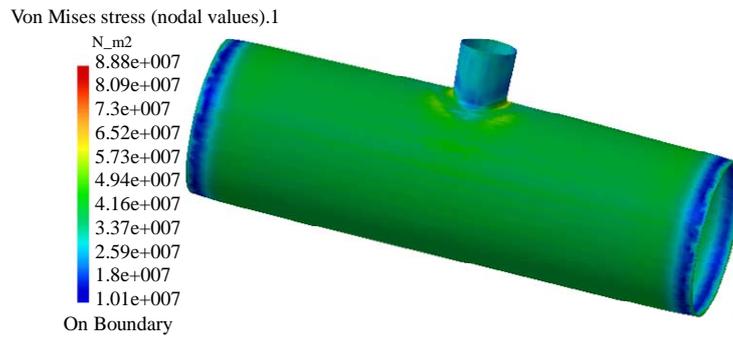
## 4. 结论

通过计算分析表明，对于不同的三通结构，采用不同的补强措施后，结构均能够满足材料的强度要求，所有三通结构补强后，均是安全的。

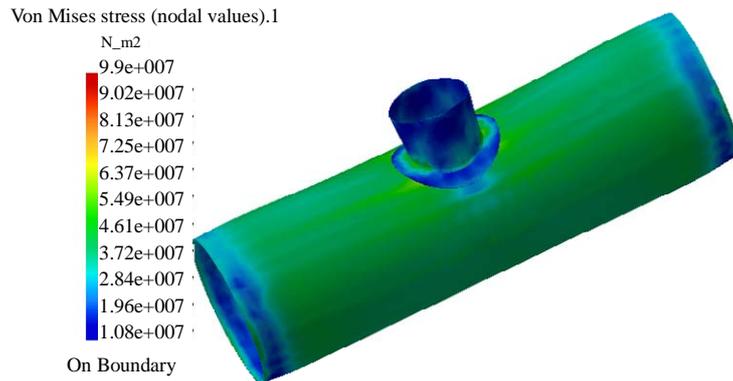
在这项工程中，虽然存在施工方的焊接质量问题，但是更大的问题是在管道的设计中。对于直径较大的管道，在承受内压的情况下，如果进行旁路开孔设计，则必须考虑对开孔位置进行补强处理。我们在核压力容器的设计中，遇到在压力容器上开孔的问题，此时，按照相应的规范，必须进行补强处理。而在化工管道设计中，缺少一定的强制规范，才出现本文中的问题，对于开孔位置未进行补强设计。

作为施工方，会吸取本文中的经验。以后的施工处理中，设计方如果存在设计不满足强度要求的情况，及早进行处理，避免返工。

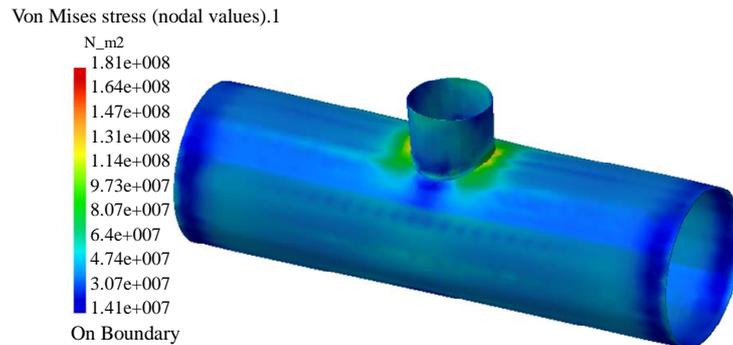
乙烯工程大口径管道三通的补强有限元分析



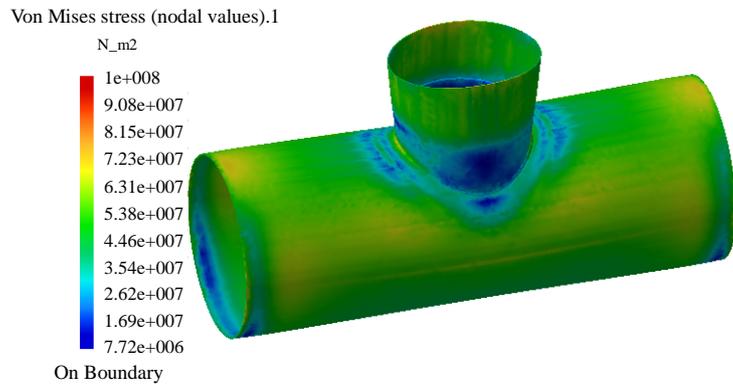
(a) D1820 × 610三通



(b) D1820 × 914三通



(c) D2220 × 1220



(d) D2220 × 1620

Figure 7. Calculation results of three-way pipe reinforcing structure  
图 7. 三通补强结构的计算结果

同时,对于今后管道施工,将在施工前采用本文中的建模和有限元分析方法,对施工的结构预先进行强度分析和计算处理。提前发现设计方存在的缺陷。虽然现场施工方没有这方面的责任和义务,但是,这样的处理,会减少返工的情况,缩短工期,节约成本。

## 参考文献 (References)

- [1] 邹根宝 (1998) 采油工程. 石油工业出版社, 北京.
- [2] 郑连纲 (2005) 三通管道优化设计. *机械*, **9**, 11-12.
- [3] 陈建平 (2006) 压力管道三通结构破坏机理分析. *机电技术*, **1**, 47-48.
- [4] 李延峰, 盛选禹 (2011) 基于有限元分析的三通接箍设计优化. *机械*, **7**, 14-17.
- [5] 盛选禹, 唐守琴, 主编 (2005) CATIA 有限元分析命令详解与实例. 机械工业出版社, 北京.
- [6] 盛选禹, 李明志, 主编 (2009) CATIA 有限元划分网格教程. 机械工业出版社, 北京.
- [7] 盛选禹, 李明志, 主编 (2009) CATIA 有限元分析实例教程., 机械工业出版社, 北京.
- [8] 盛选禹, 盛博, 主编 (2009) ABAQUS FOR CATIA 有限元分析实例教程. 机械工业出版社, 北京.
- [9] 庄茁 (2009) 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用. 清华大学出版社, 北京.