

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.03.013

# 连续玻璃纤维增强PE复合管新型接头的设计

徐含<sup>1</sup>, 张战欢<sup>2</sup>, 刘杰<sup>1</sup>, 秦升学<sup>1</sup>, 王庆昭<sup>3</sup>

(1. 山东科技大学机械电子工程学院, 山东青岛 266590; 2. 青岛海聚新材料科技有限公司, 山东青岛 266590;

3. 山东科技大学化学与生物工程工程学院, 山东青岛 266590)

**摘要:**以连续玻璃纤维(GF)增强聚乙烯(PE)复合管为研究对象,设计了一种适用于复合管道的新型非金属管道接头,该接头采用对焊和热熔缠绕的方式对管道进行连接,通过理论公式计算了管道接头处的接头厚度和GF带缠绕长度。建立了内压载荷下管道接头的有限元模型,对接头处的受力和流体流动情况进行模拟分析。模拟结果表明,GF带与管端接触的截面受力最大,最大应力出现在增强层。管道接头处的最大应力为环向应力,除最外层外,管道接头处各层受力由内向外呈现递减趋势。接头等通径的设计能够有效避免接头处物料粘结和应力集中的发生。对新型管道接头进行静液压实验,验证了管道接头的安全性及可靠性。

**关键词:**连续玻璃纤维增强聚乙烯复合管;非金属管道接头;有限元模拟;应力分布

**中图分类号:** TQ055.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)03-0076-06

## Design of New Joint for Continuous GF Reinforced PE Composite Pipe

Xu Han<sup>1</sup>, Zhang Zhanhuan<sup>2</sup>, Liu Jie<sup>1</sup>, Qin Shengxue<sup>1</sup>, Wang Qingzhao<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Qingdao Haiju New Material Technology Co., Ltd., Qingdao 266590, China;

3. College of Chemical and Biological Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract :** A new type of non-metallic pipe joint suitable for composite pipes was designed, taking the continuous glass fiber (GF) reinforced polyethylene (PE) composite pipe as the research object. The joint was connected by butt welding and hot-melt winding. The joint thickness and winding length of GF tape at the pipe joint were calculated by theoretical formula method. The finite element model of the pipe joint under internal pressure load was established, and the stress and fluid flow at the joint were simulated and analyzed. The simulation results show that the section where the GF tape contacts the pipe end bears the maximum stress, and the maximum stress occurred in the reinforcement layer. The maximum stress at the pipe joint is hoop stress. Except for the outermost layer, the stress on each layer at the pipe joint decreased from inside to outside. The design of equal diameter joint can effectively avoid the occurrence of material adhesion and stress concentration at the joint. The hydrostatic test of the new pipe joint verified the safety and reliability of the pipe joint.

**Keywords :** continuous glass fiber reinforced polyethylene composite pipe ; non-metallic pipe joints ; finite element simulation ; stress distribution

连续玻璃纤维(GF)增强聚乙烯(PE)复合管(GFT-RTP)是一种新型增强热塑性复合管,该复合管道由内层高密度PE(PE-HD)、外层PE-HD及GF增强PE复合带三部分组成,三者在内压作用下共同承受载荷<sup>[1]</sup>。GFT-RTP管道与金属管道相比具有耐

高压、耐腐蚀、柔韧性好、输送能力强等优点,因而被广泛地应用于石油、煤矿、天然气、航空航天等领域<sup>[2-4]</sup>。GFT-RTP管道接头作为整个管道系统中最重要部件之一,在管道系统中占有重要的地位,但同时也是最容易出问题的部分,因此开展对复合

**基金项目:** 山东省自然科学基金项目(ZR2021MEA234),山东省自然科学基金项目(ZR2021MEA234)

**通信作者:** 秦升学,教授,主要从事复合材料成型技术研究

**收稿日期:** 2022-12-24

**引用格式:** 徐含,张战欢,刘杰,等.连续玻璃纤维增强PE复合管新型接头的设计[J].工程塑料应用,2023,51(3):76-81.

Xu Han, Zhang Zhanhuan, Liu Jie, et al. Design of new joint for continuous GF reinforced PE composite pipe[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(3): 76-81.

管道接头的研究很有必要<sup>[5-7]</sup>。

目前,GFT-RTP管道根据压力的不同可采用三种连接方式:工作压力小于2 MPa时,采用直接对焊的方式;工作压力为2~10 MPa时,采用对焊铠装的方式;工作压力大于10 MPa时,采用哈弗卡压式连接。Lai等<sup>[8]</sup>研究了PE管道热熔对焊管道接头的质量,通过拉伸、爆破、疲劳试验研究了对焊缺陷对管道焊接接头失效的影响,表明在没有疲劳载荷的情况下,最大尺寸小于管道壁厚15%的单个焊接缺陷,无论缺陷几何形状如何,都不会导致短期使用下对焊管道接头的失效,否则,缺陷会显著加速接头的失效;杜栋栋<sup>[9]</sup>针对顺北地区极端的环境条件,对管道提出较高的性能要求,并根据运行工况与使用环境对GFT-RTP管道进行管壁结构设计,对高压小口径GFT-RTP管道的接头问题,设计了对焊-铠装管道接头,有效地提高了管道接头的便捷性和可靠性;刘文舒<sup>[10]</sup>针对整体式管道接头连接时存在的压槽深度不均匀、整体式套管在非环向槽位置与管材之间存在间隙等问题设计了哈弗式连接接头,该接头有效解决了套管与管材之间存在的压槽深度不均匀、连接不紧密等问题。Onyegiri等<sup>[11]</sup>针对夹心管道之间连接的安全性,利用有限元模型研究了几何和力学参数对内管挤锻焊缝和环焊缝附近应变强度的影响,分析结果表明,在屈服后弯曲期间,将接缝填料属性与芯材匹配可以显著降低锻造焊缝周围的应力强度因子(SIF),同时使用屈服强度大于相邻管道屈服强度的焊接金属将增加锻焊区域的SIF。

笔者设计了一种新型非金属管道接头,以GFT-RTP管道为研究对象,建立了新型GFT-RTP复合管道接头处的有限元模型,通过有限元模拟分析在内压载荷下接头处的力学性能分布规律及流体流动情况,预测新型非金属管道接头的安全性,并通过实验验证接头方案的合理性和可靠性。

1 实验方法

1.1 原材料

以公称外径为110 mm的连续GF增强PE复合管为研究对象,管道的几何参数列于表1。

增强层为玻纤带(CGF-PECT),每层复合带0.6 mm,4层GF带按照55.15°缠绕角正反交叉缠绕在内层管壁。增强层GF带由GF和PE材料复合而成,结合了两种材料的优异性能,有良好的柔性和

韧性<sup>[13]</sup>。其GF带材料的性能参数列于表2、表3。

表1 GFT-RTP管道几何参数

| 参数                     | 数值            |
|------------------------|---------------|
| 公称外径 $D/\text{mm}$     | 110           |
| 公称内径 $d/\text{mm}$     | 90            |
| 内层PE-HD厚度/ $\text{mm}$ | 5             |
| 外层PE-HD厚度/ $\text{mm}$ | 2.6           |
| 增强层层数                  | 4             |
| 缠绕角度/ $^\circ$         | +55.15/-55.15 |
| 公称压力 $P_n/\text{MPa}$  | 4             |

表2 PE-HD的参数

| 参数                           | 数值    |
|------------------------------|-------|
| 拉伸弹性模量 $E_1/\text{MPa}$      | 1 100 |
| 泊松比 $\mu_1$                  | 0.4   |
| 拉伸屈服强度 $\sigma_p/\text{MPa}$ | 22    |

表3 GF带的弹性参数

| 参数  | $E_x/\text{MPa}$ | $E_y/\text{MPa}$ | $E_z/\text{MPa}$ | $G_{xy}/\text{MPa}$ | $G_{yz}/\text{MPa}$ | $G_{xz}/\text{MPa}$ | $\mu_{xy}$ | $\mu_{yz}$ | $\mu_{xz}$ |
|-----|------------------|------------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|------------|------------|
| GF带 | 38 381           | 3 501            | 2 736            | 1 257               | 804                 | 1 140               | 0.27       | 0.29       | 0.28       |

注: $E_x, E_y, E_z$ 为材料在 $x, y, z$ 方向的弹性模量; $\mu_{xy}, \mu_{yz}, \mu_{xz}$ 为材料在 $xoy, yoz$ 和 $xoz$ 面的泊松比; $G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}$ 为材料在 $xoy, yoz, xoz$ 面的剪切模量。

1.2 GFT-RTP管道接头结构设计

以外径为110 mm的GFT-RTP管道为研究对象,设计了一种新型非金属管道接头。该接头结构首先采用对焊的方式将管端进行连接,然后在管道焊缝部位缠绕GF带,边缠绕边加热,最后将各层GF带与管道熔接在一起。图1为管道接头的结构示意图,其中管道内层、外层为PE-HD,增强层为GF带,截面1、截面2和截面3代表管道连接后不同位置的截面。接头对焊工艺方法及参数通过塑料管道对焊标准及实验测试得到<sup>[14]</sup>,具体参数见表4。

根据表1的数据可知,所研究的GFT-RTP管材

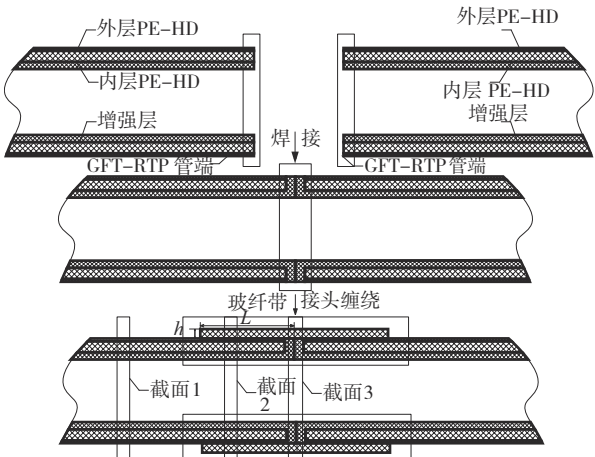


图1 GF带缠绕接头结构示意图

表4 对焊工艺参数

| 步骤    | 对焊工艺参数                                       |
|-------|----------------------------------------------|
| 清理管端  | 用铣刀将管材端面切平整,确保两管材接触面充分吻合                     |
| 加热板预热 | 预热压力:0.15 MPa;预热温度:(225±10) °C;预热卷边高度:1 mm   |
| 熔融    | 熔融压力:0.01 MPa;预热温度:(225±10) °C;加热时间:70~120 s |
| 管端对接  | 焊接压力:1.5 MPa;冷却时间:(10~16) min                |

为薄壁管件(国家标准规定  $K = D_n/d_n$ ,  $D_n$  为公称外径,  $d_n$  为公称内径。当  $K < 1.2$  时属于薄壁管;反之属于厚壁管)。

(1)求管道接头的接头厚度  $h$ , 根据静力平衡方程:

$$\frac{3P_N \pi d^2}{4} = \frac{\pi \sigma_{fe} [(D + 2h)^2 - d^2]}{4} \quad (1)$$

等价变换为:

$$h = \frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{3P_N d^2}{\sigma_{fe}} + d^2} - D \right) \quad (2)$$

式中:  $D$ ——GFT-RTP 管材外径, mm;

$d$ ——GFT-RTP 管材内径, mm;

$h$ ——接头处接头厚度, mm;

$P_N$ ——管材的公称压力, MPa;

$\sigma_{fe}$ ——GF 带的拉伸强度, MPa。

GFT-RTP 的爆破压力标准是3倍的公称压力, 取内径 90 mm, 外径 110 mm, 以公称压力为 4 MPa 的管道为例, 爆破压力为 12 MPa, 代入式(2), 求得  $h = -9.3$ , 计算结果为负值, 说明在  $h$  等于 0 时已经满足 GFT-RTP 在最高内压载荷下的轴向力要求。

对于环向力要求, 由拉美公式, 得:

$$h = \frac{Pd}{2\sigma_{fe}} \quad (3)$$

式中:  $P$ ——管材的极限内压, 其值为管材工作压力的3倍, MPa。

代入式(3), 求得  $h = 1.5$  mm, 取管道接头处的安全系数  $\lambda_H = 1.5$ , 则有:

$$h' = \lambda_H h \quad (4)$$

得  $h' = 2.25$  mm。

由于管道接头处的厚度应同时满足 GFT-RTP 管材在最高内压载荷下的轴向力要求和环向力要求, 综合公式(2)、公式(3)和公式(4)的计算结果, 最后  $h$  的取值为 2.4 mm。

(2)求解接头处 GF 带的缠绕长度  $L$

$$\frac{3P_N \pi d^2}{4} = \tau_{\min} \pi (D - 2t) L \quad (5)$$

等价变换为:

$$L = \frac{3P_N d^2}{4\tau_{\min} (D - 2t)} \quad (6)$$

式中:  $L$ ——管端 GF 缠绕长度, mm;

$\tau_{\min}$ ——GFT-RTP 管材最弱层间剥离强度, MPa;

$t$ ——GFT-RTP 管材壁厚, mm;

$\tau_{\min}$  根据前面课题组的实验与计算得出最弱界面的剥离强度为 6 MPa<sup>[9]</sup>, 代入式(6)求得  $L = 45$  mm。根据求出的扩径长度取安全系数为 1.5, 得出:

$$L' = \lambda_L L \quad (7)$$

由式(5)、式(6)、式(7)最终求得接头处 GF 带的缠绕长度  $L = 67.5$  mm。

综合式(1)、式(2)得,  $h = 2.4$  mm,  $L = 67.5$  mm。

## 2 管道接头的有限元模拟

### 2.1 管道接头力学仿真分析

以公称外径为 110 mm 的 GFT-RTP 管材为例, 取模型长度 1.2 m, 对两管连接处的 GF 带缠绕位置接头管材的受力状态进行有限元模拟。单元类型选择为 SHELL181 单元, 该单元是一种 4 节点有限应变壳单元, 每个节点有 6 个自由度, 适用于模拟薄壳至中等厚度壳结构<sup>[14]</sup>, 参照表 2 和表 3 中的数据进行材料属性设置。

将管材在圆周方向均匀划分 80 份, 轴向方向划分为 100 份, 每层共划分 7 000 个单元, 从而保证模拟结果的精确性, 划分网格后的有限元模型如图 2 所示。

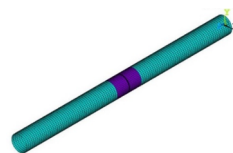


图2 有限元模型

在管材内表面施加 6 MPa 的均布内压; 管材一端设置完全固定约束; 另一端施加轴向拉力, 总的拉力为内压与端面面积的乘积, 节点拉力为 80 个节点的平均值, 设置为 712.75 N; 其他约束设置为 0。

有限元结果如图 3 所示。图 3 为  $D_n$  110 mm 的 GFT-RTP 管材及其所用 GF 带缠绕接头在 6 MPa 内压载荷下, 内层、中间 4 层 GF 复合带及外层、最外层 GF 带接头的等效应力分布图, 由图 3 可以看出, 管

材增强层承受的应力远大于内外层PE-HD的应力,且截面3接头处的受力均小于左右两侧GFT-RTP管材的受力。最外层接头处GF带的受力最大只有40.4 MPa,并未达到GF带的断裂强度,根据模拟结果来看,该管道接头的设计在该压力下是安全的。

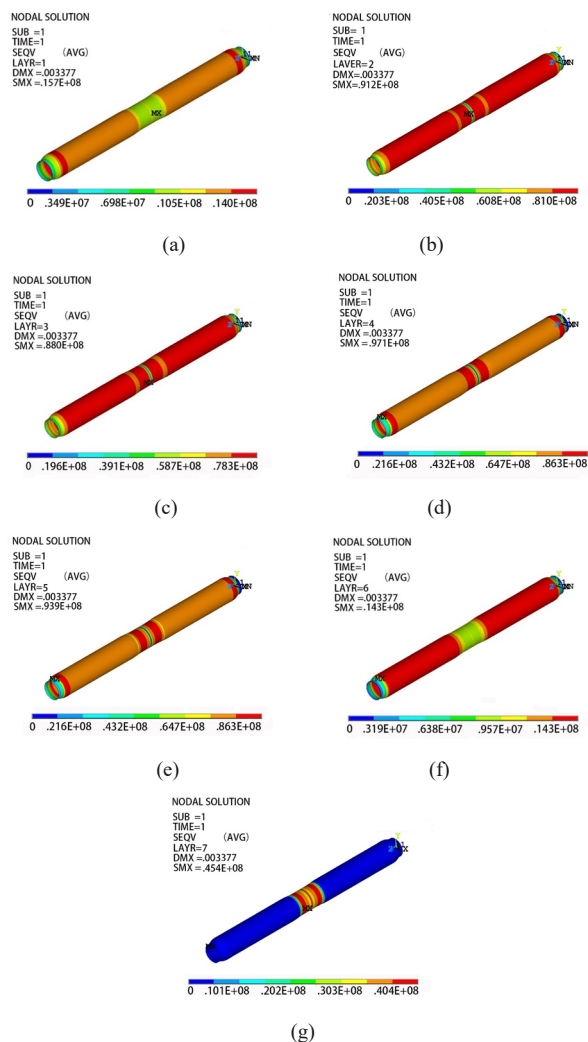
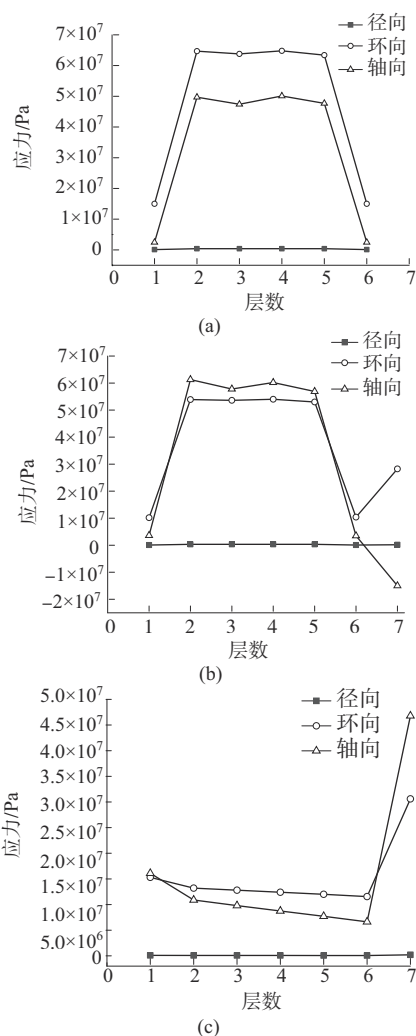


图3 内压载荷下GFT-RTP管材及其接头处的等效应力分布  
a—内层; b—增强层1; c—增强层2; d—增强层3; e—增强层4;  
f—外层; g—在外层GF缠绕接头

图3 内压载荷下GFT-RTP管材及其接头处的等效应力分布

分别取截面1、截面2、截面3各段中间附近节点为研究对象,管道层数由内到外依次为1~7层,其在柱坐标系下的轴向应力、环向应力以及径向应力的分布分别如图4所示。

由图4知,在截面1、截面2、截面3中,管材中GF带所在层的受力均大于PE-HD的受力,这是由于GF带的拉伸弹性模量大于PE-HD的拉伸弹性模量,在发生同样应变的情况下,GF带的受力将大于PE-HD的受力。截面3的受力远小于截面1和截面2,外层的最大环向力与轴向力分别为30.6 MPa和



a—截面1; b—截面2; c—截面3

图4 不同截面的径向应力、环向应力和轴向应力模拟结果

46.8 MPa,比材料本身的断裂强度要低,因此截面3部分不会发生损坏,说明在管道使用过程中两管道接头处的受力是安全的。

截面1管材各层受到的环向应力均大于轴向应力,而在截面2、截面3中各层的环向应力并不总是大于轴向应力,这说明管道接头最外层GF带的缠绕改变了该处管材的受力状态,管道接头处在管材的外部增加了GF带缠绕,使得管道接头部分的受力情况优于管道的其他部分。除去最外层的GF带缠绕层外,其余各层中截面2和截面3的环向受力均小于截面1的受力,所以当载荷达到临界条件时,管体将先于附有GF增强层的接头段失效。由图4b可以看出截面2的轴向压力为-15 MPa,表明管道接头最外层的截面2处承受轴向压应力的作用,从有限元模拟的结果来看该部分的轴向应变也为压应变,这是因为管材在内压载荷作用下发生了较大

的变形,且变形程度大于截面试头处的变形,故对接头处产生轴向压缩的效果。说明截面2最外层的环向应力较大,对管道的轴向变形产生了影响,接头处材料呈现轴向压缩的趋势。

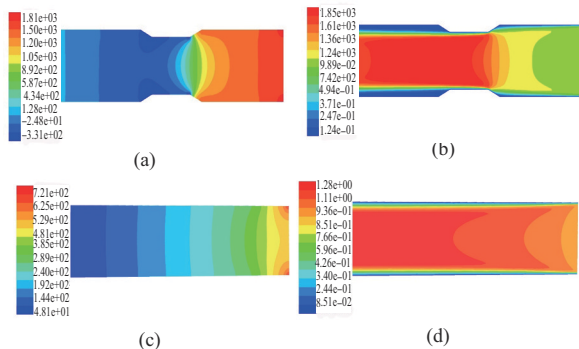
## 2.2 管道接头流体仿真分析

GFT-RTP管道因其良好的耐磨、耐腐蚀、轻便、易盘卷等优势被应用于煤矿的充填开采。充填开采中,膏体为主要传输物料,在运输过程中流速是有一定要求,既不能过高又不能过低。流速过高会加速管道的磨损,流速过低,无法满足煤矿充填开采需要,最佳流速为 $0.7\sim 1.0\text{ m/s}$ <sup>[15]</sup>。为了便于观察,将管道流速设置为 $1\text{ m/s}$ 进行仿真,膏体密度设置为 $1\,640\text{ kg/m}^3$ ,黏度为 $0.118\text{ Pa}\cdot\text{s}$ <sup>[16]</sup>。利用FLUENT软件对传统非等通径管道接头和新型非金属管道接头在输送膏体介质时的流速和压力进行仿真,分析两种接头在一定工况下的受力和流动情况。

### (1)管道接头流体仿真。

图5为管道接头流体压力、速度云图。由图5a、图5b可以看出,膏体在流经非等通径管道接头时会形成一定的压力梯度,出现应力集中现象,这一现象主要集中分布在管端与管道接头的连接部位,膏体在流经管道接头的过程中在管端管壁处形成了滞留现象,出现了流动的漩涡区,这是由于膏体的黏度较大,在该接头处没有形成良好的速度扩充,管道内膏体流动性差,易粘结在管壁,从而降低管道的通量。由图5c、图5d可见,膏体流经等通径管道接头时没有应力集中的现象发生,流动速度也较为平缓,没有漩涡或滞留情况的发生,表明等通径的管道接头设计对于管道系统来说,在运输物料的过程中安全且效率较高。

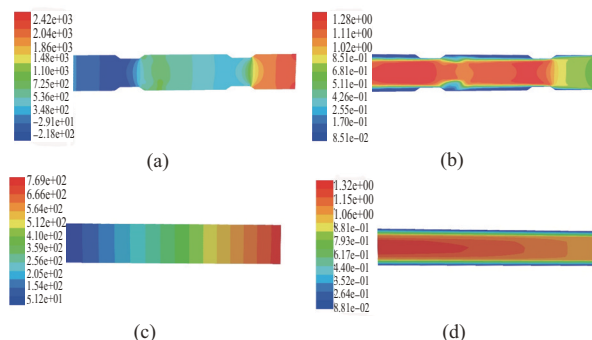
### (2)管路系统流体仿真。



a—非等通径接头膏体流动压力; b—非等通径膏体流动速度;  
c—等通径接头膏体流动压力; d—等通径接头膏体流动速度

图5 管道接头流体压力、速度云图

在实际使用工况下,考虑到管道铺设距离较长,管路系统需要多个管道接头与管道进行连接。在该状况下对单个管道接头处进行流体分析显然是不够全面的,图6为含两个管道接头的简易管路系统进行了压力和速度的分析云图。



a—非等通径管路膏体流动压力; b—非等通径管路膏体流动速度;

c—等通径管路膏体流动压力; d—等通径管路膏体流动速度

图6 管路系统接头处流体压力、速度云图

在非等通径管道接头应用下的管路系统中,膏体由管道从第一个接头流向第二个接头时,管内流速变化不大,但在管壁仍有膏体滞留现象的发生,管壁上膏体的粘结极大地降低了管道的输送效率;同时在膏体流动过程中两个管道接头处受力较大,复合管道在长期受力状况下接头处易发生蠕变,导致管道接头发生失效。对比非等通径管路膏体流动云图,等通径管路在运送膏体的过程中形成了良好的速度梯度,在管道接头处没有应力集中现象,且膏体在管内流动时无粘结现象发生,在物料输送过程中效率更高,安全性更好。

## 3 常温静液压实验

管道在工程使用过程中其接头的安全性是较为关心的问题,为了验证GF带缠绕接头的安全性,对该接头进行常温静液压实验。取型号为 $\Phi 110\times 4\text{ MPa}$ ,长度 $1.2\text{ m}$ ,壁厚 $10\text{ mm}$ 的GFT-RTP管材进行实验。将管材两端用材质为45#钢的金属封头进行封固,通过XGNB-Y疲劳实验机在室温 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下对管材的压力设置为公称压力的1.5倍( $6\text{ MPa}$ ),保持 $100\text{ h}$ ,实验样品如图7所示。



图7 管材GF带接头实验样品

实验结束后样品管材接头处未发生破裂现象,且GF带接头尺寸未发生明显变化,没有鼓胀情况的发生。由实验结果可以看出,GF带管道接头可以承受管道正常使用时的工作压力,且安全可靠,该管道接头可以用于工程的实际运用中。

#### 4 结论

(1)以GFT-RTP复合管为研究对象,设计了一种新型非金属管道接头结构。该接头结构避免了金属接头与物料长期接触时发生腐蚀现象;由管道接头流体模拟结果可知,内壁等通径的设计使得该接头与金属接头相比,避免了发生物料在输送过程中高压和冲击情况,降低了接头与管道脱落的风险,极大地改善了管道接头处的力学分布状态和物料输送效率,对充填开采、物料运输具有重要意义。

(2)利用ANSYS软件对GF带缠绕管道接头建立有限元模型,并通过有限元模拟分析管道接头的受力状况,模拟结果表明管道接头处各层受力均小于材料的拉伸强度,模拟结果在一定程度上对管道接头的安全性进行了预测。

(3)对玻纤带缠绕管道接头进行为期100 h的静液压实验,验证了新型管道接头的安全性,表明该新型管道接头的设计是合理可靠的,该管道接头的设计对于其它类型管道的连接具有一定的参考和指导意义。

#### 参考文献

- [1] 白勇,邵强强.海洋柔性管[M].上海:上海科学技术出版社,2020:3-5.  
Bai Yong, Shao Qiangqiang. Marine flexible pipe[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2020:3-5.
- [2] 王大鹏.连续玻璃纤维复合带增强聚乙烯管道失效研究[D].青岛:山东科技大学,2020.  
Wang Dapeng. Study on failure of continuous fiberglass composite tape reinforced thermoplastic pipe[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.
- [3] 彭传远,付新钰,师梦科,等.大口径热塑性复合材料管及接头内压失效分析[J].工程塑料应用,2022,50(7):104-109.  
Peng Chuanyuan, Fu Xinyu, Shi Mengke, et al. Internal pressure failure analysis of large diameter thermoplastic composite pipe and joint[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(7):104-109.
- [4] 张学敏,周腾,李厚补,等.涤纶纤维增强聚乙烯复合管承压性能模拟[J].工程塑料应用,2020,48(8):118-122.  
Zhang Xuemin, Zhou Teng, Li Houbo, et al. Simulation of pressure-bearing performance of polyester fiber reinforced polyethylene composite pipes[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8):118-122.
- [5] Liu Wenshu, Bai Yong, Gao Yifan, et al. Analysis of the mechanical properties of a reinforced thermoplastic composite pipe joint[J]. Ships and Offshore Structures, 2021, 37(8):1-7.
- [6] 王振超,张莹,彭伊娟,等.聚乙烯管道热熔接头可靠性评价方法研究[J].中国塑料,2022,36(1):148-159.  
Wang Zhenchao, Zhang Ying, Peng Yijuan, et al. Research progress on reliability assessment methods of polyethylene pipes fusion joint[J]. China Plastics, 2022, 36(1):148-159.
- [7] 李翔云.海洋非粘结柔性管道接头结构设计与分析研究[D].大连:大连理工大学,2014.  
Li Xiangyun. Investigation of design and analysis for unbonded flexible pipe end fitting structural[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [8] Lai H S, Kim J Y, Kil S H, et al. Effects of defects on failure of butt fusion welded polyethylene pipe[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2016, 32(9):117-122.
- [9] 杜栋栋.顺北区域GFT-RTP输油管道设计及模拟研究[D].青岛:山东科技大学,2021.  
Du Dongdong. Design and simulation research of GFT-RTP oil pipeline in shunbei area[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2021.
- [10] 刘文舒.增强热塑性塑料复合管的接头设计及数值模拟[D].青岛:山东科技大学,2019.  
Liu Wenshu. Joint design and numerical simulation of reinforced thermoplastic composite pipe[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019.
- [11] Onyegiri I, Kashtalyan M. Finite element analysis of a sandwich pipe joint[J]. Elsevier Ocean Engineering, 2017, 146 (1):363-374.
- [12] 曾文广,杜栋栋,葛鹏莉,等.非金属管道的受力分析与结构设计[J].中国塑料,2021,35 (3):90-96.  
Zeng Wenguang, Du Dongdong, Ge Pengli, et al. Force analysis and structural design of non-metallic pipe[J]. China Plastics, 2021, 35 (3):90-96.
- [13] Fassina P, Guangliano M, Lazzari L, et al. Failure analysis of a non-integral pipeline collet connector[J]. Engineering Failure Analysis, 2005, 4(12):711-719.
- [14] 王新敏,李义强,许宏伟,等.ANSYS结构分析单元与应用[M].北京:人民交通出版社,2011.  
Wang Xinmin, Li Yiqiang, Xu Hongwei, et al. ANSYS structural analysis unit and application[M]. Beijing: China Communication Press, 2011.
- [15] 张鹤松.煤矿膏体充填开采工艺的相关探讨[J].内蒙古煤炭经济,2019(24):203.  
Zhang Hesong. Discussion on paste filling mining technology in coal mine[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2019(24):203.
- [16] 郭沐川,谭玉叶,楚立申,等.某铁矿管道自流输送分析及管道磨损研究[J].矿冶工程,2022,42(5):39-43.  
Guo Mochuan, Tan Yuye, Chu Lishen, et al. Analysis of gravity flow pipeline transportation and pipeline wear for an iron mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(5):39-43.