

## 新型柔性复合管道连接接头设计与失效分析

靳凯<sup>1, 2</sup>, 张瑾<sup>1, 2</sup>, 汪云家<sup>3</sup>, 黄炜<sup>1, 2</sup>, 任京文<sup>4\*</sup>

[1. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司技术检测中心, 山东 东营 257000; 2. 中石化(山东)检测评价研究有限公司, 山东 东营 257000; 3. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司, 山东 东营 257000; 4. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580]

**摘要:** 随着深海油气田的进一步开发, 对纤维增强热塑性管道的连接强度提出了更高的要求。文章设计了一种结合热熔对接技术和热熔缠绕技术的新型连接接头。基于引入纤维断裂应变的薄壁圆筒理论, 建立了接头强度理论计算模型, 初步计算获得接头的层数和长度。采用 ANSYS 建立管道和接头的有限元分析模型, 结合 Hashin-Yeh 失效准则、最大应变准则和 Von-Mises 屈服准则, 对爆破工况和拉伸工况下接头的失效模式和应力应变分布规律进行模拟分析。模拟分析结果表明, 在两种工况下新型接头的失效模式均为接头拔脱失效。爆破工况下接头失效由柔性管端面向接头端面扩展, 接头纤维的危险失效模式为接头纤维拉伸失效。拉伸工况下失效由接头端面向柔性管端面扩展, 接头纤维的危险失效模式为纤维压缩失效。理论模型计算所得柔性管接头的纤维强度有一定冗余。所得结论可为纤维增强柔性管接头的设计和分析提供理论指导。

**关键词:** 增强热塑性管道; 粘接接头; 爆破失效; 失效模式

中图分类号: TE 952

文献标志码: A

文章编号: 1009-3281 (2025) 04-0104-007

增强热塑性管道 (RTPs) 因其具有高强度、耐腐蚀、可设计等优良性能而广泛应用于石油天然气运输领域<sup>[1]</sup>。复合管道接头在管道系统中扮演着至关重要的角色, 其稳固性直接关系到整个系统的安全性和可靠性<sup>[2]</sup>。RTPs 接头可大致分为三类: 金属接头 (铠装式、哈弗卡压式等)、热熔接头、粘接接头<sup>[3]</sup>。预浸带热熔缠绕连接是粘接连接的重要形式之一, 因其具有施工简单、适应性高等优点而被广泛关注。然而, 由于其力学特性的复杂性, 容易受到各种外界因素的影响而出现问题。因此, 深入研究复合管道粘接接头的性能对于提高管道系统的可靠性和安全性具有重要意义<sup>[4]</sup>。

近年来, 许多学者对粘接连接进行了详细的研究, 分析了影响粘接连接强度的因素: 铺层顺序、搭接长度和胶层厚度。在铺层顺序方面: R.R. Das 对以复合管为被粘物的粘接插插接头进行了三维应力分析, 提出了合适的堆叠顺序, 提高了粘合接头的抗断裂性<sup>[5]</sup>, X. Shang 等从材料布置和几何设计方面讨论和比较了多种减少应力集中和提高被粘物横向强度

的技术方法, 并对这些技术的突出特点进行了简短的总结<sup>[6]</sup>。在搭接长度方面: 邹田春等主要研究了搭接长度对单搭接接头的抗拉特性, 失效机理和应力分布特征的影响规律<sup>[7]</sup>。在胶层厚度方面: 马毓等利用已有试验数据, 解析分析了胶层厚度变化引起的接头承载力改变与其剪应力、剥离应力之间的关系, 发现胶层增厚, 接头承载力减小, 胶层的剪应力和剥离应力均减小, 剥离应力不是接头破坏的主要原因<sup>[8]</sup>。石磊等对不同胶层厚度的复合材料剪切粘接性能进行了研究。随着胶层厚度的增加, 胶层固化缺陷也随之增加, 引起应力集中, 导致粘接强度降低<sup>[9]</sup>。除此之外, 部分研究人员对粘接接头失效机理和柔性管的连接形式进行了探索。尚新龙深入研究复合材料单搭接胶接接头的破坏机理, 提出复合材料胶接接头破坏模式的预测方法<sup>[10]</sup>。徐含设计了一种纤维增强热塑性管道接头, 该接头采用热熔对焊和玻璃纤维聚乙烯预浸

收稿日期: 2024-11-26

通信作者简介: 任京文 (1996—), 男, 博士研究生。研究方向为复合材料压力容器与管道。

带热熔缠绕的方式进行连接。采用有限元的方式分析得出接头径向应力、环向应力、轴向应力的分布规律。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与可靠性<sup>[1]</sup>。

当前对粘接接头的研究主要是对搭接粘接接头的应力分布以及失效机理进行研究。纤维增强热塑性管道接头受到轴向拉伸载荷, 而且受到管内压力影响, 接头的失效形式包括接头材料失效和拔拖失效两种模式。因此有必要对管道粘接接头进行失效模式和应力分布规律分析, 为纤维增强热塑性管道的粘接连接设计提供理论支持。

### 1 新型缠绕补强接头设计

本文以 DN75 的纤维增强热塑性管道 (RTPs) 为研究对象。该复合管道通常由内衬层、增强层和外保护层三部分组成。增强层起到承载作用, 内衬层和外保护层起到保护增强层的作用。外保护层和内衬层材料为高密度聚乙烯 (HDPE)。增强层由 0.35 mm 厚的单向玻纤带预浸带 (GF) 按照  $\pm 54.5^\circ$  缠绕角度交替缠绕而成。其中玻璃纤维预浸带是以玻璃纤维为增强材料, 聚乙烯为基体复合而成。GF 和 HDPE 的材料性能参数由制造商提供, 具体如表 1 所示。

表 1 材料性能参数		
Table 1 Material performance parameters		
材料名称	参数名称	数值
GF	纵向拉伸模量 /MPa	$E_{11}=30\ 400$
	横向拉伸模量 /MPa	$E_{22}=3\ 600$
	面内剪切模量 /MPa	$G_{12}=14\ 500$
	主泊松比	$\nu_{12}=0.4$
	纵向拉伸强度 /MPa	$X_t=692$
	纵向压缩强度 /MPa	$X_c=150$
	横向拉伸强度 /MPa	$Y_t=15$
	横向压缩强度 /MPa	$Y_c=8$
HDPE	面内剪切强度 /MPa	$X_{12}=130$
	弹性模量 /MPa	$E=600$
	泊松比	$\nu=0.44$
	屈服强度 /MPa	$\sigma_s=25$

以 DN75 的 RTPs 为研究对象, 设计了一种新型柔性管连接接头, 其中柔性管结构参数如表 2 所示, 柔性管及接头结构如图 1 所示。该新型接头的加工制作由热熔对接和热熔缠绕两步工艺组成。热熔对接过程中加热板需预热至为 225 °C 左右, 两端管道施加

1.5 MPa 的轴向压力, 冷却时间在 15 min 以上。热熔缠绕过程中, GF 带和 HDPE 带以 100 N 左右的预紧力和  $\pm 54.5^\circ$  的对称角度, 一边加热一边螺旋缠绕在接头位置。缠绕完成后冷却一段时间直到完全固化, 此时 GF 带与管道的外保护层熔接在一起。

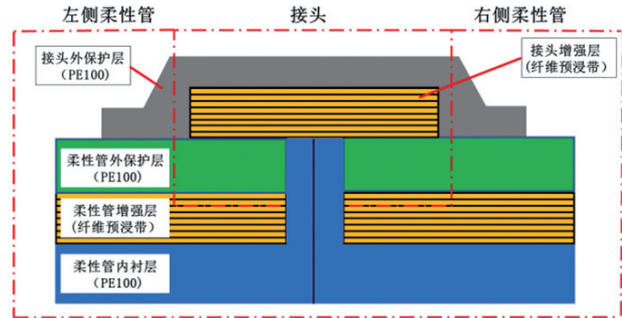


图 1 柔性管道及接头结构

Fig.1 Flexible pipe and joint construction

表 2 柔性管结构参数	
Table 2 Structural parameters of flexible pipe	
结构参数	数值
柔性管内径 /mm	$d=77$
柔性管内衬层厚度 /mm	$h_1=5.5$
柔性管外保护层厚度 /mm	$h_2=3$
柔性管增强层厚度 /mm	$h_3=8 \times 0.35=2.8$

接头层数是接头强度的关键因素之一, 本文推导了如图 2 所示的柔性管理论计算模型, 用以确定接头层数。该模型结合了薄壁圆筒应力失效理论模型, 考虑到增强纤维拉伸模量小, 内压弹性变形引起管道直径增大的问题, 引入了纤维断裂应变  $\epsilon$ 。根据力学平衡方程得出管道轴向应力失效理论模型和环向应力失效理论模型, 分别见式 (1) 和式 (2)。根据公式 (3) 可知,  $P_1$  和  $P_2$  的大小关系由缠绕角度  $\alpha$  决定。当  $\alpha=55^\circ$  时,  $P_1=P_2$ , 此时按照轴向应力和环向应力计算均可; 当  $\alpha > 55^\circ$  时,  $P_1 < P_2$ , 此时按照轴向强度校核公式校核; 当  $\alpha < 55^\circ$  时,  $P_1 > P_2$ , 此时需按照环向强度校核公式校核。根据 DN75 柔性管的爆破试验得出, 柔性管的爆破压力为 33 MPa。为了实现柔性管和接头等强度, 取柔性管接头的失效压力为 33 MPa 进行分析。本文接头预浸带缠绕角度为  $55^\circ$ , 根据公式计算得出柔性管接头纤维增强层层数为 8 层。

$$P_1 = \frac{2n\sigma_{纤维}S \cdot \sin^2\alpha}{3\pi D_1^2(1+\epsilon)\cos\alpha} > P \quad (1)$$

$$P_2 = \frac{4n\sigma_{纤维} S \cdot \cos\alpha}{3\pi D_1^2 (1 + \varepsilon)^2} > P \quad (2)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{2}{\tan^2\alpha} \quad (3)$$

式中  $\alpha$ ——接头纤维缠绕角度, rad;  
 $n$ ——接头增强层层数;  
 $D_1$ ——接头增强层中径, mm;  
 $S$ ——预浸带截面积, mm<sup>2</sup>;  
 $\sigma_{纤维}$ ——纤维抗拉强度, MPa;  
 $\varepsilon$ ——纤维断裂应变;  
 $P$ ——设计爆破压力, MPa;  
 $P_1$ ——纤维轴向应力校核极限压力, MPa;  
 $P_2$ ——纤维环向应力校核极限压力, MPa。

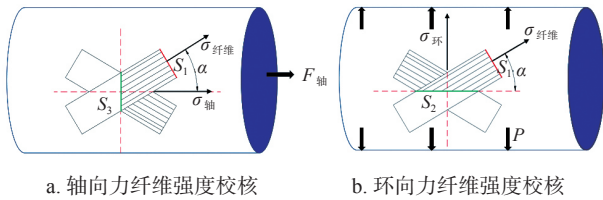


图 2 接头强度理论计算模型

Fig.2 Theoretical calculation model of joint strength

纤维增强热塑性管道的外保护层和接头增强层的基体材料均为 HDPE, 通过热熔形成一体。根据平衡方程推导得出接头长度的理论计算模型, 如式 (4) 所示。计算得出柔性管接头的长度为 66 mm。

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

式中  $L$ ——接头长度, mm;  
 $\tau_{min}$ ——外保护层剪切强度, MPa;  
 $t$ ——柔性管外保护层厚度, mm;  
 $D$ ——柔性管外径, mm;  
 $d$ ——柔性管内径, mm。

## 2 管道接头的有限元模拟

### 2.1 复合材料失效准则

GF 是一种正交各向异性材料, 因此采用公式 (5) 所示的本构关系。

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中  $\sigma_{11}$ 、 $\sigma_{22}$ 、 $\sigma_{33}$ ——材料主方向应力分量, MPa;  
 $\tau_{12}$ 、 $\tau_{31}$ 、 $\tau_{23}$ ——材料主方向剪应力分量, MPa;  
 $\varepsilon_{11}$ 、 $\varepsilon_{22}$ 、 $\varepsilon_{33}$ ——材料主方向应变分量;  
 $\gamma_{12}$ 、 $\gamma_{31}$ 、 $\gamma_{23}$ ——材料主方向剪应变分量;  
 $C_{ij}$ ——材料刚度系数。

采用 Hashin-Yeh 失效准则和最大应变准则判断柔性管接头的 5 种失效模式: 纤维拉伸失效、纤维压缩失效、基体拉伸失效、基体压缩失效和分层失效。采用 Von-Mises 屈服准则评价柔性管外保护层和内衬层失效。其中式 (6) 至式 (10) 所展示的是 Hashin-Yeh 失效准则,  $R_i$  是不同失效模式下的损伤变量, 当  $R_i=1$  时, 表示材料出现损伤。公式 (11) 展示的是最大应变失效准则, 公式 (12) 展示的是 Von-Mises 屈服准则。

模式 1: 纤维拉伸失效 ( $\sigma_1 > 1$ ):

$$R_{ft} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{X_{12}}\right)^2 = 1 \quad (6)$$

模式 2: 纤维压缩失效 ( $\sigma_1 < 0$ ):

$$R_{fc} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

模式 3: 基体拉伸失效 ( $\sigma_2 > 0$ ):

$$R_{mt} = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{X_{12}}\right)^2 = 1 \quad (8)$$

模式 4: 基体压缩失效 ( $\sigma_2 < 0$ ):

$$R_{mc} = \frac{\sigma_{22}}{Y_c} \left[ \left(\frac{Y_c}{2X_{23}}\right)^2 - 1 \right] + \left(\frac{\sigma_{22}}{2X_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{X_{12}}\right)^2 = 1 \quad (9)$$

模式 5: 分层失效 ( $\sigma_3 > 0$ ):

$$R_{dt} = \left(\frac{\sigma_{33}}{Z_t}\right)^2 = 1 \quad (10)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{11} < \varepsilon_x, \varepsilon_{22} < \varepsilon_y, |\gamma_{12}| < \gamma_{xy} & \text{拉伸} \\ \varepsilon_{11} > \varepsilon_x, \varepsilon_{22} > \varepsilon_y, |\gamma_{12}| > \gamma_{xy} & \text{压缩} \end{cases} \quad (11)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 3(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)} < \sigma_s \quad (12)$$

式中  $R_{ft}$ 、 $R_{fc}$ 、 $R_{mt}$ 、 $R_{mc}$ 、 $R_{dt}$ 、 $R_{1t}$ 、 $R_{1c}$ 、 $R_{2t}$ 、 $R_{2c}$ 、 $R_{dt}$ 、 $R_{dc}$ ——复合材料损伤变量;  
 $X_t$ 、 $X_c$ ——面内纵向拉伸和压缩强度;  
 $Y_t$ 、 $Y_c$ ——面内横向拉伸和压缩强度;  
 $Z_t$ 、 $Z_c$ ——代表面外拉伸和压缩强度;  
 $X_{12}$ 、 $X_{23}$ 、 $X_{31}$ ——面内、面外的剪切强度。  
 $\sigma_v$ ——Von-Mises 应力, MPa;  
 $\sigma_s$ ——材料屈服强度, MPa;  
 $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 、 $\gamma_{xy}$ ——极限应变。

## 2.2 管道接头有限元模型建立

以 DN75 的热塑性纤维增强柔性管道为例, 根据表 2 中的几何参数建立三维有限元仿真模型。管道及接头的总长度 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 solid185 实体单元, 该单元是一种 8 节点有限元实体单元, 适用于模拟复合材料的三维受力情况, 参照表 1 中的数据进行材料属性设置。模型采用 5 mm 的结构网格进行划分。由于管道外保护层是接头失效的薄弱区域, 因此为保证仿真精度和准确性, 在厚度方向的网格加密至 5 层, 划分网格后的有限元模型如图 3 所示<sup>[12]</sup>。

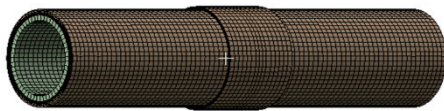


图 3 管道及接头有限元模型

Fig.3 Finite element modelling of pipes and joints

根据管道的实际受载情况, 仿真过程中的载荷施加分为两种工况: 爆破压力工况和轴向拉力工况。爆破压力工况指的是柔性管的一端施加固定约束, 内表面施加内压, 柔性管另一端施加内压所产生的轴向力。轴向力按照公式 (13) 进行计算。爆破压力和轴向力从 0 增加直至材料出现破坏, 且二者始终保持公式 (13) 的关系。轴向拉力工况即为柔性管的一端施加固定约束, 另一端施加轴向力。分析过程中所有的接触均为绑定接触。增强层失效准则综合采用 Hashin 准则、最大应变准则、最大应力准则进行失效评价, HDPE 的失效准则采用 Von-Mises 屈服准则。

$$F = \pi \times P \times R^2 \quad (13)$$

式中  $F$ ——管道轴向力;

$R$ ——管道内径, mm。

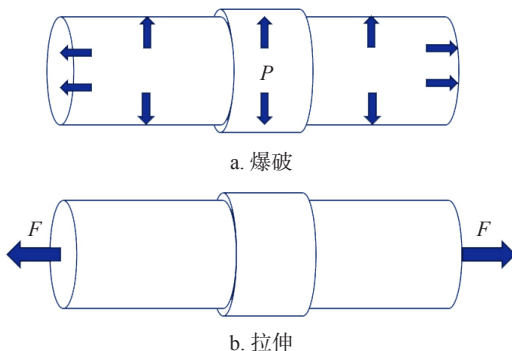


图 4 载荷及边界条件

Fig.4 Loads and boundary conditions

## 3 柔性管及接头失效分析

爆破失效和拉伸失效是热塑性管道最常见的失效形式。如图 5a 和 5b 分别为柔性管接头在爆破压力下和拉伸载荷下外保护层失效过程, 其中红色代表材料发生了屈服。当 HDPE 发生屈服后, 其承载能力显著下降, 因此近似将屈服状态等效成失效状态<sup>[13]</sup>。当热塑性管道外保护层在轴向上出现连续贯穿的屈服状态时, 即意味着接头出现拔脱失效。按照 GB/T 6111—2003 流体输送热塑性管材耐压试验方法进行管道及接头爆破试验, 试验参数与有限元模型参数相同, 实验结果显示, 接头在 33 MPa 时发生接头拔脱失效, 与后续分析结果对比表明, 有限元分析满足精度要求。

图 5a 中显示在压力达到 26.4 MPa 时, 柔性管外保护层内表面开始在管道端面位置出现屈服。屈服区域随着压力的增加向接头端面和外保护层的外表面扩展。当压力达到 30.9 MPa 时出现贯穿屈服状态, 此时接头出现拔脱失效。

图 5b 中显示在拉力达到 180 kN 时, 柔性管道外保护层外表面开始在接头端面位置出现屈服。屈服区域随着轴向拉力的增加向柔性管端面和外保护层的内表面扩展。当压力达到 207 kN 时出现贯穿屈服状态, 此时接头出现拔脱失效。

两种工况下外保护层的失效扩展规律存在差异。(1) 在失效起始位置方面: 爆破工况失效起始于接头端面外保护层的内表面; 拉伸工况下失效起始于接头端面外保护层的外表面。(2) 在失效扩展方面: 爆破工况下失效由柔性管端面向接头端面扩展; 拉伸工况下, 失效由接头端面位置向柔性管端面位置扩展。

综上所述, 在爆破工况下和拉伸工况下接头的失效模式均为拔脱失效。在爆破工况下, 接头发生拔脱失效的压力为 30.9 MPa, 与接头长度理论模型计算所得的接头失效压力 33 MPa 之间的误差为 6%。

为了更加明确接头材料安全系数的分布情况, 绘制柔性管道及其接头的纤维安全系数分布情况如图 6 所示。基体损伤对接头材料强度和刚度的影响较小, 因此为了提高计算效率, 本文忽略基体损伤对接头材料性能的影响。相比之下纤维损伤严重影响接头的材料强度, 因此纤维损伤可近似视为接头材料失效。图 6a 显示, 接头在 30.9 MPa 下的最小纤维安全系数为 1.5, 因此接头纤维安全系数存在冗余。

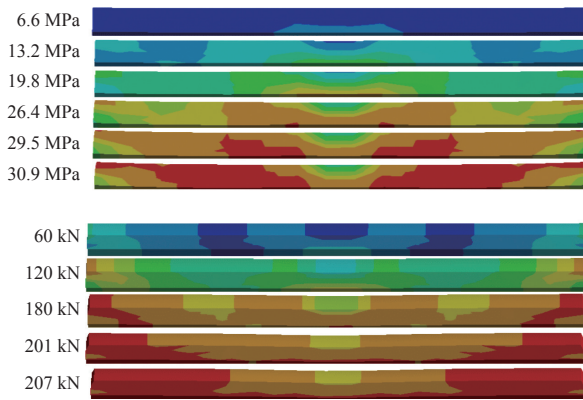


图 5 接头拔脱失效过程

Fig.5 Failure process of joint pull-out

纤维危险失效模式为纤维拉伸破坏，大致分布在柔性管道端面位置的最内层和接头端面位置的最内层。最大纤维安全系数为 4.1，主要分布在接头中间位置的最外层。图 6b 显示，接头在 207 kN 下的最小安全系数均大于 1，接头纤维的危险失效模式为纤维压缩破坏，大致分布在热塑性管道端面最内层位置和接头端面最外层位置<sup>[14]</sup>。

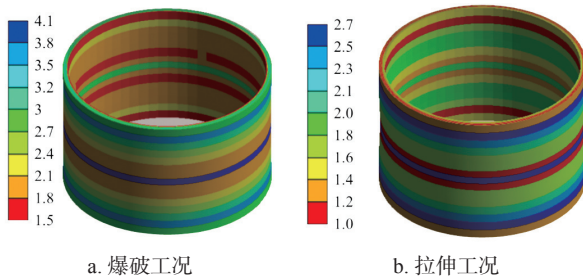


图 6 柔性管接头纤维安全系数分布

Fig.6 Distribution of fiber safety coefficients for flexible pipe joints

根据最大应变准则可知，接头纤维应变、接头基体应变以及径向应变分别反映了材料的纤维、基体和分层失效情况。选取每种失效模式中，安全系数最小的层，绘制接头的纤维方向应变、基体方向应变以及径向方向应变分布云图，如图 7 所示。从图 7a 可知，爆破工况下最大的纤维拉应变分布在管道端面位置；最大基体拉应变分布在接头中间位置；径向应变均为压应变，最大压应变分布在接头端部位置<sup>[15]</sup>。从图 7b 可知，接头纤维的最小压应变位于接头两端位置；接头基体的最大拉应变位于管道断面位置；接头最小压应变位于接头中间位置。

为了更加详细地获得接头纤维应力的分布情况，绘制 11 MPa 爆破压力下柔性管道接头纤维应力分布

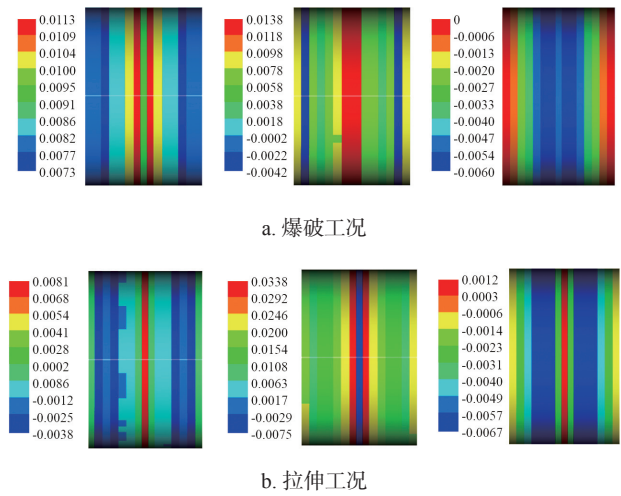


图 7 柔性管接头应变分布

Fig.7 Strain distribution of flexible pipe joints

曲线，如图 8 所示。在厚度方向上，接头纤维应力总体呈现出由内层向外层逐渐减小的分布规律；在长度方向上，呈现出严重的应力不均现象，具体表现为柔性管端面和接头端面纤维应力较大，其中柔性管端面位置纤维应力最大，熔接区域纤维应力最小<sup>[16]</sup>。在整个接头上的纤维应力均为拉应力。

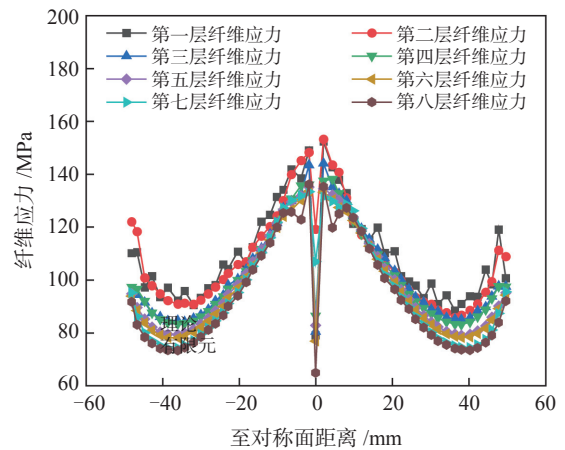


图 8 柔性道接头纤维应力分布曲线

Fig.8 Fiber stress distribution curve for flexible pipe joints

### 4 结论

(1) 设计了一种新型柔性管道连接接头，并建立了接头强度的理论计算模型和有限元模型。通过对比可知，理论模型计算得出的接头结构存在纤维安全系数冗余。

(2) 在爆破压力下和轴向拉力下，接头的首要失效形式均为接头的拔脱失效。两种工况下失效过程不同：爆破工况下失效由柔性管端面向接头端面扩

展, 拉伸工况下失效由接头端面位置向柔性管端面位置扩展。两种工况下的纤维的危险失效模式不同: 爆破工况下, 接头纤维的危险失效模式为接头纤维拉伸失效; 拉伸工况下接头纤维的危险失效模式为纤维压缩失效。

(3) 在爆破工况下接头纤维应力总体呈现出由内层向外层逐渐减小的变化规律, 同时纤维应力均为拉应力。最大纤维应力出现在柔性管道接头端面位置。

### 参考文献

- [1] TOH W, TAN, L, JAUMAN R K, et al. A comprehensive study on composite risers: Material solution, local end fitting design and global response[J]. *Marine Structures*, 2018, 61155: 169.
- [2] LIU W, BAI Y, GAO Y, et al. Analysis of the mechanical properties of a reinforced thermoplastic composite pipe joint[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2022, 17 (7): 1515-1521.
- [3] 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.
- [4] PARASHAR A, MERTINY P. Adhesively bonded composite tubular joints: Review[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2012: 3858-3868.
- [5] DAS R R, BAISHYA N. Failure Analysis of Bonded Composite Pipe Joints Subjected to Internal Pressure and Axial Loading[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 144: 1047-1054.
- [6] SHANG X, MARQUES E, MACHADO J J M, et al. Review on techniques to improve the strength of adhesive joints with composite adherends[J]. *Composites Part B*, 2019, 177 (4): 107363.
- [7] 邹田春, 符记, 李龙辉, 等. 搭接长度对 CFRP 单搭接胶接接头拉伸性能及破坏特征的影响 [J]. *材料工程*, 2021, 49 (7): 158-165.
- [8] 马毓, 李永亮. 复合材料双搭接胶连接接头承载力计算中的胶层厚度问题 [J]. *复合材料科学与工程*, 2021, (3): 66-70.
- [9] 石磊, 罗浩, 罗瑞盈. 胶层厚度对 C/C 复合材料剪切粘接性能的影响 [J]. *炭素技术*, 2023, 42 (4): 22-26.
- [10] 尚新龙. 复合材料单搭接胶接连接的承载性能分析与优化设计 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
- [11] 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.
- [12] 曾鑫. 内外压热塑性复合材料柔性管力学性能及其优化设计研究 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2020.
- [13] 聂新宇. 聚乙烯电熔接头拔脱失效研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [14] FERREIRA L R F, CAMPILHO R D S G, BARBOSA D R. Geometrical Optimization of Axially Loaded Tubular Adhesive Joints by Finite Elements[J]. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 2018: 7693-7701.
- [15] YANG C, GUAN Z. Stress Analysis of Composite Pipe Joints Under Combined Torsional and Tensile Loading[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2009, 131 (5): 051210.
- [16] CHEN B, YUAN Q, LUO J. Stress Concentration in Adhesive Layer of Adhesively Bonded Piezoelectric Pipe-Joint System[J]. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2010, 23 (6): 945-947.

## Design and Failure Analysis of New Joints for Flexible Composite Pipelines

Jin Kai<sup>1,2</sup>, Zhang Jin<sup>1,2</sup>, Wang Yunjia<sup>3</sup>, Huang Wei<sup>1,2</sup>, Ren Jingwen<sup>4\*</sup>

[1. Technical Testing Center, Sinopec Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying, Shandong 257000, China; 2. Sinopec Testing and Evaluation Research Co., Ltd., (Shandong), Dongying, Shandong 257000, China; 3. Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying, Shandong 257000, China; 4. China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China]

**Abstract:** With the further development of deep-sea petroleum projects, higher requirements are placed on the connection strength of fiber-reinforced thermoplastic pipes. In this paper, a new type of connection joint combining hot melt butt joint technology and hot melt winding technology is designed. Based on the theory of thin-walled cylinder introducing fiber breaking strain, a theoretical calculation model of joint strength is established, and the number of layers and length of the joint are obtained by preliminary calculation. The finite element analysis model of the pipe and joint was established by using ANSYS, and the failure mode and stress-strain distribution law of the joint were simulated and analysed under the blasting and tensile conditions by combining with the Hashin-Yeh failure criterion, the maximum strain criterion and the Von-Mises yielding criterion. The simulation results show that the failure mode of the new joints under both conditions is joint pull-out failure. The failure of the joint in the burst condition is extended from the end of the flexible tube to the end face of the joint, and the dangerous failure mode of the joint fiber is the stretching failure of the joint fiber. Under stretching condition, the failure extends from the end face of the joint to the end face of the flexible pipe, and

the dangerous failure mode of the joint fiber is the compression failure of the fiber. There is some redundancy in the fiber strength of the flexible pipe joints calculated by the theoretical model. The conclusions obtained can provide theoretical guidance for the design and analysis of fiber-reinforced flexible pipe joints.

**Keywords:** reinforced thermoplastic pipes; bonded joints; blast failure; failure modes

## 《化工设备与管道》入选 CSCIED 科技核心期刊

近日, CSCIED 科技核心评价数据库科技期刊年度 ES 评分发布。《化工设备与管道》评为 A 级, 划入 Q1 区, 入选 CSCIED 科技核心期刊。

CSCIED 科技核心评价数据库由香港大学、澳门科技大学、浙江大学、中南大学、深圳大学、哈佛大学、麻省理工学院、纽约州立大学等众多单位学者倡议成立, 通过同行评议机制, 评价高质量的科技数据, 帮助众多学者筛选数据, 节约科研时间, 促进科技生产力发展。CSCIED 科技核心评价数据库的评价对象包括期刊、论文、学者等, 评价内容包括但不限于创新性、研究方法、结果、结论、投稿经历、期刊效率、影响力等多种维度。CSCIED 科技核心评价数据库的用户已覆盖全球近 40 个国家或地区, 具有较强的广泛性、权威性和客观性。

此次《化工设备与管道》获评 A 级、入选 CSCIED 科技核心期刊, 充分体现了期刊在学术质量、编辑规范、

出版水平等方面的综合实力, 标志着编辑部在提升期刊影响力方面的新进展。《化工设备与管道》近年来影响力显著提升, 连续多年入编中文核心期刊、中国科技核心期刊, 成功入选中国化学学会首版化工领域高质量科技期刊分级目录, 荣获“全国石油和化工期刊百强”等多项荣誉。编辑部将以此为契机, 进一步积极探索一流科技期刊建设路径, 为公司高质量发展贡献更大力量。

