

Finite Element Analysis of Thermal Residual Stress on 3PE Pipeline Coating Disbondment

Jingtao Li¹, Shuren Chen¹, Zhenhuan Zhang¹, Xingyu Peng², Dangqiang Yin³

¹China Petroleum Pipeline Material and Equipment Company Limited, Langfang Hebei

²College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

³China Petroleum Pipeline Engineering Co, Ltd. International, Langfang Hebei

Email: atitilijingtao@163.com

Received: Mar. 20th, 2019; accepted: Apr. 18th, 2019; published: Aug. 15th, 2019

Abstract

Once the 3PE coating was peeled off from the pipe, the cathodic protection system was failed and would cause a series of corrosion and cracking risks threatening the operation of oil and gas pipelines. The Von Mises equivalent stress distribution of thermal residual stress of 3PE anticorrosion pipe was simulated and calculated by ABAQUS finite element method, and the failure area was predicted. The effects of coating thickness and tail slope shape on residual thermal stress were evaluated. By analyzing the simulation results, the formation of thermal residual stress is minimized by taking corresponding measures, which can effectively control the peeling of 3PE pipelines.

Keywords

Anticorrosion of 3PE Pipe, Disbondment Coating, Residual Stress, Finite Element Analysis

热残余应力对3PE管防腐层剥离的有限元分析

李经韬¹, 陈树仁¹, 张振环¹, 彭星煜², 尹党强³

¹中油管道物资装备有限公司, 河北 廊坊

²西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都

³中国石油管道工程有限公司国际事业部, 河北 廊坊

作者简介: 李经韬(1988-), 男, 工程师, 主要从事油气长输管道EPC项目管理方面的工作。

Email: atitilijingtao@163.com

收稿日期: 2019年3月20日; 录用日期: 2019年4月18日; 发布日期: 2019年8月15日

摘要

3PE管防腐层与管体剥离会导致阴极保护屏蔽, 进而引起一系列的腐蚀及应力腐蚀开裂风险, 威胁油气管道运行安全。利用ABAQUS有限元模拟计算3PE防腐管热残余应力的Von Mises等效应力分布, 预测可能发生失效的区域。评估了各个防腐层涂层厚度及收尾坡形等因素对残余热应力的影响。通过分析模拟结果采取相应措施最大程度减小残余热应力的形成, 可有效控制3PE防腐层剥离事件的发生。

关键词

3PE管防腐层, 防腐层剥离, 热残余应力, 有限元分析

Copyright © 2019 by author(s), Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

输送油、气的管道大多处于复杂的土壤环境中, 所输送的介质也多有腐蚀性, 管道内壁和外壁都可能遭到腐蚀。一旦管道被腐蚀穿孔, 即造成油、气泄露, 不仅使运输中断, 而且会污染环境, 甚至可能引起火灾, 造成危害。3PE管防腐管道采用的环氧底漆、中间聚乙烯粘结层和外层聚乙烯保护层3层结构, 具有良好的抗腐蚀性、抗水气渗透性以及力学性能[1]。

针对国内外发现的3PE管道防腐层投产后短期内粘结失效案例, 研究认为防腐层剥离与防腐材料和钢管底材之间加热过程不协调所产生的热残余应力有关[2]。防腐层涂覆过程中, 由于管体、环氧底漆、粘结剂和外保护层的使用材料并不相同, 热膨胀系数存在较大差异, 防腐层系统产生比较高的热残余应力。当局部残余应力超过了因为水渗透而降低的防腐层剩余粘结强度时, 就会发生防腐层剥离[3]。

2. 有限元分析理论

基于3PE管涂覆结束后水冷却阶段因温变产生的热残余应力案例, 分析研究利用ABAQUS在热辐射、热对流模拟方式上的解决方案。预制3PE钢管工艺流程中, 管体在缠绕聚乙烯保护层后通过水冷进行冷却, 冷却过程中并未经历快速、剧烈的形变, 不存在机械能转化为热能, 温度场对应应力场无依赖关

系, 故适合采用顺序热应力耦合进行求解。聚乙烯和环氧底漆可以近似认为是一种超弹性橡胶材料。对于橡胶材料, 在一定变形范围内采用 Von Mises 等效应力来确定模型中的应力分布。它可以清晰描述出结构内部的应力分布, 从而可以快速确定模型中的最危险区域。

3. 模型建立

3PE 管的管壁厚度与直径相比较小, 是一种典型的薄壁结构。建立管体的轴对称模型即可进行精确的分析。工程中采用的 3PE 管外保护层是缠绕上去的, 且有一定宽度, 所以取包含一个或几个典型宽度的管长进行研究即可。综合考虑实际情况与数值仿真的可行性, 所模拟管体的参数见表 1。模拟中假设各材料参数与温度无关, 各材料参数见表 2。

Table 1. The geometric parameters of analog pipe body

表 1. 模拟管体的几何参数

钢管内径 /mm	钢管壁厚 /mm	管体长度 /mm	预留段长度 /mm	FBE 底漆 层膜厚度/ μm	PE 粘结剂 层膜厚度/ μm	PE 外防护 层膜厚度/mm
700	14	1500	100	160	300	4

Table 2. The material parameter of 3PE anticorrosion pipe

表 2. 3PE 防腐管材料参数

防腐管材料	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量/MPa	泊松比/1	导热系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	比热容 / $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	热膨胀系数 / (10^{-6}K^{-1})
管体(钢)	7850	203,000	0.29	20	850	10.8
环氧底漆	1440	1710	0.33	0.26	22	35.2
粘结剂(聚乙烯)	940	20.4	0.42	0.3	20	314
外保护层(聚乙烯)	940	363	0.42	0.3	20	175

初始条件设置: 实际制管工艺中, 管体首先被预热到 250°C (最高不超过 275°C), 然后再进行其他工艺。因此, 计算模型的初始时刻整个管体的初始温度为 250°C 。

边界条件设置: 水冷边界可以通过热对流边界条件进行模拟。管壁内侧与空气接触, 空气实际的温度也会比较高, 而且空气流动不大, 所以热对流现象不明显, 主要是热辐射效应, 热辐射系数采用 0.8。在计算应力的分析步中, 还需定义位移边界条件和管体尾端在轴向的位移约束。

接触设置: 在管体—环氧底漆, 环氧底漆—粘结剂, 粘结剂—聚乙烯保护层之间通过 Tie 约束建立接触面两侧结构的完全刚性连接约束。

根据几何模型建立有限元模型。热传导模拟中采用热传导 CAX4 单元(4 节点双线性轴对称单元), 模型和材料的参考温度设置为室温 20°C , 物理时间设置为 60 s。

4. 仿真结果分析

1) 温度场分布。由于防腐层外侧采用水冷边界, 所以温度变化较大, 防腐层大部分区域温度降到 50°C 以下。管体内壁采用的是辐射散热, 热辐射效应不明显, 所以管体温度仍然较高, 环氧底漆的温度介于管体和聚乙烯保护层之间。

2) 变形场分布。3PE 管防腐层涂覆区域内变形场分布如图 1 所示, 可以看出, 最大变形发生在管端截短防腐层补口预留处。其中补口预留处的 PE 外防护层的形变量大于中间粘结剂层, 熔接环氧(FBE)底漆层的形变量最小, 这是由于环氧底漆的热膨胀系数远小于粘结层(大约是粘结层的 1/10)。从形态上看, 环氧底漆因温度降低导致的变形要小于粘结层。

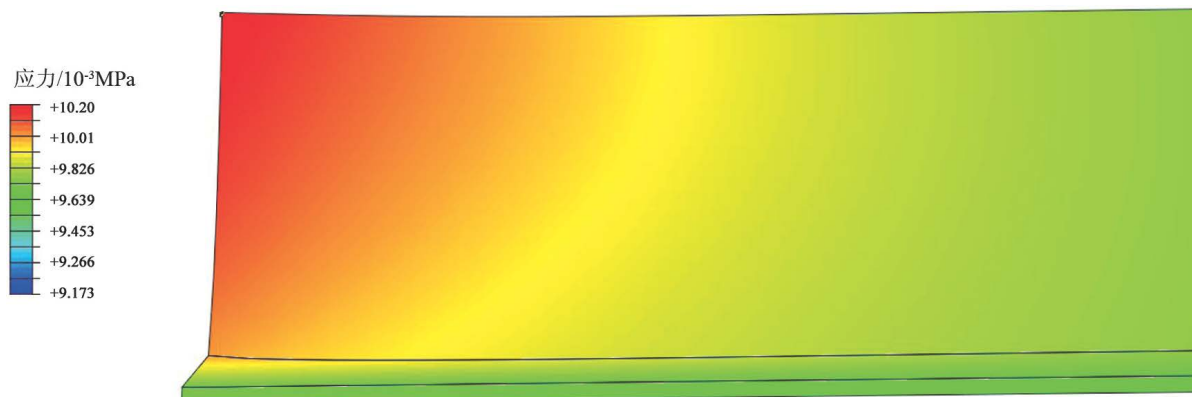


Figure 1. The distribution of deformation field of 3 PE pipe coatings

图 1. 3PE 管防腐层变形场分布

3) 应力场分布。3PE 管防腐层涂覆区域内应力场分布如图 2 所示, 可以看出, 热残余应力集中现象同样出现在管端截短防腐层补口预留处。在 FBE 底漆层最为明显, 其热残余应力比邻近的粘结剂层高 320%。虽然 FBE 底漆层其产生的形变较小, 但是由于其弹性模量要远大于粘结层的弹性模量(约 80 倍), 所以 FBE 底漆的应力反而要大于粘结层。



Figure 2. The distribution of stress field of 3 PE pipe coatings

图 2. 3PE 管防腐层应力场分布

通过观测和分析 Mises 应力分布云图, 可以发现在 3PE 管防腐层涂覆后, 经过水冷却, 3PE 防腐层在 60 s 内温度由 250℃ 急剧减少到 50℃ 左右, 热残余应力集中现象出现在管端截短防腐层的角上, 在基材与 FBE 底漆层热残余应力最大, 同时在补口预留处的 PE 外防护层出现明显形变。若基材与 FBE 底漆层在外界环境影响下导致层间粘合力小于热残余应力, 就会产生管端防腐层翘边剥离现象。

5. 管端截短防腐层区域热残余应力分析

分析了 FBE 底漆层膜厚度、粘结剂膜厚度、聚乙烯保护层厚度以及聚乙烯保护层在预留段的收尾形状等参数对残余应力的影响, 对 3PE 防腐钢管管端截短防腐层区域的热残余应力进行重点研究, 利用有限元分析软件观测各工况条件下热残余应力的分布情况。

5.1. FBE 底漆层膜厚度的影响

通过分析不同 FBE 底漆层膜厚度下最大热残余应力值(见表 3), 可以看出, 随着 FBE 底漆层膜厚度的增加, 最大轴向热残余应力和最大环向热残余应力均缓慢变小, 径向热残余应力变大。Mises 等效应力

值随着 FBE 底漆层膜厚度的增加而缓慢增加, 当底漆层膜厚度增加 43% 时, Mises 等效应力仅增加 4%。说明 FBE 底漆层膜厚度对 Mises 等效应力的影响比较小。

Table 3. The max thermal residual stress under different thickness of FBE primer film

表 3. 不同 FBE 底漆层膜厚度工况下最大热残余应力值

FBE 底漆层膜厚度/ μm	FBE 底漆层 环向热残余应力/MPa	FBE 底漆层 径向热残余应力/MPa	FBE 底漆层 轴向热残余应力/MPa	FBE 底漆层 Mises 等效应力/MPa
140	18.89	27.81	19.64	46.38
160	18.66	28.85	19.45	47.18
180	18.46	29.80	19.18	47.80
200	18.28	30.64	18.87	48.25

5.2. 中间粘结剂层膜厚度的影响

通过分析不同中间粘结剂层膜厚度下最大残余应力(见表 4), 可以看出, 随着中间粘结剂层膜厚度的增加, 各个应力分量缓慢减小, Mises 等效应力变大, 粘结剂层膜厚度的增加对热残余应力几乎没有影响。

Table 4. The max thermal residual stress under different thickness of intermediate adhesive layer film

表 4. 不同中间粘结剂层膜厚度工况下最大热残余应力值

粘结剂层 膜厚度/ μm	FBE 底漆层 环向热残余应力/MPa	FBE 底漆层 径向热残余应力/MPa	FBE 底漆层 轴向热残余应力/MPa	FBE 底漆层 Mises 等效应力/MPa
250	19.16	29.50	19.70	47.08
300	18.66	28.85	19.45	47.18
350	18.25	28.46	19.25	47.49
400	17.91	28.25	19.10	47.96

5.3. PE 外防护层膜厚度的影响

通过分析不同 PE 外防护层膜厚度下最大残余应力(见表 5), 可以看出, 随着 PE 外防护层膜厚度的增加, 所有应力分量都随之增加, 尤其是径向热残余应力增大显著。说明 PE 外防护层膜厚度的增加不利于降低管道预制工艺产生的残余应力。

Table 5. The max thermal residual stress under different thickness of external PE coating layer film

表 5. 不同 PE 外防护层膜厚度工况下最大热残余应力值

PE 外防护层 厚度/mm	FBE 底漆层 环向热残余应力/MPa	FBE 底漆层 径向热残余应力/MPa	FBE 底漆层 轴向热残余应力/MPa	FBE 底漆层 Mises 等效应力/MPa
3	17.67	24.96	18.24	42.16
4	18.66	28.85	19.45	47.18
5	19.54	32.31	20.54	51.64
6	20.36	35.43	21.55	55.70

5.4. 管端截短防腐层收尾形状的影响

图 3 是当坡度为 30° , Mises 等效应力为 15.46 MPa 时的等效应力图, 可以发现, 3 个应力分量都降

低,但是降低的幅度不相同,环向热残余应力变化幅度较小,径向热残余应力变化非常明显,此时的管端截短防腐层收尾形状比垂直形状时径向热残余应力减小 85%左右。所以,相比较垂直收尾形状,有一定角度的收尾形状能够有效降低热残余应力。表 6 为不同收尾坡度下的最大热残余应力,对比发现,当角度为 30°时,最大热残余应力最小,因此该角度为最佳收尾角度。



Figure 3. Mises equivalent stress diagram (30° tail shape)

图 3. Mises 等效应力图(30°收尾形状)

Table 6. The max thermal residual stress under different tail slopes

表 6. 不同坡口收尾坡度下最大热残余应力

坡口收尾角度/(°)	FBE 底漆层 环向热残余应力/MPa	FBE 底漆层 径向热残余应力/MPa	FBE 底漆层 轴向热残余应力/MPa	FBE 底漆层 Mises 等效应力/MPa
90	18.66	28.85	19.45	47.18
60	18.01	15.30	17.28	29.18
45	18.04	7.889	16.52	19.64
30	16.30	4.378	15.76	15.46

6. 结论

- 1) FBE 底漆膜厚度的增加会相应增加 3PE 管的热残余应力,但其影响可以忽略。防腐钢管在破损风险大的环境下,可以适当增加 FBE 底漆膜厚度。
- 2) 中间粘结剂层膜厚度的增加对热残余应力几乎没有影响。
- 3) PE 外防护层膜厚度是影响 FBE 底漆与基材间的热残余应力的主要因素。随着聚乙烯保护层厚度的增加,管道预制工艺产生的热残余应力相应增加。
- 4) 相比较垂直收尾的情况,有一定角度的收尾能够有效降低热残余应力,采用 30°的收尾坡度时最大热残余应力最小。

参考文献

- [1] 蒋学林. 钢管道 3PE 防腐自动化生产线工艺技术研究及改进[J]. 图书情报导刊, 2012, 22(15): 132-136.
- [2] 王向农, 译. 残余应力导致三层聚烯烃管道防腐层剥离与开裂[J]. 防腐保温技术, 2011, 19(3): 44-55.
- [3] 任春霞, 王晨. 3PE 防腐管道防腐层剥离因素及控制措施[J]. 焊管, 2017, 40(2): 58-62.

[编辑] 鲁大丽

知网检索的两种方式：

1. 打开知网首页：<http://cnki.net/>，点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”，跳转至：<http://scholar.cnki.net/new>，搜索框内直接输入文章标题，即可查询；
或点击“高级检索”，下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2471-7185，即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版：<http://www.cnki.net/old/>，左侧选择“国际文献总库”进入，搜索框直接输入文章标题，即可查询。

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jogt@hanspub.org