

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.11.012

基于失效模式的深海玻纤增强柔性管截面设计^{*}

潘俊¹, 颜廷俊¹, 李鹏¹, 丛日峰²

(1. 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029; 2. 山东冠通管业有限公司, 山东威海 264400)

摘要: 针对深海油气输送所使用的钢制管道存在耐腐蚀性差、质量大以及柔性小的不足, 设计了具有耐腐蚀性强、质量轻、强度高、柔性好等优点的热塑性玻璃纤维(玻纤)增强聚乙烯柔性管, 基于海深 500 m 油井油气输送用玻纤增强柔性管道中的抗压和抗拉增强层截面结构设计要求, 通过有限元方法进行了多角度玻纤缠绕设计。结合 DNVGL-RP-F119 规范和美国船级社相关规范, 首先根据柔性管受载工况进行了抗压层和抗拉层缠绕角度的设计, 然后通过对抗压层、抗拉层在 30 MPa 内压、5 MPa 外压和 588 000 N 拉力 3 种典型工况下的厚度试算以及 90 MPa 爆破压力校核, 最终获得能够满足柔性管技术设计指标要求的增强层厚度为 11.6 mm(90°玻纤缠绕抗压层 8 mm, +30°玻纤缠绕抗拉层 1.8 mm, -30°玻纤缠绕抗拉层 1.8 mm)。与传统柔性管使用的单一缠绕角度设计方法相比, 所设计的玻纤增强柔性管不需要经过多个工况强度校核进行大量缠绕角度和缠绕厚度试算以确定多种工况下的增强层最优缠绕角度和最少缠绕层数, 因此计算量小、设计效率高。

关键词: 深海; 玻璃纤维增强聚乙烯柔性管; 多角度缠绕; 截面结构设计; 有限元

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)11-0060-06

Cross Section Design of Glass Fiber Reinforced Flexible Pipe in Deep Sea based on Failure Mode

Pan Jun¹, Yan Tingjun¹, Li Peng¹, Cong Rifeng²(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;
2. Shandong Guan Tong Pipe Industry Co. Ltd., Weihai 264400, China)

Abstract: In order to overcome defects of poor corrosion resistance, large weight and weak flexibility of steel pipelines which are applied to oil and gas transmission in deep sea, the thermoplastic glass fiber reinforced polythene flexible pipes with features of high corrosion resistance, light weight and high strength and good flexibility were designed. Aiming at designing requirements of cross section structure of reinforcement layer including compressive and tensile reinforced layer of glass fiber reinforced flexible pipes which are utilized to transmit oil and gas in deep sea, such as 500 meter deep, the multi-angle glass fiber winding design was carried out based on finite element method. In combination with DNVGL-RP-F119 specifications and American Classification Society specifications, winding angle design was firstly carried out on the compressive layer and tensile layer according to flexible pipe loading conditions. By calculating the thickness of the compressive layer and the tensile layer in three typical working conditions of 30 MPa internal pressure, 5 MPa external pressure and 588 000 N tensile force, and checking the blasting pressure 90 MPa, it is obtained that the thickness of the reinforcement layer which meets the design index requirements of flexible tube technology is 11.6 mm (the thickness of 90° fiber winding compressive layer is 8 mm, the thickness of +30° or -30° fiber winding tensile layer is each 1.8 mm). Compared with the traditional design method of single winding angle used in traditional flexible pipes, the design of the glass fiber reinforced flexible pipe does not need to calculating the winding angle and winding thickness largely through checking the intensity of multiple working conditions for determining the optimal winding angle and the minimum number of winding layers in various working conditions, therefore, it has small calculation amount and high design efficiency.

Keywords: deep sea; glass fiber reinforced polythene flexible pipe; multi-angle winding; cross structure design; finite element

深海油气资源的开采已经成为当今世界石油发展的一个主要趋势^[1-2]。在进行深海油气勘探开发中的管道是连接平台与海底井口装置、各平台之间以及平台到陆地的重要环节。目前使用的钢制管道存在质量大、柔性小、耐腐蚀性能差等不足, 无法

满足深水油气资源开发的要求。玻璃纤维(玻纤)

^{*} 国家工信部项目——海洋工程用玻纤增强柔性管研制与应用示范

联系人: 颜廷俊, 教授, 研究方向为结构力学分析

收稿日期: 2017-08-26

增强柔性管具有强度高、柔性好、耐腐蚀、运输及安装方便等一系列优点,已逐步成为深海开发的重要趋势^[3-4]。目前各国海上油田使用的柔性管绝大部分由 Technip, Deepflex, NKT 等公司生产。针对柔性管截面设计,国外主要是依据 API17B《柔性管设计规范》以及 DNVGL-RP-F119 相关规范进行柔性管截面设计,已经积累了一套完整成熟的设计体系和应用于深海开发的柔性管产品,但由于技术保密的原因,能查阅的相关详细、具体的资料非常少;国内主要由天津市海王星海上工程技术有限公司和河北恒安泰公司研制出了仅能适用于浅海应用的柔性管产品^[5],但对深海柔性管研制和使用目前尚处在起步阶段。刘昊^[6]和曾季芳^[7]对深海柔性管结构及力学性能进行了分析和优化设计。卢青针等^[8]对柔性管模型进行了简化,分析研究了柔性管在拉伸载荷作用下的力学性能响应。上述的海洋柔性管研究都是针对特定某一截面结构已知的管材进行单一载荷工况下的力学性能分析或者性能优化设计,而直接根据深海多种复杂工况以及它们之间的组合工况进行柔性管截面结构设计,目前国内还未查到相应的文献资料。因此,开展对深海玻纤增强柔性管增强层中的抗压层和抗拉层的缠绕角度和缠绕厚度设计计算,对我国深海柔性管的研制具有重要的意义。笔者主要采取多角度玻纤带缠绕设计方法对柔性管增强层结构进行设计,相比于传统柔性管单一角度的缠绕设计,不需要通过多个工况进行大量缠绕角度和厚度试算来确定在多种复杂工况下的最优缠绕角,因此计算量小、设计效率高。

1 设计工况及材料性能参数

笔者主要针对我国南海 500 m 海深进行玻纤增强柔性管设计,其具体设计要求及目标见表 1。

表 1 用于深海 500 m 处的玻纤增强柔性管性能指标

项 目	数 值
工作压力 /MPa	30
爆破压力 /MPa	90
拉伸载荷 /N	588 000
外压 /MPa	5
拉伸和外压组合载荷工况	外压 5 MPa,拉伸载荷 588 000 N
海洋柔性管内径 /mm	152

根据玻纤增强柔性管内部输送石油及天然气以及所处海洋环境中均含有腐蚀性介质等特性,为保护增强层材料不被腐蚀,确定玻纤增强柔性管截面总体结构分为内衬层、增强层、外保护层 3 层。内衬层和外保护层的作用是防止油气介质及海水对玻纤增强柔性管内、外管壁的腐蚀破坏以及防止管内、

外流体相互渗透,其材料选择为在石油、天然气行业中应用较广,有较好抗腐蚀和防渗透性能且价格低廉的聚乙烯 (PE)100^[9],厚度均确定为 6 mm。增强层起到增加整个玻纤增强柔性管强度和刚度的作用,是玻纤增强柔性管最主要的承载结构层,也是设计计算的中心。该层材料以 PE100 为基体,同时选用价格适中、抗拉性能较好的玻纤进行缠绕成型。选用的某厂提供的玻璃钢 I 和 PE100 材料性能参数见表 2 和表 3。

表 2 玻璃钢 I 性能参数

项 目	数 值
纤维方向拉伸弹性模量 /MPa	49 600
基体方向拉伸弹性模量 /MPa	11 280
面内剪切弹性模量 /MPa	2 700
泊松比	0.27
纤维方向拉伸强度 /MPa	782
纤维方向压缩强度 /MPa	545.4
基体方向拉伸强度 /MPa	14.1
基体方向压缩强度 /MPa	106.7
面内剪切强度 /MPa	15.8

表 3 PE100 材料性能参数

项 目	数 值
拉伸弹性模量 /MPa	1 200
泊松比	0.44
Mises 屈服应力 /MPa	16

2 失效模式确定

进行玻纤增强柔性管增强层截面结构设计应包括截面缠绕角度、缠绕厚度设计和各工况失效模式及组合工况下强度校核。通过长期调研发现,针对海洋柔性管的设计,国外主要使用美国石油协会推荐的 API17B 和挪威船级社推荐的 DNVGL-RP-F119 规范。其中,API17B 主要针对非粘结性柔性管,其增强层为钢带按照不同缠绕角度缠绕而成,在服役期间钢带之间会发生相互滑移,而 DNVGL-RP-F119 规范针对的是粘结性柔性管,其增强层为纤维带通过热熔和缠绕技术缠绕而成,在服役期间各层之间不会发生相互滑移,与笔者所研制的柔性管结构和材料类似,因此以该标准进行后续截面结构设计和强度分析。

根据 DNVGL-RP-F119 规范:如果柔性管中存在内衬层和外保护层,则在保证内、外保护层具有较好气密性和防泄漏性能前提下,柔性管中的增强层纤维允许发生基体开裂现象,这与传统的复合材料管失效判据 (Tsai-Wu) 不同,因为传统复合材料管没有内、外保护层,在服役过程中如果出现基体开裂,会造成管内外介质的相互渗透和泄漏,因此需要考虑基体方向受力情况。而笔者在后续设计中主要考

虑内、外保护层的失效情况,针对增强层只要纤维不发生断裂即可满足强度要求。

根据 DNVGL-RP-F119 规范要求:失效模式分为内压失效、拉伸失效、压溃失效、弯曲失效。其中内压失效包括爆破实验时的纤维断裂,以及工作情况下因工作压力过大使得柔性管内衬层发生塑性变形而失效。拉伸失效是指进行海上铺管安装时,柔性管顶部因承受较大的拉伸载荷而使内衬层和外保护层发生塑性变形;压溃失效是指深海作业时的静压水头造成的柔性管压溃破坏;弯曲失效是指玻纤增强柔性管盘卷在卷盘上时,因卷盘缠绕半径小于玻纤增强柔性管最小弯曲半径使得内衬层和外保护层发生塑性变形而失效。根据柔性管服役期间所受的主要载荷工况类型,以内压、拉伸和压溃失效为主要失效模式进行抗压和抗拉增强层截面结构设计。

3 玻纤增强柔性管增强层截面结构设计

增强层是整个玻纤增强柔性管最主要的结构承载层,它决定着玻纤增强柔性管的承载能力。根据上述所提到的玻纤增强柔性管主要受到拉伸载荷及内外压载荷。因此,将增强层截面结构按功能要求设计为抗压层和抗拉层两部分。利用有限元通过试算的方法确定增强层中抗压层及抗拉层缠绕角度及厚度。

3.1 玻纤增强柔性管抗压层缠绕角度及厚度确定

根据设计技术指标,玻纤增强柔性管受到 30 MPa 的工作内压,在其内部产生较大的环向应力。根据复合材料铺层设计原则^[10],铺层方向应与受力方向一致,这样可最大限度发挥和利用纤维高强度和刚度特性,因此抗压层选用 90° 纤维缠绕角进行环向缠绕。

(1) 建立有限元模型。

根据圣维南原理,取管子的长度至少为外径的 5 倍建立有限元模型^[11]。内衬层和外保护层采用实体单元 C3D8R 建模,中间增强层选用 SHELL 单元。由于是粘结性柔性管,所以内衬层和增强层之间以及增强层和外保护层之间选用绑定约束(tie)。具体结构如图 1 所示。图 1 中深色部分为增强层,白色部分为内衬层和外保护层。

(2) 施加载荷和约束。

在玻纤增强柔性管两个端部圆心处建立参考点,将参考点与管道端部截面节点进行全自由度耦合,在端部圆心处建立局部柱坐标系。内压 30 MPa 施加在柔性管内衬层的表面上,对管道的一端参考点

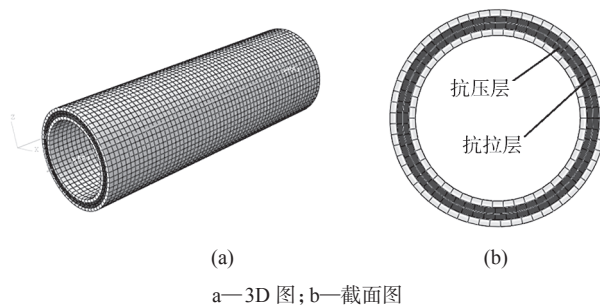


图 1 玻纤增强柔性管结构图

施加固定约束,另一端参考点限制 5 个自由度,放开轴向位移。

(3) 抗压层厚度计算。

因为玻纤的拉伸弹性模量远大于 PE100,所以它的强度要比 PE100 高很多。根据 DNVGL-RP-F119 规范要求,柔性管中存在内衬层和外保护层时,在工作压力下,内衬层和外保护层不允许发生塑性变形。依据确定的环向缠绕角度 90°,逐渐增加环向层厚度,通过有限元厚度试算的方式进行其厚度确定。根据圣维南原理,为消除管道两端应力集中对真实应力应变分布产生的影响,取管道中部查看应力应变云图^[12]。当厚度达到 6 mm 时,内衬层和外保护层应力云图如图 2 所示。

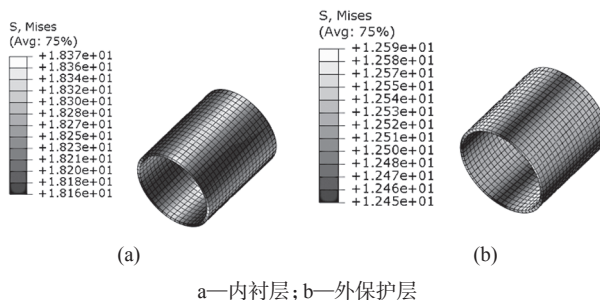


图 2 抗压层厚度为 6 mm 时内衬层和外保护层 Mises 应力分布云图

由图 2a 可知,在工作内压 30 MPa 作用下,当抗压层厚度达到 6 mm 时,内衬层最大 Mises 应力为 18.37 MPa,大于 PE100 的 Mises 屈服应力(16 MPa),说明内衬层已经发生塑性变形;由图 2b 可知,外保护层最大 Mises 应力为 12.59 MPa,小于 PE100 的 Mises 屈服应力,仍处于弹性状态。因此厚度为 6 mm 的抗压层不能满足规范要求,厚度需要继续增加。最终抗压层环向缠绕层厚度达到 8 mm 时,内衬层最大 Mises 应力略小于 PE100 的 Mises 屈服应力。应力分布云图如图 3 所示。

由图 3a 可知,内衬层最大 Mises 应力为 16.22 MPa,接近 PE100 的 Mises 屈服应力 16 MPa,

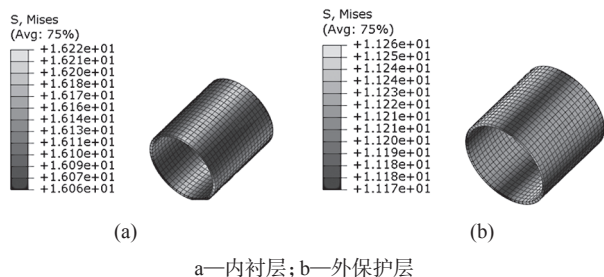


图3 抗压层厚度为8 mm时内衬层和外保护层

Mises 应力分布云图

鉴于实际工作压力一般低于设计压力,且根据力的矢量原理,抗拉层中不同角度的缠绕层在环向也能提供部分抗压强度,故内衬层满足强度设计要求。而由图3b知,外保护层最大 Mises 应力为 11.26 MPa,小于 PE100 的屈服应力。因此,在内压 30 MPa 时,内衬层和外保护层均满足强度设计要求。

(4) 玻纤增强柔性管外压作用下强度校核。

因为抗压层主要作用是承受玻纤增强柔性管所受到的内、外压。因此需要对 8 mm 厚度的抗压层进行外压强度校核,分析在 5 MPa (500 m 水深) 的外压作用下内衬层及外保护层是否发生塑性变形。有限元分析结果如图 4 所示。

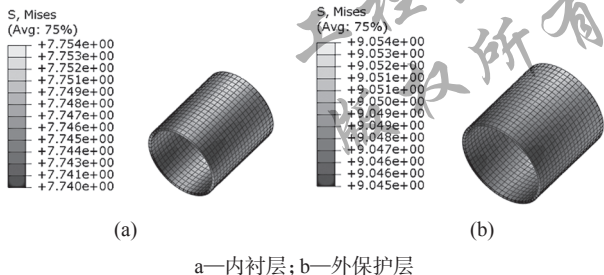


图4 5 MPa 外压作用下内衬层和外保护层 Mises 应力分布云图

由图 4a 可知,在 5 MPa 外压作用下,内衬层最大 Mises 应力为 7.754 MPa,小于 PE100 的 Mises 屈服应力。由图 4b 知,外保护层最大 Mises 应力为 9.054 MPa,小于 PE100 的 Mises 屈服应力 16 MPa。因此,在 5 MPa 的外压作用下,内衬层和外保护层均满足强度设计要求。

3.2 玻纤增强柔性管抗拉层缠绕角度及厚度确定

根据拉伸载荷工况,玻纤增强柔性管在轴线方向承受 588 000 N 的拉力,因此需对其进行纵向缠绕。从受力的角度来说缠绕角度越接近 0° ,玻纤增强柔性管轴向抗拉强度越大。考虑到 0° 的缠绕角在工艺上比较难实现^[12],因此根据现场经验一般采取 $\pm 30^\circ$ 螺旋缠绕方法。因为 90° 环向层主要提供玻纤增强柔性管环向刚度,对轴向抗拉强度贡献

非常小,所以对 $\pm 30^\circ$ 螺旋缠绕层厚度试算的过程中只需要建立内衬层、 $\pm 30^\circ$ 螺旋缠绕层、外保护层这 3 层即可。对柔性管的一端参考点进行固定约束,另一端参考点上施加 588 000 N 拉力。由于抗拉层厚度计算方法与前面抗压层方法相同,因此这里直接给出最后满足拉伸强度要求的抗拉层厚度试算结果。当抗拉层螺旋缠绕厚度增加到 3.6 mm 时 ($+30^\circ$ 层 1.8 mm, -30° 层 1.8 mm),各层应力云图如图 5 所示。

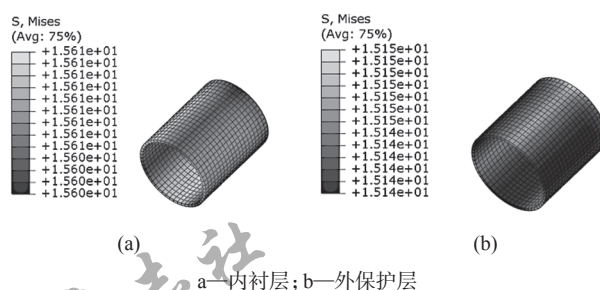


图5 抗拉层厚度为3.6 mm时内衬层和外保护层

Mises 应力分布云图

由图 5 可以看出,在受到 588 000 N 拉伸载荷时,玻纤增强柔性管的内衬层和外保护层受拉,内衬层最大 Mises 应力为 15.61 MPa,外保护层最大 Mises 应力为 15.15 MPa,均小于 PE100 的 Mises 屈服应力,仍然处于弹性范围内。从各层所受的 Mises 应力云图可以看出,在 588 000 N 拉伸载荷的作用下,玻纤增强柔性管内衬层和外保护层均没有发生塑性变形。

3.3 玻纤增强柔性管爆破压力强度校核

依据技术指标,所设计的玻纤增强柔性管需要达到 90 MPa 的爆破压力。爆破实验有两种失效模式。一种失效模式是管道在实验过程中仅受环向应力作用而发生失效,另一种失效模式是管道在实验过程中同时受到环向和轴向双向应力作用而发生失效。由于第 2 种失效模式比较危险,玻纤增强柔性管在较低的内压下就会发生破裂,因此一般都是按照最危险的失效模式进行强度校核^[13]。

按最危险的爆破失效模式进行强度校核时,需要同时考虑玻纤增强柔性管轴向和环向刚度。因此,有限元模型中增强层结构由内到外为:第 1 层为 90° 环向纤维缠绕层,第 2 层为 $+30^\circ$ 螺旋纤维缠绕层,第 3 层为 -30° 螺旋纤维缠绕层。其中 90° 环向缠绕层和 $\pm 30^\circ$ 螺旋缠绕层厚度已经通过前面的厚度试算确定了分别为 8 mm 和 3.6 mm。建模完

成后,对管道一端参考点进行固定约束,另一端参考点施加 1640 899 N 拉伸载荷,在内衬层表面施加 90 MPa 压力。根据 DNVGL-RP-F119 规范,爆破失效是一种最终极限状态,其失效标准是增强层的纤维发生断裂。增强层各层应力云图如图 6 和图 7 所示。

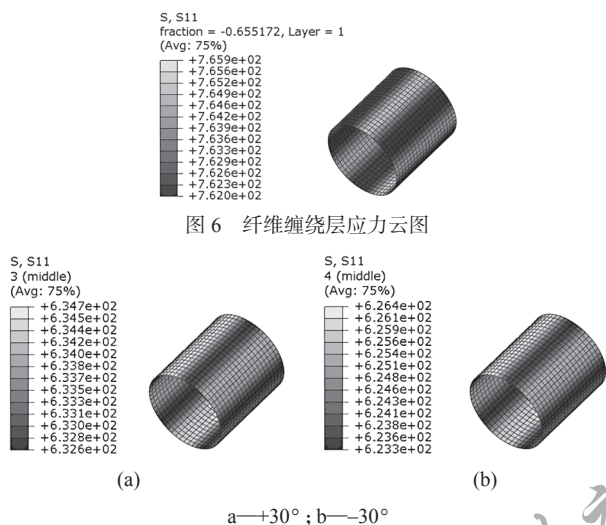


图 6 纤维缠绕层应力云图

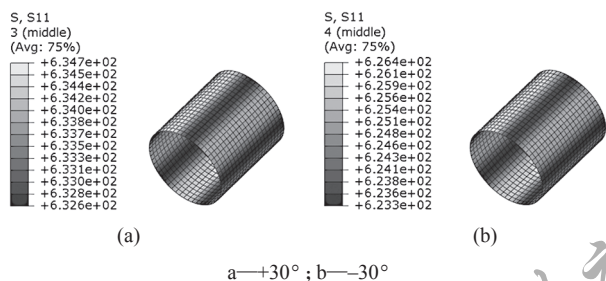


图 7 纤维缠绕层应力云图

由图 6 可知,在受到 90 MPa 爆破压力时,90° 纤维缠绕层纤维方向受拉,拉应力为 766 MPa,小于纤维的拉伸强度极限 782 MPa。由图 7 可知,+30° 纤维缠绕层纤维和 -30° 纤维缠绕层纤维方向受拉,拉应力为分别为 635 MPa 和 626 MPa,均小于纤维拉伸强度极限 782 MPa。由各层应力云图可知,所设计的玻纤增强柔性管所能承受的爆破压力已经超过 90 MPa。

3.4 玻纤增强柔性管拉伸、外压组合工况强度校核

根据美国船级社标准规定,在海底管道设计时需要考虑:爆破压力、外压载荷工况、拉伸载荷工况、拉伸与外压组合工况这 4 种典型载荷工况的强度校核^[20],前面的 3 种典型载荷工况在进行柔性管截面结构设计时已经考虑在内,因此有必要对已经完成初步截面结构设计的玻纤增强柔性管进行拉伸与外压组合工况下的强度校核,确定所设计的截面是否符合第四种典型载荷工况强度要求。对玻纤增强柔性管一端参考点施加固定约束,另一端参考点施加 588 000 N 拉力,同时在外保护层施加 5 MPa 外压。有限元分析结果如图 8 所示。由图 8 可知,内衬层最大 Mises 应力为 6.6 MPa,外保护层最大 Mises 应力为 7.27 MPa,均小于 PE100 的 Mises 屈服应力,因此各层都处于弹性状态。

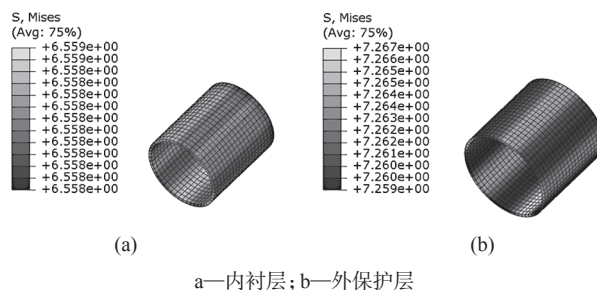


图 8 拉伸、外压组合工况下内衬层和外保护层 Mises 应力分布云图

3.5 与传统设计方法的对比

通过有限元计算的方式对玻纤增强柔性管增强层结构进行了设计计算,首先根据柔性管受载工况进行了抗压层和抗拉层缠绕角度的设计,然后通过对抗压层、抗拉层厚度试算的方式,最后获得能够满足柔性管技术指标要求的增强层厚度为 11.6 mm。而传统单一缠绕角度设计需要进行拉伸、内压和外压 3 种工况下多种缠绕角度和缠绕层数组合模型强度校核试算,找出能够同时满足 3 种基本工况的最优缠绕角度和最少缠绕厚度,计算量大,设计效率低。故笔者的研究方法为深海用玻纤增强柔性管的截面结构设计提供了一种快速、高效的计算方法。

4 结论

(1) 针对玻纤增强柔性管抗压和抗拉增强层结构设计,依据 DNVGL-RP-F119 设计规范,通过对抗压增强层进行内压 30 MPa 和外压 5 MPa 强度校核分析,确定抗压层的缠绕角度为 90°、缠绕厚度为 8 mm;对抗拉层进行 588 000 N 拉伸载荷强度分析,确定其缠绕角度为 ±30°、缠绕厚度为 3.6 mm,其中 +30° 和 -30° 缠绕厚度均为 1.8 mm。

(2) 通过对所设计的玻纤增强柔性管进行 90 MPa 爆破压力强度校核,发现增强层中纤维方向受到的最大应力小于其拉伸强度极限。再对玻纤增强柔性管进行 588 000 N 拉伸载荷与 5 MPa 外压载荷组合工况强度校核,发现内衬层和外保护层均处在弹性状态。因此通过以上强度校核,确认所设计的玻纤增强柔性管能够满足设计技术指标要求,通过失效模式对玻纤增强柔性管进行截面设计的方法是可行的。

(3) 所应用的截面结构失效分析方法与传统复合材料失效判据不同,由于传统复合材料管失效判据通常考虑了基体方向受力情况,忽略了内外保护层的作用,因此设计出的截面厚度过于保守,而本失

效分析方法在满足柔性管使用强度要求前提下,减少了柔性管截面厚度,对企业生产成本降低具有一定意义。

参考文献

- [1] Yang H Z, Zheng W. Metamodel approach for reliability-based design optimization of a steel catenary riser[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2011, 16(2):202-213.
 - [2] Rodriguez D E, Ochoa O O. Flexural response of spoolable composite tubulars: An integrated experimental and computational assessment[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(13-14):2075-2088.
 - [3] Bakaiyan H, Hosseini H, Ameri E. Analysis of multi-layered filament-wound composites pipes under combined internal pressure and thermomechanical loading with thermal variations[J]. Composites Structures, 2009, 88(4):532-541.
 - [4] 潜凌, 李培江, 张文燕. 海洋复合柔性管发展及应用现状 [J]. 石油矿场机械, 2012, 41(2):90-92.
Qian Ling, Li Peijiang, Zhang Wenyan. Development and applications of marine composite flexible pipe[J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(2):90-92.
 - [5] 陈海. 国产海底软管在海上油气田的应用 [J]. 石油机械, 2016, 44(5):61-65.
Chen Hai. The application of domestic flexible pipe in the offshore oil & gas field[J]. China Petroleum of Machinery, 2016, 44(5):61-65.
 - [6] 刘昊. 深海复合材料立管力学特性分析与优化设计研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
Liu Hao. Mechanical performance analysis and optimization design study of deepwater composite riser[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
 - [7] 曾季芳. 深海复合材料柔性管的力学性能和优化设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
 - [8] 卢青针, 岳前进, 汤明刚, 等. 海洋柔性管的抗拉性能及加强设计 [C]// 第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上册). 呼和浩特: 中国海洋学会, 2009:100-104.
Lu Qinzhen, Yue Qianjin, Tang Minggang, et al. Tensile properties and strengthening design of marine flexible pipe[C]//Proceedings of the 14th china ocean (shore) engineering symposium (first volume). Huhhot: China Ocean Society, 2009:100-104.
 - [9] Kruijer M P, Warnet L L, Akkerman R. Analysis of the mechanical properties of a reinforced thermoplastic pipe (RTP)[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(2):291-300.
 - [10] 张洁. 复合材料铺层设计准则的一些理解 [J]. 科技创新导报, 2013(14):57-58.
Zhang Jie. Some understanding of the composite material layer design standards[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(14):57-58.
 - [11] 乔嵩潼. 纤维缠绕增强复合管在内压作用下的力学行为研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
Qiao Aitong. Investigation on mechanisms of filament-wound fiber-reinforced composite pipe under internal pressure[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
 - [12] 徐光磊. 含内衬纤维复合材料发射筒力学性能研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
Xu Guanglei. Mechanical properties research for fiber reinforced composite launch canister with liner[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
 - [13] 林秀峰. 钢丝缠绕增强塑料复合管强度分析与优化设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
Lin Xiufeng. Strength analysis and optimization design of plastic pipe reinforced by cross helically wound steel wires[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- (上接第 54 页)
- Liu Peng, Wang Zhongwei, Liu Bo, et al. Prepare of novel phosphinate flame-retardant PA6 and study of the flame retardant property[J]. Plastics, 2010, 39(2):111-112.
 - [8] 阳葵, 刘渊, 王琪. 无卤阻燃尼龙 66 的研究 [J]. 塑料, 2011, 40(6):65-67.
Yang Yan, Liu Yuan, Wang Qi. Halogen-free flame retardancy of polyamide-6, 6[J]. Plastics, 2011, 40(6):65-67.
 - [9] 陈先敏, 兰修才, 李谦, 等. 无卤阻燃增强尼龙 66 提高氧指数的研究 [J]. 塑料工业, 2015, 43(8):95-98.
Chen Xianmin, Lan Xiucan, Li Qian, et al. Study on improving the oxygen index in non-halogen flame retardant reinforced nylon 66[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(8):95-98.
 - [10] 刘鹏举, 阳葵, 刘渊, 等. 高分散型三聚氰胺氰尿酸阻燃尼龙 66 的研究 [J]. 工程塑料应用, 2013, 41(3):11-15.
 - Liu Pengju, Yang Yan, Liu Yuan, et al. Highly dispersing melamine cyanurate flame retardant nylon 66[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(3):11-15.
 - [11] 吕文涛, 张京楠, 杨伏良, 等. 原位聚合法制备 N-P 复配型阻燃 PA66 树脂及性能 [J]. 塑料, 2017, 46(4):1-5.
Lyu Wentao, Zhang Jingnan, Yang Fuliang, et al. Synthesis and characterization of N-P compound type flame-retardant nylon66 resin by in-situ polymerization[J]. Plastics, 2017, 46(4):1-5.
 - [12] 代彦荣, 周岚, 冯新星. 玻纤增强阻燃共聚丙烯 66 复合材料的阻燃性能研究 [J]. 浙江理工大学学报: 自然科学版, 2017, 37(3):366-370.
Dai Yanrong, Zhou Lan, Feng Xinxing. Study on the flame retardancy of glass fiber reinforced flame retardant copolyamide 66 composites[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University: Natural Science Edition, 2017, 37(3):366-370.