

增强热塑性塑料复合管道研究进展及其应用现状

黄宝元,陶岳杰,冯济斌,冯金茂

(浙江伟星新型建材股份有限公司,浙江 临海 317000)

摘要:增强热塑性塑料复合管道(RTP)是当前的研究热点,具有耐腐蚀、耐热、耐高压、质轻、运输安装便捷、维护成本低等显著优点。综述了RTP的结构与分类;重点介绍并分析了国内外RTP理论研究进展、成型工艺的关键技术和RTP连接技术;详细地介绍了国内外RTP产品的生产与应用现状,并指出了RTP发展中存在的问题以及应用前景。

关键词:RTP;理论研究;成型工艺;连接技术;生产应用

中图分类号:TU532*.61

文献标识码:A

文章编号:1001-702X(2017)01-0071-06

Research progress and application status of reinforced thermoplastic composite pipe

HUANG Baoyuan, TAO Yuejie, FENG Jibin, FENG Jinmao

(Zhejiang Weixing New Building Materials Co. Ltd., Linhai 317000, China)

Abstract: Reinforced thermoplastic composite pipe (RTP) has become a focus recently, just because of its advantages of corrosion resistance, heat resistance, high pressure resistance, light weight, convenient transportation and installation, low maintenance cost and so on. This article reviewed the structure and classification of RTP, introduced and analyzed the theoretical research progress of RTP, the key technology of forming process and connection methods of RTP, introduced the production and application status of RTP at home and abroad in detail, and the major problems in the development of RTP as well as the future application prospects were also pointed out.

Key words: RTP, theoretical research, forming process, connection technology, production application

0 前言

随着我国经济的持续快速发展,管道输送在国民经济、国防工业以及人们的日常生活中正发挥着日益重要的作用,如饮用水、天然气、供暖、石油等资源的输送对国民经济的发展举足轻重,用于各种流体输送的管道自20世纪90年代以来也得到了迅猛发展。

管道按其材质可分为金属管道和非金属管道,金属管道具有耐高温、耐高压、抗刮擦等优点,但存在笨重、不易弯曲、管壁粗糙、易生锈、易腐蚀等缺点;单一材质的非金属管道(如塑料管道)能克服金属管道的众多缺陷,却又存在强度低、抗刮擦性能差、耐热性不足等问题。为同时克服金属管道和塑料管道各自的缺点,各种复合管道应运而生。以热塑性塑料为内

外层、各种增强材料为芯层的增强热塑性塑料复合管道(Reinforced Thermoplastic Composite Pipe,简称RTP,下同)为最具代表性的一类,是集金属和塑料2种管道优点于一身的新型管道,因其性能优异、运输安装便捷、维护成本低等显著优势,自面世之日起就一直受到市场的青睐。

1 RTP简介

RTP是一种压力管道,其结构特征为管壁一般由3层组成,内层可以是具有耐腐蚀、耐磨损、阻燃、抗静电等功能的聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、耐热聚乙烯(PERT)、尼龙(PA)等热塑性塑料;中间层为双层或多层的增强材料层;外层一般采用聚烯烃材料作为功能保护层,如抗刮擦、耐候等,以满足不同的应用要求。RTP的主要特点是既能承受较高的工作压力,同时还保持了塑料管道质轻、耐腐蚀及一定柔韧性的优点,可以制成盘管形式的连续管,每盘长度可以从几十米到近千米,既方便快速安装,又大幅降低接头渗漏的隐患。

RTP按其增强材料的材质可分为金属增强热塑性塑料复合管道和非金属增强热塑性塑料复合管道两大类,增强材料

收稿日期:2016-07-06;修订日期:2016-08-03

作者简介:黄宝元,男,1982年生,湖北黄冈人,工程师,主要从事复合管道和建筑排水管道技术开发工作。地址:浙江省临海市柏叶中路229号,E-mail:baoyuan160@163.com。

的类别如表 1 所示。

表 1 RTP 增强材料的类别

项目	材质	增强材料构成形式
金属	钢	丝、带、扁条、塑料包覆带
	铝	管(焊接)
	铜	管
非金属	碳纤维、芳纶纤维、聚酯纤维	丝、束、塑料包覆纤维带
	玻璃纤维、玄武岩纤维	丝、束、预浸带

RTP 根据其管壁结构又可分为粘结型和非粘结型 2 大类。在粘结型 RTP 中各层是熔接的,如芳纶纤维增强 RTP(见图 1),其结构中包覆芳纶纤维纱的聚乙烯增强带是互相熔接的,增强带与内衬管层以及外护套层之间也是互相熔接的;而在非粘结型 RTP 中各层间不结合,如钢带增强 RTP(见图 2),其结构中增强钢带处于相互分离的状态,可以相对滑移。与非粘结型 RTP 相比,粘结型 RTP 的显著优势来自增强材料层间以及增强层与内外层有效熔接成为一体的管壁结构,该结构使管道具有较高的层间剪切强度,进而在具备高抗内压的同时具有高抗外压(抗塌陷)的性能,而且层间无间隙,可避免端面层间渗透而导致的腐蚀及耐压失效。

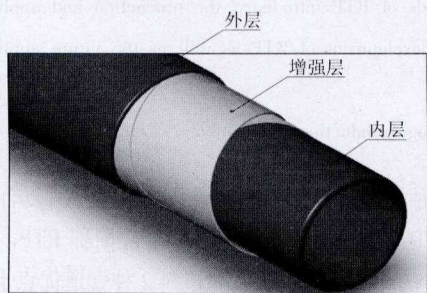


图 1 芳纶纤维增强 RTP 结构示意图

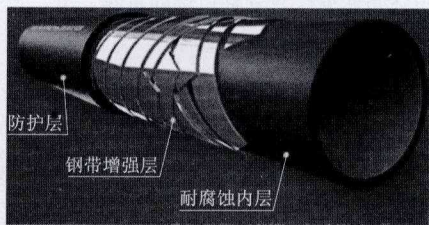


图 2 钢带增强 RTP 结构示意图

2 国内外 RTP 研究进展

2.1 RTP 理论研究进展

与传统的金属管道和单一材质的塑料管道相比,RTP 研究与应用时间较晚,又因其结构相对复杂,因而至今尚未建立完备的理论体系,欧、美、日等发达国家在 20 世纪 70 年代就开始研究 RTP 的理论与生产技术^[1],目前已较普遍地投入工

业化生产应用。

在借鉴金属管道和单一材质塑料管道成熟理论的基础上,国内外学者对 RTP 开展了大量的理论研究工作。对于目前国内 RTP 管道中应用最广泛的钢丝缠绕增强塑料复合管道,郑津洋等^[2]采用了正交各向异性模型,对钢丝和粘结树脂组成的增强层进行了简化,确定了材料的弹性参数,并对管道在承受内压荷载作用时的应力应变进行了理论分析和试验研究;卢玉斌^[3]对钢丝缠绕增强塑料复合管的力学性能进行了实验研究和有限元分析,建立了其长期性能的评定方法;朱彦聪^[4]利用 Donnell 扁壳方程求解了钢丝缠绕增强塑料复合管在外压下的弹性屈服,并进行了有限元模拟和实验验证。赵晶晶^[5]利用有限元法和有限元分析软件 ANSYS 对 2 种结构的钢骨架增强塑料复合管道进行数值仿真,建立了数学模型及有限元模型,针对不同条件下管道特定的力学特性进行分析并完成了管道的结构优化设计。Vaz 和 Rizzo^[6]对柔性管铠装结构在轴向压缩时的稳定性进行了 ABAQUS 有限元模拟,采用壳单元、梁单元、链接单元等对柔性管不同层进行了简化等效,分析了其轴向压缩时的侧向失稳现象和径向失稳现象(图 2 所示的钢带缠绕增强层属于铠装结构)。

对于非金属增强热塑性塑料复合管道,夏平原等^[7]建模分析了玻璃纤维增强连续塑料复合管的力学性能,并根据不同要求进行理论设计与爆破试验,结果证实两者基本一致;汪昱^[8]提出了纤维缠绕增强复合管道在静水外压和弯曲外压组合荷载下的屈曲分析理论,建立了在外压和弯曲外压组合荷载下的屈曲失稳分析模型,并提出了芳纶纤维缠绕增强 RTP 管外压承载力的简化计算公式。Xia 等^[9-11]基于经典复合层理论,分析了纤维缠绕增强复合管承受内压、弯曲以及温度荷载时的承载力,同时对纤维缠绕角度的影响进行了参数分析;Bahtui 等^[12-13]对柔性管在轴向拉伸以及扭转荷载下的响应进行了理论分析,并使用 ABAQUS 建立了实体模型进行分析;Kruijer 等^[14]对 RTP 管道进行了实验研究与理论分析,对管道增强层建立了新的平面应力模型和平面应变模型。

国内外大量卓有成效的理论研究工作为 RTP 的快速发展奠定了良好的根基,对 RTP 的生产与应用起着重要的指导作用,但目前所研究出的各种理论成果大多是半经验半理论的模型或公式,往往仅适用于一种或一类 RTP 管道,在实际应用过程中也存在种种不足,并且在 RTP 长期使用寿命方面的理论成果鲜见报道,有待进一步研究。

2.2 RTP 成型工艺技术

目前 RTP 的成型工艺技术按照生产组织方式可分为一步法和二步法 2 大类:使用缠绕机或编织机将高强度纤维直接缠绕或编制在内管上成为增强层再挤出包覆外层,称之为

一步法;用高强度纤维或钢丝先制成增强带,通过缠绕在内管上再包覆外层,称作二步法。二步法的第二步与一步法相同,其一般工艺流程如图3所示。

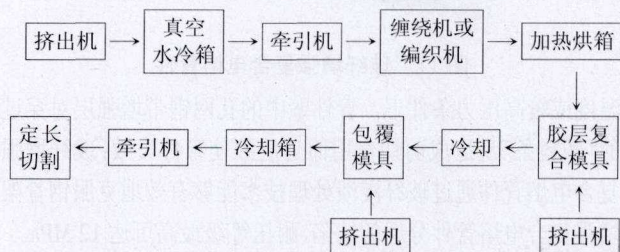


图3 RTP的成型工艺流程示意

与非粘结型RTP相比,粘结型RTP成型工艺相对复杂、技术难度大。由于粘结型RTP的增强层通常需要由多层增强材料反复缠绕并熔接构成,因此保证增强材料层间以及增强层与内外层的有效熔接是粘结型RTP工艺的关键所在,也是一大难点。目前国际上生产粘结型RTP的企业不太多,且这些企业对其制造中采用的工艺技术都严格保密。据笔者调查,实现层间熔接的工艺技术大致有以下几种:

(1)“先缠绕、后加热熔接”工艺

“先缠绕、后加热熔接”工艺的具体实现方法:增强带从缠绕机上的存储带盘中拉出,先不加热,以要求的张力、角度和位置缠绕到内衬管上(或已经缠绕多层增强带的内衬管上)。缠绕时贴合处没有外加压力,增强带缠绕贴合后随管材通过外辐射加热。依靠增强带张力缠绕在内衬管上形成的层间压力和贴合后外辐射加热传递来的热量实现层间的熔接。如英国Ridgway公司的连续纤维增强热塑性塑料管生产线采用的就是这种工艺(见图4);美国AD(Automated Dynamics)公司2004年申请的美国专利^[6]中的RTP连续生产线也是采用这种方法(见图5)。这种工艺有一定局限性,当管材直径比较大、缠绕角度比较小时,依靠增强带张力形成层间压力就会不够,若提高带的张力又可能造成过高的残余应力,进而影响质量。

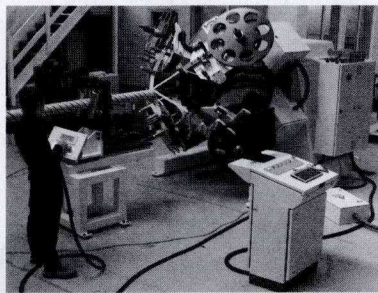


图4 Ridgway公司的RTP生产工艺

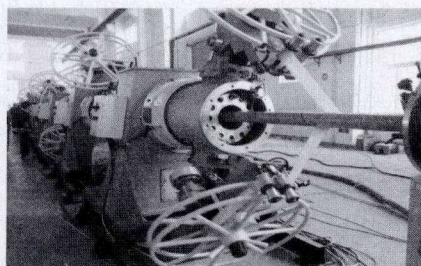


图5 AD公司的RTP生产工艺

(2)“缠绕贴合前加热、贴合时加外压熔接”工艺

“缠绕贴合前加热、贴合时加外压熔接”工艺^[6]的具体实现方式:在增强带缠绕至内衬管之前先用红外辐射预热待结合的两界面,先在增强带和内衬管的贴合处之前用热空气加热使结合界面达到塑料熔点,然后在增强带和衬管的贴合处再用压辊加压,以保证界面在可控的压力下熔接(见图6、图7)。

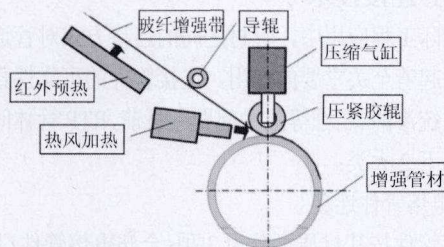


图6 “缠绕贴合前加热、贴合时加外压”工艺示意

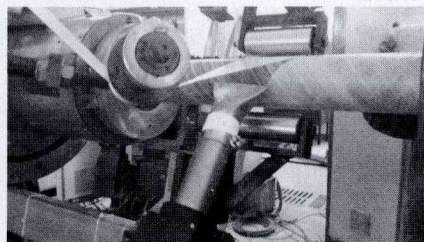


图7 “缠绕贴合前加热、贴合时加外压”工艺设备

该工艺方案可以保证RTP的充分有效熔接,且适应性较广,可以灵活调整温度和压力以适应各种需要。但要求每条生产线要配置多个缠绕机(每一增强带盘配一套)独立控制加热和加压装置,使得生产线结构复杂、投资增大,且生产线的操作控制也比较复杂。

(3)“先缠绕、后加热加压熔接”工艺

荷兰Airborne公司分别在中国^[7]和美国(US20140020766)申请了同一项发明专利(2012年),该专利提出了不同于传统的工艺技术(见图8):连续内衬管平移经过“缠绕站”和“固结站”组成的“制造站”,先在“缠绕站”完成增强带的缠绕(不加热),然后在“固结站”通过加热和外加挤压完成增强带与内衬管或上一层增强带的熔接与固化。这个固结区在内衬管轴向上有一

定长度(可从 5 cm 到数米,取决于管径等因素),外加挤压在环向至少占部分圆周(最好设计成覆盖到整个圆周)。不同于传统方法中挤压只施加到贴合点周围较小的区域内。而且专利中还表明,一些带层在彼此的顶部缠绕并且之后被同时固结。

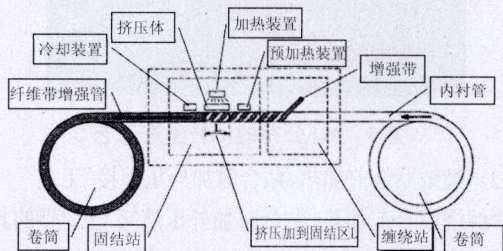


图 8 Airborne 公司“先缠绕后加热加压熔接”工艺示意

该工艺与传统方法相比,简化了工艺与设备,同时减少能源消耗,更利于制造需要缠绕几十层增强带的高压深海管道。

2.3 RTP 连接技术

在实际工程应用中,管材之间的连接方式对管道系统的正常运行起着至关重要的作用,连接管件的可靠性直接关系到管道系统渗漏、腐蚀等质量问题。目前,RTP 管体间的连接主要有以下 2 大类:

(1) 电熔管件连接

电熔管件按其材质可分为 3 种:全塑电熔管件(见图 9)、钢骨架增强复合电熔管件(见图 10)和玻纤增强复合电熔管件(见图 11)。

全塑电熔管件目前应用最为广泛,但耐压等级较低,国内为 1.6 MPa 以下,欧洲最高可达 2.5 MPa;钢骨架增强复合电熔管件耐压最高可达 3.5 MPa,但因塑料的蠕变特性,在较高



图 9 全塑电熔管件

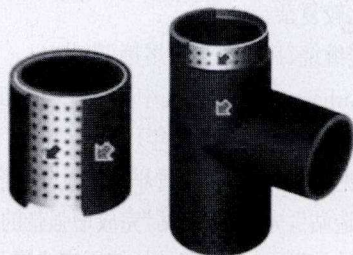


图 10 钢骨架增强复合电熔管件



图 11 玻纤增强复合电熔管件

温度或较高压力条件下,管件壁中的孔网钢带增强层对穿过的“塑料条”易造成剪切作用而分层致使管件失效;玻纤增强复合电熔管件通过玻纤浸渍处理技术能够有效地克服钢骨架增强复合电熔管件分层的缺陷,耐压等级最高可达 12 MPa。

(2) 金属扣压管件连接

金属扣压管件(见图 12、图 13)连接是目前中高压 RTP 管道应用最广泛的一种连接技术。该连接是把一个金属管件的插口端插入 RTP,在 RTP 外套一个金属套,用机械方法把金属套-RTP 管端-管件插口端压紧成为可以保证密封并承受轴向荷载的接头,金属接头之间再通过螺纹或法兰连接。金属扣压接头连接简单、施工便捷,因而受到市场青睐,但该连接可能存在 2 大缺陷:一是为了把金属套-RTP 管端-管件插口端压紧,必须在 RTP 管端施加一定的压力,从而造成 RTP 管端部分的压缩变形而使接头内管壁减薄,此外,RTP 管端的变形致使接头处与管道主体变形不一致,进而在接头与管体连接处易产生应力集中,最终易导致破裂失效,这也正是在水压爆破试验中经常发生 RTP 接头与管体连接处损坏失效(见图 14)的原因所在;二是金属扣压管件一般采用不锈钢或碳钢材质通过模具锻造加工而成,成本价格相对较昂贵,不适合较短定长 RTP(如 8 或 12 m/根的刚性管道)的连接,适用于 100~1000 m 以上较长的柔性盘管 RTP 的连接。

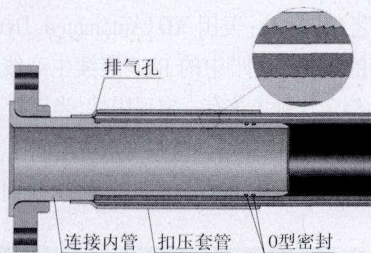


图 12 金属扣压管件结构示意图

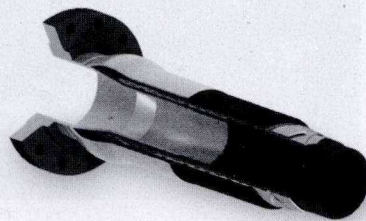


图 13 金属扣压管件实物

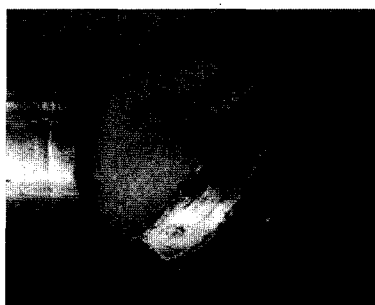


图 14 金属扣压连接 RTP 爆破试验失效

3 国内外 RTP 生产应用现状

3.1 国内外 RTP 产品及生产厂家概况

早在 20 世纪 70 年代,欧美发达国家就开发了 RTP 产品并在油气田领域开始应用,经过几十年的快速发展,其适用于不同领域、结构迥异的各类功能性 RTP 产品与技术已比较成熟,最高耐压等级已达到 137 MPa,耐热最高可达 160 ℃。国内 RTP 产品的生产与应用起步较晚,自 2009 年南京晨光欧佩亚复合管工程有限公司从德国 Krauss Maffei 公司引进我国第一条 RTP 生产线开始,后续有屈指可数的几家公司在借鉴橡胶高压管道成熟技术基础上,引进、消化、吸收欧美技术,开发了一系列 RTP 产品,最高耐压等级达到 32 MPa,耐热最高温度不高于 95 ℃。国内外 RTP 产品主要厂家生产及应用情况如表 2 所示。

表 2 国内外 RTP 产品主要厂家生产及应用情况一览

序号	国外公司	国内公司	产品	应用领域
1	加拿大 Flexpipe	伟星新材	纤维束或镀锌钢丝缠绕增强 PE 或 PE-RT 复合管	油气集输,注水、CO ₂ 、醇,输水
2	荷兰 Airborne	长春高翔	玻纤预浸带缠绕增强 PE、PP、PA、PVDF	油气集输,注水、CO ₂ 、醇,输水
3	荷兰 Soluforce	南京晨光	芳纶纤维带缠绕增强塑料复合管	
4	美国 Polyflow			
5	美国 Fiberspar	河北恒安泰	纤维束(环氧树脂浸渍)缠绕热塑性塑料复合管	油气集输、注水、污水输送
6	美国 Flexsteel	长春高翔	钢带缠绕塑料复合管	油气、水、CO ₂ 输送等
7	美国 Smart pipe	无	高强纤维带或纤维束缠绕 PE 复合管	修复、改造管线,油气输送
8	法国 Technip	天津海王星	多层窄钢带、多层塑料复合管(海洋系统多种产品与业务)	海洋油气输送、电缆
9	英国 Wellstream			
10	英国 Magma	无	碳纤维增强聚醚醚酮(PEEK)复合管	深海油气集输

浙江伟星新型建材股份有限公司在消化吸收国内外 RTP 生产技术基础上,经过 7 年多的研发,先后开发了新型钢丝缠绕增强塑料(PE、PERT)复合管道,纤维束缠绕增强塑料(PE、PERT)复合管道,性能质量更加稳定可靠,达到同类产品国际先进水准,目前已广泛应用于消防给水、市政给水、山区供水以及油气集输等领域,并正在着力开发玻纤预浸带缠绕增强塑料复合管道,属国内首创的完全粘结型复合管道,将打破国外技术垄断,填补国内空白。

3.2 国内外 RTP 产品应用情况

目前 RTP 产品的应用主要集中在油气开采领域,主要包括以下 3 大细分市场:(1)陆地(Onshore)油气田管道系统,主要用于注水、注醇、油气集输、污水输送等;(2)浅海(Offshore)油气田管道系统,主要用于浅海油气集输;(3)深海(Subsea)管道系统,主要用于深海油气集输、海底电缆护套等。

欧美发达国家的 RTP 产品在油气开采领域应用得已相当普遍,比如,法国 Technip 公司的 RTP 产品应用遍及 40 个国家,仅在陆地油气田管道市场就已累计应用达 25 000 km(总合同价值 135 亿欧元),在深海领域应用超过 18 000 km;加拿大 Flexpipe 公司的 RTP 产品在油气田领域应用总长度超过 18 000 km,遍及北美、拉丁美洲与澳大利亚;美国 Fiberspar 公司玻纤增强 RTP 产品在油气集输市场应用也超过 20 000 km。而国内油气开采领域的管道系统大约 90% 仍然采用金属管道,在剩下约 10% 的非金属管道中又以玻璃钢管道为主流,占比超过 60%,RTP 的应用在整个油气田领域占比大致在 2%~3%,累计估计不超过 3 000 km,且尚未形成统一的国家标准,呈现出“一种产品、一家企业、一个标准”的现象。

欧美在上述 4 个细分市场均有规模较大的企业,且往往是油气田领域多元化经营的集团公司,涵盖油气田设计、设备设施、管道、钻井平台、工程服务等一体化业务,最典型的代表就是总部在法国的 Technip 公司;而国内仅有屈指可数且规模小的几家企业在模仿跟进,并且也都还处于刚起步的初级阶段,与欧美企业相比,其差距主要体现在:一是管道耐压等级达不到高压、超高压的水平;二是深海管道系统还处于空白状态;三是工程技术、维修等后期保障难以满足应用需要;四是国内公司销售的仅仅是管道产品,而国外公司销售的则是系统性的技术与方案。

4 存在问题及我国发展 RTP 管道的思考

RTP 具有耐腐蚀、耐热、耐高压、质轻、运输安装便捷、维护成本低等显著优势,因此,在油气田、矿山、化工等工业领域,RTP 取代高能耗高污染的传统钢管是一种必然趋势,其应用前景十分广阔。但若要大面积应用普及,尤其是针对国内市

场,从理论设计到生产应用以及连接技术等方面都存在许多问题,还有待进一步深入研究,主要有以下几个方面:

(1)在使用寿命评估方面,对单一材质塑料管道的使用寿命评价,有建立在高分子材料“时温等效原理”经典理论基础上的“外推法”(ISO 9080 标准)进行预测评估,而对 RTP 而言,尚未见有成熟的可被广泛认可的理论及检测评估方法。

(2)在 RTP 的理论设计方面,缺少一种系统性的能广泛适用于各类 RTP 且与实际应用十分吻合的设计理论。

(3)在 RTP 成型工艺及连接技术方面,欧美发达国家已发展得比较成熟,但其技术往往都对外封锁,尤其是用于高端市场(如深海)的 RTP,国内尚无成熟的整套制造技术。

(4)在生产应用方面,国内目前尚未形成统一的国家标准,尤其是柔性高压 RTP,只是简单的模仿参考欧美相关标准和规范进行组织生产与应用。

RTP 虽有大约 40 年的历史,但发展得并不十分成熟,新技术又通常处在严格保密和专利保护下,因此,我国发展 RTP 不可能像过去发展单一材质塑料管道那样全套引进设计、制造、检验与应用的技术,只能在尽量吸收国外技术成果的同时,更多地依靠自主研发,循序渐进地推动 RTP 的发展。建议优先发展陆地油田用纤维增强 RTP,以最高使用温度达到 120 ℃、最高耐压等级达到 60 MPa 为第一阶段技术目标,逐步取代金属管道;在开发 RTP 管道同时,着重研发连接技术、管道系统性能评价、质量检测技术以及应用技术,积累生产应用经验,再向浅海与深海领域拓展,延伸开发与应用海洋油气集输非金属材料增强 RTP。

参考文献:

[1] 孙哲,孙振国,刘惠明,等.柔性增强热塑性塑料管道的发展和市场前景[J].新型建筑材料,2013(12):97-101.
 [2] 郑津洋,林秀峰,卢玉斌,等.钢丝缠绕增强塑料复合管的应力分析[J].中国塑料,2006,20(7):56-61.
 [3] 卢玉斌.钢丝缠绕增强塑料复合管力学性能研究[D].杭州:浙江大学,2006.
 [4] 朱彦聪.钢丝缠绕增强塑料复合管外压失稳研究[D].杭州:浙江大学,2007.

[5] 赵晶晶.钢骨架增强塑料复合管道的力学性能分析与优化设计[D].天津:河北工业大学,2013.
 [6] Vaz M A,Rizzo N A.S.A finite element model for flexible pipe armor wire instability[J].Marine Structures,2011,24(3):275-291.
 [7] 夏平原,李诗春,陈斌.玻璃纤维增强连续塑料复合管道的应用性能[J].油气储运,2013,32(7):795-798.
 [8] 汪昱.增强热塑性塑料管轴向压缩失稳机理研究[D].杭州:浙江大学,2014.
 [9] Xia M,Takayanagi H,Kemmochi K.Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under intimal pressure[J].Composite Structures,2001,53:483-491.
 [10] Xia M,Kemmochi K,Takayanagi H.Analysis of filament-wound fiber-reinforced sandwich pipe under combined internal pressure and thermomechanical loading [J].Composite Structure,2001,51:273-283.
 [11] Xia M,Takayanagi H,Kemmochi K. Bending behavior of filament-wound fiber-reinforced sandwich pipe[J].Composite Structures,2002,56:201-210.
 [12] Bahtui A,Bahai H,Alfano G.A finite element analysis for unbond flexible risers under torsion[J].Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering,2007,130(4):169-173.
 [13] Bahtui A,Bahai H,Alfano G.Numerical and analytical modeling of unbonded flexible risers[J].Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering,2009,131(2):1020-1024.
 [14] 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,2005,36:291-300.
 [15] DE Hauber.reinforced thermoplastic pipe manufacture: US,6773773 B2[P].2004-6-25.
 [16] 张玉川.油气产业用塑料管道技术汇编 2015[R].中国管道商务网,2015:73-76.
 [17] 马库斯·安东尼斯·伊凤娜·克雷默斯.用于制造连续复合材料管的方法、用于制造连续复合材料管的设备:中国,CN 103501989A [P].2014-01-08.



(上接第 16 页)

in reinforced concrete structures:A computational aspect[J].Journal of Civil Engineering & Management,2008,14(1):49-60.
 [10] Kwon S H,Shah S P.Prediction of early-age cracking of fiber-reinforced concrete due to restrained shrinkage [J].Aci

Materials Journal,2008,105(4):381-389.

[11] Noushini A,Vessalas K,Arabian G,et al.Drying shrinkage behaviour of fibre reinforced concrete incorporating polyvinyl alcohol fibres and fly ash[J].Advances in Civil Engineering,2014(2014):1-10.

