

纤维增强钢管道的研究现状及展望

张冬娜¹ 戚东涛¹ 魏斌¹ 齐国权¹ 丁楠¹

摘要: 随着我国天然气工业的迅速发展,对输送管道的承压能力提出了更高的要求,因此需要开发高压、大流量、长距离的输送管道,根据国内外目前的发展,增加钢材钢级或钢管壁厚的方式都具有一定的局限性,而纤维缠绕钢管是一个非常重要的发展方向。纤维增强钢管道包括干法缠绕成型的纤维增强钢管(FAST-Pipe)和湿法缠绕成型的复合材料增强管线钢管(CRLP),这2种管道通过在钢管外表面缠绕纤维增强层的方式提高钢管的承压能力。与同等承压能力的钢管相比,纤维增强钢管道具有重量轻、费用低和止裂性好等优势,在高压天然气长输管道上具有广泛的应用前景。

关键词: 纤维增强; 钢管道; 复合材料; 缠绕

Doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2016.5.002

Current Status and Prospect of Fiber Reinforced Steel Pipeline

Zhang Dongna, Qi Dongtao, Wei Bin, Qi Guoquan, Ding Nan

Abstract: The rapid development of natural gas industry makes higher requirement of the pipeline's loading capacity. At present, there are limitations by using the method of increasing steel grade or thickness of steel pipelines. So fiber reinforced pipe was developed. Fiber augmented steel technology pipe (FAST-Pipe) prepared by dry winding and composite reinforced line pipe (CRLP) prepared by wet winding were introduced in this paper. These two kinds of pipe improve the loading capacity of steel pipe through winding a fiber reinforced layer. Comparing with steel pipe owning the same loading capacity, fiber reinforced pipes have the advantages of light-weight, low-cost and good crack arrest, which make them have application prospect in high-pressure natural gas transportation.

Key words: fiber reinforced; pipeline; composite; winding; natural gas transportation

天然气是一种清洁、方便的优质能源,广泛应用于燃料、发电和车辆等领域,同时也是一种基本有机化工原料。如今我国的天然气工业正处于发展高峰期,目前的消费量已达到每年 $1\,300 \times 10^8 \text{ m}^3$,预计2020年我国天然气需求量将达 $3\,600 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。除了消费量,天然气的生产量也在逐年提高,2013年常规天然气产量为 $1\,178 \times 10^8 \text{ m}^3$,根据我国发布的《能源发展战略行动计划(2014—2020)》,到2020年,年产常规天然气将达到 $1\,850 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

我国的天然气资源约60%集中在西部地区,主要是塔里木天然气、新疆煤制气等,从天然气的产销数据也可以发现,为了满足天然气的使用需求,有一部分天然气还需从国外进口。天然气资源分布的集中性使天然气的管道输送问题变得尤为重要,并且为了保证天然气的使用量,满足高压、大流

量、长距离输送是我国天然气输送管道技术发展的必然趋势。

目前,在西气东输二线及三线采用的1 219 mm、X80、12 MPa方案,最大输气量只能达到 $330 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ^[1],西气东输四线以及五线要求输气量为 $450 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。为了满足这一要求,需要开发出高压、大流量、长距离的输送管道,根据国内外目前的发展,增加钢材钢级或钢管壁厚的方式都具有一定的局限性,而纤维缠绕钢管是一个非常重要的发展方向。

1 纤维缠绕钢管发展的必要性

随着天然气输送压力的提高,对输送管线钢级的要求也越来越高。X70与X80分别在1973、1985年添加到API标准中,2007年,API 5L第44版与

¹石油管工程技术研究院

ISO 3183整合，增加了X90、X100和X120钢级^[2]，形成了比较完整的标准体系。

1985年，X80管线钢最早应用在德国^[3]，之后就开始了快速的发展，并在管道设计、冶炼和轧制、钢管制造、现场焊接工艺、管道防腐保护与运营维护等方面积累了丰富的经验，目前普遍认为X80管线钢的工业应用在技术上已经比较成熟。我国对X80管线钢研究稍晚，但发展迅速，西气东输二线引进中亚地区的X80管道干线长4 843 km，五条支干线总长2 667 km。当对管道压力的要求进一步提高时，可以采用大壁厚的X80管线钢管，但这种方法不仅大幅度地增加管道建设成本，而且厚壁X80管线钢的使用对冶金水平提出更高的要求，也增加了焊接的难度。

除了增加壁厚，另外一个方法就是提高管线钢的钢级水平，采用高钢级钢管使管道建设的成本大大降低，管道建成后运营的经济效益更加良好。有统计分析表明，每提高一个钢级可减少建设成本7%^[4]。在90年代中期X100管线钢的研发开始发展，TransCanada公司于1998年对X100钢级管线钢进行开发与应用研究^[5]，在2002年新版的CSZ 245-1—2002将X100钢级列入了加拿大国家标准。我国在2007首次成功研制了X100钢级直缝埋弧焊管，并达到国际同类钢管质量水平。

虽然X100管线钢的使用可以提高承压能力，减薄钢管壁厚，但是其应用还存在一定的问题。目前国外已经建成数条试验段，但长度都在5 km以下，国内尚没有相关试验段。X100广泛使用需要解决的一个问题是钢管的现场焊接问题，另一个问题是高强度的管线钢具有较低的止裂能力，一旦管道破坏产生裂纹，裂纹可能沿管线扩张数公里^[6-7]。目前X100及以上钢级的设计、焊接还需进一步的研究与完善，也缺少相应的标准。

综上所述，在高钢级管线钢管的使用方面，X80的主要技术问题已经解决，目前我国西气东输二、三线就采用了X80钢管，但是在X80的基础上要提高管线的输送能力，增加管道壁厚和提高钢级都有一定的局限性。为了降低管线钢新产品的材料开发难度与成本，目前的方法是在较低钢级的管线钢管外环向缠绕连续纤维，提高管体的环向承压能力，达到高压、大流量、长距离输送的目的。

2 纤维缠绕钢管的种类

在内压力作用下，钢管的环向应力(σ_r)和轴向应力(σ_a)的关系为 $\sigma_r = 2\sigma_a$ ，如果钢管道的壁厚满

足了轴向应力的要求，那么其环向应力只能满足一半，即钢管的内压承载能力是由其环向应力限制的。因此，当在钢管外缠绕连续纤维时，由于纤维承担了钢管环向的载荷，提高了内压载荷下管道环向承载能力，轴向的载荷仍由钢管道承担，在连续纤维缠绕工艺方面，目前使用的方法为干法缠绕和湿法缠绕两种。

干法缠绕的复合管道结构包括钢管、纤维缠绕层和外包覆层三部分^[8]，康菲公司最早使用干纤维缠绕，并申请了相关专利，C-FER公司对这类管道也进行了大量研究，目前将这种管称为FAST-Pipe(fiber augmented steel technology pipe)^[9]。FAST-Pipe缠绕使用的纤维多为玻璃纤维，可以是玻璃纤维束或玻璃纤维带。

湿法缠绕在纤维缠绕阶段增加了浸渍热固性树脂的过程，其主要结构为内层钢管、过渡层、纤维树脂复合材料层和外包覆层。NCF公司最早使用湿法缠绕的方法增强管线钢管，之后TransCanada开发出一系列承压能力从8.275 MPa至24.800 MPa不等的复合材料增强钢管产品，将这种复合管称为CRLP (composite reinforced line pipe)，并铺设了相应的试验段^[10]，其中萨拉托加的试验段包含7个接头，单管长12 m，口径1 219 mm。加拿大已经制定了CRLP相关的标准，在CAS Z662—2011中的第17章对复合材料增强管道的设计、材料和制造、安装、连接、压力测试和操作维护进行了叙述。

3 纤维缠绕钢管的结构层

FAST-Pipe的结构包括内层钢管、纤维层和外保护层三部分组成。钢管在经过防腐处理后进行缠绕，缠绕的纤维可以是玻璃纤维、碳纤维、高密度聚乙烯纤维、芳纶纤维等，目前最常使用的是玻璃纤维。当缠绕结束时，纤维层外有一个保护层，外保护层可以是热塑性塑料如高密度聚乙烯，也可以是由聚脲、聚氨酯或氢化丁腈橡胶组成的弹性层。保护层有两个作用，一是由于纤维层比较松散，当保护层包覆在纤维层外面时，可以将纤维层聚集并紧贴在钢管表面；另外保护层可以防止水汽进入到金属层表面，起到防腐的作用。

CRLP的结构包括内层钢管、过渡层、复合材料增强层和外保护层四部分组成。首先钢管需要进行喷砂处理，去除表面污染物以提高黏附力，在此基础上涂覆过渡层，过渡层与复合材料缠绕层之间有一定的黏结性，能起到传递应力的作用，并且对钢管有一定的防腐的作用。常用的过渡层材料包括

环氧、聚酯、乙烯基酯等。

过渡层之后是复合材料缠绕层,纤维在缠绕前与未固化的树脂复合,树脂起到传递应力并且固定纤维的作用,同时保护纤维性能不在环境作用下降低。最常使用的纤维是玻璃纤维,常用的树脂材料包括聚酯、环氧树脂、乙烯基酯和酚醛树脂等。这几种树脂中,聚酯是最通用的一种树脂,在玻璃纤维增强工业使用广泛,其强度适宜,可以在室温下固化,并且费用最低;环氧树脂的强度最高,耐化学腐蚀性好,通常需要高温固化,费用较高;乙烯基树脂为环氧树脂与聚酯的混合物,有非常好的耐腐蚀性,优良的强度和韧性,但费用偏高;酚醛树脂具有优异的阻燃性,较低的延伸率,适宜的强度,费用偏高。通过对几种常用树脂的分析,可以针对不同的强度要求与使用环境,选择适宜的树脂与固化体系,对于高压管道而言,最常使用的树脂材料为环氧树脂。

最后要在纤维增强的管线外包覆一外保护层,外保护层可以在运输、安装及管道使用的过程中对管道进行防护,尤其避免纤维增强层受到外界的伤害。这层保护层通常由增强织物层和树脂胶衣层两部分构成。织物层保护外界腐蚀和机械损伤对承载纤维造成的破坏;胶衣层富含树脂,能阻止内层材料因吸收水分而造成的性能下降。

通过对FAST-Pipe和CRLP两种管道结构的分析可知,二者都包括了钢管、增强层和外防护层,CRLP有一过渡层,FAST-Pipe虽然没有过渡层的概念,但也需要做钢管的防腐处理,因此二者的主要区别还是增强层材料。FAST-Pipe中使用干纤维缠绕,无树脂体系,而CRLP中使用的树脂通常是热固性树脂,因此在缠绕结束后需要一个固化过程,需要选择合适的固化方法及固化场所。树脂体系的引入虽然要考虑固化的问题,但是树脂可以更好的固定纤维位置,并起到传递应力和保护纤维的作用,此种方法的使用目前更为广泛。

4 纤维缠绕钢管的结构设计

在两种管道的结构设计过程中,需要根据管道的实际载荷要求计算出缠绕层的结构参数,在这个问题上可以借鉴类似结构的钢质内胆缠绕气瓶。根据缠绕气瓶的相关标准,如ISO/FDIS 11515、GB/T 24160—2009和ISO 11439—2000^[11],标准中要求采用非线性分析软件(专用计算机程序或有限元分析程序),建立计算复合材料力学性能的适当模型,对缠绕气瓶进行工作压力和最小设计爆破压力下的

应用分析,确定缠绕层和内胆中的应力分布及纤维应力比。

对于纤维缠绕钢管,在确定应力分布与缠绕层的厚度、纤维缠绕角度和纤维含量时,也需要通过有限元模型的计算。针对FAST-Pipe, Mamdouh M. Salama^[9]使用有限元法预测管道内压力以及弯曲应变的能力,结果表明管道在爆破时的破坏形式通常是由玻璃纤维失效引起的,并通过实物试验对管道弯曲试验进行了校准。在C-FER与TransCanada对CRLP的研究中^[10],建立了CRLP的结构模型,确定了各结构层的规格尺寸,计算相同应变下钢层与复合材料层的载荷分布,并分析了水压试验、操作压力及爆破试验下钢层与复合材料层的内压-环向应力曲线。由于有限元的分析需要一定的计算周期,因此John Wolodko^[12]针对CRLP的应力-应变响应,以屈服强度为界限,分别建立了钢层与增强层在自由端和固定端时的应力-应变响应公式,并将使用公式计算的结果与有限元法计算的结果进行了对比,这种方法简单便捷,但是该方法只能简单地对复合结构进行初步设计,详细的计算还应使用有限元法。

使用有限元法设计缠绕层尺寸与结构时,干纤维和复合材料的缠绕都起到增加钢管环向应力的作用,但是钢材、玻璃纤维和复合材料的性能存在一定的差异,见表1,不同性能的材料复合在一起必须考虑性能差异带来的问题。

表1 管线钢、复合材料和玻璃纤维的基本性能

性能	管线钢 (X65~X80)	复合材料	玻璃纤维
屈服强度/MPa	450~552	-	-
拉伸强度/MPa	414~621	483~1034	590~1130
弹性模量/GPa	207	35~45	75
泊松比	0.3	0.22~2.7	0.245
拉伸断裂伸长率/%	> 20	1.2~2.7	3.0~7.5

复合材料和玻璃纤维在拉伸过程中不会出现屈服现象,其应力-应变曲线是线性的,因此两种材料无屈服强度值。三种材料性能相差最大的是弹性模量和拉伸断裂伸长率,以CRLP为例,在管道内施加压力的过程中,内钢层先进入屈服阶段,并且钢材断裂前延伸率大于20%,所以在复合材料增强层破坏前,钢层处于屈服阶段而不会发生强化,纤维增强层处于低应力状态,增强层的性能不能充分发挥。

同样的问题也存在于FAST-Pipe中,对于这种由于弹性模量相差较大带来的问题,目前使用预应力的方法^[13],即缠绕结束后在管内施加压力(预应

力)直至钢管发生屈服变形,之后卸载到无压力状态。当预应力卸载后,钢层由于发生塑性变形而不能完全回复,产生了永久变形,因此缠绕层内存在一定的拉伸应力而钢层内存在一定的压缩应力。当经过此方法处理的缠绕层再次被施加内压时,钢衬的屈服点后移,弹性区域扩大,缠绕层由于残余拉伸应力的存在能更早承载,易充分发挥增强层的承载作用。预应力处理已经广泛应用在天然气气瓶^[14]和压力容器^[15]的生产制造中。

在实际应用中,FAST-Pipe和CRLP需要进行水压试验检测,压力增加到钢管发生屈服后卸压,此时钢管产生了0.2%左右的塑性变形。由于钢管的变形,增强层有残留的拉应力,当再次加压时,增强层能从实质上分担载荷,此外,由于钢管中残留一部分压应力,也提高了管体的耐疲劳性能^[16]。

5 纤维缠绕钢管的接头连接

FAST-Pipe和CRLP的接头连接不能仅靠焊接完成,其中内层钢管进行焊接,外层的缠绕层需要通过补口的方式将其连接起来。由于焊接的高温会对纤维及树脂材料造成一定的破坏,因此在FAST-Pipe和CRLP的制造过程中,钢管两头的部分不进行缠绕,缠绕段长度离钢管两端都余出一定的距离(150 mm),这部分距离保证在内层钢管焊接的过程中纤维和复合材料不会因为焊接高温而发生性能的下降。

FAST-Pipe在钢管焊接后,先在焊缝处缠绕纤维层,缠绕到规定厚度后喷涂涂层,该涂层干燥后可以形成弹性体保护层。CRLP在钢管部分焊接完成后,先在未缠绕的裸管部分进行喷砂处理,并涂底漆,之后再缠绕补口带,进行接头部分的缠绕^[17-18]。纤维先浸胶处理,通常为预浸带,缠绕纤维的宽度与钢管裸露处的宽度一致,其厚度是管体缠绕厚度的1.5~2倍,缠绕结束后,需要对树脂进行固化处理。

两种纤维增强钢管都需要在现场进行焊缝处的缠绕,接头部分缠绕的设备与目前通常使用的缠绕设备不同,常使用的缠绕设备多是绕丝嘴沿芯模轴向移动,芯模做圆周运动。但由于现场作业的需求,管道固定后焊缝处缠绕设备的绕丝嘴需做圆周运动,目前TransCanada已经针对CRLP连接处缠绕的设备,进行了现场作业。

6 结语及展望

纤维缠绕钢管除了能提高钢管的环向应力外,

还具有质量轻、价格低、止裂性好等优点。复合材料和纤维的价格与高钢级管线钢的价格相比较低,并且复合材料的密度为 2.0 g/cm^3 左右,玻璃纤维的密度也只有 $2.5\sim 2.8\text{ g/cm}^3$,远低于钢材的 7.85 g/cm^3 。质轻的优点也使其管网铺设的价格进一步降低,主要体现在运输费和人工费上。由于增强层使原本的钢层减薄,焊接成本也会降低。有研究表明^[10],在管网铺设过程中,CRLP比全钢管节约7%~8%的费用,FAST-Pipe在单纯的管道成本上比全钢管节约42%。此外,由于纤维层分担了载荷,并且通过纤维缠绕时的预紧张力对钢管产生了约束,阻止裂纹的扩张,从而提高了钢管的止裂能力。

虽然FAST-Pipe和CRLP在性能、成本上具有一定的优势,但是两种管道的广泛使用还需要经过进一步研究。研究的主要方向包括管道的长期结构性能、长期耐腐蚀性能等,并且增强层不能使用传统的钢管检测方法,需开发新的监测及检测方法。

在2012年1月再版的加拿大标准《Oil and gas pipeline system (CSA Z662—11)》中,增加了第17章复合材料增强钢管道(Composite-reinforced steel pipeline)的内容,该标准规定了复合材料增强钢管的设计、材料、建造、压力测试、使用和维护等的要求。同时,标准中也指出管道的连接和修复等内容应该有大量工程检测数据和现场试验支撑,而目前的数据基本是试验段的研究数据,因此还需进行进一步的研究,标准也需要在研究的基础上制定更详细的工艺规范。

参考文献

- [1] 李鹤林,吉玲康,田伟.高钢级钢管和高压输送:我国油气输送管道的重大技术进步[J].中国工程科学,2010,12(5):84-90.
- [2] 黄开文.国外高钢级管线钢的研究与使用情况[J].焊管,2003,26(3):1-10.
- [3] 庄传晶,冯耀荣,霍春勇,等.国内X80级管线钢的发展及今后的研究方向[J].焊管,2005,28(2):10-14.
- [4] 李鹤林.天然气输送钢管研究与应用中的几个热点问题[J].中国机械工程,2001,12(3):349-352.
- [5] GLOVER A. Application of Grade 550 (X80) and Grade 690 (X100) in Arctic climates[C]//Proc International Pipe Dreamer's Conference. USA: American Society of Mechanical Engineering, 2002: 33-52.
- [6] SALAMA M M. Dry fiber wrapped pipe: US Patent 8418337[P]. 2013-4-16.
- [7] TAKEUCHI I, FUJINO J, YAMAMOTO A, et al. The prospects for high-grade steel pipes for gas pipelines[J]. Pipes and Pipelines International, 2003, 48(1): 33-43.

(下转第13页)