

含缺陷高压管道复合材料补强有限元模拟

王勇军¹,王 鹏¹,王峰会¹,白真权²,赵新伟²

(1. 西北工业大学,陕西 西安 710072;

2. 中国石油天然气集团公司 管材研究所,陕西 西安 710068)

摘要:针对输气管道存在缺陷时容易引起气体的泄漏,利用高压管道复合材料补强力学模型,用有限元方法计算了在不同管道尺寸、厚度、缺陷面积和缺陷深度下用复合材料补强的最小层数,并绘出了补强厚度与缺陷面积和深度的关系图。计算结果表明,在极限输送气压下,缺陷深度和面积是决定补强层数的主要因素。

关键词:管道缺陷;补强;有限元

中图分类号:TQ055.8;TQ022.11 文献标识码:A 文章编号:1001-4837(2007)10-0013-04

Analysis Failure Mechanism of Composite Reinforced High Pressure Pipe with Outside Flaw by FEM

WANG Yong - jun¹, WANG Peng¹, WANG Feng - hui¹, BAI Zhen - quan², ZHAO Xin - wei²

(1. Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China; 2. Institute of Tubular Goods Research Center, Xi'an 710068, China)

Abstract: When the outside wall of pipe is corroded or damaged, the strength of the pipe near the flaw decrease, which would lead to gas leak when work at high pressure condition. In order to solve this problem, composite reinforced methods are often to be used to assure pipeline security. So understanding the failure mechanism is important for practical engineering use, in this paper, a FEM model was utilized to analyze the ultimate pressure when composite material applied outside the pipe, the stresses in composite material layers, the bonding layer and pipe flaw were calculated. The effects of flaw depth and size surface area were also taken into account in the calculated model. The results show that the failure of the pipe with outside reinforced composite layers most affected by the depth and size of surface area of the flaw, ie, the failure of reinforced pipeline still controlled by the flaws, but application of reinforced composite layers can prevent the further damage of the flaw and the leak of the gas.

Key words: corrosion and flaw; reinforcement; finite element method

国内外腐蚀管道补强技术主要有焊接不停输修复技术、复合材料加强套补强、玻璃纤维带外缠绕修复法等^[1]。管道复合材料补强的方法是通过在管

壁缺陷处填加一种树脂材料,然后包裹一层复合材料补强层,补强层与钢管外壁之间采用环氧树脂胶剂粘结。针对不同程度的缺陷,复合材料补强的层

数也是不同的。缺陷或孔洞对管道的影响也进行了一些研究^[2-4],但含有补强层的管道的失效问题还需要进一步研究。

复合材料补强的目的是确保缺陷处的管道强度达到要求,即要求缺陷处的管道变形处于弹性阶段,从而防止缺陷处的塑性变形和应力集中造成的裂纹扩张,并且可以防止缺陷继续腐蚀。补强管道可能发生的失效分为复合材料的失效和环氧树脂与管道的分离。复合材料失效形式包括:基体屈服开裂、纤维与基体界面脱胶、纤维断裂。纤维的断裂主要由纵向拉伸强度 X_t 决定,而纤维与基体的分层是由层内切应力过大引起的。补强将复合材料缠绕在管道周向上,因此必须保证复合材料层的周向应力小于纵向拉伸强度;另一方面在缺陷附近存在切应力,因此还要考虑到环氧树脂与复合材料层以及管道与复合材料层间粘结处的切应力,当切应力较大时,会发生层间开裂。

1 计算模型

缺陷处填补材料与管道之间、补强片与钢管壁和粘结材料之间都采用环氧树脂进行粘结,计算中假设三者之间没有相对的位置和滑动。采用有限元软件 ABAQUS 进行计算,在处理材料非线性时,由于管道钢是韧性很好的材料,因而计算中取理想弹塑性非线性材料模型。由于本文只对缺陷附近钢管的应力和应变进行了研究,因此在建立模型时只取 0.5 m 长的管道进行研究。同时由于结构对称性,只取管道的 1/4 进行计算,见图 1,2。

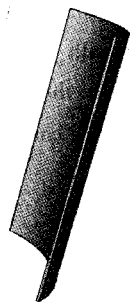


图 1 管道的 1/4 模型

缺陷采用蚀坑形即管道外壁存在凹陷,为方便计算,假设缺陷为方形。在计算中采用 8 结点等参单元 C3D8R。为了避免在有限元建模中由于划分网格而产生的应力集中问题,采用空单元块方法来定

义缺陷的大小,即在完整的管道模型上首先划分出网格,然后通过修改程序文件将管道外表面一定面积和深度范围内的单元定义为空单元,见图 3。

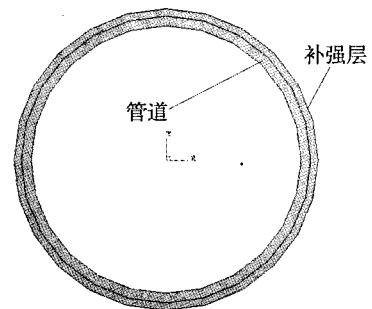


图 2 补强模型

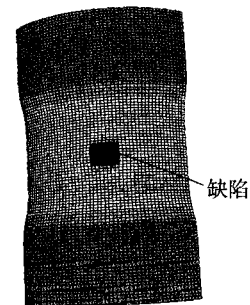


图 3 缺陷示意

缺陷的面积分为 4 种:225, 625, 1225 和 2500 mm^2 。缺陷的深度按照管厚取 1/5, 1/4, 3/8 和 1/2 壁厚。

2 有限元计算及结果

2.1 材料参数

管道材料为输气专用 X 型钢,弹性模量为 250 GPa,泊松比为 0.25,采用理想弹塑性材料模型。不同型号钢材的屈服强度见表 1。

表 1 X 钢的屈服强度

钢级	X46	X52	X56	X60	X65
σ_s (MPa)	375	410	440	460	480

由于补强层数不可为小数,所以模拟计算的结果一律取整数;补强层为碳纤维/环氧树脂复合材料,每层厚度为 0.5 mm,参数见表 2。

2.2 无缺陷管道超压补强

本文的计算前提是假设管道在极限压强输气情况下存在缺陷的补强,因此首先要确定不同型号和钢号的极限压强。图 4,5 所示分别为不同管径、壁

厚和型号钢的极限压强。

表 2 复合材料的力学参数

参数	E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	ν_{12}	G_{12} (GPa)	X_t (MPa)	X_c (MPa)
碳纤维/环氧	76.8	5.52	0.25	4.5	1230	1051
环氧树脂	3	—	0.3	—	15	—

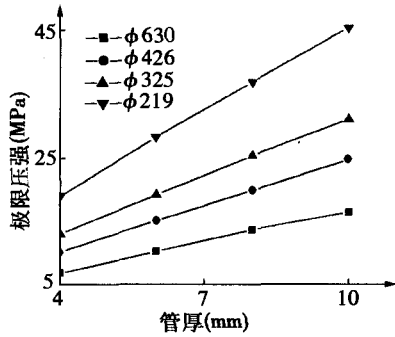


图 4 X65 钢管壁厚与极限压强

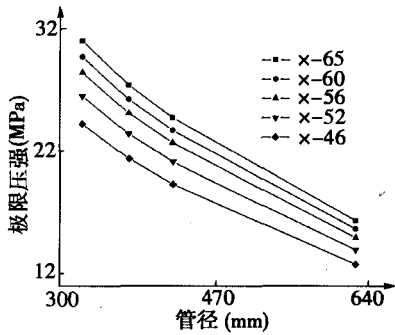


图 5 管道厚度为 10 mm 时管径与极限压强

为了使计算结果具有可靠性和可比性,先假设无缺陷管道在超过极限输气压强 20% 下输气,计算正常工作时所需的最小复合材料补强的层数。此情况类似于管道的外层被全部腐蚀,也对应于某缺陷深度的极限补强值(见图 6)。

从图 6 可见,随着管道厚度的增加补强层数明显增加,且成正比关系,对于不同管径补强层数的变化有相同的规律。

2.3 存在缺陷管道超压补强

对多种型号的钢以及不同的管道直径分别进行计算。在无缺陷管道的极限气压下,把管道缺陷处的应力控制在屈服以内,同时复合材料层内的周向应力也必须小于纤维的强度,层间剪切应力小于层间材料的强度,满足上述条件的最小补强层数就是所需结果。其步骤为:首先满足缺陷处的应力小于

屈服极限,然后考察补强层上的周向应力和切应力。

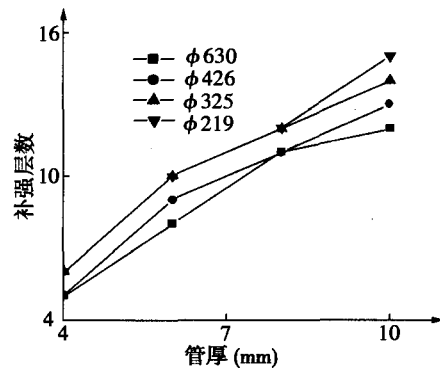


图 6 X65 钢管不同厚度时在 120% 极限压强下的补强层数

以管径 325 mm、壁厚 10 mm 为例,在管线的压强为极限压强 31 MPa 时,计算不同缺陷深度 h 和面积 S 下所需的补强层数。表 3 列出了有限元计算结果。

表 3 不同缺陷下的补强层数

缺陷面积 S (mm ²)	225	625	1225	2500
$h = 1.25$ mm	1	2	4	8
$h = 2.50$ mm	1	4	7	12
$h = 3.75$ mm	2	6	9	16
$h = 5.00$ mm	4	8	12	19

图 7,8 所示为补强层数与缺陷尺寸的变化图。从图中可见,随着缺陷深度增加,补强厚度明显变大,但并不成正比关系,而是有递增的趋势;且随着缺陷面积增加,补强厚度变大,有递减的趋势,逐渐平坦并存在最大值,显然最大值对应管道外圈完全被腐蚀、管壁变薄时的补强。因此,深度对补强层数的影响大于面积的影响。

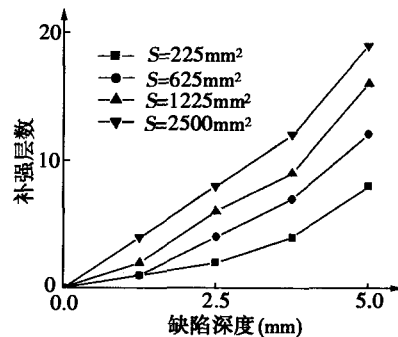


图 7 管道补强层数与缺陷深度

在补强试验过程中,如果在一定补强层数下仍然发生了管道的塑性变形或失效,说明层数不够,需要更多的补强层来分担,同时也说明,越内层所承受

的压力越大。因此为了考查补强层数是否足够,只需要确保最内层的最大应力值。

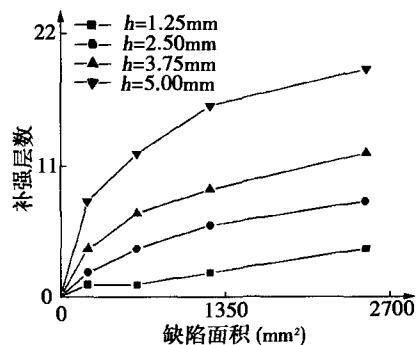


图 8 管道补强层数与缺陷面积

图 9,10 所示为模拟补强后管道变形图的应力云图以及补强层在周向的应力分布图。



图 9 管道的 Mises 应力云图

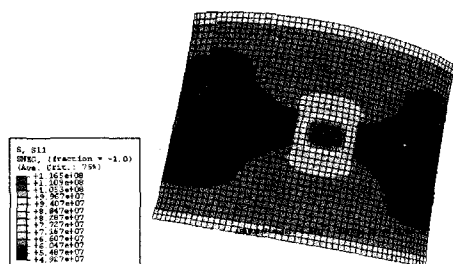


图 10 复合材料层的周向应力图

图 9,10 的应力图表明:有补强层的管道的变形明显小于未补强段,复合材料补强层的周向应力在存在缺陷位置的值有明显的突变,这证明补强层分担了作用在缺陷处的压强。

不同型号缺陷管道补强后最内层补强层的最大周向应力见图 11。

从图 11 中可知,复合材料层上周向最大应力远小于其纵向拉伸强度 X_t ,说明上面的结果是安全可靠的。实际上,由于补强层所能承受的应变远大于钢材的弹性应变,因此一般来说,不管如何补强,失

效只可能发生在管道缺陷处而不会在复合材料补强层。

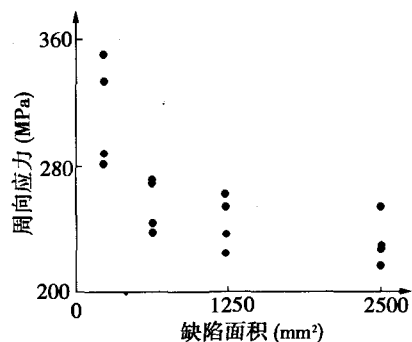


图 11 补强层上的最大周向应力

针对不同的管道型号,可用相同的方法来得到类似的补强图和相似的结论。

3 结论

(1)用有限元对管道缺陷的计算是可行的,其计算结果与试验测试吻合较好;

(2)无缺陷时的超压补强随管径变大而增加,与管道厚度成正比;

(3)随着缺陷深度增加,补强厚度明显变大,而且有递增的趋势;随着缺陷面积增加,补强厚度变大,且有递减的趋势;深度对补强层数的影响大于面积的影响。

参考文献:

- [1] 李焯英,吴锋.国外旧管道不停输外修复技术[J].油气储运,2000,19(3):53-57.
- [2] 张建护,唐德渝,张田利,等.管道自动焊常见缺陷产生原因及防治措施[J].石油工程建设,2005,31(3):44-47.
- [3] 董事尔,何东升,张鹏,等.双点腐蚀管道的弹塑性有限元分析[J].机械,2005,32(9):20-22.
- [4] 王志亮,薛小龙,桑芝富.弯矩作用下补强圈对带压开孔管道强度性能影响的试验研究[J].压力容器,2005,22(11):9-13,55.

收稿日期:2007-06-11 修稿日期:2007-08-24

作者简介:王勇军(1981-),男,从事材料及结构的可靠性研究,通讯地址:成都市武侯祠大街89号中国航空研究院611所,邮编:610041。