

使用时管状纺织复合材料的开裂和爆破现象, 导致工程的失败^[5]。本文中采用材料力学与工程流体力学相关理论, 较系统地建立了适用于管道修复的管状纺织复合材料的强度计算方法, 为管状纺织复合材料的强度设计奠定了较好的理论基础, 从而指导管状纺织复合材料选材、制作、复合工艺等的设计与研究。

1 管状纺织复合材料强度设计的基本理论

假设管道内压为 P , 管壁厚度为 t , 管道的内径为 D , 如图 1(a) 所示。截取管壁上的单元体 k 进行受力分析, 因管壁的径向应力较小, 故略去不计^[6], 仅考虑内压引起的轴向应力 σ_x 和环向应力 σ_y , 其中轴向应力是指沿管状织物经向的应力, 环向应力是指沿管状织物纬向的应力。经向应力和纬向应力如图 1(b) 所示。

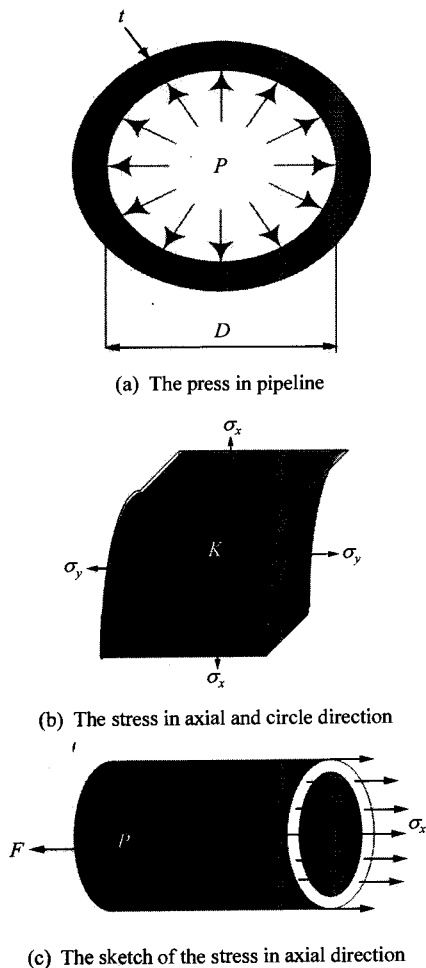


图 1 管道内压引起的经向应力

Fig. 1 Stress in the axial direction caused by the press in pipeline

用截面法, 假想地将管道沿横向分为两部分, 保留左边为自由体, 横截面上作用经向应力 σ_x , 如图 1(c)。由力与压强的关系, 则管道底部受到的作用力 $F = P \frac{\pi(D+2t)^2}{4}$, 由静力学平衡方程 $\sum F_x = 0$, 即在 x 轴方向静力的矢量和为零, 得

$$\sigma_x \pi(D+2t)t - P \frac{\pi(D+2t)^2}{4} = 0 \quad (1)$$

解得管道内压引起管状纺织复合材料的经向应力为

$$\sigma_x = \frac{P(D+2t)}{4t} \quad (2)$$

用截面法, 假想用相距单位长度“1”的两横截面与一个纵面从管道中截取一部分为自由体, 如图 2(a) 所示, 则两个横截面所受的应力 σ_y 与一个纵面所受应力如图 2(b) 所示。

由静力学平衡方程 $\sum F_y = 0$, 即在 y 轴方向静力的矢量和为零, 得

$$2\sigma_y \cdot t \cdot 1 - \int_0^\pi P \cdot \frac{(D+2t)}{2} d\theta \cdot \sin\theta \cdot 1 = 0 \quad (3)$$

解得管道内压引起管状纺织复合材料的纬向应力为

$$\sigma_y = \frac{P(D+2t)}{2t} \quad (4)$$

其中, θ 为管道截面上由原点为起始点的旋转角。

由管道的经向应力和纬向应力的表达式(2)及表达式(4)可见, 径向(即垂直于管壁方向)应力 $\sigma_z \approx P$, 远小于式(2)和式(4)所得的应力, 故可略而不计。因此管道受内压可视为二向应力状态的典型实例。

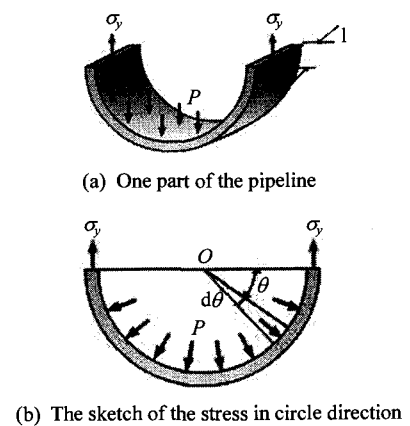


图 2 管道内压引起的纬向应力

Fig. 2 Stress in the circle direction caused by the press in pipeline

经向、纬向应力的要求是管状纺织复合材料设计的主要依据, 管状纺织复合材料的经纬向极限强

度必须超过上述应力要求才能安全使用。从式(2)与式(4)可以看出,管状纺织复合材料受内压后,纬向应力是经向应力的2倍,说明材料的破坏容易出现在纬向,因此在设计管状纺织复合材料时,这一点必须特别注意。

2 管状纺织复合材料强度的计算方法

2.1 管状纺织复合材料的受力因素

2.1.1 翻衬压力

翻衬修复工艺可以采用水压法,也可以采用气压法。水压法是利用水的静压使管状纺织复合材料翻转,同时依靠水的静压使内衬管的“翻转头”在管道内移动推进,从而实现内衬管的无摩擦就位。气压法翻转则是利用空气压力来实现内衬管的翻转及就位。由于水压法技术简单、容易操作,国内的修复工艺技术多采用该方法,但水压法存在压力不易调节、浪费水资源、内衬管受力不均匀等诸多弊端;而气压法在内衬质量控制和施工成本上均具有非常大的优势,国内一些技术人员也正积极致力于气压法工艺设备的研究^[7]。不管采用水压法还是气压法进行翻衬修复,管状纺织复合材料都是在一定压力下翻转衬于管道内的,在这个过程中管状纺织复合材料受到两方面的力:(1)受到使其紧贴于管壁的内压 P_i ;(2)推动其“翻转头”向前移动的压力 P_j 。

2.1.2 输送介质产生的内压

管状纺织复合材料衬于管道后与原管道形成新管道,验收合格开始投入使用,管道在输送介质的过程中产生的压力有两种:(1)正常工作所产生的工作压力;(2)因突然关闭阀门或突然停泵引起管道水压或气压急剧升高而产生的水锤压力或气锤压力。水锤压力或气锤压力是瞬时的,但其压力值有时远超过工作压力^[6]。

(1)工作压力:指管道内的气压或液体压力,其方向与管壁垂直。如果管道输送的介质是气体,工作压力是指输送的气体压力。如果管道输送的介质是液体,工作压力由两部分组成:一部分为管道的输送压力;另一部分为管道内的液体静压,即

$$P_g = P_s + \rho_l r_i (1 - \cos\beta) \quad (5)$$

其中: P_g —工作压力(MPa); P_s —管道的输送压力(MPa); ρ_l —输送液体的密度(kg/m^3); r_i —管内半径(mm); β —管截面上由顶端为起始点的旋转角($^\circ$)。

管道的输送压力按管道系统可能出现的最大输送压力确定。当管道为输热管或输气管时, $\rho_l = 0$,则工作压力只是管道的输送压力。工作压力在截面上的分布如图3所示。

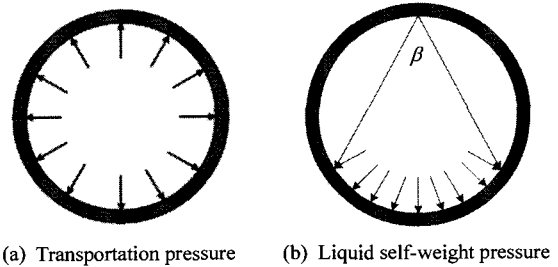


图3 输送介质产生的内压

Fig. 3 The stress caused by medium press

(2)水锤或气锤压力:它是因管道运行时突然停泵或关闭阀门引起管道水压或气压急剧升高而产生的压力。一般情况是当水锤或气锤压力超过实验时的爆破压力($P_{sh} = 1.25P_s$)时,常采用缓慢关闭阀门或设置水锤或气锤消除器等措施消除水锤或气锤压力,而不是采用加大内压力进行管道设计,因为这样更经济。

2.2 管状纺织内衬材料与管状纺织复合材料应力的计算方法

2.2.1 管道内压引起的纬向与经向应力

管道内压包括翻转时产生的内压 P_i 和运行时输送介质产生的内压 P_s ,在设计管状纺织内衬材料的纬向与经向应力时,设计值应大于等于计算值。若 $P_i > P_s$,内压取 P_i 来计算管状纺织内衬材料纬向与经向应力;若 $P_i < P_s$,内压取 $P_{sh} = 1.25P_s$ 来计算管状纺织复合材料纬向与经向应力。由图1分析可知,管道内压引起管状纺织复合材料的纬向应力为

$$\sigma_y = \frac{P(D+2H)}{2H} \quad (6)$$

式中: σ_y —管状纺织复合材料的纬向应力(MPa); P —管道内压(MPa); D —管道内径(mm); H —管状纺织复合材料厚度(mm)。

管道内压引起管状纺织复合材料的经向应力

$$\sigma_x = \frac{P(D+2H)}{4H} \quad (7)$$

其中, σ_x 为管状纺织复合材料的经向应力(MPa)。

2.2.2 翻转压力引起的经向应力

如图4(a)为翻衬过程中的示意图,把管状内衬材料的一端反翻固定,采用气压法进行翻衬,推动

管状纺织内衬材料的“翻转头”向前移动的压力引起管状纺织复合材料经向的应力。采用弯管中介质对管壁的作用力来计算,此时可假设管道存在 90°的弯头,这样作用在“翻转头”上的力可视为作用在弯管处管壁上的力,如图 4(b)所示。

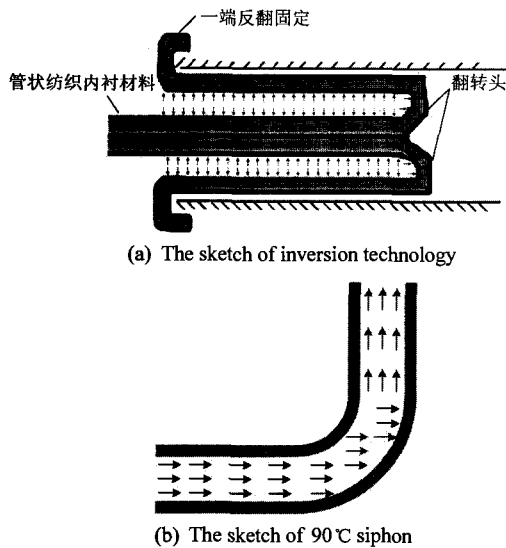


图 4 翻衬工艺示意图

Fig. 4 Stress in the axial direction caused by the inversion press

由工程热力学可知,理想气体的状态方程式为^[8]

$$P = \rho RT \quad (8)$$

式中: P —管道内压强(MPa); ρ —气体密度(kg/m^3); R —气体常数,对空气 $R = 287.06 \text{ J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$; T —绝对温度(K)。

上式(8)表明理想气体在任一平衡状态时,在压强 P 、密度 ρ 和温度 T 三者之间的变化关系,当已知其中任意两个参数时,便可求出第三个参数。

实际气体的状态方程为

$$P = Z\rho RT \quad (9)$$

由此推得

$$\rho = \frac{P}{ZRT} \quad (10)$$

其中, Z 为实际气体的压缩系数。

根据牛顿第二定律或理论力学中的动量定理,物体所受合力的冲量等于动量的变化^[9]。因此得下式:

$$\beta_2 \rho q_{v2} v_2 - \beta_1 \rho q_{v1} v_1 = \sum F \quad (11)$$

式中: F —作用在“翻转头”上的力(N); β_2 、 β_1 —动能修正系数,工业管道内的介质流动, β_2 、 $\beta_1 = 1.01$

~ 1.10 ,在流动计算问题中,一般近似地取 β_2 、 $\beta_1 = 1$; q_{v2} 、 q_{v1} —介质的体积流量(m^3/s); v_2 、 v_1 —介质的平均流动速度(m/s)。

采用式(11)计算作用在管状纺织复合材料“翻转头”上的力,可假设气体由速度 v_1 变为 $v_2 = 0$,因此翻转压力作用在管状纺织复合材料“翻转头”上的力为

$$F + P \frac{\pi}{4} D^2 = -\beta_1 \rho q_{v1} v_1 \quad (12)$$

由作用力与反作用力原理,翻转压力作用在管状纺织复合材料经向的应力为

$$F = \beta_1 \rho q_{v1} v_1 + P \frac{\pi}{4} D^2 \quad (13)$$

将式(10)代入上式(13)得到与翻转压力、翻转速度、温度等参数有关的管状纺织复合材料经向的应力计算公式:

$$\sigma_j = \frac{\beta_1 P_f q_{v1} v_1 / ZRT + P(\pi/4) D^2}{S} \quad (14)$$

式中, S 为管道的截面积(m^2)。

3 管状纺织复合材料强度的计算实例

以修复燃气管道为例,一般施工时,翻衬压力为 0.05~0.08 MPa,而低压燃气管道的压力范围为 $P_w \leq 0.05 \text{ MPa}$,中压燃气管道的压力范围为 $0.2 \text{ MPa} \leq P_w \leq 0.4 \text{ MPa}$,高压燃气管道的压力范围为 $0.8 \text{ MPa} \leq P_w \leq 1 \text{ MPa}$,因此翻衬压力大于低压的压力极限值而小于中压和高压燃气管道的压力极限值^[10]。这样在修复低压燃气管道时,管状纺织内衬材料由管道内压引起的纬向与经向应力可采用式(6)、式(7)计算,管道内压取翻衬压力为 0.08 MPa。当修复中压、高压燃气管道时,中压、高压燃气管道的压力极限值大于翻衬压力,因此这里管道内压要取高压管道压力最大值的 1.25 倍来计算管状纺织复合材料的应力,因为管状纺织复合材料不仅能够承受中压、高压,还要能够承受其破裂试验的压力。因此采用式(6)、式(7)计算管状纺织复合材料的纬向、经向应力时,管道内压分别取 0.5 MPa 和 1.25 MPa。计算结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,管道内的压力越大,需要的管状纺织复合材料纬向与经向的强度越高。对管状纺织复合材料纬向拉伸强度的要求可参照表 1 来设计。

翻衬时管状纺织内衬材料经向受力可按照式

(14)计算。假设动能修正系数 $\beta_1 = 1.05$, 翻衬压力 $P_f = 0.05 \text{ MPa}$, 翻衬速度为 0.05 m/s , 即 $v_1 = 0.05 \text{ m/s}$, 可计算得介质的体积流量 $q_{v1} = 0.039 \text{ m}^3/\text{s}$; 压缩系数 Z 取 1, 气体常数 $R = 287.06 \text{ J/kg}\cdot\text{C}$, 温度取常温 25 C , 计算得管状纺织复合材料的截面积 $S = 1.57 \text{ m}^2$ 。把以上的参数代入式(14)计算得管状纺织内衬材料在翻转时由于“翻转头”受力作用在其经向的应力为 0.05 MPa 。因此所设计的管状纺织复合材料经向极限强度值应大于 $0.05 \text{ MPa} + \sigma_x$ (表 1 中由内压引起的经向应力)。

表 1 管状纺织复合材料强度计算举例
Table 1 Examples of the stress calculation of the tubular textile composite

	Thickness of composite/mm	Stress in the circle direction /MPa	Stress in the axial direction /MPa
Lower press	4.87	4.19	2.09
Medium press	3.61	5.62	2.81
Higher press	2.39	52.80	26.40
	2.20	57.32	28.66
	1.81	173.90	86.95
	1.73	181.88	90.94

4 结 论

(1) 管状纺织复合材料受内压后, 纬向应力是经向应力的 2 倍, 说明材料的破坏容易出现在纬向, 因此在设计管状纺织复合材料的强度时, 这一点应特别注意。

(2) 通过计算 90° 弯管中介质对管壁的作用力, 得到与翻转压力、翻转速度、温度等参数有关的管状纺织复合材料经向应力的计算公式。因此要根据翻衬工艺灵活设计管状纺织复合材料的强度。

参考文献:

- [1] 张 平, 桂良进, 范子杰. 编织复合材料圆管准静态轴向压缩吸能特性的试验研究 [J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 146-150.
Zhang Ping, Gui LiangJin, Fan Zijie. Experimental investigation on the energy absorption characteristic of braided composite circular tubes subjected to quasi-static axial compression [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 146-150.
- [2] ASTM 1216-03. Standard practice for rehabilitation of existing pipelines and conduits by the inversion and curing of a resin-impregnated tube [S]. West Conshohocken, United States: ASTM International, 2003.
- [3] ASTM F2207-02. Standard specification for cured-in-place pipe lining system for rehabilitation of metallic gas pipe [S]. West Conshohocken, United States: ASTM International, 2002.
- [4] ASTM F1743-03. Standard practice for rehabilitation of existing pipelines and conduits by pulled in-place installation of cured-in-place thermosetting resin pipe (CIPP) [S]. West Conshohocken, United States: ASTM International, 2003.
- [5] Zhang Shujie, Wang Rui. Research on tubing textile composite applied on pipeline rehabilitation technology [C] // International Forum on Textile Science & Engineering for Doctoral Candidates. Shanghai: Donghua University, 2006: 161.
- [6] 刘雄亚, 晏石林. 复合材料制品设计及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 34-36.
- [7] 米 淇, 刘殿博. 采用翻转内衬技术修复管道 [J]. 油气储运, 2000, 49(1): 58-59.
Mi Qi, Liu Dianbo. Repairing pipeline adopting inversion lining technology [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2000, 49(1): 58-59.
- [8] 袁恩熙. 工程流体力学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1986: 35-40.
- [9] 赵孝宝. 工程流体力学 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2004: 64-69.
- [10] 董久樟. 翻转内衬法修复我国燃气旧管道技术的应用研究 [D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2001: 47.