第 12 卷 第 1 期 复 合 材 料 学 报 Vol. 12 No. 1
1995 年 2 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Feb. 1995

纤维缠绕玻璃钢管道的渗漏判据

黄龙男 刘锡礼
(哈尔滨建筑大学,哈尔滨 150006)

摘 要 本文通过对无矩层合板细观应变的有限元分析,求得层合板的最大应变集中系数。利用细观力学分析结果,建立了无矩层合板的树脂开裂宏观力学判据。利用该判据建立了管道的渗漏判据。并分析了纤维含量、温差、管径对渗漏压力的影响情况。

关键词 应变集中系数,渗漏判据,最佳纤维含量

1 引 言

玻璃钢管道具有轻质高强、耐腐蚀等许多优异的性能。然而,玻璃钢管在使用过程中,在远低于破坏压力时,常常出现树脂的早期开裂,导致管道渗漏。如果能够定量地分析出树脂开裂机理,并对其影响因素采取相应的措施,以最佳材料匹配,达到最好的防渗效果,必将有利于玻璃钢管道的进一步推广应用。

文献[1]对纤维六角形排列和正方形排列两种模型的典型元进行了切片分析。分析结果表明,纤维间的树脂中发生应变集中,并推导出横向应变集中系数的理论计算式。该方法中,对切片进行分析时,假定单向板和典型元中的每一个切片在 T-n 平面内,均处于平面应力状态。因而忽略了由于纤维方向的细观应力引起的纵向变形对横向应力、应变的影响。并且假定切片内的纤维区基体区内的应力是均布的。实际上,单向板和典型元中纤维方向的细观应力一般是存在的,而且纤维和基体截面内不同位置处的应力也是不同的。为了消除切片法这些假设引起的误差,得到更精确的结果,本文运用有限元法对三维应力状态下的典型元,进行细观应变分析。因为有限单元可以划分得充分小,所以分析结果将更接近于实际分布情况,由此可以得到更精确的横向应变集中系数及危险点的位置。

采用有限元分析结果,建立了层合板的树脂开裂判据。该判据应用于管道中,建立了管道的渗漏判据。众所周知,增加纤维含量对提高管道的强度是有利的,但同时由于应变集中程度越来越严重,树脂早期开裂的可能性也加大,这对提高渗漏强度不利。那么对管道,从渗漏角度而言,是否存在最佳纤维含量?本文对特定管道进行了计算,相信其结果对管道的设计和制造者有一定的参考价值。

2 无矩层合板的树脂开裂判据

纤维增强复合材料中,由于纤维和树脂的力学性能相差很大,因此层合板受力时,板内发

本文于 1994 年 6 月 5 日收到修改稿,1993 年 5 月 18 日收到初稿

生应力(或应变)集中现象。因这种现象是由组成复合材料的各相之性能差异造成的,所以对它的分析必须从细观力学分析入手。

以单向板为研究对象,对纤维不同分布情形进行分析。文献[1]分析了两种不同分布情况下的细观应力和细观应变,并得出结论:在纤维含量相同的情况下,正方形排列的细观应力和细观应变的不均匀性大于六角形排列。因此本文只对纤维正方形排列的情形进行分析,其结果应用于实际设计中,将比六角形分布情形偏于安全。如图 1 所示为纤维正方形分布的单向板。根据对称性,可以在 T-n 平面内沿坐标方向画出一系列对称线。其中相邻的两对对称线围成的区域具有典型性。所以在分析时只需考虑如图 2 所示典型元。取相邻纤维中心距之半为单位宽度,即典型宽度。

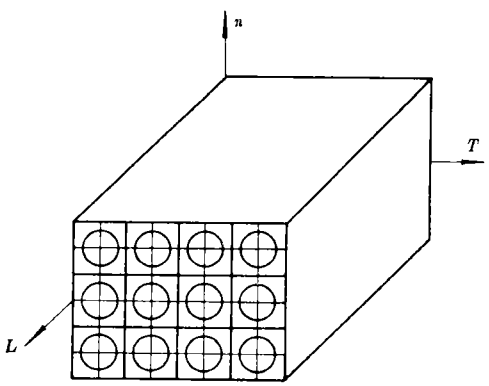

图 1　纤维正方形分布的单向板

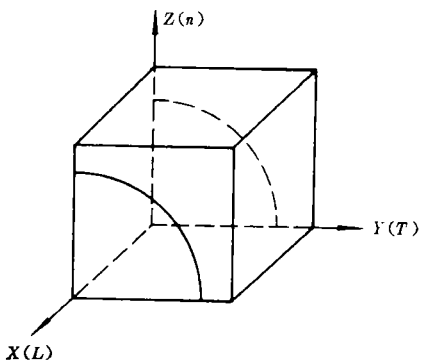

图 2　典型元

由对称性可知,无矩层合板的典型元,变形前为正方体,变形后为长方体。因为典型元沿纤维方向的各截面的纵向应变不随坐标而变,恒为常量,所以典型元处于广义平面应变状态[2]。

广义平面应变问题,虽属三维问题,但由于 $\varepsilon_z \equiv$ 常数,$\gamma_{zx}=\gamma_{yz}=0$,所以其物理关系式可简化为

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} + \{\overline{D}\}\varepsilon_z \tag{1}$$

式中

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}, \quad \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}, \quad \{\overline{D}\} = \frac{E\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$[D] = \frac{E}{2(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 2(1-\gamma) & 2\gamma & 0 \\ 2\gamma & (1-\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\gamma) \end{bmatrix}$$

由(1)式可见,广义平面应变问题的物理方程只需在平面应变问题的物理方程后面加上一个常数列阵 $\{\overline{D}\}\varepsilon_z$ 即可。这样广义平面应变问题仍可采用平面应变问题的有限元分析方法,只需在平衡方程后加一个常数阵列,即

$$\{F\} = [K]\{\delta^*\} + \{H\}\varepsilon_z \tag{2}$$

式中，$\{F\}$为节点荷载列阵；$\{\delta^e\}$为节点位移列阵；$[K]$为平面应变问题的刚度矩阵；$\{H\}$为广义平面应变问题所特有的项，它是由材料的弹性常数组成的常数列阵。

根据对称性及应变状态，可以写出典型元的位移边界条件

$$\begin{aligned} u &= 0 & X &= 0 \\ v &= 0 & Y &= 0 \\ u &= \varepsilon_T & X &= 1 \\ v &= -(\nu_{LT}+\nu_{TL})\varepsilon_L & Y &= 1 \end{aligned} \tag{3}$$

式中的ν_{LT}、ν_{TL}可由混合律求得；ε_T、ε_L可通过宏观计算求得。

将典型元在X-Y平面内划分有限单元。考虑到纤维与树脂的弹性模量相差很大，纤维和树脂过渡处应力梯度也会很大。为了比较准确地反映实际应力分布情况，划分单元时在纤维和树脂的界面附近单元划分得比较密。另外根据文献[1]计算结果表明，0°切片的树脂区应变集中程度最严重，为了求得较精确的最大应变集中系数，该区域的单元也划分得较密(如图3)。

根据上述分析，可以编制程序进行有限元计算。若定义：最大细观横向应变与宏观横向应变的比为最大横向应变集中系数，并用K_{mT}表示，则经有限元计算绘出的最大应变集中系数随纤维体积含量变化曲线如图4。由图可见，在材料一定的情况下，应变集中系数随纤维含量的增加而增大，且随着纤维含量的增加，其增长速率越来越快。由此可知，玻璃钢制品中控制纤维含量的必要性。而在相同纤维含量下，应变集中系数取决于纤维和树脂的弹性模量之比。

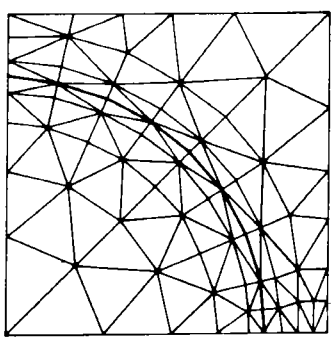

图3 单元划分图

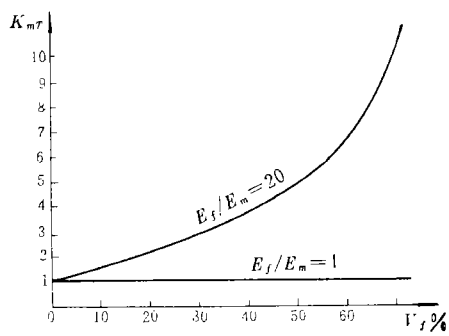

图4 应变集中系数随纤维体积含量变化曲线

若树脂的断裂延伸率为$\bar{\varepsilon}_m$，利用最大强度理论，当树脂中发生的最大应变ε_{max}满足

$$\varepsilon_{max} \leqslant \bar{\varepsilon}_m \tag{4}$$

时树脂不会开裂。若宏观横向应变为ε_T，则根据最大应变集中系数的定义知

$$\varepsilon_{max} = K_{mT}\varepsilon_T$$

将上式代入(4)式得到树脂开裂细观力学判据

$$K_{mT}\varepsilon_T = \bar{\varepsilon}_m \tag{5}$$

利用K_{mT}可以将树脂开裂细观力学判据转化为宏观力学判据。

令 $$\bar{\varepsilon}_T = \frac{\bar{\varepsilon}_m}{K_{mT}} \tag{6}$$

$\bar{\varepsilon}_T$为单向板横向应变宏观限定值。将(6)式代入(5)式，得无矩层合板的树脂开裂宏观力学判

据

$$\varepsilon_i < \bar{\varepsilon}_i \tag{7}$$

讨论 1　式(7)建立了无矩层合板的树脂开裂宏观力学判据，该判据的宏观应变限定值是由细观力学分析结果确定的。由于利用了细观力学分析方法，该判据也为产品设计时选择基体和增强材料及纤维含量的确定等提供了定量分析的依据。

讨论 2　该判据从细观角度解释了层合板中树脂开裂机理。即当层合板受载荷作用时，由于其非均质性，树脂中发生应变集中，造成局部树脂的应变首先达到极限应变值而开裂。这种开裂是从应变集中系数最大的位置处开始发生。细观计算结果表明，发生最大应变的细观位置在纤维和纤维中心连线的中点处。

讨论 3　该判据为建立玻璃钢制品的渗漏判据，提供了理论依据。

3　管道的渗漏判据

工程上常见的管道，按其内压形式可分为轴对称管道和非轴对称管道。本文只对轴对称内压情形进行分析。

3.1　轴对称内压管道的渗漏判据

采用如图 5 所示简图计算轴对称内压引起的内力。约定端部不限制周向位移，而纵向不可移动。

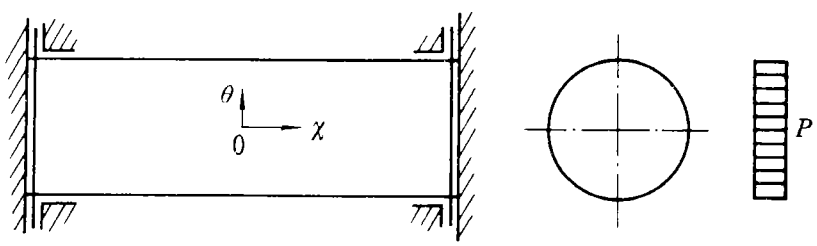

图 5　轴对称内压管道计算简图

因为主坐标系 x、θ 也是弹性主轴，且受轴对称荷载，所以管壁的热弹性方程为[3]

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_\theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{12} & A_{22} \end{bmatrix} \left[\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_\theta \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_\theta \end{Bmatrix} \right] \Delta T \tag{8}$$

考虑到约束条件 $\varepsilon_x = 0$，且 $N_\theta = RP$，可以解得

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} RP \cdot A_{11}/A_{22} - (A_{11} - A_{12}^2/A_{22})\bar{\alpha}_x \Delta T \\ RP \end{Bmatrix} \tag{9}$$

式中，R 为管道的半径；P 为管道的内压；α_i 为层合板的热膨胀系数，可由单板的纵向和横向膨胀系数求得；ΔT 为管道的工作温度与安装温度之差；A_{ij} 为层合板的刚度系数；N_x、N_θ 为管壁上两个主方向的内力。

管道采用均衡型设计[3]，则应满足均衡型设计条件：

$$\frac{N_\theta}{N_x} = \frac{A_{22} + A_{12}}{A_{11} + A_{12}} \tag{10}$$

其均衡应变为

$$\varepsilon = N_{yy}(A_{22} + A_{12}) \tag{11}$$

将(11)式代入(5)式，并考虑(9)式可得到管壁上的树脂开裂判据

$$P \leqslant \frac{\bar{\varepsilon}_m}{K_{mT}R}(A_{22} + A_{12}) \tag{12}$$

即管道所受的内压力 P 若能满足上式，则树脂就不会发生开裂。又因均衡型层合板的各单层处于相同的应变状态，理论上各单层的树脂同时达到断裂延伸率而同时开裂，并沿壁厚形成裂纹通道而发生管道渗漏。因此，式(12)便是轴对称内压管道的渗漏判据。式(12)的右式为内压限定值，即渗漏内压值，用 P_s 表示则

$$P_s = \bar{\varepsilon}_m(A_{22} + A_{12})/K_{mT}R \tag{13}$$

若以 P_s 为设计内压，则根据式(10)和式(9)可得此时实现均衡型条件为

$$\frac{RP_s}{RP_sA_{12}/A_{22} - (A_{11} - A_{12}^2/A_{22})\bar{\alpha}_x\Delta T} = \frac{A_{22} + A_{12}}{A_{11} + A_{12}} \tag{14}$$

在材料选定，R、ΔT、$\bar{\alpha}_x$ 一定的情况下，联立式(13)和式(14)可求得均衡缠绕角和内压限定值。改变 R 和 ΔT，P_s 也将随之变化。以壁厚一定的环氧玻璃钢管道为例，试算结果如图6、图7。

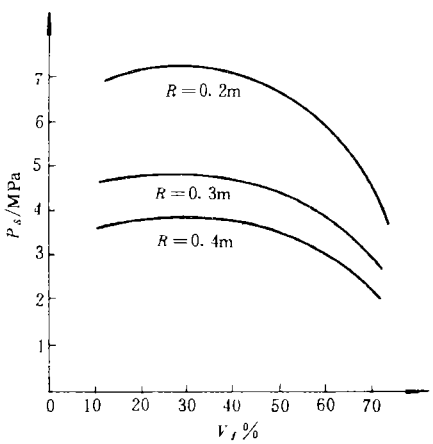

图6 管径对渗漏内压的影响，$\Delta T=-50$℃

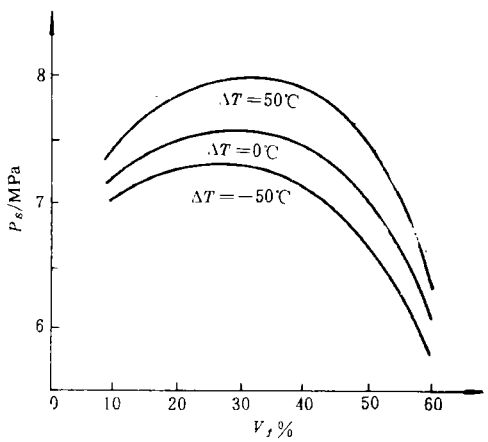

图7 温差对渗漏内压的影响，$R=0.2m$

3.2 结果分析与讨论

(1)由图6、图7可知，在一定范围内提高纤维含量，有利于提高管道的渗漏强度。但当纤维含量超过一定量后，随着纤维含量的增加，管道的渗漏强度急剧下降。由式(13)和图4可知其原因是随着纤维含量的增加，应变集中系数急剧增大造成的。本文是以基体为环氧树脂为例进行计算的。若选用聚酯树脂，因其弹性模量低于环氧树脂，应变集中会更严重。

(2)由图6可知，壁厚一定的情况下，管径越小抗渗能力越强，但渗漏内压的最大值始终对应于同一纤维含量。这说明最佳纤维含量与管径无关。

(3)温差不同，最佳纤维含量也不同。当管道系统的工作温度高于安装温度时，最佳纤维含量较大，渗漏强度也随之提高。

4 结论与建议

综合以上分析结果，得出如下结论与建议：

(1)通过细观力学分析可以建立管道的渗漏判据。利用该判据可以判断内压管道是否渗漏。也可给出管道的内压限定值。

(2)合理地确定纤维含量，对提高管道的渗漏强度具有重要影响。其最佳纤维含量可通过细观力学计算求得。计算结果表明，环氧玻璃钢管道的最佳纤维体积含量为25%～30%之间。也就是说，最佳树脂体积含量在65%～70%。一般缠绕工艺很难达到这么高的树脂含量。因此建议在缠绕成型过程中，一边缠绕一边均匀喷射短切纤维，以达到提高树脂含量的目的。

(3)提高树脂的断裂延伸率和降低纤维和树脂的弹性模量比，有利于提高渗漏强度。这就要求对常规树脂改性，使之具有较高的弹性模量和断裂延伸率。

(4)在壁厚一定的情况下，管径越小对提高渗漏强度越有利。

(5)管道的工作温度高于安装温度有利于提高渗漏强度。因此选择温度较低的季节安装为宜。

参 考 文 献

1 刘锡礼. 均衡型层合板细应力应变分析. 哈尔滨建筑工程学院，1982：(2)：14～16

2 井上达雄. 弹性力学の基础. 日刊工业新闻社，1979：96

3 刘锡礼，王秉权. 复合材料力学基础. 北京：中国建筑工业出版社，1984：122～130

SEEPAGE CRITERION FOR GRP PIPES

Huang Longnan　Liu Xili

(Harbin Architectural University, Harbin 150006, P. R. China)

Abstract The microstrain of balanced laminate is calculated with finite element analysis and the maximum strain-concentration coefficient is obtained from the micromechanical results. The micromechanical criterion for the balanced laminate and the seepage criterion of GRP pipe are built up on the basis of criterion of resin breaking. The influence of fiber fractions, temperature difference and pipe diameters on seepage pressure of GRP pipe are discussed in this paper.

Key words strain-concentration coefficient, seepage criterion, optimum fiber fraction