

110-116

# 复合材料管道结构设计

TE973.1

陈靖华

宋东昱

(西南石油学院,四川南充 637001) (石油大学,北京昌平 102200)

A

**摘 要** 本文选用碳纤维复合材料,运用可靠性理论,灰色系统理论,结合优化方法,考虑了白色、灰色、随机等管道结构设计中可能遇到的影响因素,提出了复合材料输气管道结构设计方法;通过建立灰模型 GM(1,1),导出了设计土壤温度与管道中心埋深之间的关系式;介绍了用灰色关联度优选输气公式的方法

**关键词** 复合材料,输气管道,结构设计

对于油气管道系统,人们总希望投资少,运行安全、平稳、经济、合理。降低输送成本,提高管道系统的可靠性是管道运输建设方面技术进步的一个基本任务;减少管道投资,同时又保证其结构可靠,需采用高强度薄壁管材。

20

碳纤维复合材料是以碳纤维为增强材料,环氧树脂为基体材料复合而成的新型工程材料。碳纤维是目前唯一强度不下降的材料,其最突出的优点是高比强度和高比模量<sup>[1]</sup>。碳纤维复合材料能满足工程上油、气管道对管材高强度、高弹性模量的要求。本文以正交异性碳纤维复合材料的性能参数试验统计值<sup>[2]</sup>为依据,对地下输气管道进行了结构设计。

## 1 数学模型的建立

一个结构优化设计问题可归纳为如下所述的数学问题:

$$\begin{array}{l}
 \text{求} \quad \bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^n \\
 \text{使} \quad V^{\odot}(\bar{x}) \rightarrow \min \\
 \text{满足约束} \quad \left. \begin{array}{l}
 R_j^{\odot}(\bar{x}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \\
 G_j^{\odot}(\bar{x}) \leq 0 \quad j = m + 1, m + 2, \dots, p \\
 H_j^{\odot}(\bar{x}) = 0 \quad j = p + 1, p + 2, \dots, q; q - p < n \\
 x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1, 2, \dots, n
 \end{array} \right\} \quad (1)
 \end{array}$$

式中:“ $\odot$ ”表示该量或该方程包含灰数; $\bar{x}$ 表示优化设计问题的目标函数; $R_j^{\odot}(\bar{x})$ 、 $G_j^{\odot}(\bar{x})$ 、 $H_j^{\odot}(\bar{x})$ 分别表示可靠性指标约束函数、不等式约束函数和等式约束函数; $x_i^L$ 、 $x_i^U$ 分别表示第*i*个设计变量的下、上限值。

该模型考虑了白色、灰色、随机等工程结构优化设计过程中可能遇到的影响因素,称为可

本文于 1994 年 10 月 25 日收到第二次修改稿,1993 年 12 月 31 日收到初稿

靠性灰色优化模型。模型中,若不计信息不完全因素的影响,则为可靠性优化模型;若同时又不计随机因素的影响,则为一般优化模型。下面根据地下输气管道,分别建立这三种模型。

### 1.1 地下输气管道结构优化设计模型

1 设计变量 取管道外径  $D(\text{m})$ 、压缩机站数  $N(\text{座})$ 、管道壁厚  $\delta(\text{m})$ 、管顶覆土厚度  $H(\text{m})$  为设计变量,有:  $\bar{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [D, N, \delta, H]^T \in R^4$  (2)

2 目标函数 以“管道结构和主要设备投资最低、管道系统的年折合费用最少及管内摩阻最小”为优化指标,建立目标函数:

$$v_1 = (\pi D \delta r_p \gamma_p + \frac{N}{L} \gamma_c) / S_{c1} \quad (3)$$

$$v_2 = (EK + \vartheta) / S_{c2} \quad (4)$$

$$v_3 = \frac{\lambda Z T \Delta}{(P_1 + P_2) d^{5/2} C S_{c3}} Q^2 \quad (5)$$

式中:  $\gamma_p$ 、 $\gamma_c$  分别表示管材单价 ( $\text{Y/kg}$ ) 和压缩机站设备投资 ( $\text{Y/座}$ );  $L$  表示管道计算长度 ( $\text{m}$ );  $E$  表示投资效果系数 ( $1/\alpha$ );  $K$  表示基建投资 ( $\text{Y/m}$ );  $\vartheta$  表示年经营费用 ( $\text{Y}/[\text{m} \cdot \alpha]$ );  $r_p$  表示管材密度 ( $\text{kg/m}^3$ );  $\lambda$  表示水力摩阻系数;  $Z$  表示天然气压缩性系数;  $T$  表示天然气的输送温度 ( $\text{K}$ );  $\Delta$  表示天然气的相对密度;  $Q$  表示标准状态下的体积流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $C$  为常数;  $S_{c1}$ 、 $S_{c2}$ 、 $S_{c3}$  分别为对比管线的管道结构及主要设备投资 ( $\text{Y/m}$ )、年折合费用 ( $\text{Y}/[\text{m} \cdot \alpha]$ ) 和管内摩阻 ( $\text{Pa}$ );  $P_1$  为输气管计算段起点或增压站出口压力 ( $\text{Pa}$ );  $P_2$  为输气管计算段终点或增压站入口压力 ( $\text{Pa}$ )。

### 3 约束条件

(1) 管道强度约束:  $G_1(\bar{x}) = S_\theta / [S] - 1 \leq 0$  (6)

式中:  $S_\theta$ 、 $[S]$  分别为管壁环向应力和管材环向容许应力 ( $\text{N/m}^2$ )。按下式计算<sup>[12]</sup>:

$$S_\theta = \frac{Pd}{2\delta} - \frac{6M}{\delta^2} \quad (7)$$

$$M = (0.377q - 0.165q_H - 0.0106q_L) R_0^2 \quad (8)$$

$$q = r_{so} H \quad (9)$$

$$q_H = \frac{K_c}{K_p} q \quad (10)$$

$$q_L = \frac{3f(1+J)}{\pi H^2} \left[ \cos(\tan^{-1} \frac{0.5}{H})^{-5} + \left[ \cos(\tan^{-1} \frac{2.3}{H}) \right]^5 \right] \quad (11)$$

$$[S] = FS_0 \quad (12)$$

$$S_0 = 0.543 \bar{S} \left( \frac{L_0}{\pi D} \right)^{0.1} \quad (13)$$

式中:  $P$  为管内设计压力 ( $\text{Pa}$ );  $d$ 、 $R_0$  分别为管道内径和平均半径 ( $\text{m}$ );  $M$  为由动、静外载荷在管顶处产生的管壁弯矩 ( $\text{N} \cdot \text{m}/\text{m}$ );  $q$ 、 $q_H$ 、 $q_L$  分别为管顶垂直静土压、管侧水平静土压和地面动载荷引起的动土压 ( $\text{N}/\text{m}^2$ );  $r_{so}$  为土壤的容重 ( $\text{N}/\text{m}^3$ );  $K_c$  为管基系数<sup>[3]</sup>,  $K_c = 0.102$ ;  $K_p$  为水平侧压圆心角所确定的常数<sup>[3]</sup>,  $K_p = 0.061$ ;  $f$  为单个车轮的载荷,  $f = 78000 \text{N}$ ;  $J$  为无量纲冲击系数,  $J = 0.766 - 0.436H$ ;  $S_0$  表示长为  $\pi D$  时复合材料的设计强度 ( $\text{N}/\text{m}^2$ );  $L_0$  为试件的标距 ( $\text{m}$ );  $\bar{S}$  表示标距为  $L_0$  试件对应于给定可靠度下的测试强度值 ( $\text{N}/\text{m}^2$ );  $F$  为设计系数, 这

批碳纤维<sup>[2]</sup>试件的拉伸强度值最小 1157MPa、最大 2179MPa,故取  $F=0.53$ 。

(2) 管道纵向稳定约束<sup>[4]</sup>

$$G_2(\bar{x}) = \frac{AS_L}{0.375\rho q_{cr}} \quad (14)$$

式中: $A$ 为管道横截面面积( $m^2$ ); $\rho$ 为管道弹性敷设的曲率半径( $m$ ); $S_L$ 为管壁轴向压应力( $N/m^2$ ); $q_{cr}$ 为管道朝上竖直位移时土的临界支承力( $N/m$ ),按下式计算:

$$S_L = -\mu \frac{Pd}{2\delta} + \alpha E_L(t - t_c) + \frac{E_L D}{2\rho} \quad (15)$$

$$q_{cr} = r_{so}D(h_o - 0.39D) - r_{so}h_o^2 \text{tg}(0.74\varphi) + \frac{0.7h_o q_{sc}}{\cos(0.74\varphi)} \quad (16)$$

式中: $\mu$ 、 $\alpha$ 、 $E_L$ 分别为管材的轴向泊松比<sup>[1]</sup>、热膨胀系数<sup>[2]</sup>( $1/^\circ C$ )和弹性模量<sup>[1]</sup>( $N/m^2$ ),对于碳纤维复合材料,取  $\mu=0.23$ , $\alpha=20 \times 10^{-6}$ , $E_L=3.158 \times 10^9$ ;  $t_c$ 、 $t$ 分别为管道的安装温度和工作温度( $^\circ C$ ); $\varphi$ 、 $q_{sc}$ 分别为土壤的内摩擦角和内聚力( $N/m^2$ ); $h_o$ 为管道中心埋深( $m$ )。

(3) 管道横截面稳定约束<sup>[3]</sup>  $G_3(\bar{x}) = 3q_n/p_{cr} - 1 \leq 0$  (17)

式中: $q_n$ 为总的外压力( $N/m^2$ ),它由管顶土压力 $q$ 、地面动载荷 $q_L$ 和管内可能出现的真空负压 $q_V$ 组成,即  $q_n = q + q_L + q_V$ ;  $p_{cr}$ 为管道丧失径向稳定的临界载荷( $N/m^2$ ),按下式计算<sup>[3]</sup>:

$$p_{cr} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{B_1 \cdot B_2 \cdot E_{so} \cdot E_\theta \left(\frac{\delta}{R_o}\right)^3} \quad (18)$$

$$B_1 = \frac{1 - (R_o/h_o)^2}{(1 + \mu_{so})[1 + (R_o/h_o)^2(1 - 2\mu_{so})]} \quad (19)$$

$$B_2 = (1 - \mu_{so})(1 - 2\mu_{so})/(1 - \mu_{so}) \quad (20)$$

式中: $\mu_{so}$ 、 $E_{so}$ 分别为土的泊松系数和弹性模量( $N/m^2$ ); $E_\theta$ 表示管材的环向弹性模量( $N/m^2$ ),对于碳纤维复合管材,取  $E_\theta = 3.158 \times 10^9$ 。

(4) 管道刚度约束:

$$G_4(\bar{x}) = \frac{\Delta X}{0.05D_o} - 1 \leq 0 \quad (21)$$

式中: $D_o$ 为管道的平均直径( $m$ ); $\Delta X$ 为管环的水平径向变形量( $m$ ),按下式计算<sup>[1]</sup>:

$$\Delta X = \frac{2(1.75q + q_L)K_o R_o^4}{E_\theta I + 0.061E_{so} R_o^3} \quad (22)$$

式中: $I$ 为单位长度管壁的截面惯性矩, $I = \delta^3/12$ 。

(5) 管内流态约束:

$$G_5(\bar{x}) = Re_2/Re - 1 \leq 0 \quad (23)$$

式中: $Re_2$ 为混合摩擦区向粗糙区过渡的临界雷诺数; $Re$ 为雷诺数。

(6) 能量平衡约束:

$$H(\bar{x}) = \frac{NP_c}{L} - \frac{\lambda ZT\Delta}{(P_1 + P_2)d^5 C^c} Q^2 = 0 \quad (24)$$

式中: $P_2$ 为天然气流经增压站获得的能量( $Pa/座$ )。

(7) 边界约束:

$$D^c \leq D \leq D^u \quad (25)$$

$$0 \leq N \leq N^c \quad (26)$$

$$D/110 \leq \delta \leq \delta^u \quad (27)$$

$$\max[D, 0.8] \leq H \leq 4.5D \quad (28)$$

## 1.2 地下输气管道结构可靠性设计模型

将上模型中的管道强度约束改为可靠性系数约束,就变为输气管道结构可靠性设计模型,

即式(6)被取代为下式: 
$$R(\hat{t}) = \frac{[\beta] \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_c^2}}{\mu_c - \mu_c} - 1 \leq 0 \quad (29)$$

式中:  $[\beta]$  为油气管道结构给定的可靠性系数<sup>[4]</sup>,  $[\beta] = K_1 K_H / m$ ,  $K_1$  为管材的安全系数,  $K_H$  为管道的可靠性指标,  $m$  为管段的工作调节系数;  $\mu_c$ 、 $\sigma_c$  分别为管材强度的分布均值和标准差( $\text{N}/\text{m}^2$ ),  $\mu_c = [S]$ ,  $\sigma_c = C_1 \mu_c$ ,  $C_1$  为管材强度的变异系数, 对于碳纤维复合材料, 取<sup>[5]</sup>  $C_1 = 0.1082$ ;  $\mu_c$ 、 $\sigma_c$  分别为管道环向应力的分布均值和标准差( $\text{N}/\text{m}^2$ ), 由下式计算:

$$\mu_c = \frac{Pd}{2\delta} - C_1 \frac{HD_0^2}{\delta^2} + C_2 \frac{(1-J)D_0}{\delta} \quad (30)$$

$$\sigma_c = \sqrt{C_3 \left(\frac{Pd}{2\delta}\right)^2 + C_4 \left(\frac{HD_0^2}{\delta^2}\right)^2 + C_5 \left[\frac{(1+J)D_0}{\delta}\right]^2 + C_6 \left(\frac{HD_0}{\delta}\right)^2} \quad (31)$$

其中,

$$C_1 = \frac{3}{2} (0.377 + 0.166 \frac{K_H}{K_a}) r_c \quad (32)$$

$$C_2 = \frac{3}{2} \cdot 1.06 \cdot 10^{-3} f C_1 \quad (33)$$

式中:  $C_1$  为管线上单位长度的动载荷系数( $1/\text{m}$ ):

$$C_1 = C_1 - 2 \frac{\epsilon'}{q} \quad (34)$$

$$C_1 = 0.02224 \epsilon r_c \quad (35)$$

$$C_3 = 1.4045 \cdot 10^{-12} \epsilon^2 C_1^2 f^2 \quad (36)$$

$$C_4 = 2.5281 \cdot 10^{-12} C_1^2 C_1^2 f^2 \quad (37)$$

式中:  $\epsilon$  为管壁厚度的分布均值偏差( $\text{m}$ ),  $\epsilon \in [0, 10^{-3}]$ ;  $C_P$  为管内设计压力的变异系数<sup>[5]</sup>,  $C_P = 0.06$ ;  $C_I$  为无量纲冲击系数的变异系数<sup>[7]</sup>,  $C_I = 0.3$ 。

### 1.3 地下输气管道结构可靠性灰色优化设计模型

(1) 确定灰数 油气管道结构可靠性系数与管内压力、管径、管材有关, 视管道沿途敷设路段的具体情况而定, 设计中应作为灰数处理, 记  $\otimes(\beta)$ 。

增压站原动机用电动机还是燃气轮机, 站内设备, 基建投资和经营费用都是灰数, 分别记为  $\otimes(\lambda)$ 、 $\otimes(k)$  和  $\otimes(\theta)$ 。

实现管道输气这一功能, 可用新型管材或不同型号的钢材, 管材单价为灰数, 记  $\otimes(\lambda_p)$ 。另外, 管内是否采用内涂层, 是否外加保温层, 防腐绝缘层用什么材料及沿途地质地貌都没有具体确定, 有的需进一步增补信息才明确, 有的则需优化计算才白化; 埋管中心处土温沿埋深变化, 而埋深是设计变量, 所以设计土温应作为灰数处理; 气管道属常温输送, 故输气温度为灰数, 记  $\otimes(T)$ 。这样, 三个目标函数中都含灰数, 记为  $v_1^{\otimes}$ 、 $v_2^{\otimes}$  和  $v_3^{\otimes}$ 。考虑到土温测试数据少, 优化迭代中可能需要预测值, 这里采用 GM(1,1), 找土温与管中心埋深  $h_c$  间的关系式。

(2) 建立 GM(1,1), 找土温表达式<sup>[2]</sup>, 假如有一组土温测试数据, 如表 1, 序列  $t = t^{(0)}(k)$ , 满足: ①  $m[k, k+1] = 1$ , ②  $[k, k+1] \rightarrow \epsilon$ ,  $\epsilon$  是事实上的最小数, ③  $t^{(0)}(k-1) - t^{(0)}(k) \neq 0, \forall k$ 。所以, 可通过建立 GM(1,1), 求解土温预测值  $\hat{t}^{(1)}(h_c)$ 。

经过 IAGO · GM(1,1) · AGO( $t^{(0)}(k)$ ) 运算并用埋深  $h_c$  代替序号  $k$ , 整理得:

$$\hat{t}^{(1)}(h_c) = (t^{(0)}(1) - b/a)(1 - e^{-a})e^{10ac}e^{-10ah_c} \quad (38)$$

式中,  $a$ 、 $b$  为模型 GM(1,1) 的待定参数。

这样, 灰色可靠性系数约束下, 以“最小费用和摩阻”为优化指标的地下输气管道结构灰色

表 1 土壤温度测试值

序号 $k$	1	2	3	4	.....	$N$
深度 $h_0(\text{m})$	$c$	$c+0.1$	$c+0.2$	$c+0.3$	.....	$c+\frac{N-1}{10}$
土温 $t^{(k)}(k)$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$t_1^{\circ}$	$t_2^{\circ}$	$t_3^{\circ}$	$t_4^{\circ}$	.....	$t_N^{\circ}$

优化设计模型可表示如下:

求设计变量  $\vec{x}$

使目标函数  $V^{\circledast}(\vec{x}) = f(v_1^{\circledast}, v_2^{\circledast}, v_3^{\circledast}) \rightarrow \min$

满足约束  $R^{\circledast}(\vec{x}) = \frac{\odot(\beta) \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_s^2}}{\mu_c - \mu_s} - 1 \leq 0$

$$G_1^{\circledast}(\vec{x}) = \frac{A}{0.375 \rho q_{cr}} \left[ \frac{E_1 D}{2 \rho} - \mu \frac{P d}{2 \delta} + \alpha E_1 (t^{(k)}(h_0) - t_c) \right] - 1 \leq 0$$

$$G_2^{\circledast}(\vec{x}) = 3q_0 / p_{cc} - 1 \leq 0$$

$$G_3^{\circledast}(\vec{x}) = \Delta X / 0.05 D_0 - 1 \leq 0$$

$$G_4^{\circledast}(\vec{x}) = Re_2 / Re - 1 \leq 0$$

$$H^{\circledast}(\vec{x}) = \frac{NP_0}{L} - \frac{\lambda Z \odot (T) \Delta}{(P_1 + P_2) d^3 C^2} Q^2 = 0$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U$$

(39)

## 2 模型解法

引入权系数,将求解多目标极小化问题归结为求解与之相关的单目标极小化问题。

在三种模型中,第三个目标函数和等式约束方程都是由同一个输气公式演变来的。现公认的输气公式有四个:威莫斯、潘汉德尔、前苏联早期及近期公式。分别将各公式代入式(5)、(24),求出每个单目标最小值,并由下式计算权系数,

$$W_{ij} = \frac{v_j^{\circledast}}{\sum_{j=1}^3 v_j^{\circledast}} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad j = 1, 2, 3 \quad (40)$$

式中:  $W_{ij}$  为权系数;第一个下标表示所用输气公式,第二个下标表示目标函数。

这里用关联度<sup>[5]</sup>优选权系数及输气公式,

$$\text{主行为序列} \quad W_0 = \left\{ \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 W_{0j} \right\} \quad (41)$$

$$\text{因子序列} \quad W_i = \{W_{ij}\} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad j = 1, 2, 3 \quad (42)$$

$$\text{关联系数} \quad \xi_{01}(j) = \frac{\min_i \min_j |W_0(j) - W_i(j)| + p \max_i \max_j |W_0(j) - W_i(j)|}{|W_0(j) - W_i(j)| + p \max_i \max_j |W_0(j) - W_i(j)|} \quad (43)$$

$$\text{计算关联度} \quad r_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \xi_{01}(j) \quad (44)$$

式中:  $p$  为分辨系数,  $p \in [0, 1]$

把最大关联度所对应的一组权系数及输气公式代入三种数学模型, 将多目标化为一个数值目标。

### 3 实例分析

一条运行中的地下输气管线, 全长 1038km, 弹性敷设,  $\rho=455\text{m}$ , 亚砂土; 设计输量 4 亿 (标) $\text{m}^3/\text{a}$ , 设计压力 5.5MPa; 沿途最低气温  $-4.6\text{C}$ , 沿线月平均最高土壤温度见表 2。现采用碳纤维复合管材, 进行管道结构设计。

表 2 月平均最高温度

深度 $h_0$ (m)	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	...	1.5	...	2.0
土温 $t_{(t)}^{(0)}$ (C)	26.7	26.3	25.9	25.5	25.2	24.8	...	23.1	...	21.4

计算结果

(1) 关联度矩阵:  $\vec{r} = [r_1, r_2, r_3, r_4]^T = [0.3637588, 0.1323635, 0.3577500, 0.1461278]^T$

所以,  $r_1 > r_3 > r_4 > r_2$ 。因此, 选用威莫斯公式及其对应的一组权系数:

$$W_1 = (W_{11}, W_{12}, W_{13}) = (0.2770232, 0.4169956, 0.3059812)$$

(2) 土壤温度:

$$t_{h_0}^{(0)} = 28.67385e^{-0.144915h_0}$$

(3) 模型解列于表 3。

表 3 输气管线设计值

参量 设计方法	$D$ (mm)	$N$ (mm)	$\delta$ (mm)	$H$ (cm)	相对目标函数值 $\hat{\otimes}(r_i)$			可靠性指标	
					1	2	3	$[\beta]$	$[R]$
优化	400	1	2.8	100	0.4666667	0.7336124	0.9164435		
	400	1	3	100	0.5000000	0.7502617	0.9214166	2.0667	0.9803
可靠性	400	1	4	100	0.6666667	0.8335078	0.9467679	2.5833	0.9951
	400	1	4.3	100	0.7166667	0.8584816	0.9545347	3.0910	0.9990
可靠性	400	1	3	115	0.5000000	0.7502617	0.9214166	2.0917	0.9817
灰色优化	400	1	4	118	0.6666667	0.8335078	0.9467679	2.9824	0.9986
常规	400	1	6	80~120	1.0000000	1.0000000	1.0000000		

### 5 结 论

(1) 可靠性灰色优化设计壁厚为 4mm 时, 灰色可靠系数的白化值为 2.9824, 略大于重要管段的可靠性系数<sup>[4]</sup>2.5833, 壁厚同可靠性优化设计值一致; 与普通优化结果比, 虽然目标成本大些, 但优化迭代中考虑了随机因素, 并视土温, 可靠性系数为灰数, 且给出了可靠度。

(2) 与三种优化设计值比较, 常规设计壁厚的储备量过大, 按常用的结构失效概率  $10^{-3}$  设计, 管外径为 400mm 的碳纤维复合材料管道, 壁厚只需 4.3mm。若常规设计的壁厚减少 1mm 全线可节约碳纤维 2329 吨, 碳纤维复合材料按 29.5 万元/吨<sup>[1]</sup>计, 折合人民币约六万八千七百万元。因此, 复合材料油气管道结构可靠性灰色优化设计, 值得推广。

## 参 考 文 献

- 1 郭钟福, 郭玉英. 合成材料手册. 上海: 上海科学技术出版社, 1986. 246~248
- 2 朱颐龄. 复合材料概率结构设计. 复合材料学报, 1986, 3(1): 72~79
- 3 李卓球, 岳红军. 玻璃钢管道与容器. 北京: 科学出版社, 1990. 292~299, 303~304, 342~343
- 4 [苏]阿英宾杰尔 A B, 卡麦尔什捷英 A T. 干线管道强度及稳定性计算. 北京: 石油工业出版社, 1988. 10: 16, 45, 92
- 5 邓聚龙. 灰色系统理论教程. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990. 11: 182~183, 189~192

## STRUCTURAL DESIGN FOR COMPOSITE PIPES

Chen Jinghua

Song Dongyu

(Southwest Petroleum Institute, Nanchong 637001)

(University of Petroleum, Beijing 102200)

**Abstract** In this paper, design methods for the gas pipeline structure of composites are introduced by combining the reliability theory and grey system theory with optimization, and taking account of influences of white, grey and random factors on the oil or gas pipeline design. A relation between soil temperature and the central depth of a buried pipe is deduced from a grey mathematical model GM(1,1). A method for selection of the best from transfer-gas formulas is also introduced in terms of the grey relative ratio.

**Key words** composite, gas pipeline, structural design

-----  
 (上接第 109 页)

有限元法计算其 CAI 值。A. Ferrigo 等人提出了以局部-整体(G-L)原理为基础的数值分析方法,将损伤层板折算为具有切口的层板以此模型分析了含损伤层板的破坏过程。Ishikawa 等人通过 C 超声检测受损层板的损伤特征,提出了一种当量扇形模型,成功地分析了圆形层板的 CAI 值,同时还分别采用 NASA 和 SACMA 实验标准研究了碳纤维增强热塑性树脂(PEEK)和热固性树脂(Epoxy)在低能量冲击下的损伤特性。

### 3.3 高能量冲击下具有穿透损伤复合材料和结构的损伤特征(9)

本专题共有九篇论文分别讨论了新材料和常用纤维增强树脂复合材料在高速冲击下穿透损伤的破坏特征,并提出了用于数值模拟分析的工程模型。

A. P. Monrity 研究了在水下爆裂荷载作用下 GL/EP 编织复合材料弯曲冲击响应特征,通过分析指出,由于 GL/EP 复合材料沿其厚度方向采用 Kevlar 纤维编织,将使层板产生损伤,从而导致该层板面内静强度降低,但是编织工艺将明显地提高层板抗高速冲击性能。F. F. Knight 等人研究了在热/湿和冷/湿环境下以尼龙为外层,高密度聚乙烯为衬里,制成的复合材料头盔的抗高速冲击的能力,指出热/湿和冷/湿环境不会降低该头盔抗冲击能力,但是在以上两种环境下,头盔受高速冲击的破坏形式与常温下有明显的差别。M. R. Vigte 等人研究了具有陶瓷涂层的层合复合材料的高速冲击下的响应,通过贯穿试验,讨论了陶瓷涂层厚度与结构抗贯穿能力间的联系。N. L. Reper 等人提出了一种以非稳态穿透理论为基础的一维独体(Exoding Body)模型和刚体模型,分别研究了两相材料在外来物高速冲击下贯穿破坏的全过程。通过理论分析与实验比较,证明此模型可进一步推广应用于轴对称体的贯穿分析。S. Howlet 和 L. Greaver 对 GL/EP 复合材料分别进行静力压痕试验与高速贯穿试验,比较两种试验的材料损坏扩展特征,给出以拟静力法为基础的贯穿分析的等价模型。

### 4. 无损试验与评估(1/23) 略

(下转第 123 页)