

设计计算

# 组合压力容器的优化设计

姚安林

罗洪泉

西南石油学院

四川石油局南充炼油厂

(四川省南充市)

**提 要** 依据参考文献〔1〕导出的纤维增强压力容器的内力计算公式,建立了优化设计的数学模型,采用复合形法求得最优解。分析结果表明,在相同的内压和容积条件下,组合压力容器的材料费比单纯钢制容器低,组合压力容器的重量显著减轻。

**主题词** \*组合 \*压力容器 \*〔优化设计〕 纤维 〔增强〕

## 1 概 述

树脂基复合材料以其轻质、高强和耐腐蚀的主要特性不仅在航空、航天等高新技术产业中发挥了重要作用,而且目前已发展成为最有希望替代钢铁材料的一种新型工程材料,在机械、电器和石油化工等工业领域中得到越来越广泛的应用。用纤维复合材料增强压力容器,既可节省大量优质钢材,又可使压力容器在十分恶劣的使用环境中延长使用期限,这对提高石油化工生产的经济效益无疑是意义深远的。文献〔1〕研究了纤维增强压力容器在内压作用下的内力分析问题,并导出了相关的计算公式;本文在此基础上探讨GFRP/钢组合压力容器的优化设计问题。

## 2 结构分析

组合压力容器的结构模型如图1所示,其内层是普通钢材制成的内衬,外层是GFRP(玻璃钢)外套。筒身段是圆柱体,封头为等厚度半球形封头。在图1所示 $r-\theta-z$ 柱标系中 $a$ 表示容器的内半径, $d$ 表

示容器的外半径, $b$ 表示GFRP外套与钢制内衬结合面的半径, $L$ 表示组合容器筒身段的轴线长度。这里假定组合容器承受工作内压为 $P$ ,容器的变形不受外界约束。

为了计算该结构在上述工况下的内力,文献〔1〕将组合容器的筒身段分离成钢制内衬和GFRP外套,封头分离成钢制内壳和GFRP外壳,在各向同性和正交各向异性两种材料的弹性理论的基础上,利用应力边界条件和变形协调条件导出了如下的应力计算公式。

### 2.1 筒身段的内力计算公式

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta} &= \frac{(a^2b^2 + a^2r^2)P}{r^2(b^2 - a^2)} \\ &\quad - \frac{(a^2b^2 + b^2r^2)VP}{r^2n_1(b^2 - a^2)} \\ \sigma_r &= \frac{(a^2r^2 - a^2b^2)P}{r^2(b^2 - a^2)} \\ &\quad + \frac{(a^2b^2 - b^2r^2)VP}{r^2n_1(b^2 - a^2)} \\ \sigma_z &= k_2P \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

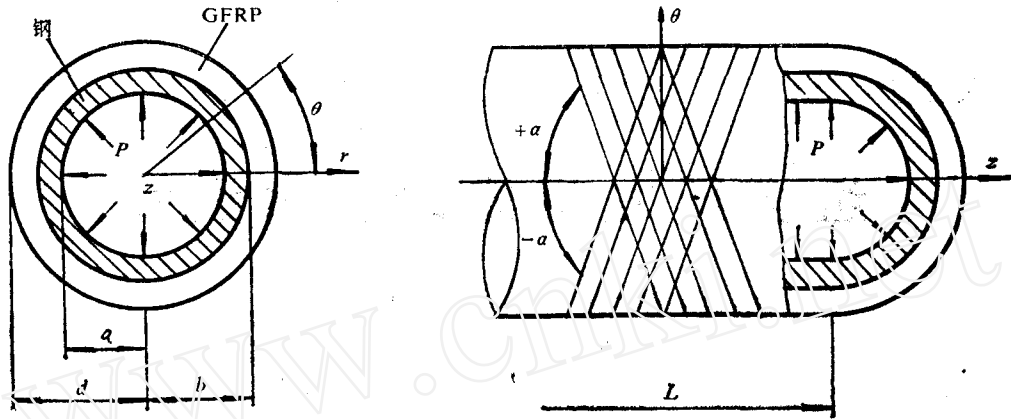


图1 组合压力容器的结构简图

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta}' &= [\beta G_1 r \cdot \exp(x_1 - 1) + \beta G_2 r \cdot \exp(x_2 - 1) + G_3] P \\ \sigma_R' &= [G_1 r \cdot \exp(x_1 - 1) + G_2 r \cdot \exp(x_2 - 1) + G_3] P \\ \sigma_z' &= k_2 P \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

2.2 封头的内力计算公式

$$\left. \begin{aligned} \sigma_T &= \left[ \frac{a^3 (b^3 + 2R^3)}{2R^3 (b^3 - a^3)} - \frac{(2R^3 + a^3) b^3}{2R^3 (b^3 - a^3)} \lambda_1 \right] P \\ \sigma_R &= - \left[ \frac{a^3 (b^3 - R^3)}{R^3 (b^3 - a^3)} + \frac{b^3 (R^3 - a^3)}{R^3 (b^3 - a^3)} \lambda_1 \right] P \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_T' &= [ (C_R x_{01} + D_R) H_R R \cdot \exp(x_{01} - 1) + (C_R x_{02} + D_R) \\ &\quad \cdot K_R R \cdot \exp(x_{02} - 1) ] \lambda_1 P \\ \sigma_R' &= [ (A_R x_{01} - B_R) H_R R \cdot \exp(x_{01} - 1) + (A_R x_{02} + B_R) \\ &\quad \cdot K_R R \cdot \exp(x_{02} - 1) ] \lambda_1 P \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

以上各式中

$$V = - (m_1 k_1 + n_1 k_2 + 2a^2)$$

$$h_1 = E (a^2 - b^2) (\bar{S}_{22} \beta + \bar{S}_{23}) \varphi - a^2 (1 + \nu) - b^2 (1 - \nu)$$

$$m_1 = \nu (a^2 - b^2)$$

$$n_1 = E (a^2 - b^2) (\bar{S}_{12} + \bar{S}_{22} \pi \xi + \bar{S}_{23} \psi \xi)$$

$$k_1 = \frac{a^2 - \lambda_1 b^2}{b^2 - a^2}$$

$$k_2 = \frac{\lambda_1 b^2}{d^2 - b^2}$$

$$G_1 = \frac{1}{\eta} \left( \tau \xi k_2 + \frac{V}{h_1} d \cdot \exp(x_2 - x_1) \right)$$

$$G_2 = \frac{1}{\eta} \left( \lambda_1 \xi k_2 - \frac{V}{h_1} \right)$$

$$G_3 = \xi k_2$$

$$\beta = \frac{A_0 + B_0}{D_0 + E_0}$$

$$\pi = \frac{1}{\eta} \beta \tau b \cdot \exp(x_1 - 1)$$

$$+ \frac{1}{\eta} \beta \lambda b \cdot \exp(x_2 - 1) + 1$$

$$\psi = \frac{\tau}{\eta} b \cdot \exp(x_1 - 1) + \frac{\lambda}{\eta} b \cdot \exp(x_2 - 1) + 1$$

$$\varphi = \frac{1}{\eta} [d \cdot \exp(x_2 - 1) b \cdot \exp(x_1 - 1) - b \cdot \exp(x_2 - 1)]$$

$$\tau = d \cdot \exp(x_2 - x_1) - b \cdot \exp(x_2 - 1) d \cdot \exp(1 - x_1)$$

$$\lambda = b \cdot \exp(x_1 - 1) d \cdot \exp(1 - x_1) - 1$$

$$\eta = b \cdot \exp(x_2 - 1) - [b \cdot \exp(x_1 - 1) d \cdot \exp(x_2 - x_1)]$$

$$\xi = \frac{C_0(D_0 + E_0) - F_0(A_0 + B_0)}{(D_0 + E_0) - (A_0 + B_0)}$$

$$\lambda_1 = \frac{3a^3(1-\nu)}{2E(b^3 - a^3) [\Delta + (\bar{S}_{11} + \bar{S}_{12})N_R + \bar{S}_{13}M_R]}$$

$$\Delta = \frac{(1-\nu)(2b^3 + a^3) + 2\nu(b^3 - a^3)}{2E(b^3 - a^3)}$$

$$N_R = (C_R x_{01} + D_R) H_R b \cdot \exp(x_{01} - 1) + (C_R x_{02} + D_R) \cdot K_R b \cdot \exp(x_{02} - 1)$$

$$M_R = (A_R x_{01} - B_R) H_R b \cdot \exp(x_{01} - 1) + (A_R x_{02} - B_R) \cdot K_R b \cdot \exp(x_{02} - 1)$$

$$H_R = \frac{d}{(A_R x_{01} - B_R) [b \cdot \exp(x_{02} - 1) d \cdot \exp(x_{01} - 1)] \cdot \exp(x_{02} - 1) - [b \cdot \exp(x_{01} - 1) d \cdot \exp(x_{02} - 1)]}$$

$$K_R = \frac{d}{(A_R x_{02} - B_R) [b \cdot \exp(x_{01} - 1) d \cdot \exp(x_{02} - 1)] \cdot \exp(x_{01} - 1) - [b \cdot \exp(x_{02} - 1) d \cdot \exp(x_{01} - 1)]}$$

$$x_1 = \frac{1}{2D_0} \left[ (A_0 - E_0) + \sqrt{(E_0 - A_0)^2 + 4B_0D_0} \right]$$

$$x_2 = \frac{1}{2D_0} \left[ (A_0 - E_0) - \sqrt{(E_0 - A_0)^2 + 4B_0D_0} \right]$$

$$x_{01} = \frac{1}{2} \left[ 1 - F_R + \sqrt{(F_R - 1)^2 + 4G_R} \right]$$

$$x_{02} = \frac{1}{2} \left[ 1 - F_R - \sqrt{(F_R - 1)^2 + 4G_R} \right]$$

$$F_R = \frac{1}{A_R} [2(A_R - C_R) - B_R]$$

$$G_R = \frac{1}{A_R} (2D_R + B_R)$$

其余各参数  $A_0, B_0, C_0, D_0, E_0, F_0, A_R, B_R, C_R, D_R$  均是与GFRP外套的偏轴柔度系数相关的系数;  $E$  和  $\nu$  分别为钢材的弹性模量和泊松比。有关GFRP外套偏轴柔度系数  $\bar{D}_{ij}$  ( $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$ ) 的计算公式已在文献〔1〕给出。

### 3 建立优化设计模型

如图1所示的组合压力容器, 由于封头是等厚度半球形封头, 所以只要确定了筒身段的形体尺寸, 封头及整个容器的形体参数也就确定了。故本文将组合容器筒身段钢内衬的壁厚  $t_s$ 、GFRP外套的厚度  $t_G$  和玻璃纤维缠绕角  $\alpha$  取为设计变量, 即

$$X = (\alpha, t_s, t_G) \dots \dots \dots (5)$$

为便于计算, 令  $\tilde{t}_s = t_s/\alpha, \tilde{t}_G = t_G/\alpha$ , 则可将设计变量化成无量纲形式

$$\tilde{X} = (\alpha, \tilde{t}_s, \tilde{t}_G) \dots \dots \dots (6)$$

优化设计的目标是使组合压力容器的材料费最省, 于是用组合压力容器的材料费比上相同工况和容积条件下单纯钢制容器的材料费, 即可建立如下无量纲形式的目标函数

$$\tilde{F}_V = F_C / F_S \dots \dots \dots (7)$$

式中  $F_C$ ——组合压力容器的材料费, 它包括制造组合压力容器的各种材料费之和。

$$\text{即 } F_C = F_{SL} + F_{GL} + F_{SR} + F_{GR} \dots (8)$$

其中

$$F_{SL} = \pi L \gamma_s W_s a^2 (2 \tilde{t}_s + \tilde{t}_s^2)$$

$$F_{GL} = \pi L \gamma_G W_G a^2 (2 \tilde{t}_G + 2 \tilde{t}_s \tilde{t}_G + \tilde{t}_G^2)$$

$$F_{SR} = (4/3) \pi \gamma_s W_s a^3 (3 \tilde{t}_s + 3 \tilde{t}_s^2 + \tilde{t}_s^3)$$

$$F_{GR} = (4/3) \pi \gamma_G W_G a^3 (3 \tilde{t}_G + 6 \tilde{t}_s \tilde{t}_G + 3 \tilde{t}_s^2 \tilde{t}_G + 3 \tilde{t}_s \tilde{t}_G^2 + 3 \tilde{t}_G^2 + \tilde{t}_G^3)$$

式中  $L$ ——筒身段的长度;

$\gamma_s$ ——钢材的密度;

$W_s$ ——钢材的单价;

$\gamma_G$ ——GFRP复合材料的密度;

$W_G$ ——GFRP复合材料的单价;

$F_S$ ——单纯钢制压力容器的材料费, 由下式计算;

$$F_S = \{ L ( 2 a t_P + t_P^2 ) + \frac{4}{3} ( 3 a^2 t_P + 3 a t_P^2 + t_P^3 ) \} \cdot \pi \gamma_s W_s \dots \dots \dots (9)$$

式中  $t_P$ ——单纯钢制压力容器的壁厚, 由第四强度理论容易导出  $t_P$  为下列二次方程的一个正实根;

$$A t_P^2 + B t_P + C = 0 \dots \dots \dots (10)$$

式中  $A = \sqrt{3} P - [\sigma]$

$$B = 2 a ( \sqrt{3} P - [\sigma] )$$

$$C = \sqrt{3} a^2 P$$

$[\sigma]$ ——钢材的许用应力;

其余符号意义同前。

组合压力容器的约束条件主要考虑钢制内衬的强度约束和GFRP外套的变形限制两种约束。亦即, 钢内衬危险点处的应力必须满足Mises屈服准则, GFRP外套中的最大应变必须符合应变限定要求〔2〕。众所周知, 在图1所示压力容器结构中, 封头的受力情况优于筒身段, 所以危险点将出现在筒身段。

根据文献〔1〕导出的组合压力容器壁内的应力分布规律容易看出钢内衬的危险点是在  $r = a$  的内表面, 将  $r = a$  代入式(1)得危险点上的三向应力。

$$(\sigma_r)_{r=a} = -P$$

$$(\sigma_\theta)_{r=a} = \frac{(b^2 + a^2)P}{(b^2 - a^2)} - \frac{2 b^2 \nu P}{h_1 (b^2 - a^2)} \dots (11)$$

$$(\sigma_z)_{r=a} = k_1 P$$

于是，用Mises屈服准则表示的第一约束方程为

$$\begin{aligned} & [(\sigma_r)_{r=b} - (\sigma_\theta)_{r=b}]^2 + [(\sigma_\theta)_{r=b} - (\sigma_z)_{r=b}]^2 \\ & + [(\sigma_z)_{r=b} - (\sigma_r)_{r=b}]^2 \leq 2\sigma_s^2 \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

式中  $\sigma_s$ ——钢材的屈服应力。

对于GFRP外套，最大应变将发生在筒身段  $r=b$  的结合面的环向。因此，将  $r=b$  代入式(2)，可得GFRP外套在结合面的三向应力计算公式

$$\left. \begin{aligned} (\sigma_r)_{r=b} &= [G_1 b \cdot \exp(x_1 - 1) + G_2 b \cdot \exp(x_2 - 1) + G_3] P \\ (\sigma_\theta)_{r=b} &= [\beta G_1 b \cdot \exp(x_1 - 1) + \beta G_2 b \cdot \exp(x_2 - 1) + C_3] P \\ (\sigma_z)_{r=b} &= \frac{1}{2} P \end{aligned} \right\} \dots\dots (13)$$

根据正交各向异性体的物理方程<sup>[3]</sup>容易写出第二个约束方程为

$$\bar{S}_{12}(\sigma_z')_{r=b} + \bar{S}_{22}(\sigma_\theta')_{r=b} + \bar{S}_{23}(\sigma_r')_{r=b} \leq \bar{\epsilon}_0 \dots\dots\dots (14)$$

式中  $\bar{\epsilon}_0$ ——GFRP外套的许用应变；

$$(\alpha, \tilde{t}_s, \tilde{t}_G)^* = (0.5268, 0.03608, 0.01002)$$

其余符号意义同前。

于是，组合压力容器优化设计的数学模型可归纳成如下型式

$$\left. \begin{aligned} \text{Find } \bar{X} &= (\alpha, \tilde{t}_s, \tilde{t}_G) \\ \text{Min. } \tilde{F}_V &= F(\bar{X}) \\ \text{s.t. } G_i(\bar{X}) &\leq 0 \\ & i = 1, 2 \end{aligned} \right\} (15)$$

### 4 优化模型的求解

为了求解上面所建立的组合压力容器优化设计的数学模型，这里采用M.J.Box提出的一种直接优化方法——复合形法<sup>[4]</sup>。其电算程序框图如图2所示。

### 5 算例及讨论

欲设计一台内径  $2a=1.2\text{m}$ ，筒长  $L=2.5\text{m}$ ，承受工作内压  $P=10\text{MPa}$  的GFRP/钢组合压力容器，已知钢材、GFRP的力学性能参数如表1所示，GFRP与钢材的单价比  $W_G/W_s=4.0$ 。取设计变量的上、下限值分别为

$$\begin{aligned} (\alpha, \tilde{t}_s, \tilde{t}_G)^U &= (1.0472, 0.2, 0.2) \\ (\alpha, \tilde{t}_s, \tilde{t}_G)^L &= (0.52398, 0.01, 0.01) \end{aligned}$$

根据以上已知参数，利用本文所编程序由计算机算得设计变量最佳取值为

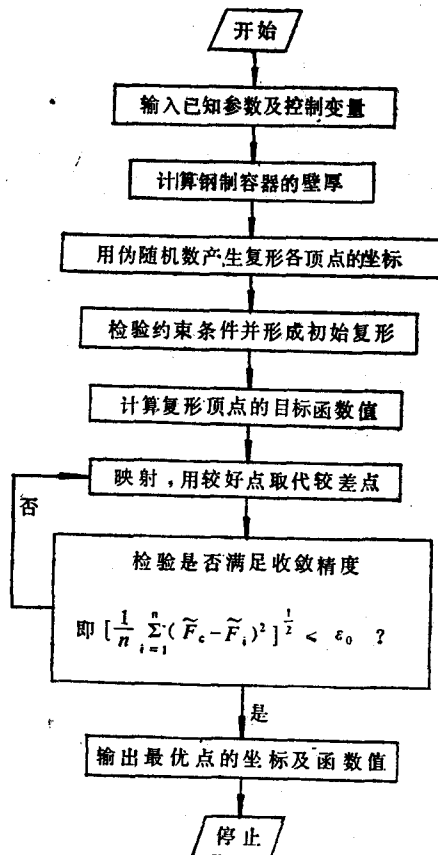


图2 复合形法电算程序框图

表 1 材料力学性能参数表

材料名称	杨氏模量/GPa		泊 松 比		剪切模量/GPa	密度/t.m <sup>-3</sup>	设计容许值
GFRP	E <sub>L</sub>	33.839	v <sub>12</sub>	0.33	G <sub>L<sub>T</sub></sub> = 4.335	2.0	σ <sub>s</sub> = 0.001 5
	E <sub>T</sub>	12.094	v <sub>13</sub>	0.20			
	E <sub>N</sub>	6.047	v <sub>23</sub>	0.15			
钢	206.0		0.30		78.48	7.85	σ <sub>s</sub> = 240MPa

按以上设计参数制造组合压力容器的材料费只有单纯钢制压力容器材料费的0.778 903倍,组合压力容器的相对重量只有0.647 045。

为了探讨内压和内衬钢材强度等级对GFRP/钢组合压力容器最优设计方案的影响,笔者采用本文所编优化程序分别对各种内压和各种内衬钢材强度等级条件下组合压力容器的最优形体参数作了计算。将计算出的序列最优值作成图线得到如图3和图4所示的影响曲线。从图3可以看出,随着容器承受工作内压的增大,GFRP/钢组合压力容器的相对成本明显降低,说明复合材料增强组合压力容器作为高压容器使用时比钢制

压力容器的投资更省。从图4可以看出,随着内衬钢材强度等级的提高,GFRP/钢组合压力容器的相对成本将逐渐增大,甚至可能使 $\tilde{F}_v$ 的值超过1.0,这表明选用普通钢材制作组合压力容器的内衬比选用优质钢材更为合理。由此可见,采用复合材料增强组合压力容器替代石油化工工业中的钢制压力容器确能节省大量的优质钢材。而且,由于复合材料增强组合压力容器的自重比钢制压力容器的自重显著减轻,所以还能节省用于制作容器支承结构的大量建筑材料。

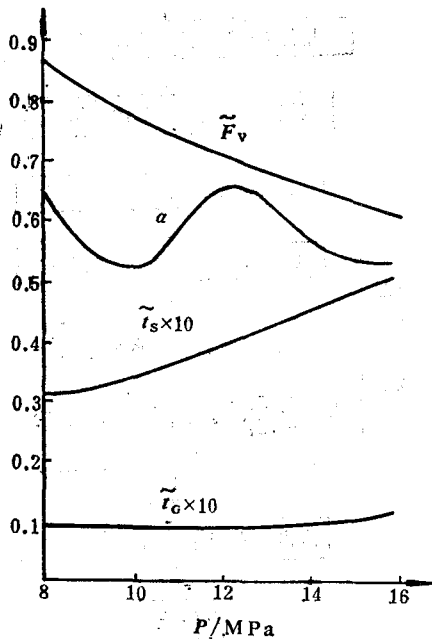


图 3 内压对组合压力容器最优设计方案的影响

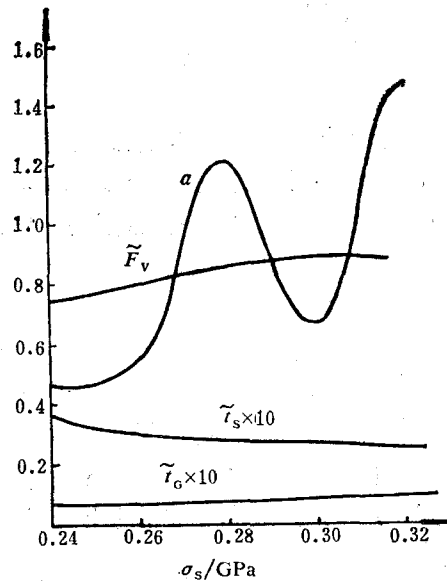


图 4 内衬钢材强度等级对组合压力容器最优设计方案的影响

## 6 结 语

本文的研究结果表明,用GFRP/钢组合压力容器替代石油化工行业中的耐高压钢

# 伴热管线设计方法的探讨

高希锋

华北石油勘探设计院 (河北省任丘市)

关键词 输油管道 \* [ 伴热管线 ] \* 管线设计 \* [ 方法 ]

为了寻求伴热管线设计的合理方法,我们对一系列正在运行的伴热管线进行了调查和分析,找出了存在的问题,提出了设计中应采取的措施。

## 1 伴热管线设计中存在的问题

伴热管线具有支路多,负荷差异大,站内分布广的特点,如果设计方法不合理,就很难控制和分配伴热介质的流量,给生产管理带来麻烦。现发现伴热管线设计中存在着以下问题。

### 1.1 伴热流程不合理

以往大部分伴热管线的布置设计见图1所示。尽管各支路是一组并联的管路,但人为造成了支路与干管组成的回路中摩阻不

同。在支路摩阻相同的条件下,自左至右回路中的摩阻逐渐增大,因此,末端伴热介质流量较小。

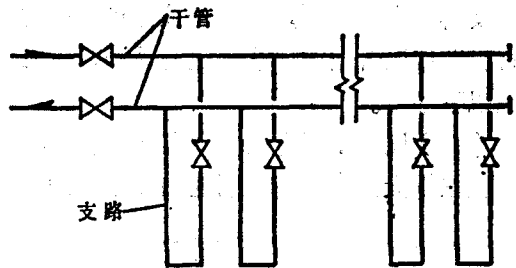


图1 伴热管线布置I

### 1.2 干管太少

由于干管少,负荷相差较大的支路连到

制容器,不仅在技术上可行,而且在经济上更加合理。文中所建立的GFRP/钢组合压力容器优化设计的数学模型也适用于求解任何其他纤维增强的组合压力容器的形体参数优选问题。编制的优化设计软件程序适合于不同容积、内压和钢材强度等级条件下组合压力容器的优化设计计算,运算速度快,使用灵活、方便。

## 参 考 文 献

[1] 姚安林、罗洪泉. 纤维增强压力容器的内力

分析. 石油工程建设, 1992, 18(1)

[2] 姚安林. 组合圆筒管的优化设计. 工程力学, 1989, 6(2): 113~120

[3] 刘锡礼、王秉权. 复合材料力学基础. 中国建筑工业出版社, 1984, 12~24

[4] 朱伯芳等. 结构优化设计原理与应用. 水利电力出版社, 1984, 140~147

(收稿日期, 1991-12-28)

本文编辑: 张明智

(17) Installation of the Sediment Discharging Unit on the Breather System of Caverned Oil Storage Tank *Fan Jiye*

(19) A Simple Analysis on the Method of Gasoline Unloading from Tank Car in High Temperature *Li Ketian*

(21) Selection of the Minimum Temperature for Testing the Density of Gudao Crude *Zhang Haomin Tian Shuju*

• ENERGY SAVING & ENVIRONMENTAL PROTECTION •

(22) Method of Enhancing the Utilization Ratio of Thermal Energy in Tank Farm and of Prolonging the Lifetime of Heater *Li Yunpeng*

• DESIGN AND CALCULATION •

(25) The Optimizing Design of Combined Pressure Vessel

In accordance with the internal pressure calculation formular derived from the Reference Material 1 for fiber-reinforced pressure vessel, this paper sets up the mathematical model for optimizing design and achieves the optimum solution by using compound method. The analysed results show that the material cost of combined pressure vessel is lower than the pure steel vessel and that the weight of combined pressure vessel is much decreased in the same condition of internal pressure and containing volume.

*Yao Anlin Luo Hongquan*

(31) Probing into the Designing Method of Heat-traced Pipeline

*Gao Xifeng*

• TRANSPORTATION TECHNOLOGY •

(33) Application of Pigging Technology and Its Effect on Ke—Du Pipeline

Ke — Du Oil Pipeline is the first long distance pipeline constructed in China and it has been operated in the condition of low efficiency since its completion. Based on investigations, analysis and tests on how to thoroughly solve the problem of pipe wall waxing, this pipeline had been put into renovation in accordance with the requirement of pigging technology. As a result, pipeline has succeeded in adopting the pigging technology and has achieved the better economical and social benefits after its renovation. The experiences and lesson of this job have been introduced in the paper.

*Yu Jianzhong Min Xihua Qi Wenyuan*

• CORROSION PROTECTION •

(37) A New Method of Cathodic Protection Applied to the Bottom Plate of Metal Tank by Impressed Current

It is normal that the outside of metal tank bottom plate is seriously corroded and that the insulated flanges must be installed by the traditional method of cathodic protection. However, recent study shows that the solid electrolyte with impressed current is available for use in the principle of cathodic protection, and that the tank bottom plate is being cathodically polarized. By this way, the purpose of retarding or controlling corrosion could be achieved with polarized potential controlled at a setting value and the installation of insulated flange could be eliminated.

*Li Chunguang Ge Doufu Zhang Zongwang*