

# 空冷器复合管束力学建模和数值模拟

偶国富, 黄军辉, 李剑敏

(浙江理工大学多相流沉积-冲蚀实验室, 杭州 310018)

**摘要:** 对加氢空冷器复合管束进行结构分离和解析,根据弹塑性力学方法获得复合管的力学分析控制方程,对内衬 316L 不锈钢的复合管进行应力场数值模拟,比较弹性力学和有限元数值模拟方法得到的应力分析结果相互吻合;分析复合管的极限工作载荷以及运行工况下的热应力,提出以结合强度为空冷器复合管束检验的指标,并对实际制造的复合管样品进行结合强度测试,结果满足相关国家标准,工程应用实现了设备长周期运行。

**关键词:** 复合管; 加氢空冷器; 力学分析; 结合强度  
**中图分类号:** TB125;TB37      **文献标识码:** A

## 0 引 言

加氢裂化反应流出物空冷器(reactor effluent air cooler, REAC)面临高压、高温差、腐蚀性多相流等苛刻工况,其失效与介质腐蚀性、流动性及传热过程相关,具有明显的局部性、突发性和风险性,此类失效在国内外非常普遍。美国石油学会(API)提出将管束材质提升为 incoloy825<sup>[1]</sup>,更换材质虽然能够较好地改善空冷器运行效果,但成本巨大,是普通碳钢成本的 10 倍。另一方面,空冷器的高压临氢状态和强腐蚀性多相流介质要求其换热管束必须满足强度、刚度和防腐蚀性的要求,同时也要求有严格的传热效率保证<sup>[2-3]</sup>。采用内衬防腐蚀不锈钢或合金的复合管是一种行之有效的办法,在此基础上进行管束结构创新设计、材料选择、制造工艺研究,可以满足不同工程应用要求<sup>[4-6]</sup>。本文拟采用外层为低碳钢、内层为不锈钢或合金的复合管束代替普通碳钢管束,应用于加氢裂化反应流出物空冷器,以满足化工企业对设备的平稳长周期运行要求,达到经济、有效、实用的效果。

本文以弹塑性力学为基础,建立加氢裂化空冷器复合管束的力学分析控制方程;对典型内衬材料的复合管进行算例分析,其结果可为设计、制造、运行提供理论指导和参考数据。

## 1 结构模型和控制方程

### 1.1 复合管束结构

为满足管束耐腐蚀和承载能力强的要求,复合空冷器管束拟以耐蚀不锈钢或者合金材料为内衬管,以普通碳钢材料为复合管束的外管,管束结构如图 1 所示。衬管与外管之间有一定的过盈配合量,连接方式为胀接。复合管的各层参数表示见表 1。

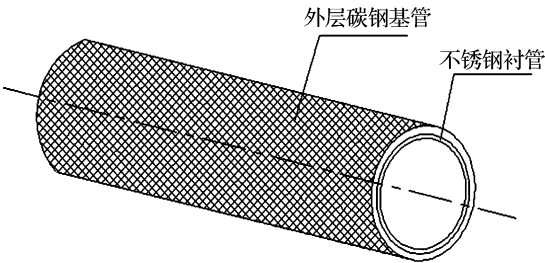


图 1 复合管束的模型结构示意图

表 1 复合管各层参数表示

| 参数    | 基管外表面 | 基管内表面 | 衬管外表面 | 衬管内表面 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 半径    | $R_1$ | $R_0$ | $R_0$ | $R_2$ |
| 边界作用力 | $P_2$ | $P_0$ | $P_0$ | $P_1$ |

根据复合管结构和工作特性,假设内衬不锈钢的复合管在结构、材质和载荷分布等方面均符合轴对称要求,内衬层与碳钢管内壁紧密贴合。在复合管的力学分析中,应力和应变的关系采用厚壁圆筒弹塑性力学的平面解。

1.2 力学控制方程

1.2.1 弹性力学基本方程

复合管的形状和载荷分布具有轴对称性,可假设其任意横截面在变形后仍保持为平面,力学分析过程转变为平面应变的轴对称问题。

在圆柱坐标系 $(R,\theta,Z)$ 中,剪应力 $\tau_{r\theta}=\tau_{\theta z}=\tau_{zr}=0$ ,应满足弹性力学基本方程:

物理方程

$$\begin{bmatrix} \epsilon_z \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{zz} & s_{z\theta} & s_{zr} \\ s_{z\theta} & s_{\theta\theta} & s_{\theta r} \\ s_{rr} & s_{\theta r} & s_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \sigma_r \end{bmatrix} \tag{1}$$

平衡方程

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \tag{2}$$

几何方程

$$\begin{cases} \epsilon_r = \frac{du}{dr} \\ \epsilon_\theta = \frac{u}{r} \\ \gamma_{r\theta} = \gamma_{\theta z} = \gamma_{zr} = 0 \end{cases} \tag{3}$$

变形协调方程

$$r^2 \frac{d^2 \epsilon_\theta}{dr^2} + 2r \frac{d\epsilon_\theta}{dr} - r \frac{d\epsilon_r}{dr} = 0 \tag{4}$$

其中,物理方程中的柔度矩阵 $[S]$ 的各分量,由材料的弹性模量及泊松比确定,并且对于各向同性材料和各向异性材料,此比值的确定差别较大<sup>[8-9]</sup>。

1.2.2 热弹性力学方程

复合管在温度载荷作用下,分析热应力时,采用热弹性力学的叠加方法,物理方程为:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_z \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{zz} & s_{z\theta} & s_{zr} \\ s_{z\theta} & s_{\theta\theta} & s_{\theta r} \\ s_{rr} & s_{\theta r} & s_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \sigma_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_z \\ \alpha_\theta \\ \alpha_r \end{bmatrix} T \tag{5}$$

其中 $\alpha_z, \alpha_\theta, \alpha_r$ 为热膨胀系数,与材料类型相关。对于金属材料,三者相等。

1.2.3 管层的应力分析

对于基管和衬管的应力分析,可按照厚壁圆筒的弹性应力分析求解。衬管与基管采用过盈胀接配合,假设两管不发生相对滑动,则由已知条件:衬管与基管配合过盈量 $\delta$ ,衬管与基管接触面半径 $R_a$ ,基管、衬管弹性模量 $E_1, E_2$ ,泊松比 $\mu_1, \mu_2$ 。首先可确定在衬管和基管配合面上产生的套装压力 $P_a$ ,然后根据拉梅(Lamé)公式,得到当管束内表面处承受内压 $P_1$ 、外表面处受外压 $P_2$ 时,管层的应力分量 $\sigma_r, \sigma_\theta$ 、应变分量 $\epsilon_r, \epsilon_\theta$ ,和位移分量 $u$ 。

套装压力为:

$$P_a = \frac{\delta}{R_a} \frac{1}{\frac{1}{E_2} \left( \frac{R_a^2 + R_2^2}{R_a^2 - R_2^2} - \mu_2 \right) + \frac{1}{E_1} \left( \frac{R_a^2 + R_1^2}{R_1^2 - R_a^2} + \mu_1 \right)} \tag{6}$$

根据拉梅公式,对于衬管层,应有:

$$\begin{cases} \sigma_{r2} = \frac{R_a^2 R_2^2 (P_a - P_1)}{R_a^2 - R_2^2} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{R_2^2 P_1 - R_a^2 P_a}{R_a^2 - R_2^2} \\ \sigma_{\theta 2} = -\frac{R_a^2 R_2^2 (P_a - P_1)}{R_a^2 - R_2^2} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{R_2^2 P_1 - R_a^2 P_a}{R_a^2 - R_2^2} \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} \epsilon_{r2} = \frac{1}{E_2} \left[ (1 + \mu_2) \frac{R_a^2 R_2^2 (P_a - P_1)}{R_a^2 - R_2^2} \cdot \frac{1}{r^2} + (1 - \mu_2) \frac{R_2^2 P_1 - R_a^2 P_a}{R_a^2 - R_2^2} \right] \\ \sigma_{\theta 2} = \frac{1}{E_2} \left[ -(1 + \mu_2) \frac{R_a^2 R_2^2 (P_a - P_1)}{R_a^2 - R_2^2} \cdot \frac{1}{r^2} + (1 - \mu_2) \frac{R_2^2 P_1 - R_a^2 P_a}{R_a^2 - R_2^2} \right] \end{cases} \quad (8)$$

$$u_2 = \frac{1}{E_2} \left[ -(1 + \mu_2) \frac{R_a^2 R_2^2 (P_a - P_1)}{R_a^2 - R_2^2} \cdot \frac{1}{r} + (1 - \mu_2) \frac{R_2^2 P_1 - R_a^2 P_a}{R_a^2 - R_2^2} r \right] \quad (9)$$

同理,可以求出基管内部的各应力、应变分量和位移。

1.3 复合管极限承载压力

按照等强度原则设计复合管的结构尺寸<sup>[8]</sup>。对于复合管,承受内压为  $P_1$ ,衬管与基管间相互作用压力为  $P_a$ ,设衬管材料的屈服极限为  $\sigma_{s2}$ ,基管为  $\sigma_{s1}$ ,则在弹性状态下,作用力  $P_1$ 、 $P_a$  应分别使衬管内壁和基管内壁同时达到屈服状态,根据 Tresca 屈服准则,计算得到复合管的弹性极限压力为:

$$P_e = \frac{\sigma_{s2}}{2} \left( 1 - \frac{R_2^2}{R_a^2} \right) + \frac{\sigma_{s1}}{2} \left( 1 - \frac{R_a^2}{R_1^2} \right) \quad (10)$$

在塑性极限状态下,根据平衡方程和屈服条件,代入作用力的边界条件,求得复合管的塑性极限压力为:

$$P_p = \sigma_{s2} \ln \frac{R_a}{R_2} + \sigma_{s1} \ln \frac{R_1}{R_a} \quad (11)$$

2 算例分析

2.1 模型与计算参数

空冷器换热管束基管规格为  $\Phi 25 \times 3$  mm,衬管材料可选择为 316L、incoloy825、2205 双相不锈钢和 monel400 四种,各种材料的物理特征参数见表 2,有限元分析采用的结构模型有四种,编号为 1、2、3、4,对应的内衬厚度分别为 1、0.7、0.5、0.3 mm。

表 2 衬管材料物理参数

| 材料         | 密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 弹性模量 E/GPa | 屈服强度 $\sigma_s$ /MPa | 泊松比  | 热膨胀系数 $\alpha$ /(10 <sup>-6</sup> /°C) |
|------------|-------------------------|------------|----------------------|------|----------------------------------------|
| 10#钢       | 7.8                     | 206        | 245                  | 0.3  | 12                                     |
| 316L       | 7.9                     | 200        | 255                  | 0.3  | 15                                     |
| Incoloy825 | 8.14                    | 193        | 290                  | 0.28 | 14                                     |
| 2205       | 7.85                    | 180        | 175                  | 0.29 | 13                                     |
| Monel400   | 8.8                     | 173        | 224                  | 0.31 | 13.9                                   |

2.2 有限元模型

利用 ANSYS 软件对管束进行有限元分析,全金属管和双金属复合管应用的单元选择条件为:选择 plane82 单元进行 2D 静态模拟,采用间接耦合法对复合管进行温度—静载耦合分析;三维建模单元采用 solid185 单元,分析时对节点施加周向位移约束,使管束模型只产生径向变形。分析基管与衬管的过盈配合时,采用非线性分析中的面—面接触方法。复合管网格划分示意如图 2、图 3 所示。

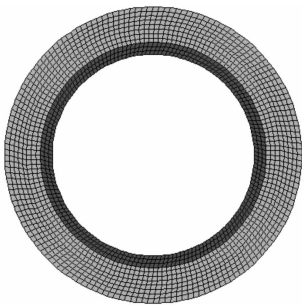


图 2 复合管束 2D 模型网格划分示意

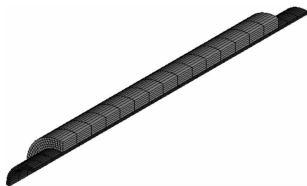


图 3 接触分析网格划分(1/4 模型)

2.3 计算结果

2.3.1 过盈量分析

过盈量是影响套装应力分布的重要因素。选择结构模型 1,对内衬材料为 316L 时管束内部最大密赛斯

应力  $\sigma_m$  进行分析,结果如表 3 所示。

表 3 不同过盈量时的密赛斯应力强度

| 过盈量/mm | $\sigma_m$ /MPa | 位置    |
|--------|-----------------|-------|
| 0      | 0               | /     |
| 0.01   | 41.404 4        | 基管内表面 |
| 0.015  | 60.923 4        | 基管内表面 |
| 0.02   | 80.441 4        | 基管内表面 |

2.3.2 静载应力分析

内衬 316L 材料复合管承受 16 MPa 管内流体静压时的密赛斯应力  $\sigma_m$  如图 4 所示。由图 4 可以看出,数值模拟解和弹性力学模型解的变化规律和量值能够较好地吻合,实际结果相对误差小于 2.29%。由此可见,复合管有限元模型的建立及数值模拟方法能够反映复合管模型的力学特性,是正确合理的。

图 5 为复合管承受内压时应力分布云图,图 5 的结果表明:复合管中的应力主要由内衬不锈钢管承受,衬管所承受的应力远大于基管中的应力。

2.3.3 温度与静载联合作用

空冷器第一层管束入口处为冲蚀关键点,对其进行温度与静载耦合作用的热应力分析,利用工业过程传热模拟软件 HTRI 进行计算,得管内壁面温度 112.42℃,管外壁面温度为 97.10℃,静载内压设为 16 MPa,分析结果如图 6 所示。由图 6 可以看出:在温度—静载联合作用下,由于不锈钢内衬管与碳钢基管的材料参数不同而造成两管层变形不一致,应力分层也不规律;当压力和温度波动较大时(常见于开、停工或紧急放空),循环多次作用易造成内衬层和基管贴合面的疲劳失效,产生贴合层松动甚至脱离,因此对必须根据实际工况选择适合的结合强度。

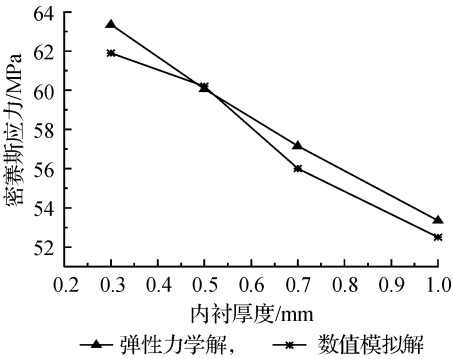


图 4 密赛斯应力强度—厚度关系曲线

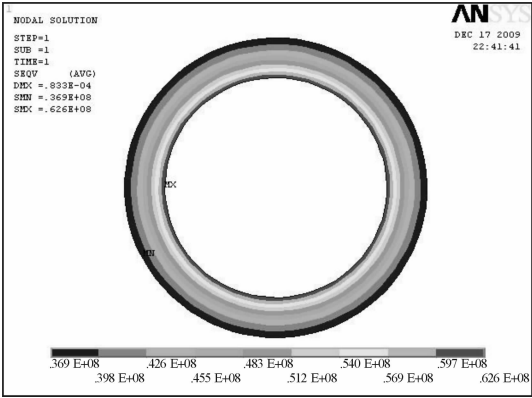


图 5 承受内压时复合管层应力分布云图

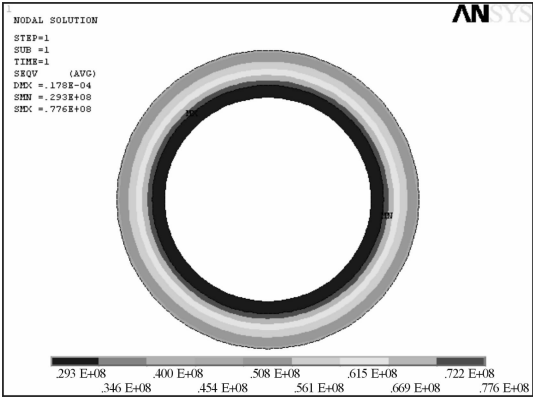


图 6 静载—温度联合作用下的应力分布

2.3.4 极限载荷分析

当基管尺寸规格为  $\Phi 25 \times 3$  mm,内衬材料为 316L 时,衬管内衬厚度与弹性极限载荷关系曲线如图 7 所示。由图 7 可见,复合管的弹性极限载荷随着内衬厚度增加极限性增大。因此适当增大内衬厚度有利于提高复合管的极限承载能力,但是内衬厚度过大则提高了复合管制造难度和制造成本,因此内衬厚度应综合制造成本和工作性能进行选择。实际工程实施中推荐的内衬厚度为 0.4~1 mm,对应极限载荷为 60~70 MPa。

另外,不同内衬材料对应的极限载荷影响较大,选择结构模型 2,内衬不同材料时的弹性极限载荷如图 8 所示。由图 8 可看出:当内衬厚度相同时,内衬 Incoloy 825 的复合管承载能力明显优于内衬其他 3 种材料的复合管,但因 Incoloy825 材料成本昂贵,在实际工程中并不常采用。

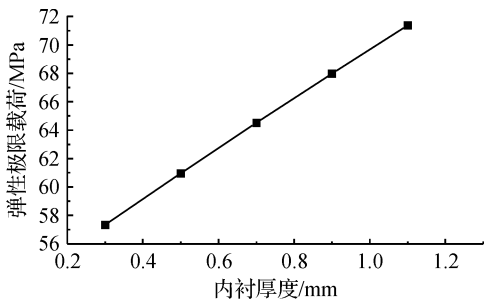


图 7 内衬厚度与极限载荷的关系曲线

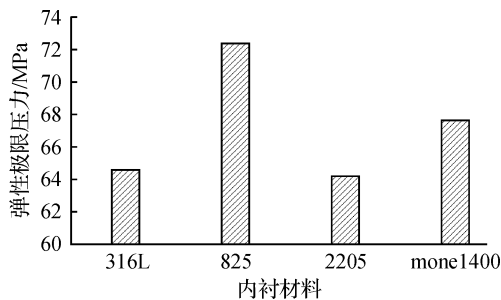
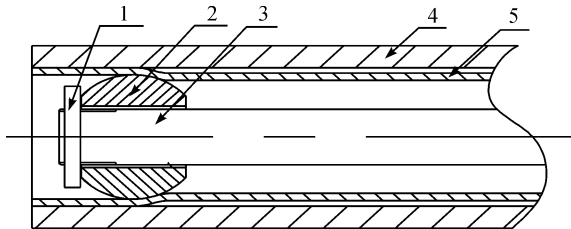


图 8 内衬不同材料的极限载荷

### 3 工程应用

为防止含氯原料油加工引起的空冷器管束失效,国内某大型炼油厂采用了内衬 316L 不锈钢的复合管束,取得了良好的效果。复合管的制造工艺如图 9 所示,其相关加工参数为:基管规格:Φ25×3 mm,衬管规格:Φ17.5×1 mm,模具胀头的直径小于 17.32 mm。

按照国家相关标准的测试方法和内容对复合管进行测试检验<sup>[9]</sup>,测试所得结合强度大于 4 MPa,单管的传热效率测试值与标准值误差 1.49%,符合实际工程应用要求。



1. 紧锁螺母, 2. 模具胀头, 3. 拉杆, 4. 基管, 5. 衬管

图 9 复合管加工工艺

### 4 结 论

a)建立了空冷器复合管束的有限元应力分析模型和计算公式,力学模型解析解和数值模拟解较好吻合,验证了模型的正确、合理性。

b)复合管的综合承载能力,可以从选材、过盈量、内衬厚度等方面考虑;运用弹塑性力学解析方法和数值模拟相结合,探索复合管束的工作性能,可指导复合管选材和结构参数优化。

c)基于力学分析和设计,制造出的一种内衬 316L 不锈钢的复合空冷器管束,已实际工程应用于含氯原料油加工,效果良好,延长了使用周期。

### 参考文献:

- [1] API Recommended Practice 932-B. Design, Materials, Fabrication, Operation, and Inspection Guidelines for Corrosion Control in Hydroprocessing Reactor Effluent Air Cooler (REAC) Systems[S].
- [2] Vedvik N P, Gustafson C G. Analysis of thick walled composite pipes with metal liner subjected to simultaneous matrix cracking and plastic flow[J]. Composites Science and Technology, 2008, 68: 2705-2716.
- [3] 偶国富, 许根富, 朱祖超, 等. 弯管冲蚀失效流固耦合机理及数值模拟研究[J]. 机械工程学报, 2009, 45(11): 119-124.
- [4] Command O, Perreux D, Thiebaud F, et al. Methodology to improve the lifetime of type III HP tank with a steel liner[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34: 3077-3090.
- [5] Hardwick R, Wang C T. Fabrication process for the production of a zirconium bimetal tube for Cl<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S gas wells [C]//ASME Pressure Vessels & Piping Division. 8th International Conference on High Energy Rate Fabrication. San Antonio: ASME, 1984: 189-194.
- [6] 王学生, 王如竹, 李培宁. 复合管液压成形装置及残余接触压力预测[J]. 中国机械工程, 2004, 15(8): 662-666.
- [7] 张 越. 复合层合枪管强度及温度场的理论与试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [8] 毕继红, 王 晖. 工程弹塑性力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 2003.
- [9] CJ/T 192—2004 内衬不锈钢复合钢管[S].