

发动机冷却水提高车用天然气罐脱附性能分析

谭羽非¹, 卜宪标^{1,2}, 牛传凯¹

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨, Tanyufei2002@163.com;

2 中国科学院 广州能源研究所, 510640 广州)

摘要: 车用吸附存储天然气脱附过程产生的吸热效应, 严重影响天然气脱附效率及汽车行驶速度. 采用发动机冷却水来加热储气罐, 并通过建立该脱附过程的数值模型, 模拟计算了脱附过程中温度、压力、脱附量等参数的变化, 论证了发动机冷却水用于补充脱附过程所需热量的可行性. 结果表明: 在脱附放气过程中, 用发动机冷却水加热储气罐壁面, 可以提高储气罐的平均温度, 改善储气罐的温度场, 增加脱附量. 适当增加内部换热管的管径, 增加吸附剂的导热系数, 均能增加储气罐的脱附量.

关键词: 车用天然气储罐; 脱附过程; 脱附热效应; 数值模拟

中图分类号: TE821 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)10-0076-04

Analysis of improving the desorption performance of natural gas vehicle tank using engine cooling water

TAN Yu-fei¹, BU Xian-biao^{1,2}, NIU Chuan-kai¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, Tanyufei2002@163.com; 2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, 510640 Guangzhou, China)

Abstract: Endothermic effects in desorption process of natural gas vehicle tank seriously affects the gas desorption efficiency and vehicle speed. In this paper, a numerical model in desorption process of heating natural gas vehicle tank by engine cooling water was established, and by which the desorption processes were calculated. It shows that when the tank is heated by the engine cooling water, the rising of temperature makes the desorption amount of natural gas increased obviously. Also, the increasing of diameter of internal cooling pipe and thermal conductivity of adsorbent can increase the desorption amount.

Key words: natural gas vehicle tank; desorption process; desorption thermal; numerical simulation

近年来天然气汽车以清洁天然气能源为燃料, 得到许多国家的重视和推广. 车用天然气可采用液化天然气、压缩天然气和吸附天然气的方式储存. 与传统的液化天然气和压缩天然气相比, 吸附天然气加气站采用单级压缩, 能降低充气站建设费用, 且储气罐由于储存压力低(3~5 MPa), 可采用较薄材质, 置于汽车之上安全性较高. 但目前车用吸附存储天然气技术还不成熟, 存在着一定的技术问题. 目前主要难点是脱附热效应问题. 天然气储罐的脱附过程是吸热过程, 严重影响天然气脱附量, 进而影响汽车的行驶速度. 国外已有

学者研究表明^[1-2]: 储气罐在室温下脱附时, 压力从 3.5 MPa 降至 0.25 MPa 时, 储气罐的中心温度下降了 22.6 °C, 脱附量较等温脱附量大大减少. 因此补充脱附过程所需热量, 就成为提高脱附效率的技术关键. 但一方面由于脱附过程是在有限空间汽车内发生, 车内不可能装备加热设备, 另一方面车内发动机冷却水温度能达到 93 °C 左右, 若用发动机冷却水加热储气罐, 以补充脱附过程所需热量, 能够很好地提高储气罐的脱附能力.

本文建立发动机冷却水加热储气罐, 用于脱附过程的数值模型, 模拟计算了脱附过程中压力、温度、脱附量等参数的变化, 论证发动机冷却水用于补充脱附过程所需热量的可行性, 为吸附天然

气汽车的实际应用提供技术支持。

1 数学模型

ANG 储气罐几何形状见图 1, 发动机冷却水有 2 种布置方式, 一种是在储罐外部布置一个环形套管, 另一种是在储罐的外部 and 中心处分别布置冷却水管。发动机冷却水从水管内流过, 储罐内装有活性炭吸附剂, 通过对流换热加热内部的吸附剂。储罐内存有一定吸附压力下的天然气, 通过脱附向发动机供应燃料。

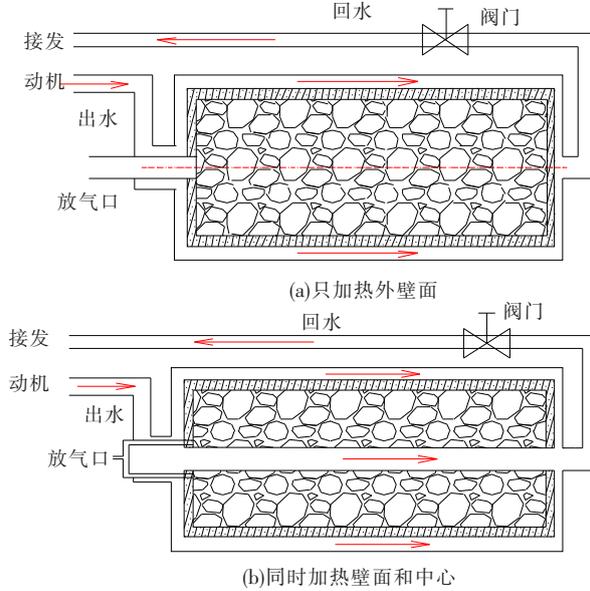


图 1 储罐示意

为了抽象数学模型, 简化计算, 做如下假设:

- 1) 忽略活性炭和储罐壁面的接触热阻;
- 2) 罐内吸附剂为各向同性的均匀介质;
- 3) 储罐内压力均匀分布, 温度沿径向分布;
- 4) 外壁环境绝热。

建立控制方程组:

1) 连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_1 \rho_g + \rho_b q^*) = \dot{m}. \quad (1)$$

式中: ε_1 为总孔隙率; ρ_g 为气相气体浓度, kg/m^3 ; ρ_b 为活性炭比重, kg/m^3 ; q^* 为活性炭即时吸附量, kg/kg ; \dot{m} 为单位体积的放气速率, $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

2) 放气速度方程

$$-2\pi L \int_0^{R_0} m r dr = M. \quad (2)$$

式中: M 为车的用气速率, g/s ; L 为储罐长度, m ; R_0 为储罐内半径, m 。

3) 能量方程

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\lambda_e r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho_b q^*) \Delta H - \varepsilon_1 \frac{\partial P}{\partial t} +$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[(\rho_b C_{ps} + \varepsilon_1 C_{pg} \rho_g + C_{pg} \rho_b q^*) T] = 0. \quad (3)$$

式中: λ_e 为床层导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; C_{pg} 为气体热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; C_{ps} 为活性炭热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ΔH 为吸附热, J/kg 。

4) 气体状态方程

$$\rho_g = \frac{PM_g}{RT}. \quad (4)$$

式中 M_g 为甲烷摩尔质量, g/mol 。

5) 吸附量方程^[3-4]

$$\begin{cases} q_{eq} = \frac{q_m b P}{1 + b P}, \\ q_m = 55920 T^{-2.3}, \\ b = 1.0863 \times 10^{-7} \exp\left(\frac{806}{T}\right). \end{cases} \quad (5)$$

式中: q_{eq} 为活性炭平衡吸附量, kg/kg ; q_m 为活性炭饱和和吸附量, kg/kg 。

6) 吸附速率的线性推动力方程

$$\frac{\partial q^*}{\partial t} = k(q_{eq} - q^*). \quad (6)$$

式中 k 为传质系数, $1/\text{s}$ 。

7) 内外壁间流体的能量方程

$$\frac{d(m_{o,J} C_{py} T_{o,J})}{dt} = \dot{m}_o C_{py} T_{o,J-1} - \dot{m}_o C_{py} T_{o,J} - Q_{o,J}. \quad (7)$$

式中: $m_{o,J}$ 为微圆体内的流体质量, kg ; C_{py} 为水的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $T_{o,J}$ 为 J 点水的温度, K ; \dot{m}_o 为水的质量流量, kg/s ; $Q_{o,J}$ 为液体与壁面的对流换热功率, W 。

8) 内管管壁的能量方程

$$\frac{d(m_{w,J} C_{pw} T_{w,J})}{dt} = Q_{o,J} - Q_{l,J}. \quad (8)$$

式中: $m_{w,J}$ 为微圆体内的管壁质量, kg ; $T_{w,J}$ 为 J 点壁面的温度, K ; C_{pw} 为储罐壁热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

9) 壁面处的换热量

$$Q_{o,J} = h_{y,J} A_{o,J} (T_{o,J} - T_{w,J}), \quad (9)$$

$$Q_{l,J} = \lambda_e A_{l,J} \frac{(T_{w,J} - T_{out})}{\Delta r}. \quad (10)$$

式中: $A_{o,J}$ 为 J 点内管外侧的换热面积, m^2 ; $h_{y,J}$ 为 J 点的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_{out} 为紧挨壁面的控制容积温度, K 。

10) 储罐壁面处按第 3 类边界条件处理, 储罐中心处的温度为轴对称。

$$t = 0, P = P_E, T = T_1, T_w = T_1, \quad (11)$$

$$r = R_2, 0 \leq z \leq L, Q_{vR2} = 0, \quad (12)$$

$$0 \leq z \leq L, r = 0, t > 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (13)$$

式中： P_E 为储罐内初始压力，Pa； P_T 为脱附終了压力，Pa； T_1 为储罐内初始温度，K； T_w 为储罐壁面温度，K； R_2 为套管半径，m。

采用控制容积积分法对方程式(1)~(13)进行离散，用 Newton-Raphson 方法^[5-7]，用 MATLAB 编程进行求解，时间步长取 0.01 s，空间步长取 0.01 m。

2 算例分析

车用天然气储罐内吸附存有 $P_E = 3.5$ MPa，温度为 $T_1 = 293.15$ K 的天然气，脱附过程从 $P_E = 3.5$ MPa 开始到 $P_T = 0.16$ MPa 结束。以上海 Passat 轿车为计算实例，该车每百公里耗汽油量为 8L，在时速为 100 km/h 时，按热值相等计算，天然气的耗量为 $M = 1.315$ g/s^[3]。发动机出口水温度为 93 °C，流量为 100 L/min。计算中用到的数据见表 1。

表 1 模拟中用到的参数值

| 符号名称 | 数值 | 符号名称 | 数值 | 符号名称 | 数值 |
|-----------------|-------|-------------|---------|------------|------------------------|
| ε_1 | 0.74 | λ_e | 0.2 | R_2 | 0.17 |
| L | 1.0 | R_0 | 0.15 | K | 8 |
| C_{pg} | 2 250 | C_{ps} | 900 | R_1 | 0.16 |
| B_w | 0.01 | C_{pw} | 502 | Δr | 0.005 |
| M_g | 16.04 | P_T | 160 000 | ΔH | $-1.126 1 \times 10^6$ |
| ρ_b | 460 | R | 8 314.3 | ΔZ | 0.01 |

表 2 为只加热储罐外壁面时的脱附性能和传统脱附性能的对比。由表 2 分析可知，脱附过程中，发动机冷却水用于加热外壁面时，脱附量为 3.182 kg，是传统脱附量的 1.163 5 倍。同时，脱附效率也从 75.51% 提高到 87.85%，增加了储罐的利用率。吸附剂平均温度从 250.46 K 升高到 277.34 K。可见，车用发动机冷却水用于补充脱附过程的热量是可行的，可以增加脱附量。

图 2 为脱附終了时储罐径向温度分布，由图 2 可见，靠近储罐壁面处温度有很大改善，而内部的温降较大，吸附剂在径向方向上存在较大温度梯度。这是由于发动机冷却水只加热储罐的外壁面，而在储罐的中心处，热量没有得到及时补充，导致温降很大。

表 2 不同条件下的脱附性能

| 脱附条件 | 脱附质量/kg | 床层均温/K | 脱附效率/% | 吸附热/kJ |
|----------|---------|--------|--------|---------|
| 传统脱附 | 2.735 | 250.46 | 75.51 | 1 795.7 |
| 冷却水加热外壁面 | 3.182 | 277.34 | 87.85 | 2 293.1 |

图 3 是不同脱附时刻沿径向的温度分布，随着脱附的进行，由于吸热使吸附剂中心处温降较大，而由于壁面处发动机冷却水的加热，靠近壁面

处的温降较小。

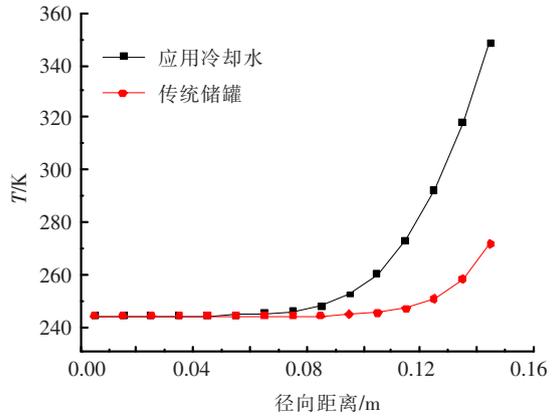


图 2 脱附終了时储罐的径向温度分布

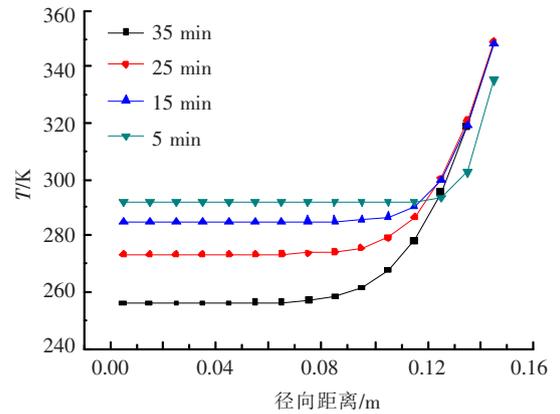


图 3 不同脱附时刻储罐径向温度

表 3 是运用发动机冷却水同时加热外壁面和内部布置不同管径的换热管的脱附性能分析。由表可知，内部换热管的管径越大，脱附終了时，床层的均温越大，管径的大小对脱附质量和脱附效率也有一定程度的改善。当内部换热管的直径分别为 0.02, 0.04, 0.06 m 时，脱附量分别为 3.202, 3.216, 3.201 kg，分别是传统脱附量的 1.170 7, 1.192 0, 1.170 4 倍。但并不是随管径的增加而增加。因为内部换热管的管径越大，占据储罐的有效容积也越大，一定程度地影响了罐内装填吸附剂的量。但是内部换热管的管径大，对改善床上的温度场有利。图 4 所示为不同管径下，脱附終了时的径向温度分布。在 3 种管径中，管径 $d = 0.04$ m 所对应的脱附质量和脱附效率最高。

图 5 为气相和吸附相质量随时间的变化曲线，可见脱附前半段，气相的气体释放较多，而在后半段，吸附相的气体释放的较多，这说明活性炭吸附剂在低压时具有较好的脱附特性。

图 6 是不同导热系数下，脱附終了时径向温度变化。当吸附剂的导热系数为 0.2 W/(m·K) 时，吸附剂在径向方向上存在较大温度梯度，这是因为，在脱附过程中，由于导热系数太小，无法将

外壁面处的热量传递到内部. 当导热系数从 $0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 增加到 $1.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 放气量从 3.18 kg 增加到 3.81 kg . 可见增加吸附剂的导热系数, 可大大增加脱附量. 同时, 吸附剂内部径向的温度梯度也有了明显改善.

表 3 不同管径下的脱附质量和床层均温

| 脱附条件 | 脱附质量/kg | 床层均温/K | 脱附效率/% | 吸附热/kJ |
|------------|---------|--------|--------|---------|
| $d = 0.02$ | 3.202 | 276.36 | 88.4 | 2 321.0 |
| $d = 0.04$ | 3.216 | 279.10 | 88.8 | 2 353.8 |
| $d = 0.06$ | 3.201 | 281.99 | 88.37 | 2 364.6 |

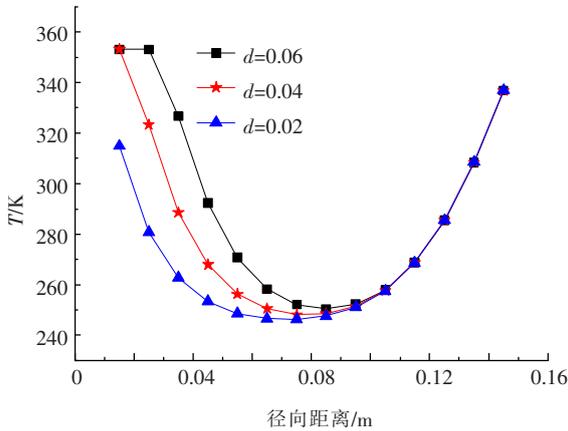


图 4 不同管径下脱附终了时的径向温度

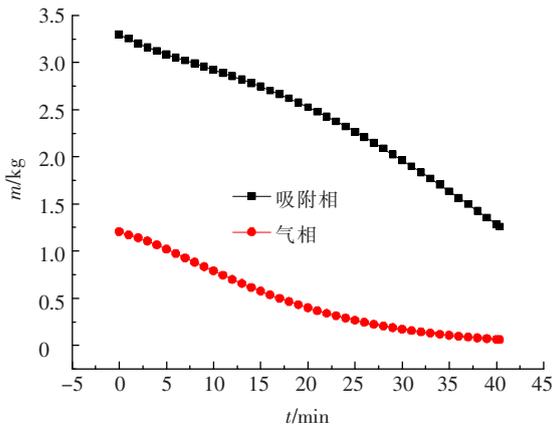


图 5 气相和吸附相质量随时间的变化

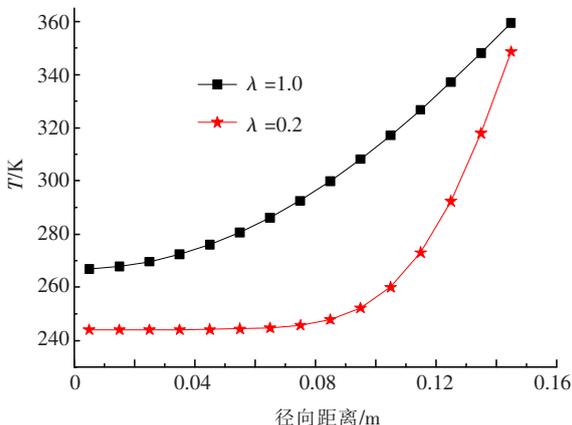


图 6 应用冷却水脱附终了时的径向温度

3 结 语

脱附放气过程中系统吸热降温, 降低了系统的脱附性能, 用发动机冷却水加热储罐, 以补充脱附需要的热量, 可以提高储罐温度, 改善储罐的温度场, 增加脱附量. 文中算例仅加热外壁面的脱附量比没有加热时传统脱附量增大了 1.163 5 倍. 当内壁面换热管直径为 0.04 m 时, 脱附量为传统脱附量的 1.192 0 倍. 增大吸附剂的导热系数也可增加脱附量, 当导热系数从 $0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 增加到 $1.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 放气量从 3.18 kg 增加到 3.81 kg .

参考文献:

- [1] FIRAS N, ROSLI M, AHMAD I. Dynamic delivery analysis of adsorptive natural gas storages at room temperature [J]. Fuel Processing Technology, 2007, 88 (4): 349 - 357.
- [2] FIRAS N, ROSLI M, MOHD R, *et al.* Thermal transient behavior of an ANG storage during dynamic discharge phase at room temperature [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(1): 55 - 62.
- [3] 卜宪标. 车用天然气吸附储存及热效应模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [4] SÁEZ A, TOLEDO M. Thermal effect of the adsorption heat on an adsorbed natural gas storage and transportation systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(13): 2617 - 2623.
- [5] CAVENATI S, GRANDE C, RODRIGUES E, *et al.* Separation of $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{N}_2$ mixtures by layered pressure swing adsorption for upgrade of natural gas [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(12): 3893 - 3906.
- [6] 王福军. 计算流体动力学分析 - CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 30 - 85.
- [7] NORDBOTEN J, AAVATSMARK I, EIGESTAD G. Monotonicity of control volume methods [J]. Numer Math, 2007, 106(2): 255 - 288.

(编辑 赵丽莹)