

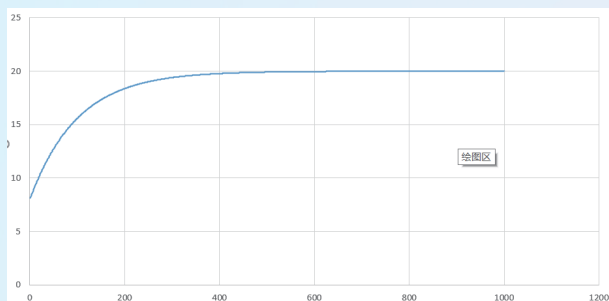


图3 牛顿冷却定律曲线图

则必然有 $T_s > T > T_o$ 。也就是说, 管道油温的起始温度 T_o 必然小于它任何时间吸收热量后的温度 T ; 且最后的温度 T 不可能比土壤温度 T_s 更高, 亦不能被升温至与土壤温度一样。

假设将密闭埋地管道内航油视为一整体 (T_o, P_o, V_o), 在向周围土壤吸收热量 Q 后变为 (T, P, V)。他们都符合物体状态方程^{[5]~[7]}, 即:

$$f(T_o, P_o, V_o) = f(T, P, V) = 0$$

密闭管道中航煤很难被压缩, 因此视航煤体积保持不变, 则 P 和 T 两个变量可以建立一偏微商关系, 即:

$$V = f(T, P)$$

由多元函数理论, 当发生 T 、 P 的微小变化时, 即:

$$dV = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T dP \quad \text{或者} \quad \frac{dV}{V} = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P dT + \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T dP \quad (6)$$

同理当 T 、 V 作为独立状态参量时, 则:

$$dp = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V dT + \left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T dV \quad \text{或者} \quad \frac{dp}{p} = \frac{1}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V dT + \frac{1}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T dV \quad (7)$$

下面, 我们来了解下流体热力学中的两个参数: 体积膨胀系数、热压力系数。

体积膨胀系数^{[8]~[10]}: 恒压下改变单位温度时物体体积的变化率为该物体的体积膨胀系数(热膨胀系数), 即:

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

热压力系数 β : 恒体积下改变单位温度时物体压力的变化率为该物体的热压力系数, 即:

$$\beta = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V$$

其中 β 仅与液体的摩尔体积、液体分子大小有关系, 即是与密度的函数关系, 与温度无关^[11]。则式(7)可写成:

$$dP = \beta_{dT} + \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T dV \quad (8)$$

因为航煤是一种混合物, 在传热学中只能用化学纯物质按比例混合来实验并通过测量来确定体积膨胀系数、热压力系数从而得到最后的物态方程。

而对于航煤, 当温度和压强变化时体积变化都很小, 则此时虽然管道与航煤都会因吸收土壤热量而膨胀, 但是管道的线膨胀系数(钢铁 α 约 $1.2 \times 10^{-5} K^{-1}$) 比航煤(航煤 α 约 $1.0 \times 10^{-3} K^{-1}$) 小 2 个数量级, 更不容易压缩和膨胀, 即密闭管道内航煤受热无法发生膨胀, 视 $V = V_o$, 则 $dV = 0$ 。

结合式(4)、(8)可得:

$$dP = \beta_{dT} = -K^\beta (T - T_s) dt \quad (9)$$

实验表明, 在恒定的体积下, 液体的压力与温度近似地呈直线关系^[12], 特别是在压力不太高的范围内, 更是一条很好的直线, 则 β 为一常数。由式(9)可看出 ΔP 与 ΔT 呈线性关系, 因此管道吸热过程中, 管道中航煤的压力变化曲线也满足牛顿冷却定律。从自控室观察到当天最后一班航班充油结束后, 压力的变化曲线符合其相关规律。

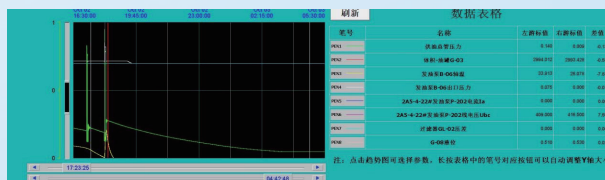


图4 2021-11-09 夜晚油库总管压变化图

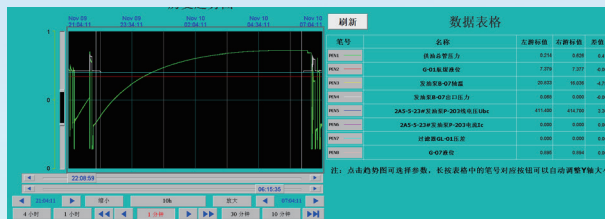


图5 2021-11-16 夜晚油库总管压变化图