

泡沫玻璃隔热油管和真空隔热油管 隔热效果的数值模拟分析

周成龙¹, 徐永香¹, 盛宏至¹, 朱国金²

(1. 中国科学院力学研究所; 2. 中海油研究总院, 北京 100190)

摘要: 本文通过对目前常用的真空隔热油管与提出的新方案——泡沫玻璃隔热油管保温效果的数值模拟对比, 不同厚度泡沫玻璃隔热油管隔热效果对比以及泡沫玻璃隔热油管氢渗后保温效果和真空隔热油管氢渗后保温效果对比, 得出结论: 保温层在 16mm 左右的泡沫玻璃隔热油管和真空隔热油管保温效果相当, 但是当发生一定量的氢渗以后, 泡沫玻璃隔热油管的保温效果远远优于真空隔热油管。

关键词: 保温油管; 泡沫玻璃, 真空; 数值模拟

引言

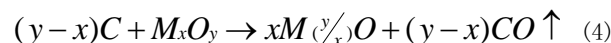
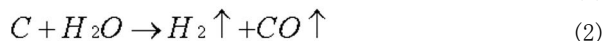
目前, 海上稠油热采所采用的隔热油管主要为真空隔热油管, 该类型的隔热油管在使用初期表现出了出色的隔热性能。然而^[1], 在使用一段时间以后, 真空隔热油管会因为氢渗导致隔热油管真空度降低, 又由于氢气的导热性能极好, 常压下在工作温度 350℃ 时氢气的导热系数达到了 0.327W/(m·k), 远远高于隔热油管的最低要求 0.08 W/(m·k), 因此, 导致真空隔热油管的使用寿命很短, 难以满足工程需要。

对于真空隔热油管, 氢渗是不可避免的, 因此, 为了提高隔热油管的使用寿命, 本文提出了采用在内管和外套管之间填充闭孔泡沫玻璃保温材料的新途径。氢气在渗入泡沫玻璃以后, 要穿过一层层的气泡, 很大程度上限制了氢气的传热性能。

泡沫玻璃是由一定量的碎玻璃、助溶剂、发泡剂、改性剂和促进剂等, 经过粉碎混合均匀形成配合料, 经过预热、熔融、发泡、退火等工艺制成的, 有许多球形密封的或相互链接的微孔结构的无机材料, 属于多孔玻璃的一种^[2,3], 是均匀的气相和固相体系, 气泡直径在 0.1~5mm 之间, 占总体积的 80%~95%, 表观密度约为 50~120kg/m³^[4-8]。由于泡沫玻璃制造成本低且加工程序简单, 同时实现了废弃玻璃的循环利用^[9], 使其在石油化工、建筑和化学工业等方面得到了广泛应用。

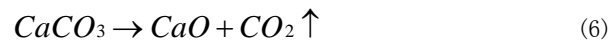
1 泡沫玻璃发泡机理

对于泡沫玻璃^[10], 根据发泡剂的发泡机理不同, 可将发泡剂分为氧化型发泡剂和分解型发泡剂, 两种类型的典型代表分别为炭黑和碳酸钙。氧化型反应机理:



注: 式 (4) 中 M 为 Fe、Mn 等过渡金属氧化物, 式 (5) 会生成 SO₂、H₂S 等刺激气味气体。

分解型反应机理:



可见, 对于氧化型反应, CO₂ 是泡沫玻璃气泡内的重要组成成分, 而对于分解型反应, CO₂ 是泡沫玻璃气泡内的唯一的组成成分。因此, 本文假设泡沫玻璃气泡内的初始成分为纯二氧化碳。

2 相关材料的导热系数

由传热学知识可知, 在传热模型一定的情况下, 热流仪与传热物质的导热系数有关。因此, 为了分析真空隔热油管和泡沫玻璃隔热油管的热流值, 需要先查明相关物质的导热系数。物质的导热系数随温度变化较明显。

2.1 钢材的导热系数

基金项目: 国家重大专项 2011ZX05024-005-005 海上稠油热采提高热效率关键技术研究

在缺少某些材料的参数值的时候,常用的方法是寻找一个已知的与这种材料成分相似的材料参数值^[11-13]。对于钢材,含碳量接近的钢种,他们的导热系数及其变化规律也接近^[14]。经查明,隔热油管常用的N80型钢材碳含量在0.4%左右,由此便可查得其导热系数随温度的变化,在28~500℃范围内,钢材导热系数随温度的增加而减小。

2.2 泡沫玻璃中的玻璃成分导热系数

泡沫玻璃的原材料碎玻璃中SiO₂的质量分数一般为72%左右^[15,16],占绝大多数,因此,泡沫玻璃中的固体成分假设为石英玻璃,按照石英玻璃的导热系数进行计算。金太权通过实验测出了0~500℃范围内石英玻璃导热系数随温度的变化^[17]。

2.3 泡沫玻璃中的气体成分导热系数

2.3.1 单一气体成分的导热系数

对计算结果影响最大的是闭孔玻璃泡中的气体成分的导热系数,根据童景山^[18]提出的计算常压下气体导热系数的经验公式,若已知T₁温度下的导热系数为λ_n,则可由如下经验公式来预计另一温度T₂下的导热系数:

$$\frac{\lambda_{T_2}}{\lambda_{T_1}} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^n \quad (8)$$

常使用0℃时的导热系数来预计另一温度下的导热系数,此时,

$$\frac{\lambda}{\lambda^0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \quad (9)$$

式中,λ⁰表示0℃时气体导热系数;λ表示温度为T(单位为K)时的导热系数;T₀=273.15K。氢气0℃时导热系数为0.172W/(m·K),n取0.78;二氧化碳0℃时导热

系数为0.0149W/(m·K),n取1.23,因此,可以求得氢气导热系数与温度的关系式为:

$$\lambda_{H_2} = 0.172 \left(\frac{T}{273.15} \right)^{0.78} \quad (10)$$

二氧化碳导热系数与温度的关系式为:

$$\lambda_{CO_2} = 0.0149 \left(\frac{T}{273.15} \right)^{1.23} \quad (11)$$

化学化工物性数据手册(无机卷)^[19]中也给出了常压下(约0.1MPa)氢气和二氧化碳的导热系数随温度的变化值,如下面两个表:

表1 化学化工物性数据手册(无机卷)中氢气和二氧化碳导热系数随温度的变化

温度(℃)	λ _{H₂} (W/(m·K))	λ _{CO₂} (W/(m·K))
0	0.1720	0.01456
15	0.1790	0.01569
100	0.2196	0.02259
200	0.2638	0.03090
300	0.3068	0.0379
400	0.3469	0.0456

拟合NIST数据库也可以得到氢气、二氧化碳导热系数随温度的变化。以下是整理数据分别得到的采用经验公式、拟合NIST数据库数据以及化学化工物性数据手册(无机卷)中的H₂、CO₂的导热系数随温度的变化图:

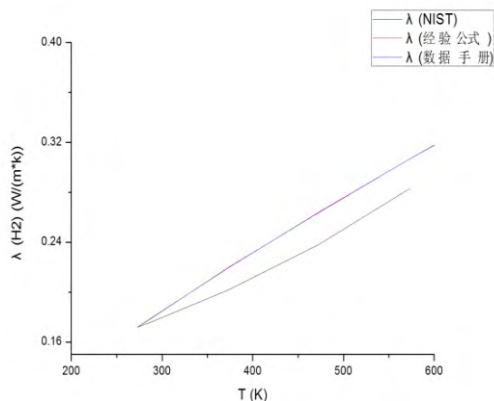


图1 氢气导热系数

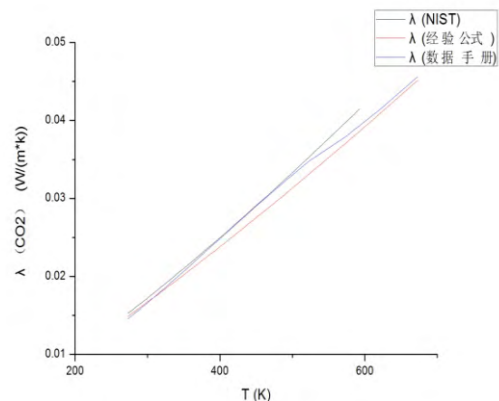


图2 二氧化碳导热系数

通过对比以上两图可以发现：(1)在温度较高的段 NIST 拟合数据误差会较大，这主要是由于 NIST 数据库中的实验数据大多都是 200℃ 以下的实验数据，200℃ 以上的实验数据极少；(2)分析发现 CO₂ 导热系数三组数据之间误差很小，说明了 CO₂ 导热系数数据的可信性，H₂ 导热系数中采用经验公式和数据手册中得到的数据非常接近，采用 NIST 数据库拟合的数据相比之下差别就较大，因此，采用 NIST 数据库拟合得到的氢气导热系数数据在高温段可信度不高。因此，采用经验公式 (8) 得到的氢气和二氧化碳的导热系数具有

较高的可信度。

2.3.2 混合气体的导热系数

采用 Brokaw 经验式计算混合气体导热系数，对于二元体系^[18]：

$$\lambda_m = q\lambda_{mL} + (1-q)\lambda_{mR} \quad (12)$$

$$\text{其中, } \lambda_{mL} = y_1\lambda_1 + y_2\lambda_2 \quad (13)$$

$$\text{和 } \frac{1}{\lambda_{mR}} = \frac{y_1}{\lambda_1} + \frac{y_2}{\lambda_2} \quad (14)$$

q 随混合物中轻组分的组成而变，可由下表查出：

表 2 q 随混合物中轻组分的组成而变化的情况

轻组分 浓度	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	1
q	0.32	0.34	0.37	0.39	0.42	0.46	0.5	0.55	0.61	0.69	0.74	0.8

根据该公式，结合公式 (10)、(11) 计算得到了不同浓度的氢气和二氧化碳混合气体的导热系数随温度的变化，如下图所示：

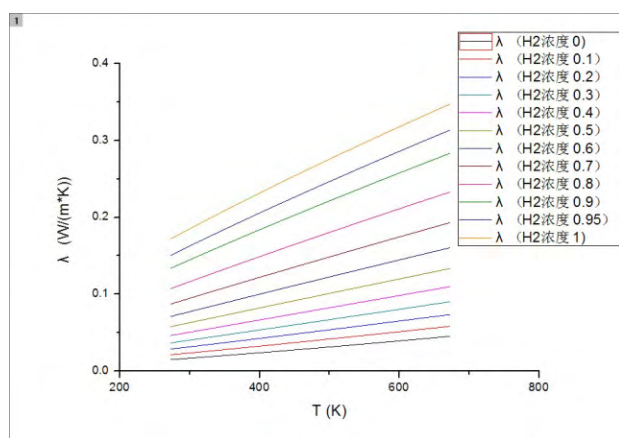


图 3 不同浓度的氢气和二氧化碳混合气体导热系数

为了验证该数据的准确性，参考 T S ederberg 等给出的 25℃ 时不同浓度的氢气和二氧化碳的混合物的导热系数的实验值^[20]，与 Brokaw 经验式在 25℃ 时的计算值进行对比，对比数据如下：

表 3 25℃ 时不同浓度的氢气和二氧化碳混合物的导热系数实验值与计算值

氢气浓度	实验值	Brokaw 经验式
0.047	0.01855	0.01978
0.193	0.03173	0.03015
0.496	0.06335	0.06045
0.906	0.14660	0.14805
0.964	0.16841	0.16767

通过以上对比发现利用 Brokaw 经验式计算的氢气和二氧化碳混合气体的导热系数与实验值吻合很好，又克服了实验值只提供了低温下极有限数据的缺点。

2.3.3 压强对气体导热系数的影响

考虑到泡沫玻璃高温发泡时要克服固体物质分子之间的分子力，因此，闭孔玻璃泡内的二氧化碳气体可能压强较大，当然，随着冷却以后气泡内的压强会有一定减小。现假设泡沫玻璃气泡内压强是 1MPa，气体为纯 CO₂，则由化学化工物性数据手册可得到压强为 1MPa 时 CO₂ 导热系数随温度变化的规律，如下表^[19]：

表 4 压强为 1MPa 时 CO₂ 导热系数随温度变化的规律

温度 (°C)	20	25	30	35	40	45	50	55	60
λ (W/(m·K))	0.01672	0.01708	0.01746	0.01779	0.01819	0.01857	0.01890	0.01930	0.01972

温度 (°C)	65	70	75	80	85	90	95	100	110
Δ (W/(m ² *K))	0.020	0.020	0.020	0.021	0.021	0.022	0.022	0.023	0.023
温度 (°C)	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Δ (W/(m ² *K))	0.024	0.025	0.026	0.027	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031
温度 (°C)	210	220	230	240	250	300	350	400	450
Δ (W/(m ² *K))	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	0.038	0.041	0.045	0.049

当发生氢渗以后,存在于泡沫玻璃气泡中的氢含量相对于二氧化碳来说较少,又由于在低压和常压下压强对气体导热系数的影响很小,因此,氢气导热系数按照常压下导热系数计算即可。

3 数值模拟及计算结果分析

3.1 真空隔热油管失效前后热流密度及不同厚度泡沫玻璃

隔热油管热流密度

首先,用 ANSYS 软件计算出了常用的保温层为 5 m 的真空隔热管失效前和失效后的热流密度,以及根据泡沫玻璃生产厂家提供的泡沫玻璃整体导热系数计算出了不同厚度保温层下泡沫玻璃隔热管的热流密度,如下表所示:

表 5 不同工况下保温管宏观热流密度

工况	真空隔热管失效前	真空隔热管失效后	泡沫玻璃隔热管 (保温层 5mm)	泡沫玻璃隔热管 (保温层 10mm)	泡沫玻璃隔热管 (保温层 15mm)	泡沫玻璃隔热管 (保温层 16mm)	泡沫玻璃隔热管 (保温层 17mm)
热流密度 (W/m ²)	1149	13480	3920	1973	1316	1227	1155

由表 5 可知,真空保温管氢渗失效后的热流密度非常大,是失效前的 10 倍以上,而泡沫玻璃隔热管在保温层较薄的时候热流密度也比较大,但随着保温层厚度的增加,其热流密度逐渐减小,当泡沫玻璃隔热管保温层厚度达到 16mm 时,其热流密度实际上已经与真空隔热管失效前热流密度相当。因此,可以得出结论,泡沫玻璃隔热管保温层厚

度选择 16mm 左右是较理想的选择。

3.2 计算模型的确定

一般泡沫玻璃外管的孔径小于 1mm,壁厚在 10~30 μm 为佳^[10],考虑到本文模型将原本为近似球形的泡沫玻璃泡假设为二维的正方形,因此,为了补偿该假设造成的计算误差,假设壁厚为 30 μm 。

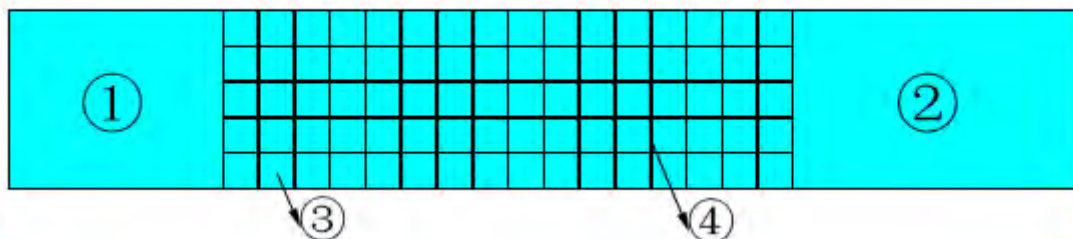


图 4 泡沫玻璃隔热油管二维计算模型

建立如图 4 所示的闭孔泡沫玻璃隔热油管二维计算模型,其中区域①表示内管,区域②表示外管,区域③表示泡沫玻璃材料内的气泡,区域④表示泡沫玻璃材料内的玻璃框架,根据实际工作环境,内管内边界设为 350°C 常温,外管

外边界设为 100°C 常温,区域③真实情况下为圆球形或椭圆形,这里为了建模和计算方便,假设其为正方形。气泡之间实际上有 30 μm 的窄缝,由于与正方形边长 1mm 相比很小,因此很难看到。

3.3 泡沫玻璃泡内二氧化碳气体在不同压强下保温管的热流密度

选择保温层厚度 16mm 作为图 4 中模型的保温层厚度，分别计算了泡沫玻璃泡(结构③)中 CO₂ 压强为常压和 1MPa 高压时的热流密度，常压下热流密度为 1265 W/m²，1MPa 高压下热流密度为 1269 W/m²，发现在压强小于 10 个大气压的范围内，压强对泡沫玻璃保温管热流密度的影响极小，可以忽略。采用图 4 模型算出的热流密度值(1265 W/m²)与采用泡沫玻璃的宏观导热系数直接算出的热流密度(1227 W/m²)误差在 5% 以内，证明了该模型的合理性。

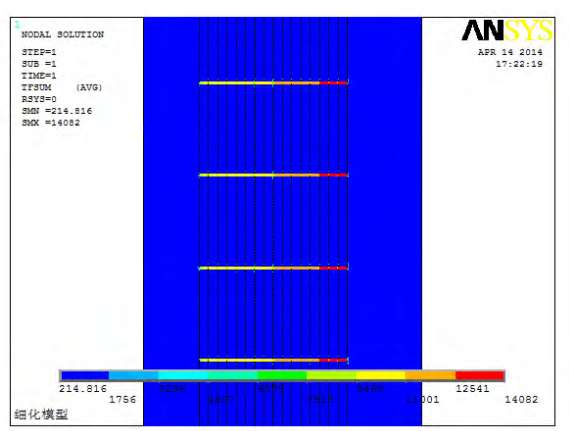


图 5 泡沫玻璃隔热管模型在 Y 轴方向扩大十倍后的热流分布图

如图 5 所示为泡沫玻璃隔热管内充常压 CO₂ 时的热流密度分布图，由于玻璃夹层仅有 30 μm，正常图形难以看出玻璃夹层的热流密度分布，因此选择在 Y 轴方向扩大十倍后的热流分布图。虽然在泡沫玻璃层热流密度分布不均，难以看出热流密度的平均值，但是在内管和外管区域，热流值为同一数值，分析知该值即为泡沫玻璃管热流密度的平均值。

3.4 发生氢渗后在不同氢气含量下泡沫玻璃隔热油管热流密度

进一步利用氢气和二氧化碳混合气体导热系数可算出当泡沫玻璃泡中进入一定量的氢气后泡沫玻璃隔热管的热流密度，计算结果如下表所示：

表 6 泡沫玻璃隔热管渗入不同氢气含量下的热流密度

氢气含量 (%)	10	20	30	40
热流密度 (W/m ²)	1407	1593	1796	2023

由表 6 可以看出，渗入一定量的氢气后，虽然泡沫玻璃隔热管的热流密度有所上升，但上升幅度很小。假设原来泡

沫玻璃泡中为压强 1MPa 的 CO₂，当渗入一个大气压的氢气后，氢气含量不足 10%，此时泡沫玻璃隔热管的热流密度约为 1400 W/m²，但是，当真空隔热管渗入一个大气压的氢气后，其热流密度在一万以上，已经失效。且由于泡沫玻璃隔热管内部压强本来就较大，因此，氢渗过程相比真空隔热管将更加缓慢，从而可以大幅度提高隔热管的使用寿命。

采用泡沫玻璃隔热油管不足之处是需要较厚的保温层，增加了隔热油管的重量和体积，其优势是大幅度削弱了氢渗对隔热油管保温效果的影响，从而可以大大延长保温油管的使用寿命。

4 误差分析：

(1) 本文采用二维模型进行计算，且将泡沫玻璃近似球形的闭孔泡沫玻璃泡近似为正方形，会引入一定的误差；

(2) 本文对泡沫玻璃的固体部分导热系数近似假设为石英玻璃的导热系数，与实际情况略有差别，实际上泡沫玻璃在加工过程中会溶入少量金属元素以及其他元素，此假设会导致计算所得的泡沫玻璃热流密度与实际情况稍有偏差；

(3) 实际上泡沫玻璃内部除了含有 CO₂ 气体以外，还会含有少量 CO 气体及其他气体，也会导致计算结果与实际情况有所偏差；

5 结论

通过数值模拟对真空隔热油管和泡沫玻璃隔热油管热流密度的分析我们不难发现，在氢渗以前，真空隔热油管和泡沫玻璃隔热油管均可达到良好的保温效果，然而，当发生氢渗以后，真空隔热油管热流密度急剧增加，导致真空隔热油管失效，泡沫玻璃隔热油管发生氢渗以后热流密度增加并不明显。因此，可以考虑采用泡沫玻璃隔热油管取代真空隔热油管以达到在满足良好的保温效果的同时有效延长油管使用寿命的目的。

参考文献

- [1] 邓晶, 周成龙, 徐永香, 等. 真空隔热油管隔热性能失效机理分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012(12): 253-254.
- [2] 王承遇, 陶瑛. 玻璃材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [3] 张剑波, 吴勇生. 泡沫玻璃的研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2010(04): 25-30.
- [4] 田英良, 屈培元. 国内外泡沫玻璃产业发展沿革及趋势[J]. 玻璃与搪瓷, 2002, 30(5): 48.
- [5] 田英良, 邹玉林, 赵飞, 等. 高性能泡沫玻璃的研究[J]. 北京工业大学学报, 2001, 27(2): 247.