

[环保·安全]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2012.06.029

PE埋地管道气密性试验过程中 瞬态温度场的数值模拟

祝新伟¹, 卢志明², 徐松强³, 沈美华¹, 杜斌康²

(1. 嘉兴市特种设备检测院, 浙江 嘉兴 314001; 2. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014;
3. 嘉兴市燃气集团有限公司, 浙江 嘉兴 314033)

摘要:建立了气密性试验过程中PE埋地管道的传热模型,采用有限元软件数值模拟方法,对埋地管道和土壤系统的温度场分布进行了瞬态数值模拟分析。比较了不同管内介质温度对周围温度场的影响。结果表明,在气密性试验开始时,管内气体温度急剧下降,30 min后管内外温度基本达到平衡,管内气体温度保持恒定;随着管内气体温度升高,管内外温度达到平衡所需要的时间增加,且土壤受管内气体温度影响范围增大。图5表2参10

关键词:埋地管道;气密性试验;温度场;数值模拟

中图分类号:TE832;TP391.9 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2012)06-0105-05

Numerical Simulation of the Transient Temperature Field for Buried PE Pipeline During the Air-Tight Test

ZHU Xinwei¹, LU Zhiming², XU Songqiang³, SHEN Meihua¹, DU Binkang²

(1. Jiaxing Special Equipment Inspection Institute, Jiaxing 314001, Zhejiang, China;

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology Hangzhou 310014, China;

3. Jiaxing Gas Group Co., Ltd., Jiaxing 314033, Zhejiang, China)

Abstract: The paper set up heat transfer model of the PE buried pipeline during the air-tight test, adopted finite element software transient numerical simulation analysis for the temperature distribution of buried pipeline and earth system. Compared the influence of medium temperature in different tubes on temperature field around. The results show that at the beginning of gas tight test, the temperature in the pipe drops sharply, after 30 minutes the temperature of inner and outside of the tube reach balance basically, the gas temperature of inner tube keeps constant. With gas temperature of inner tube rises, the the time for reaching balance of inner and outside of the tube temperature will increasing, as well as the influence scope of inner tube gas temperature on earth is increased. [Ch, 5 fig. 2 tab. 10 ref.]

Key words: buried pipeline; air-tight test; temperature field; numerical simulation

0 引言

埋地管道运输油气在国民经济中占有重要的地位,而管道发生泄漏事故极其危险,除了损失油气产品之外,还会酿成爆炸或火灾事故,严重威胁管道沿线国家和人民的生命财产安全^[1]。因此,管道的气密性检测是管道生产管理中的重要环节。但实际检测过程

中,管内压力随温度变化而变化,因此,即使管道没有发生泄漏,也会由于温度变化而产生压降,导致无法准确判断管道的气密性。

通过建立土壤和管道的物理模型,实际模拟温度场随时间的变化,得到管内介质不同时刻的温度分布,可以准确地预测管道内介质由于温降造成的压降,有

收稿日期:2012-08-03;修回日期:2012-08-27

基金项目:国家质检总局科技计划项目(2011QK146)

专利项目:嘉兴市特种设备检测院,浙江工业大学,嘉兴市燃气集团有限公司.埋地燃气管道严密性试验方法和系统(201120439156.1)

作者简介:祝新伟(1967),男,浙江嘉兴人,高级工程师,主要从事压力容器安全技术研究。E-mail:zhuxinwei@126.com

利于正确判断管道的气密性。国内外学者在埋地管道温度场方面进行了大量的研究工作,并取得了一定的进展。W. K. Song^[2]利用有限容积法对埋设在不同介质下的长输管道进行了传热分析计算,并对管道周围温度场的变化情况进行了实验测试,实验结果对埋地管道温度场计算具有参考意义。叶志伟^[3]采用ANSYS的热分析功能对埋地管道预热过程中管道周围土壤温度场和管内油品温度进行数值计算,得出了不同时刻埋地管道周围土壤温度的分布和管内油品沿程温度变化情况。B. YU^[4]总结了将二维半无限大模型简化为二维矩形模型的两种方法,即数学推导方法和热力影响区域假设法,建立了二维整体模型,采用FLUENT模拟了运行过程中埋地热油管道的传热情况,同时研究了影响埋地管道温度场变化的因素。

在以往的研究中,主要是针对埋地管道运行过程中的温度场分布,具有传热量大、传热时间长、受气温周期变化影响等特点。文中主要针对埋地管道气密性试验的静态降温过程,通过有限元瞬态热分析,模拟土壤温度场随时间的变化情况,为气密性试验提供理论指导。

1 埋地管道物理模型的建立^[5]

研究的试验系统,管道尺寸为 $\varnothing 110 \text{ mm} \times \varnothing 10 \text{ mm}$,埋深为1 m,气密性试验管内空气的初始温度为 50°C ,土壤温度为 20°C ,管道材质为聚乙烯管(PE),密度为 ρ_c ,比热容为 C_c ,导热系数为 λ_c ,土壤与试验气体物性由现场实验测量获得,气密性试验时间为24 h。

1.1 物理模型的简化

土壤与管道的物理性质,管道埋地深度,管道内气体的温度以及气体的物理性质、管道直径的大小与厚度,管道与土壤之间接触的紧密程度,都是影响管道周围温度场分布的因素^[6]。鉴于埋管周围温度场计算的复杂性,为了便于理论分析和模拟作如下一些假设^[7]:

- 1) 忽略土壤中因水分迁移而引起的热迁移,认为埋管与土壤之间只通过纯导热进行传热;
- 2) 埋管与土壤接触完好,忽略接触热阻;
- 3) 认为土壤是均质的,即土壤各向导热系数相同;
- 4) 由于气密性检测时,埋管内打入的气体与土壤的温差较小,且空气的密度、比热均远小于土壤,因此,假设距离埋管0.5 m处不存在水平方向的热流;
- 5) 气密性检测时间为24 h,忽略昼夜温差对地下1 m处的影响,即认为埋管处于恒温的土壤中。

根据以上假设建立起管道周围土壤温度场的物理

模型,如图1所示,图中A点为管道中心;B点为管道内壁;C点为管道外壁;D点为近管壁处土壤;E点为远处土壤。

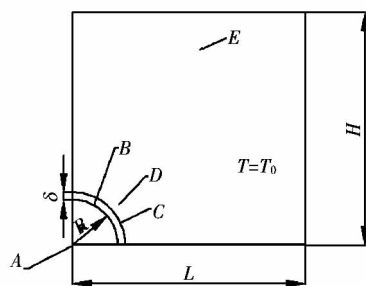


图1 埋地管道温度场的简化模型

Figure 1 Simplified temperature field model of buried pipeline

由于整个土壤温度场关于管道中心左右对称,故只需计算管道一侧的温度场即可知道整个土壤温度场的分布。又由假设4)和5)可知,管道内气体所含热量较小,因此热力影响区范围也比较小,故可假设管道处于温度均匀分布的土壤中,地表温度的昼夜变化不影响地下1米处的温度分布^[8],可将模型继续简化成1/4模型。

1.2 传热方程

传热的3种基本方式为热传导、热辐射和热对流,文中所研究的模型的传热方式主要是热传导和热对流。热传导是指不同温度的物体接触时所发生的热能传递现象,土壤、管壁以及土壤与管壁之间的传热方式为热传导;热对流是指流体流过另一物体表面时所发生的热交换,管壁与空气、土壤与大气之间的传热属于热对流。热传导与热对流的导热微分方程式如下^[9]:

1) 土壤热传导

$$\frac{\partial}{\partial X}(\lambda_t \frac{\partial T_t}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y}(\lambda_t \frac{\partial T_t}{\partial Y}) = \rho_t C_t \frac{\partial T_t}{\partial \tau} (\tau > 0);$$

2) 管壁热传导

$$\frac{\partial}{\partial X}(\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y}(\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial Y}) = \rho_c C_c \frac{\partial T_c}{\partial \tau} (\tau > 0);$$

3) $X = L$ 或 $Y = H$ 边界上,由假设4)和5)可知,水平方向距离管道 L 或深度方向 H 处,不存在热流,故 $X = L$ 和 $Y = H$ 处的边界条件均为 $T = T_0$;

4) $r = R$ 处,即管壁与空气之间的热对流

$$-\lambda_c (\frac{\partial T_c}{\partial r})_{r=R} = \alpha (T_c|_{r=R} - T_w);$$

5) $r = R + \delta$ 处,即土壤与管壁之间热传导

$$\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial r}|_{r=R+\delta} = \lambda_t \frac{\partial T_t}{\partial r}|_{r=R+\delta}$$

式中: τ —运行时间/s;

T_i —任意时刻土壤温度/℃;

λ_i —土壤导热系数/[W·(m·℃)⁻¹];

ρ_i —土壤密度/(kg·m⁻³);

C_i —土壤比热容/[J·(kg·℃)⁻¹];

T_c —任意时刻管壁温度/℃;

λ_c —管子导热系数/[W·(m·℃)⁻¹];

ρ_c —管子密度/(kg·m⁻³);

C_c —管子比热容/[J·(kg·℃)⁻¹];

T_w —任意时刻管内气体温度/℃;

α —土壤自然对流换热系数/[W·(m²·℃)⁻¹]。

2 温度场的数值模拟

运用有限元软件瞬态传热分析功能,通过对模型几何形状的建立,以及初始条件的确立和边界条件的加载,对埋地管道温度场进行求解计算。

其中,有限元网格划分是进行数值模拟分析至关重要的一步,它直接影响着后续数值计算分析结果的精确性。建立土壤与管道的模型后,网格划分可分为3个部分进行:土壤、管壁和管内空间。由于传热主要发生在管子附近,故采用 Spacing Ratio 功能将局部网格细化^[10],网格划分结果如图2所示。

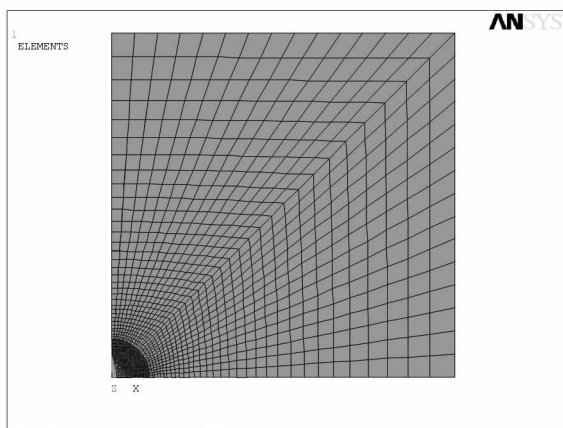


图2 模型网格划分结果

Figure 2 Mesh result of the model

有限元分析的主要目的是检查结构或构件在一定载荷条件下的响应。因此,在分析中制定合适的载荷条件是关键的一步,加载方式如下:

1) 土壤温度场分析为瞬态热分析,需要知道管道和土壤的初始温度,可由实测获得。此处为了简化,认为管道初始与土壤具有一致的温度。并且认为管道周围土壤的温度在短时间内不受昼夜温度变化的影响,即土壤温度均匀分布。

2) 施加对流边界条件。根据管道温度场模型,应在管内壁施加对流边界条件。

3) 施加温度载荷。在土壤、管道及管内介质分别施加温度载荷。

4) 设定运行时间及载荷步骤进行求解。

3 模拟结果分析

3.1 温度场随时间的变化

管内介质温度为50℃时,土壤温度场在不同时刻的温度分布如图3所示。

由图3不同时刻土壤温度场的分布情况可以看出,最高温度在管道中心,最低温度在远处土壤,管内介质温度基本分布均匀;随着传热过程的进行,温度场的最高温度逐渐降低;同时,管道对土壤温度场的影响范围随时间逐渐增大。时间为1 min时,影响区域基本在管外壁附近;到19 min时,影响范围已经达到约一倍管径的区域;传热达到平衡时,管道对土壤温度的影响范围约为0.117 m;但相对于土壤的尺寸,管外土壤温度的变化主要是集中在管道周围一个不大的区域内,而远端土壤温度基本不受影响,说明管内介质含热量较小,这是因为空气本身的密度和热容量远小于土壤,而且气密性试验过程中,管内空气不是恒热源,总热量是恒定的。

3.2 管道周围温度的分布

分别取管道中心A、管道内壁B、管道外壁C、管道附近土壤D及远离管道的土壤E等5个点(见图1),画出它们各点处温度随时间的变化曲线,如图4所示。

由图4可以看出,管道中心温度与管道内壁温度基本相等,管道中心温度初始急剧下降,当中心温度下降到与管道外壁相当时,中心温度下降速度减慢,这是因为管道中心与外界温差减小,传热速度降低。从温度曲线图4可以清楚地看到,管道外壁与近管壁处土壤的温度一开始升高,然后缓慢降低直至达到平衡;而远管壁处土壤的温度基本保持不变。

3.3 管内介质温度对土壤温度场的影响

分别取管内试验温度为30℃、40℃、50℃和60℃,画出管道中心温度变化曲线,如图5所示。

由图5可以看出,管内温度越高,温度下降速度越快,前3 min的温度变化最明显,这是因为初始温差大,降温速度更快;温度越高,达到平衡所需要的时间越多,不同试验温度下,达到平衡所需时间如表1所示,达到平衡时,管内温度与外界温度一致,管内温度基本不变。

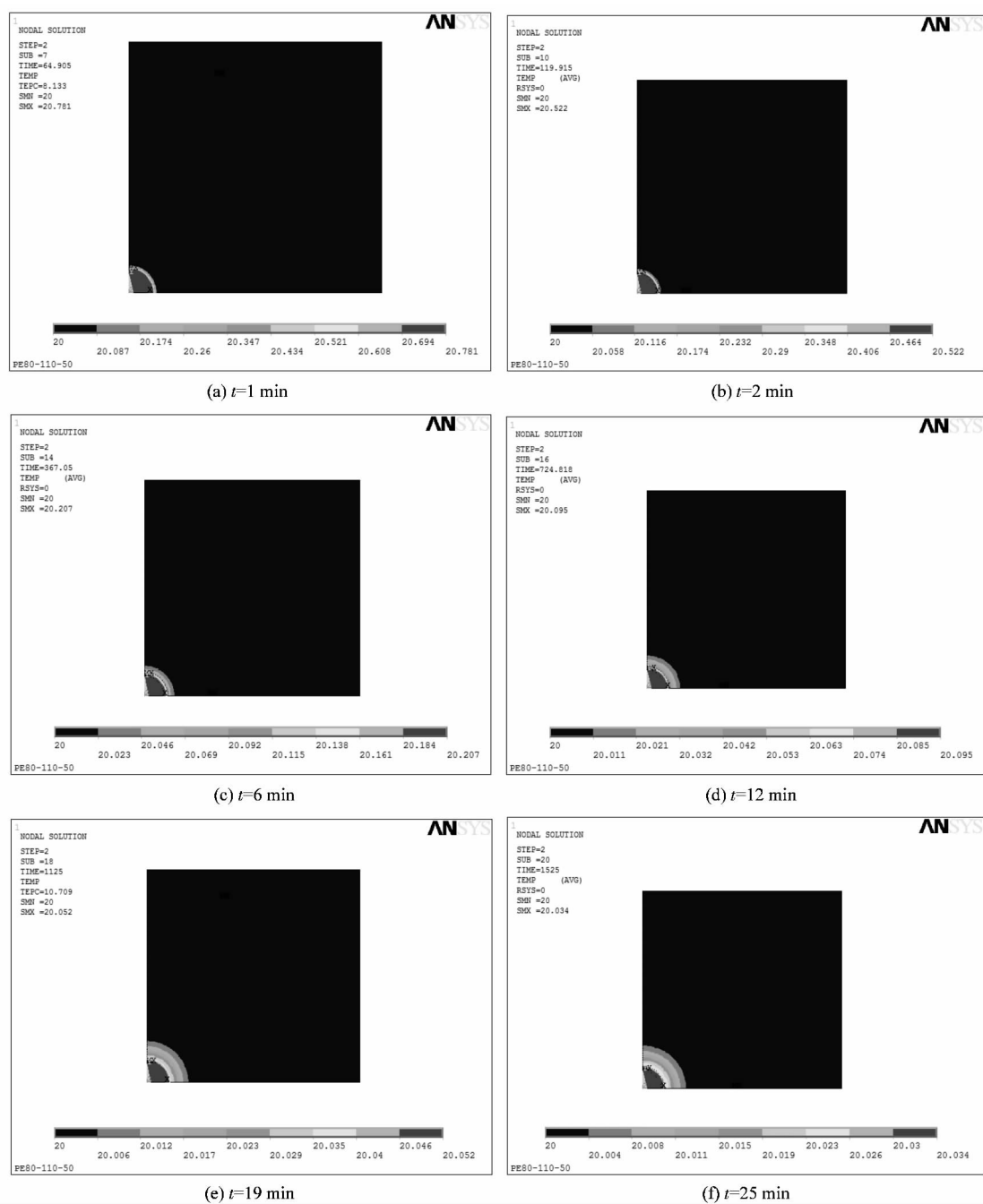


图 3 不同时刻土壤温度场的分布情况

Figure 3 Temperature distribution of soil in different time

表 1 不同试验温度下达到平衡所需时间

Table 1 Time needed for balance of different testing temperature

试验温度 $T/^\circ\text{C}$	时间 t/min	试验温度 $T/^\circ\text{C}$	时间 t/min
30	10	50	25
40	15	60	30

不同试验温度对土壤温度场的影响范围如表 2 所示。

表 2 不同试验温度对土壤温度场的影响范围

Table 2 Influenced range of different testing temperature

试验温度 $T/^\circ\text{C}$	温度场影响范围 d/mm	试验温度 $T/^\circ\text{C}$	温度场影响范围 d/mm
30	91.9	50	117.5
40	98.3	60	125.0

试验温度越高,影响范围越大,影响范围与试验温度基本成正比。温度场的影响范围基本上与管径相

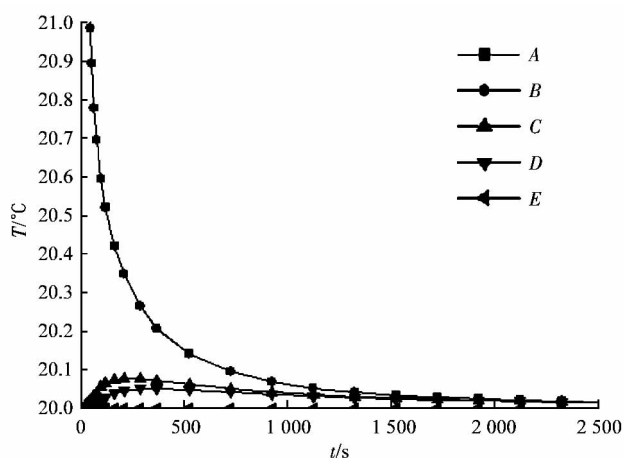


图4 不同位置温度随时间的变化曲线

Figure 4 Temperature curves of different locations

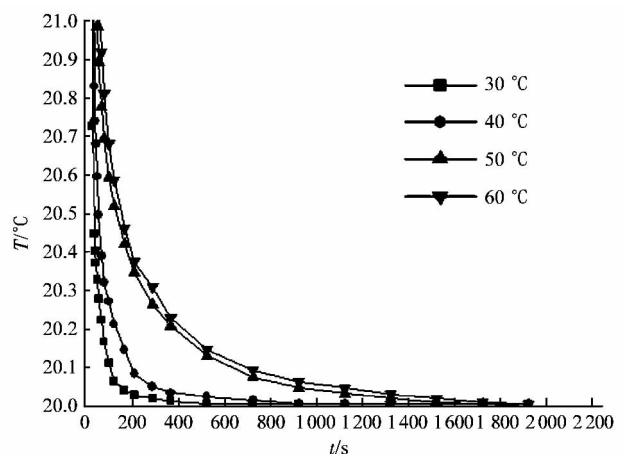


图5 不同试验温度下管内温度变化曲线

Figure 5 Temperature curves of the pipe center
with different testing air temperature

当,远小于土壤埋深与大气温度昼夜变化对土壤的影响范围。

4 结论

针对 PE 埋地管道气密性试验过程中的温度场,建立了合理的物理模型,写出了传热微分方程及边界

条件,运用有限元软件进行瞬态热分析,得到管道周围温度场随时间的变化趋势。同时,分析了不同试验温度对管道周围温度场传热速度的影响,对比了不同试验温度下土壤温度场的影响范围。得到了如下结论:

1) 在气密性试验开始时,管内气体温度急剧下降,到约 20~30 min 后,管内外温度趋于平衡,气体温度基本保持不变。

2) 随着管内气体温度升高,管内外温度达到平衡所需要的时间增加,且土壤受管内气体温度影响范围增大;当管内气体温度从 30℃ 升高至 60℃ 时,土壤中温度影响范围从 92 mm 增大到 125 mm。

3) 气密性试验过程中,管内温度变化对气密性试验结果有一定影响。本研究结果表明,气密性试验过程中,温度的测量应在试验开始 30 min 以后进行。

参考文献 (References):

- [1] 吴长春,张孔明.天然气的运输方式及其特点[J].油气储运,2003,22(9):39-43.
- [2] Song Weon-Keun. Thermal transfer analysis of unpaved and paved freezing oil media including buried pipelines [J]. Numerical Heat Transfer Part A: Applications, 2005, 48(6): 567-583.
- [3] 叶志伟,王瑞金.预热管道中原油沿程温降和土壤温度场数值模拟[J].石油化工高等学校学报,2009,22(4):77-80.
- [4] YU Bo, LI Chao, ZHANG Zhengwei, et al. Numerical simulation of a buried hot crude oil pipeline under normal operation [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(17/18): 2670-2679.
- [5] 嘉兴市特种设备检测院,浙江工业大学,嘉兴市燃气集团有限公司.埋地燃气管道严密性试验方法和系统:中国,201120439156.1 [P]. 2012-05-31.
- [6] 那威,宋艳,姚杨.土壤源热泵地下水平埋管换热性能及其周围土壤温度场的影响研究[J].太阳能学报,2009,30(4):475-480.
- [7] 赵永涛.埋地热油管道周围温度场的数值模拟[J].新疆石油天然气,2007,3(1):80-86.
- [8] 刘晓燕,石成,赵军,等.大气温度突变对土壤温度场的影响研究[J].太阳能学报,2007,28(8):918-921.
- [9] 吴国忠,庞丽萍,卢丽冰.埋地输油管道热力计算数值求解结果分析[J].油气田地面工程,2001,20(2):1-2.
- [10] 张朝晖. ANSYS8.0 热分析教程与实例分析 [M]. 北京:中国铁道出版社,2005.

(上接第 104 页)

参考文献 (References):

- [1] 赵伟然,徐青山,祁建华,等.风电场选址与风机优化排布实用技术探讨[J].电力科学与工程,2010,26(3):1-4.
- [2] BURTON T, SHARPE D, JENKINS N,等.风能技术[M].武鑫,谷海涛,李海东,等,译.北京:科学出版社,2007.
- [3] 魏子杰,段宇平.风电场风能资源评估[J].发电设备,2009(5):376-378.
- [4] 戴庚,徐璋,皇甫凯林,等.垂直轴风力机研究进展[J].流体机械,2010,38(10):39-43.

- [5] 张秀芝.气象灾害影响风电场安全运营[N].中国气象报,2007-11-2(3).
- [6] 冯长青,包紫光,王成富.风电场 50 年一遇安全风速计算方法的对比分析[J].电网与清洁能源,2011,27(2):67-70.
- [7] 张江华.风电场安全风速计算方法研究[J].黑龙江电力,2007,29(6):450-452.
- [8] 呼津华,王相明.风电场不同高度的 50 年一遇最大和极大风速估算[J].应用气象学报,2009,20(1):108-113.
- [9] 国家发展改革委员会.全国风能资源评价技术规定[L].北京:发改能源[2004]865 号,2004-4-14.

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2012.06.030

中空纤维膜组件壳程传质的研究进展

刘俊¹, 陈冰冰^{1,2}, 梁力锦¹

(1. 浙江工业大学 化工机械研究所, 浙江 杭州 310014;

2. 浙江工业大学 制药工程省部共建教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:中空纤维膜组件高效的传质分离性能受到越来越广泛的关注。膜组件中纤维呈随机分布状态,其壳程流动特性十分复杂,对其传质性能的准确预测存在很大困难。随着研究的不断深入,对膜组件中传质过程的理解也更加全面。针对平行流式中空纤维膜组件的研究,介绍了一些壳程传质关联式和主要的数学模型,讨论了壳程传质性能的影响因素。

图3表1参39

关键词:中空纤维膜组件;随机分布;平行流式;数学模型;传质关联式

中图分类号:TQ051.8

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2012)06-0110-05

Research Progress on Mass Transfer of Shell-Side of Hollow-Fiber Membrane Modules

LIU Jun¹, CHEN Bingbing^{1,2}, LIANG Lijin¹

(1. Institute of Process Equipment and Control Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Key Laboratory of Pharmaceutical Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The efficient mass transfer separation performance of hollow-fiber membrane modules has been attracted extensive attention increasingly. But the complicated flow conditions because of randomly packed fiber bundles results in great difficulties to predict the mass transfer performance of shell-side exactly. The understanding of process of mass transfer in membrane modules is gradually deepening with the advance of investigations. This review summarizes the research progress on correlations of mass transfer and mathematical models, and discusses the influence factors on shell-side mass transfer in parallel-flow hollow-fiber membrane modules. [Ch, 3 fig. 1 tab. 39 ref.]

Key words: hollow-fiber membrane modules; randomly packed; parallel-flow; mathematical model; correlations of mass transfer

0 引言

中空纤维膜组件传质面积大,对流体无密度差要求,能独立控制两相速率,操作范围宽,结构紧凑,易于放大,且不存在液泛、起泡和雾沫夹带等操作问题,已成为污水处理、果汁浓缩、金属离子提取、血液透析、废气吸收等分离过程的研究热点^[1-3]。膜组件中的传质过程分为管程传质、跨膜传质和壳程传质3个部分。管程传质和跨膜传质目前都有比较准确的数学公式描述^[4-5];而纤维束呈随机分布,使得壳程流动形态十分复杂,对膜组件壳程传质性能的准确预测还没形成统

一认识。为了弄清楚膜组件的传质机理,以指导其设计和优化,很多学者们通过实验方法或理论方法研究了膜组件中的流动特征和传质系数。文中针对中空纤维膜组件壳程传质性能的研究进展,介绍了一些壳程传质关联式和数学描述模型,希望对从事膜科学研究的学者提供一些参考。

1 传质理论

平行流式结构是目前使用最多的中空纤维膜组件结构,其大体形状和管壳式换热器差不多,如图1所示。圆筒形壳体中装填了多根中空纤维丝,纤维两端

收稿日期:2012-03-05;修回日期:2012-03-19

作者简介:刘俊(1986),男,重庆人,硕士研究生,主要研究方向为过程流体的传热与传质。通信作者:陈冰冰。E-mail:chenbb@zjut.edu.cn