

研究论文

垂直列管加热的搅拌槽中温度场的测量与数值模拟

王志锋 黄雄斌 施力田
(北京化工大学化工学院, 北京 100029)马青山
(北京化工研究院, 北京 100013)

摘 要 在装有 4 组对称垂直加热列管、直径为 500 mm 的搅拌槽中使用 PBT 桨进行搅拌, 以甘油为工作物料, 采用液晶测温技术测量搅拌槽内温度的分布. 实验研究了温度随时间的变化以及搅拌转速对温度分布的影响. 采用计算流体力学软件 CFX-4 对槽内轴向、径向温度分布进行数值模拟, 并将模拟结果与实验结果进行了比较, 发现二者基本符合.

关键词 搅拌槽 液晶测温技术 温度分布 数值模拟

中图分类号 TQ 027.2

文献标识码 A

文章编号 0438-1157 (2002) 11-1175-07

MEASUREMENT AND NUMERICAL SIMULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTIONS IN AGITATED TANK EQUIPPED WITH PBT IMPELLER

WANG Zhifeng, HUANG Xiongbin and SHI Litian

(Institute of Chemical Engineering, Beijing University
of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

MA Qingshan

(Beijing Research Institute of Chemical
Engineering, Beijing 100013, China)

Abstract A liquid crystal technique was used to investigate the temperature profile in an agitated tank equipped with a PBT impeller. Four sets of vertical tubes were symmetrically fixed in the agitated tank with diameter of 500 mm. A mixture of cholesteric liquid crystals was dispersed homogeneously in glycerol. The effects of time, rotation speeds on the temperature profile were discussed. The commercial CFD code CFX-4.3 was used to simulate the axial and radial temperature profiles in the tank. And the results of the simulation were compared to the experimental data. The CFD predictions are in good with experimental data.

Keywords agitated tank, liquid crystal technique, temperature distribution, numerical simulation

引 言

在实际生产中以垂直列管兼作挡板进行换热是搅拌槽中经常采用的一种传热方式. 搅拌槽内的传热过程是一个在有限空间内进行的复杂过程, 要准确了解槽内温度分布的详细信息有很大的难度. 通常, 实验测量和数值模拟是获得这些信息的重要手段. 相对实验测量而言, 数值模拟能够获得更详细的信息. 虽然近年来对搅拌槽内流场的模拟研究有

了很大的进展, 但对搅拌槽温度场的模拟研究却较少, 对以垂直列管兼作挡板进行换热的搅拌槽的模拟, 目前国内未见相关报道. 由于搅拌槽内温度的分布对许多化学反应过程(如聚合反应)的进行极为重要, 温度的不均匀会导致产率的下降或副反应的增加, 最终影响产品的质量. 这种影响在层流和过渡流中尤其明显. 因此, 了解其温度分布的详细信息是非常必要的. 本文利用液晶测温技术(Liquid Crystal Technique)测量了过渡流区槽内的全场温度

2002-04-15 收到初稿, 2002-07-09 收到修改稿.

联系人: 黄雄斌. 第一作者: 王志锋, 男, 30 岁, 硕士.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 29976002)及橡胶新型材料合成国家工程研究中心基金资助项目.

Received date: 2002-04-15.

Corresponding author: Huang Xiongbin.

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 29976002).

分布,并用计算流体力学软件 CFX-4 对之进行了模拟.

1 实 验

1.1 实验方法

液晶测温技术能以彩色显示全场的温度分布,且对流场和温度场不产生干扰,并能提供满意的精度和分辨率(其灵敏度在 0.05 K 以下),所以被流体力学和传热领域的研究人员所重视.液晶测温技术在国外已被用于搅拌槽中温度分布和混合时间的测定等^[1,2];而在国内这方面的研究报道较少^[3~5].实验所用热色液晶呈现的每一种彩色均对应一个确定的温度.因此,在使用热色液晶进行实验之前必须先对它进行标定,即定出它的彩色与温度 T 之间的关系.彩色具有 3 个特性:色度、明度和饱和度,其中色度 Hue 是彩色彼此区分的判据.因此,在标定热色液晶时,只要得到其色度-温度的一一对应关系即可^[6].本实验标定曲线如图 1 所示.从图中可以看出实验温度应控制在 301.5~303.5 K 之间.

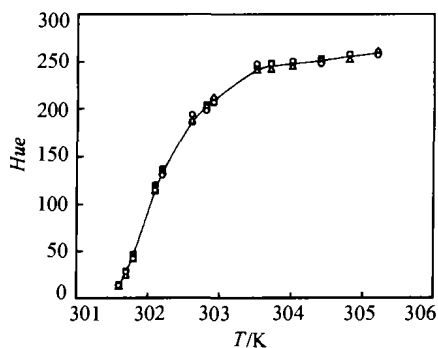


Fig. 1 Temperature-Hue relationship curve

1.2 实验装置

实验装置如图 2 所示.在直径 $D = 500$ mm 的圆柱形有机玻璃搅拌槽内对称装有 4 组垂直列管,每组垂直列管分别由两个功率为 150 W 的 U 型电加热棒串联组成.列管外径为 6.5 mm,列管间距为 5 mm,与槽壁的间距为 5 mm.槽壁外侧为一个外切等八面体有机玻璃夹套,为了消除由于光学折射所造成的视差,在间隙中装有与槽内物料一样高度的水.采用 575 W 的球形镝灯为光源,透过特制的灯箱狭缝形成片光源,照亮所要拍摄的截面.用数码照相机记录搅拌槽内的色彩变化.所用数码照相机的像素为 1600×1200 .最后将拍摄好的图

片传送到计算机中利用图像处理软件进行处理.实验采用四斜叶(PBT)桨,直径 $d = 296$ mm ($d/D = 0.592$),桨叶离槽底距离 $C = 190$ mm,液深 $H = 480$ mm.

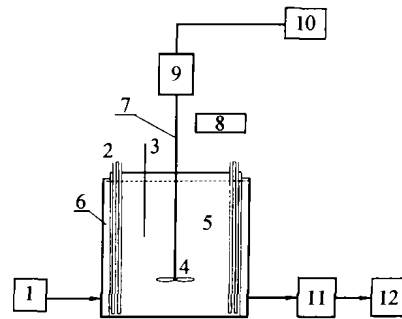


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup
1—light source; 2—vertical tube; 3—thermometer; 4—impeller;
5—stirred tank; 6—octagonal jacket; 7—shaft;
8—tachometer; 9—motor; 10—frequency converter;
11—digital camera; 12—computer

1.3 实验物料

实验物料为 99.5% 的优质透明甘油,其黏度 $\mu = 0.292$ Pa·s,甘油中均匀分散有平均粒径为 $75 \mu\text{m}$ 的液晶粒子.本实验所用的微胶囊状胆甾相液晶型号为 BM100/R29C4W/S40,其温度响应范围为 301~305 K,在此范围内,液晶随温度的升高逐渐由红变绿再变蓝最后为紫色.该液晶随温度的响应时间为 ms 级.

1.4 温度场的测量

1.4.1 轴向剖面温度场的分布随时间的变化 在实验中首先把槽内主体温度升高到 301.5 K,然后将搅拌桨转速 N 调至 $20 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ($Re = 423$) 并开始计时,同时用数码相机拍摄槽内液晶颜色的变化.四斜叶桨搅拌槽中轴向剖面(在列管背对流体区,距列管约 25 mm)的分布随时间的变化如图 3 所示.从图中可以直观地看出在桨的上方靠近加热列管附近有一弧状的高温带,在桨下方靠近加热列管附近也存在一很小的高温带.随着列管加热时间的增加,整个槽内流体的温度也在增加,但槽内温度分布的总体趋势随时间变化并不显著.这是因为槽内温度分布的趋势主要取决于桨叶所产生的流型.由槽内轴向剖面上液晶颜色的分布可以看出,此剖面上的温度分布不均匀,这是因为此时叶轮 Reynolds 数比较低 ($Re = 423$),槽内流体的大部分区域(非叶轮区)表现为层流,少部分区域(叶轮区)表现为

湍流, 使得槽内流体传热速度较慢, 温度分布不均. 上述结果表明, 采用延长搅拌时间的方法, 不能显著改善搅拌槽中温度分布的不均匀性.



Fig. 3 Picture of axial section at different time

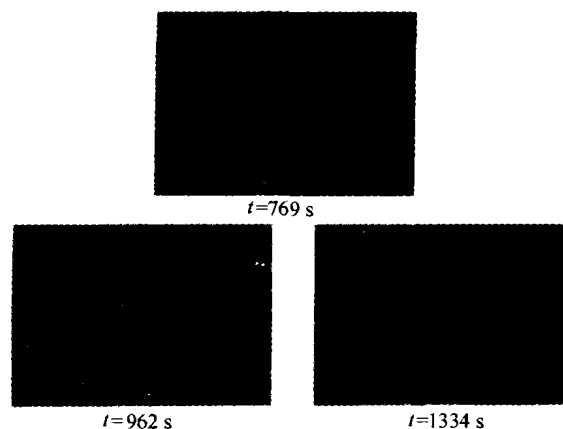


Fig. 5 Pictures of horizontal section at different time

1.4.2 轴向剖面温度分布随转速的变化 为了研究搅拌槽内轴向剖面温度分布随转速不同而变化的情况, 分别取 $N = 20$ 、 30 及 $37 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 3 种转速来分析(所对应 Re 分别为 423, 635, 783). 图 4 即为同一时刻不同转速条件下槽内轴向剖面的分布图. 从图 4 可以比较得出, 随着搅拌转速的增加, 槽内冷流体与加热列管附近的高温流体的混合速度明显要快, 而且温度场的分布也趋于均匀. 这表明通过增加转速在一定程度上可以改善搅拌槽内的温度分布.

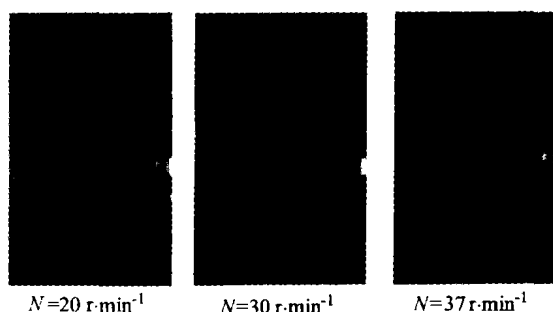


Fig. 4 Pictures of axial section at different speed

方法为滑移网格法^[7]. 这种方法将计算域分为两部分, 如图 6 所示. 一部分包含了运动的桨叶(a), 另一部分包含静止的挡板与槽体(b), 两部分网格之间要求彼此独立. 在 CFX-4 中是通过定义非匹配边界条件来实现的. 外部的网格静止, 内部的网格随搅拌桨一起转动. 两部分网格之间通过滑移界面进行插值处理. 由于滑移网格法计算的是瞬时值, 这正与搅拌槽内加热过程的非稳态性相吻合, 可采用实验所拍摄的槽内温度场的分布与用滑移网格法计算的结果进行比较.

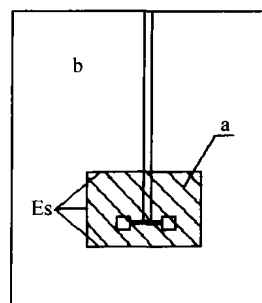


Fig. 6 Schematic of sliding mesh method
a—rotatory section; b—static section; Es—sliding interface

1.4.3 水平剖面温度场的分布随时间的变化 $N = 30 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、离底 320 mm 的水平剖面温度场分布随时间的变化如图 5 所示. 从图中可以看出列管附近高温流体的流向. 随着时间的增加, 这个水平剖面的整体温度也在增加, 但温度分布的总体趋势随时间变化并不显著.

2 温度场的模拟

2.1 计算方法

计算所使用的软件为 CFX-4, 所采用的计算

2.2 模拟条件

(1) 计算条件

由于搅拌槽的轴对称性, 以及 PBT 桨具有 4 个叶片, 4 组加热列管又对称安装在槽壁上, 所以计算搅拌槽的四分之一区域即可. 采用柱坐标系. 为简化计算, 采用层流模型; 假设流体不可压缩; 在实验温度范围内, 流体的物性不变. 槽内流体的流动和传热为非稳态过程.

(2) 模拟参数

在实验条件下搅拌槽内甘油的密度 $\rho = 1252 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 黏度 $\mu = 0.292 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 热导率 $\lambda = 0.289 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 比热容 $c_p = 2.37 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 搅拌转速 $N = 37 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$.

(3) 初始条件

设槽内流体的初始温度为 301.5 K.

(4) 边界条件

列管的热流密度 $q = 8289 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$, 由于实验时室温为 295 K 左右, 夹套中水的温度变化范围一般为 291~297 K, 为简化计算, 假定流体与槽壁的接触面以及槽顶流体与空气的接触面为绝热边界, 即槽内流体与这些接触面之间没有热量交换.

(5) 网格数

网格数为径向×轴向×切向($r \times z \times \theta$) = $58 \times 54 \times 30 = 93572$

3 结果与讨论

3.1 轴向剖面温度场的分布

$N = 37 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $t = 92 \text{ s}$ 时 PBT 桨搅拌槽内一个轴向剖面上的液晶分布如图 7 所示, 其相对应的等温线图如图 8 所示. 从轴向剖面上液晶的分布图可以直观地看出, 其温度分布趋势与 $N = 20 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时相似. 这一分布趋势从等温线图中也可以看出(图 8 中虚线所示为桨叶所在位置).

同一轴向剖面在相同时刻温度场及等温线分布的数值模拟结果分别如图 9、图 10 所示. 从图 7、图 9 中可以看出, 模拟的结果与实验所测的温度场分布基本相符. 在靠近加热列管附近的区域从上到

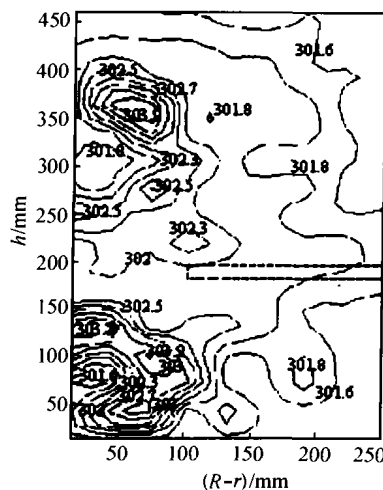


Fig. 8 Temperature contour of axial section at $t = 92 \text{ s}$

下都有一长条形的高温带, 高温带在槽的上部都比较宽, 这是因为此处离桨叶较远, 受桨叶的作用较小, 所以对流传热速度比较慢, 使得高温流体聚集在一起. 而在桨叶区高温带则比较窄, 是因为此处受桨叶的影响大, 对流传热速度快. 计算值与实验值的主要区别在于模拟结果相对连续, 而真实结果有非连续性. 例如, 如图 7 中蓝色高温区出现明显的分散区域.

图 11 为 $N = 37 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $t = 333 \text{ s}$ 时的液晶分布图, 其数值模拟结果如图 12 所示. 对比图 11 和图 12 可以看出, 模拟结果与实验结果总体上符合, 局部区域仍然有差别. 对比图 9 和图 12 的模拟结果可以更清楚地看出, 虽然列管加热时间增加了 3.6 倍, 但槽内温度分布的总体趋势随时间基本不变.

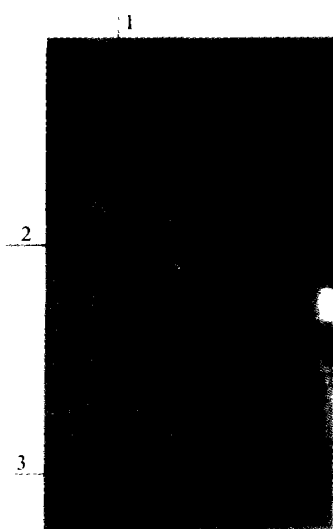


Fig. 7 Picture of liquid crystal of axial section at $t = 92 \text{ s}$

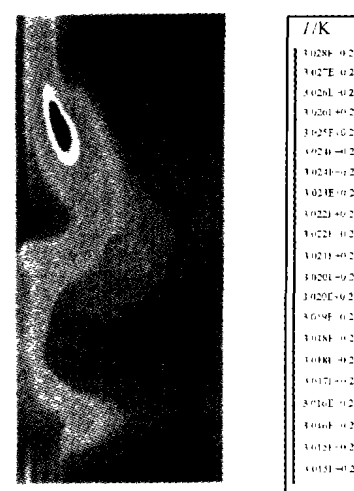


Fig. 9 Simulation results of temperature profile of axial section at $t = 92 \text{ s}$

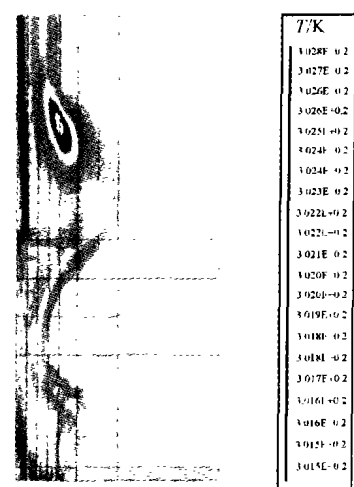


Fig. 10 Simulation results of temperature contour $t = 92$ s

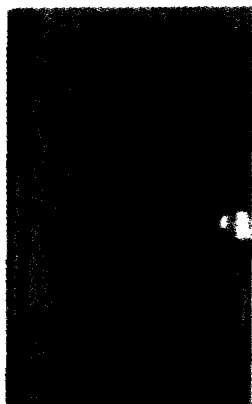


Fig. 11 Picture of liquid crystal of axial section at $t = 333$ s

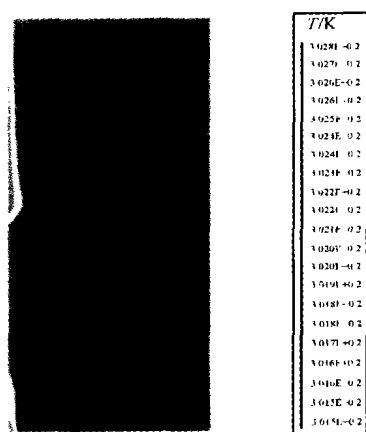


Fig. 12 Simulation results of temperature profile of axial section at $t = 333$ s

3.2 水平剖面温度场的分布

$t = 62$ s 时离底 235 mm 水平剖面上液晶的分布图如图 13 所示, 桨叶顺时针旋转. 此水平剖面在相同时刻温度场分布的数值模拟结果如图 14 所示. 从图 13、图 14 中可以明显地看出, 在列管附近都存在一股高温流体“拖尾”, 通过“拖尾”还可得出此截面上流场的一些信息. 高温流体正是沿着“拖尾”的方向与冷流体进行混合. 同时可以看出此截面上二者的温度分布也不均匀, 列管附近流体的温度与主流体温度差别都较大. 但是, “拖尾”区的大小和方向在二者图中有明显的差别, 模拟结果中, “拖尾”区明显大于真实结果, 且“拖尾”的方向比真实值更靠近槽壁.



Fig. 13 Picture of liquid crystal of radial section at $t = 62$ s

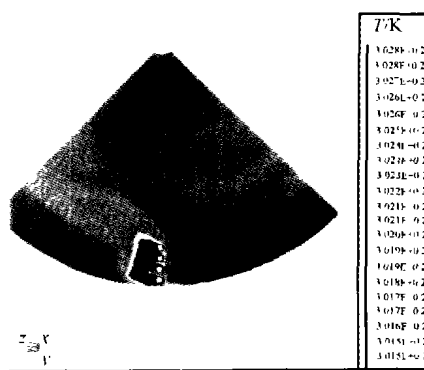


Fig. 14 Simulation results of temperature profile of radial section at $t = 62$ s

3.3 轴向、径向温度分布

通过比较数值模拟与实验测量所得到的轴向剖面及水平剖面温度分布图可以较直观地看出二者是否相符. 但要定量地比较某特定区域数值模拟与实验测量的温度分布的关系, 则要将数值模拟量化结果与实验测量结果进行比较. 本实验选取 $t = 92$ s

时轴向剖面温度分布图中的 3 个位置进行讨论. 在这些地方温度变化比较大, 它们的位置(线条 1, 2, 3)如图 7 所示.

(1) 轴向温度分布

线条 1(离轴心 190 mm)上轴向温度分布的模拟结果与实验值如图 15 所示, 从图中可以看出, 在所选取位置上的温度分布二者皆有 4 个峰值, 并且峰值的大小也基本吻合. 其中离浆叶最远的峰温度值最高, 这是因为它受浆叶的作用小, 高低温流体的混合速度比较慢. 此位置是一个流动死区, 且接近加热列管, 故其温度值较高. 这个分布趋势从图 7 的轴向剖面图中也可以看出.

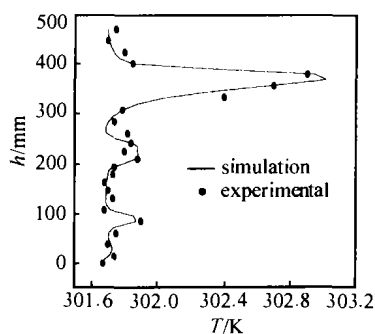


Fig. 15 Simulation results of axial temperature distribution on line 1

(2) 径向温度分布

对于径向温度分布的研究以图 9 中线条 2(离底 290 mm)、3(离底 60 mm)上的温度分布来说明. 它们径向温度分布的模拟结果与实验值分别如图 16、图 17 所示. 从这两个图中可以看出它们的温度分布趋势相似, 在离轴心 200 mm 左右有一个峰. 在轴心及槽壁附近的温度较低, 这与由四斜叶桨所产生的流场有关. 温度分布趋势与图 7 的轴向剖面图所示基本一致. 通过与轴向温度分布的比较可以看出, 径向温度分布的温差要比轴向温度分布的温差小.

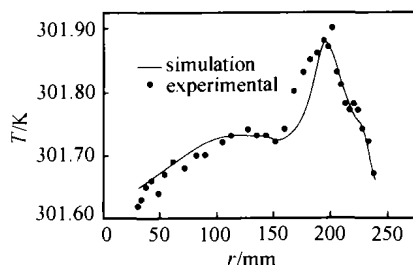


Fig. 16 Simulation results of radial temperature distribution on line 2

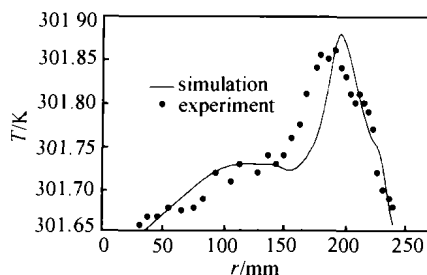


Fig. 17 Simulation results of radial temperature distribution on line 3

从图 17 中可以看出, 模拟值与实验值仍有一定的差别. 综上所述, 由 CFX-4 对四斜叶桨搅拌槽内温度场的模拟基本可以反映出实验的真实情况. 这说明所选用的层流模型基本适用于本实验的条件. 但在某些区域二者仍存在一些差别, 说明仍需对模型及计算条件做一定的改进. 例如, 通过增加网格数量、考虑物性随温度的变化、引入湍流模型等, 都会对模拟结果产生影响.

4 结 论

(1) 液晶测温技术可以很好地显示搅拌槽内全场的温度分布. 从实验结果可以清楚地了解冷热流体的流动与混合过程以及温度分布随时间、转速的变化. 实验和模拟结果都表明, 延长搅拌时间很难改变搅拌槽中温度分布的总体趋势.

(2) 采用商业化软件 CFX-4 模拟了 PBT 浆在搅拌转速 $N = 37 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下搅拌槽内温度场的分布, 计算结果与实验测量结果基本吻合, 但在一些细节上仍有差别, 模拟条件的设置需要进一步改进.

符 号 说 明

- C ——桨叶离底距离, m
- c_p ——比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- D ——搅拌槽直径, mm
- d ——桨叶直径, m
- Hue ——色度
- h ——离底距离, mm
- N ——搅拌转速, $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
- q ——热流密度, $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$
- R ——搅拌槽半径, mm
- Re ——搅拌 Reynolds 数
- r ——距轴心的距离, mm
- T ——温度, K

t ——时间, s

λ ——热导率, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

μ ——黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$

ρ ——密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

References

- 1 Masafumi Kuriyama, Masakatsu Ohta, Kinya Yanagawa, Kunio Arai, Shozaburo Saito. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1981, **14**(4): 323—330
- 2 Lee K C, Yianneskis M. In: Lavoister, ed. *Proc. 9th Euro. Conf. on Mixing*, Paris: GFGP, 1997. 121—128
- 3 Yang Jun(杨军), Huang Xiongbin(黄雄斌), Shi Litian(施力田). *Journal of Beijing University of Chemical Technology*(北京化工大学学报), 2001, **28**(3): 17—20
- 4 Wang Zhifeng(王志锋), Huang Xiongbin(黄雄斌), Zhou Guozhong(周国忠). *Science & Technology in Chemical Industry*(化工科技), 2001, **9**(4): 10—14
- 5 Wang Zhifeng(王志锋), Huang Xiongbin(黄雄斌), Zhou Guozhong(周国忠). *Journal of North China Institute of Technology*(华北工学院学报), 2001, **22**(6): 416—419
- 6 Zhang Xi(张曦), Weng Wenguo(翁文国), Zhang Jiafeng(张嘉锋), He Shiping(何世平). *Journal of China University of Science and Technology*(中国科学技术大学学报), 2000, **30**(1): 51—55
- 7 Bakker A, Laroche R D, Wang M H, Calabrese R V. *Trans IChemE.*, 1997, **75**(A): 42—44

信息与交流

世界探明石油储量 1350 亿吨

法国石油行业委员会提供的数字显示, 根据现有的统计, 截至 2000 年底, 全世界已探明的石油储量为 1349.66 亿吨, 其中石油输出国组织(欧佩克)国家拥有 1094.79 亿吨, 约占总量的 81%。

在主要石油生产国中, 只有 5 个国家的储量超过 100 亿吨, 其中沙特阿拉伯的已探明储量为 359.48 亿吨, 占全球总储量的 26.6%, 遥居首位。位居第二的是伊拉克, 已探明储量为 153.48 亿吨, 占 11.4%。阿拉伯联合酋长国名列第三, 已探明储量 133.42 亿吨, 占 9.9%。居第四和第五位的是科威特和伊朗, 已探明储量分别为 131.65 亿吨和 122.37 亿吨, 占 9.8% 和 9.1%。探明储量在 50 亿吨以上的国家有两个, 依次为: 委内瑞拉, 99.05 亿吨, 占 7.3%; 俄罗斯, 66.27 亿吨, 占 4.9%。

法国石油行业委员会的统计还显示, 2000 年, 中国的石油已探明储量为 32.74 亿吨, 占全球总储量的 2.4%, 居世界第 10 位; 美国的已探明储量为 28.70 亿吨, 占 2.1%, 居第 12 位。

可食性保鲜膜研制成功

9 月 27 日, 在成都高新区博创园的推广会上, 一种能有效调节果蔬气体交换和水分散失、具有国际先进水平的“可食性保鲜膜”受到用户的赞扬。

从美国归来的博士后金锡萱在美国有较长时间从事可食性保鲜膜技术的研究, 他专长于农产品可食性保鲜膜技术的研究与产后贮藏管理, 曾获 3 项美国专利。他回国后专门从事我国可食性保鲜膜技术的研究。这次研发成功的“依柯可食性保鲜膜、果蔬保鲜剂”技术, 可根据不同果蔬的生理特性采用疏水性和亲水性成分复配成制剂, 有效地调节果蔬的气体交换和水分散失, 降低代谢速率, 减缓后熟过程, 达到保鲜目的。其 MA 气调技术居全国领先地位, 填补了国内空白。

(摘自“中国化工信息网”)