

# 应用液晶测定搅拌槽中温度场的试验研究

杨 军 黄雄斌\* 施力田

(北京化工大学化学工程学院, 北京 100029)

**摘 要:** 探讨了利用热色液晶 (Thermochromic Liquid Crystals, TLC) 测量流体温度场的新技术, 并运用此技术测定了搅拌槽中流体的温度分布以及温度边界层。文中给出了甘油的温度场分布以及聚丙烯酰胺 (PAM) 水溶液的温度边界层的实验测量结果与讨论。液晶测温技术运用了数字图片处理系统, 是一种快速、准确的温度测量方法, 能够较好地描述搅拌槽内的流体混合及传热过程。

**关键词:** 热色液晶; 搅拌槽; 温度场; 温度边界层

**中图分类号:** TQ 027.2

## 引 言

对于搅拌槽中的传热研究来说, 准确的测出槽内各点流体的温度值是极其重要的, 以前大多使用热电偶来测量, 但这有其不可避免的缺点: 热电偶的响应滞后性使得测量误差较大; 热电偶不适用于全场温度测量, 它属于浸入式测温方法, 在同一时刻只能布有限几个热电偶, 若布点太多, 会影响到槽中的流型, 使其与实际不符; 在测量高粘度流体温度场时, 热电偶的探头很容易被一层不流动的流体裹住, 大大地增加了热电偶与被搅拌流体之间的传热热阻, 降低了热电偶的灵敏度, 使得测量结果不准确。

与应用于电子信息显示等方面的液晶性质不同, 热色液晶能随着温度的变化而显示不同的颜色, 将热色液晶均匀地混入被测流体中, 由此可以把对温度的测量转变为对颜色的测定上来。目前, 国内只有张曦等人<sup>[1,2]</sup>利用液晶测温技术测量了射流撞击下的壁面温度分布, 以及位于壁面下气泡周围的流体中自然对流的温度分布和速度分布, 但对于搅拌槽内复杂的三维流动场和温度场, 国内未见用此技术进行研究的报道。另外英国人 K C Lee<sup>[3]</sup>在直径和高均为 100 mm 的小搅拌槽内, 搅拌桨为六叶涡轮的条件下用液晶测量了流体 (水) 的混合时间。对于较大直径的搅拌槽和工业中应用较广泛的轴流

式桨叶以及非牛顿流体等不同条件下的温度场, 还需要进一步的研究。

## 1 液晶测温技术

### 1.1 液晶显色原理<sup>[4]</sup>

液晶根据分子排列结构的不同, 可分为近晶相、向列相、胆甾相 3 类, 用于温度显示的主要是胆甾相液晶, 又称热色液晶。热色液晶对温度的敏感性缘于其特殊的分子结构, 它的分子排列一般如图 1 所示, 分子分层而整齐地排列着, 每一层中的分子长轴

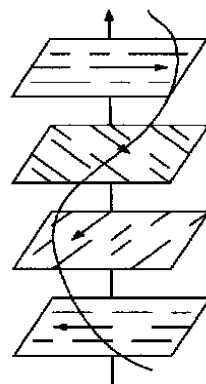


图 1 热色液晶的分子结构<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Schematic of molecule structure of TLC

互相平行, 且平行于层面。当不同层的分子长轴排列沿螺旋方向 (左旋或右旋) 经历 360° 的变化之后, 又回到初始取向, 这个周期性的层间距称为热色液晶的螺距  $P$ ,  $P$  随着温度的改变而变化。当用一束白光照射液晶层状结构时, 热色液晶对光波的选择反射与  $P$  密切相关, 其关系式<sup>[4]</sup>为

$$I_{\text{最大}} = nP \cos \frac{1}{2} \left[ \sin^{-1} \left( \frac{\sin \phi_1}{n} \right) + \sin^{-1} \left( \frac{\sin \phi_2}{n} \right) \right]$$

收稿日期: 2001-02-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (29976002)

第一作者: 男, 1975 年生, 硕士生

\* 通讯联系人

式中:  $\lambda_{\max}$  为最大反射光的波长, nm;  $\phi_1$  为入射角,  $\phi_2$  为反射角, ( $^\circ$ );  $n$  为该液晶的折射率。当固定  $\phi_1$  和  $\phi_2$  时, 则液晶显示的颜色将只随  $P$ , 亦即温度的变化而变化。

## 1.2 技术应用

热色液晶在使用前必须进行标定, 热色液晶所呈现的每一种色彩均对应着一个确定的温度, 则可以获得“色彩-温度”的一一对应关系。人眼认为色彩由色度  $H$ 、饱和度和亮度这 3 种特性组成, 色度是用来度量物体反射回来的或透过物体的光波波长的量; 饱和度是色彩中所含的灰色量, 灰色成分越低, 则饱和度越高; 亮度则是对色彩光强度的测定单位。在这 3 个量中, 色度是色彩彼此区分的判据, 因此在标定热色液晶的色彩时, 用色度来区分色彩只需一个变量, 避开了饱和度和亮度, 从而解决了照明条件不同及照明不均匀带来的影响, 保证了标定结果的通用性。

## 2 实验部分

### 2.1 实验物料

本实验所用液晶为英国 Hallcrest 公司生产, 型号为 BM100/ R29C4W/ S40, 其温度响应范围大约是在  $28 \sim 32$  之间, 响应时间为毫秒 (ms) 级, 基本可以实时显示温度的变化。由于天然液晶易被有害杂质侵蚀, 性能不稳定, 所以在实际应用中用透明的聚合物薄膜将液晶包裹成无数的小颗粒, 颗粒大小为  $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 。随着温度的升高, 液晶显色从红色开始, 逐渐变为黄色、绿色、蓝色。在其响应温度范围之外, 液晶不再显示颜色。

实验中所用流体分别为牛顿流体甘油 (纯度为 99.5%) 和质量分数为 2 000  $\mu\text{g/g}$  的非牛顿流体聚丙烯酰胺 (PAM) 水溶液。

### 2.2 实验装置及实验过程

实验装置由搅拌系统、光照系统和记录拍照系统组成, 如图 2 所示。搅拌槽为一个直径  $D = 500$  mm、高  $h = 600$  mm 的圆筒, 外面围着一个边长为 225 mm、高 500 mm 的正 8 边形夹套, 两者都是用 5 mm 厚的有机玻璃做成, 以尽量增加透明度。全挡板条件, 中心电极加热, 夹套冷却水冷却, 主流体温度可由玻璃温度计测得。为了增加光亮度, 实验采用 575 W 的球型钨灯作光源, 透过灯箱狭缝形成片光源, 照亮槽中流体的一个轴截面。根据经验, 当与

入射光成  $45^\circ$  角观察时液晶亮度最高, 故将数码相机 (Nikon COOLPIX950 型) 放在与光照面成  $45^\circ$  夹角的地方拍照。

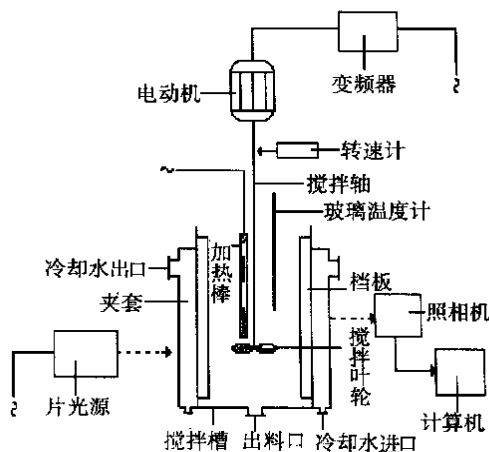


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Scheme of experimental unit

实验按照以下 3 个步骤进行。

(1) 在槽内装入甘油, 液位高度 400 mm, 加入液晶 25 g, 通过控制电极的加热量, 以及搅拌叶轮在槽内的快速搅动, 使得槽内的温度在  $28 \sim 32$  均匀变化。使用的玻璃温度计量程为  $0 \sim 50$ , 精确度为 0.1, 温度计固定在搅拌槽中心主流体区。测出几个不同时刻的主流体温度, 同时用相机拍摄温度计测量处在该温度下的液晶显色照片, 用图像处理软件 Photoshop 读出每一种颜色所对应的色度值, 就可做出“色度-温度”的关系标定曲线。

为了增加标定曲线的准确性, 重复此步骤 3 ~ 5 次, 取各测量值的平均值作出最终的标定曲线。

(2) 将槽内甘油加热到  $32$ , 停止加热, 夹套内开通冷却水冷却, 在连续的一段时间内拍摄不同时刻的液晶颜色分布图。

(3) 将槽内液体换成质量分数为 2 000  $\mu\text{g/g}$  的 PAM 水溶液, 同样加入 25 g 的液晶, 与步骤 (2) 相同, 可拍摄到较甘油粘度低的液体在搅拌槽内的温度边界层。

## 3 实验结果和讨论

将数码相机拍摄到的图片输入电脑, 然后用图像处理软件 Photoshop 处理得到色度值, 再从“色度-温度”关系曲线上将其转换成温度值, 画出温度分布曲线。由于搅拌槽的轴对称性, 所以本文只对对称平面内轴一侧区域的温度场进行了分析处理。

3.1 “色度-温度”关系标定

将每一个温度下的颜色照片读出色度值,做出“色度-温度”关系曲线,如图 3 所示。

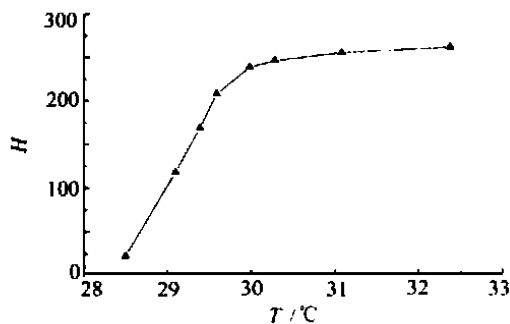


图 3 色度-温度关系曲线

Fig. 3 Hue-temperature relationship curve

从图 3 中可以看出,在 28.5 ~ 30 之间,温度的很小变化可引起色度值的较大改变,而且此区间内的曲线近似为直线,所以实验中尽量将温度控制在此范围内。

3.2 甘油的温度分布图

图 4 为使用长薄叶 (CB Y) 桨,在较低转速 45 r/min 下不同时刻的甘油颜色分布照片。

从图 4 可以看出随着时间的进行,低温区域(图中深色区)从靠近槽壁的液体上表面处开始发展 ( $t = 7$  min 时),逐渐地向整个槽内扩大,至  $t = 37$  min 时,只剩下中间区域有一大一小两处高温未混匀区(图中浅色区),形成了两处温度死区。

在一系列的甘油照片中选取某一时刻的进行数据处理,根据色度-温度关系曲线可得到等温线分布

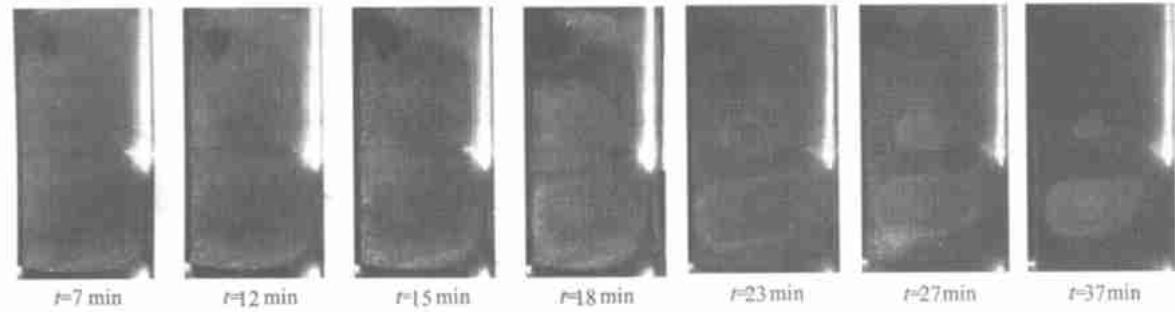


图 4 不同时刻的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution at different time

图,图 5 为  $t = 15$  min 时的等温线分布图,其中  $h$  为离底高度,mm;  $D$  为槽直径,mm;  $r$  为离开轴心的径向距离,mm。从图 5 可以看到上部的两处低温集

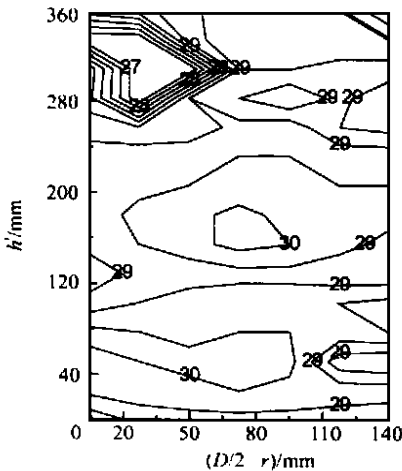


图 5  $t = 15$  min 时的等温图

Fig. 5 Temperature contours ( $t = 15$  min)

中区和中部、下部的两处高温集中区,与图 4  $t = 15$  min 时的液晶显色照片较好地吻合。

3.3 PAM 水溶液的温度边界层

PAM 水溶液的粘度在实验温度下大约为 4 mPa·s,较甘油粘度(实验温度下大约为 300 mPa·s)要小的多,但又比水的粘度(实验温度下大约为 0.8 mPa·s)大,因此在较低的转速下能够在壁面附近形成一个几十毫米厚的温度边界层。将 PAM 水溶液的照片中选取 35 r/min 转速下某一时刻的照片,分析离底  $h = 200$  mm(图 6 中画线处)近壁处的各点的温度值,可得到该高度的径向温度分布(图 7),图 7 中  $r$  为离开槽壁的距离,mm。

由图 7 可见,温度边界层的厚度大约为 20 mm。根据温度边界层的机理<sup>[5]</sup>,在湍流流体与固体壁面之间,在靠近壁面处有一层流内层存在,层流内层中的传热以导热方式进行,假设在温度边界区内温度沿径向成直线下降关系,则以直线关系延长

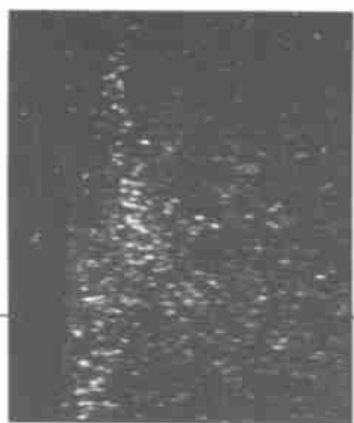


图 6 PAM 的温度边界层

Fig. 6 Temperature boundary layer of PAM

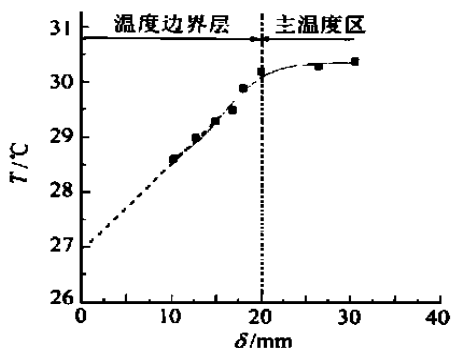


图 7 径向温度分布

Fig. 7 Radial temperature distribution

图 7 的温度曲线与纵坐标相交,可得到壁温大约为 26.9 。

## 4 结 论

(1) 本文成功的将液晶测温技术运用到搅拌槽内温度场的研究上来,测量了搅拌槽内流体的温度分布,获得了较好的实验结果。这是一种新颖的测量温度技术,与以前的测温技术相比,液晶测温技术具有不影响流型、直观可视、全场准确测量等优点。

(2) 实验中清晰地拍摄到甘油在搅拌槽内不同时刻的温度分布照片,画出了整个槽子的等温线图。

(3) 测出了 PAM 水溶液的温度边界层的厚度,并使用外推法获得了壁面温度,这是以前的实验方法难以完成的。

## 参 考 文 献

- [1] 张 曦,周 鹏,何世平,等. 应用热色液晶测量射流撞击壁面温度分布. 实验力学,1996,11(3):246~250
- [2] 张 曦,翁文国,张嘉锋,等. 液晶测温测速技术在流体实验中的应用. 中国科学技术大学学报,2000,30(1):51~55
- [3] Lee K C, Yianneskis M. Measurement of temperature and mixing time in stirred vessels with liquid crystal thermography. In: Bertrand J, Villiermaux J. Proceedings of 9th European Conference on Mixing. Nancy: GFGP, 1997. 121~128
- [4] 王良御,廖松生. 液晶化学. 北京: 科学出版社,1988. 8~26
- [5] 王绍亭,陈 涛. 化工传递过程基础. 北京: 化学工业出版社,1987. 159~161

## Measurement of temperature field in a stirred tank with liquid crystal thermography

YANG Jun HUANG Xiong-bin SHI Li-tian

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

**Abstract:** A novel technique for measurement of temperature field was studied by using thermochromic liquid crystals. The technique was applied to measure the temperature distribution and temperature boundary layer of liquid in a stirred tank. Some of the experimental results with glycerin and PAM aqueous as the tested liquids were presented in this paper. The liquid crystal thermographic technique coupling with a digital image processing system provides a rapid and accurate method for temperature measurement. It is useful to describe the mixing and heat transport processes of liquid in stirred vessels.

**Key words:** thermochromic liquid crystal; stirred tank; temperature field; temperature boundary layer