

# 印刷涂布烘箱 V 型条缝喷嘴冲击射流流场的数值模拟

白文华<sup>1,2</sup>, 包能胜<sup>1,2</sup>, 许鹏<sup>3</sup>, 葛汝峰<sup>3</sup>

(1. 汕头大学, 汕头 515063; 2. 汕头轻工装备研究院, 汕头 515063; 3. 汕头市华鹰软包装设备总厂有限公司, 汕头 515064)

**摘要:** 为了解印刷涂布设备烘箱 V 型条缝喷嘴冲击射流流场分布及其影响因素, 采用标准  $k-\epsilon$  湍流模型, 对喷嘴射流冲击移动壁面进行数值模拟。分析了喷嘴冲击射流壁面附近速度场和压力场分布情况, 考虑了影响喷嘴冲击射流壁面附近速度分布的喷嘴宽度和高度等因素。研究表明: 在冲击射流中, 喷嘴距壁面的高度和喷嘴宽度对壁面附近速度分布影响较为明显; 综合考虑各种因素, 较理想的喷嘴高度是 15 mm, 相应的喷嘴宽度为 2.5 mm。

**关键词:** V 型条缝喷嘴; 冲击射流;  $k-\epsilon$  湍流模型; 数值模拟

**中图分类号:** TS803.6; TS801.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)03-0028-05

## Numerical Simulation of V-shaped Slot Nozzle Impinging Jet of Printing and Coating Oven

BAI Wen-hua<sup>1,2</sup>, BAO Neng-sheng<sup>1,2</sup>, XU Peng<sup>3</sup>, GE Ru-feng<sup>3</sup>

(1. Shantou University, Shantou 515063, China; 2. Shantou Institute for Light Industrial Equipment Research, Shantou 515063, China; 3. Shantou Huaying Soft-Packing Equipment Plant Ltd., Shantou 515064, China)

**Abstract:** In order to understand the impinging jet field distribution and influencing factor of printing and coating equipment oven V-shaped slot nozzle, with standard model of  $k-\epsilon$ , numerical simulation was performed to the nozzle impinging jet on moving wall. The velocity and pressure field distribution near the moving wall was analyzed. The influencing factors of the impinging jet was considered, which include nozzle width and height, etc. The results showed that the height of the wall to nozzle and the nozzle width affect the velocity distribution near the wall evidently; considering kinds of factor, the ideal nozzle height is 15 mm, and the nozzle width is 2.5 mm.

**Key words:** V-shaped slot nozzle; Impinging jet;  $k-\epsilon$  turbulence model; Numerical simulation

冲击射流技术可作为一种强化传热方法, 广泛应用于纺织品、纸张、木材等的干燥, 其射流冲击过程非常复杂, 不但涉及到介质的物性参数、冲击方式, 而且同喷嘴的几何构造及排列方式有重大关系<sup>[1]</sup>。在国外, Cooper<sup>[2]</sup>和 Baughn<sup>[3]</sup>等人针对轴对称射流冲击平板做了实验研究, 分析了冲击射流滞止点附近的流动和传热特性。然而, 对冲击射流的实验研究需要耗费大量的实验成本, 用数值模拟的方法不但可以快速解决问题, 同时还能预测实验条件下无法测量的信息, 更深刻地理解问题产生的机理<sup>[4]</sup>。目前, 国内对冲击射流的数值模拟研究主要集中在对固定壁面的

单个喷嘴的模拟, 对移动壁面模拟的研究还未见到。

笔者针对印刷涂布烘箱干燥过程的实际走膜情况, 建立模型, 对移动壁面射流冲击进行仿真研究。根据烘箱干燥实际情况, 以气体作为流体介质, 通过数值模拟, 来对烘箱 V 型喷嘴射流流场特征进行分析。烘箱内喷嘴喷出的空气速度为低速 (低于 100 m/s), 可把此时的气体看作不可压缩流体的流动来处理, 使问题大大简化<sup>[5]</sup>。利用 FLUENT 软件提供的标准  $k-\epsilon$  湍流模型, 采用 SIMPLE 算法对流体控制方程进行求解, 通过有限体积法对流场区域进行有限分析。计算区域的划分采用非结构网格来划分, 可以

收稿日期: 2010-11-09

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(8351503101000001); 广东省高等学校产学研结合示范基地项目(cgzhzd0717)

作者简介: 白文华(1984-), 男, 江西樟树人, 汕头大学硕士生, 主攻机械产品设计、轻工装备节能减排技术。

对网格局部加密,易于流场分析。通过对喷嘴的不同结构进行模拟,分析喷嘴结构参数对冲击射流流场分布的影响。

## 1 喷嘴冲击射流的数学模型

单束射流见图 1,一般可把冲击射流流场分为 3

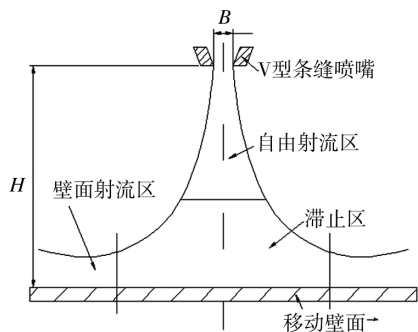


图 1 单束射流示意图

Fig. 1 Diagram of single jet

个区<sup>[6]</sup>:自由喷射流区,介质从喷嘴喷出,与周围介质不断发生能量交换,速度呈钟形分布,中心有一个等速核心区;滞流区,射流介质冲击到壁面,向左右两边发生转向,垂直速度降为零,在滞止区的速度变化梯度最大;壁面射流区,射流介质经过转向,以一定初始速度向两边散开,形成贴壁射流。

### 1.1 数学模型的基本假设

- 1) 喷射介质为不可压缩流体,其密度  $\rho$  为常数。
- 2) 射流冲击平面为宽大幅度面,相对于喷嘴宽度,可看成平面射流。
- 3) 喷嘴表面光滑,对空气阻力很小,因此喷嘴口流出的射流流速可看成是均匀的。

### 1.2 数学模型

流体的数学模型可用控制方程来描述,根据前面的假设,射流介质为不可压缩流体, $\rho = const$ ,则由流体力学基本方程组式,可得流体的质量守恒方程为<sup>[7]</sup>:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = v \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{1}{\rho} S_u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = v \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{1}{\rho} S_v \end{cases} \quad (2)$$

其中: $u, v$  分别代表  $x, y$  方向的速度; $\rho$  为流体密度; $t$  为时间; $\mu$  为流体动力粘度, $\nu$  为运动粘度, $\nu = \mu / \rho$ ;  $S_U = F_x + S_x, S_V = F_y + S_y, S_x, S_y$  为小量,对于粘性为常数不可压流体时, $S_x = S_y = 0, F_x, F_y$  为  $x, y$  方向上的体积力。

由于烘箱 V 型喷嘴出口流体处于湍流状态,采用标准的  $k-\epsilon$  湍流模型。标准  $k-\epsilon$  方程模型的湍动能  $k$  和耗散率  $\epsilon$  是 2 个基本未知量,与之相对应的输运方程为<sup>[8]</sup>:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \cdot (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (4)$$

其中: $G_k$  是由于平均速度梯度引起的湍动能  $k$  的产生项; $G_b$  是由于浮力引起的湍动能  $k$  的产生项; $Y_M$  代表可压湍流中脉动扩张的贡献; $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$  和  $C_{3\epsilon}$  为经验常数; $\sigma_k$  和  $\sigma_\epsilon$  分别是湍动能  $k$  和耗散率  $\epsilon$  对应的 Prandtl 数; $S_k$  和  $S_\epsilon$  是用户定义的源项。

在标准  $k-\epsilon$  模型中,根据 Launder 等的推荐值及后来的实验验证值,式(3)和(4)中模型常数定义见表 1。

表 1  $k-\epsilon$  模型中采用的模型常数

Tab. 1 Values of constants used in the  $k-\epsilon$  model

$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	$C_{3\epsilon}$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

在模拟过程中,为了更好地控制求解过程、加速求解的收敛性,一般要设定控制器欠松弛因子,根据实际操作经验,具体设定见表 2。

表 2 欠松弛因子设定值

Tab. 2 Setting of under-relaxed factors

压力	动量	$k$	$\epsilon$
0.3	0.7	0.8	0.8

### 1.3 有限元模型的建立与网格的划分

V 型条缝喷嘴在进行数值模拟时,考虑到喷嘴中射流条件的对称性,在模型建立和网格划分的时候采用 2-D 轴对称模型,见图 2。使用 GAMBIT 划分网格时采用了非结构网格中的三角形网格。使用非结构网格可以消除结构网格中节点的结构性限制,节点和单元分布的可控制性好,因而能更好地处理边界<sup>[9]</sup>。

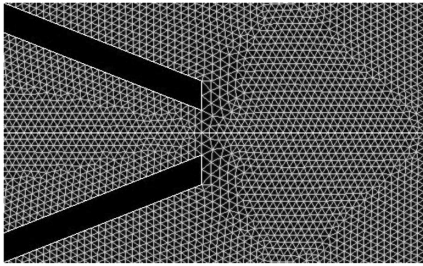


图2 V型条缝喷嘴有限元模型网格局部放大图

Fig. 2 Local zoom in of the model mesh of V-shaped slot nozzle

边界设置见图3。本例的计算域为2个面

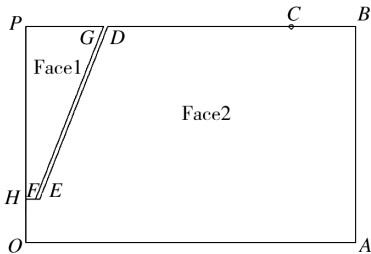


图3 边界设置

Fig. 3 Boundary setting

(Face1, Face2)。其中:  $PG$  为喷嘴入口, 即求解域的速度入口;  $HF$  为喷嘴出口, 即 Face1 和 Face2 的公共流通交界面,  $BC$  为计算域的出口;  $DM, ME, EF, FN, NG, DE$  和  $FG$  为固壁;  $OH$  和  $HP$  为求解域的对称轴;  $OA$  为气流冲击移动壁面;  $O$  为坐标原点。边界条件是控制方程在边界上应该满足的条件, 对数值计算会产生重大影响。对于粘性流体流动, 固壁边界采用壁面无滑移条件<sup>[10]</sup>。

喷嘴仿真采用的参数: 喷嘴入口宽度为 66 mm, 喷嘴入口速度 2 m/s, 喷嘴出口宽度 2~5 mm, 计算域出口宽度 30 mm, 喷嘴出口到气流冲击壁面间距  $OH$  为 10~30 mm; 空气密度  $1.225 \text{ kg/m}^3$ , 定压比热容  $C_p$  为  $1006.43 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ , 动力粘度  $1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ , 冲击壁面水平移动速度 2 m/s; 离散网格间距 0.5 mm。

## 2 数值模拟结果与分析

冲击射流流场的特性主要表现在速度场和压力场上, 因此主要研究喷嘴射流特性和结构参数对冲击壁面附近的射流速度和压力分布的影响情况。

### 2.1 喷嘴冲击射流流场分布

采用以上仿真参数, 设定喷嘴出口宽度 3 mm, 喷嘴到壁面高度为 15 mm, 进行数值模拟。得到喷嘴对称轴线上从冲击壁面到喷嘴的速度分布与工程实测值相吻合, 见图4。由此可以看出, 通过数值模拟得出的数据是准确可靠的。

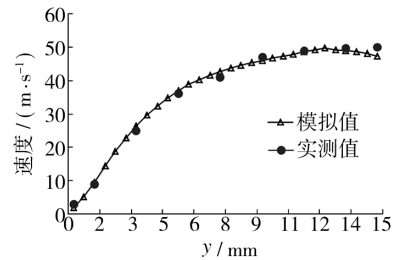
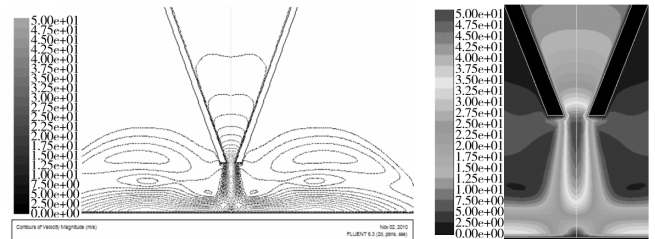


图4 对称轴上的速度分布

Fig. 4 Velocity distribution of symmetry axis

由图4可知, 在  $y=15 \text{ mm}$  处, 即喷嘴口处速度最大, 随着离喷嘴越远, 速度逐渐减小, 到坐标原点的速度基本为 0, 此点为驻点。由图中实测值或模拟值还可以看出, 在离喷嘴口的一小段距离内的速度基本保持不变, 这是因为自由射流区有一个等速核的原因, 速度在等速核区保持不变。

喷嘴冲击射流流场速度云图见图5。由图5a可



a 喷嘴射流速度云图

b 局部放大

图5 喷嘴的速度分布(m/s)

Fig. 5 Nozzle velocity distribution

看出, 介质从喷嘴射出, 由于周围介质的卷吸作用, 不断地与周围介质进行动量与质量交换, 射流速度逐渐减弱, 并且向两边扩散, 形成钟形分布。图5b为喷嘴的射流的局部放大图, 从图中可以明显看出, 在自由射流区有一个明显的核区, 此区域内速度与喷嘴出口速度相同, 并呈现倒三角分布; 在滞止区, 射流介质向两边散开, 速度不断增大, 其中驻点处的速度为 0; 在壁面射流区, 速度在射流的充分发展阶段达到最大值, 之后由于沿程阻力等原因, 逐渐减弱到 0。

为了具体反映壁面附近流场分布情况, 取在壁面

附近( $y=1\text{ mm}$ )处的速度与压力分布曲线,见图 6。

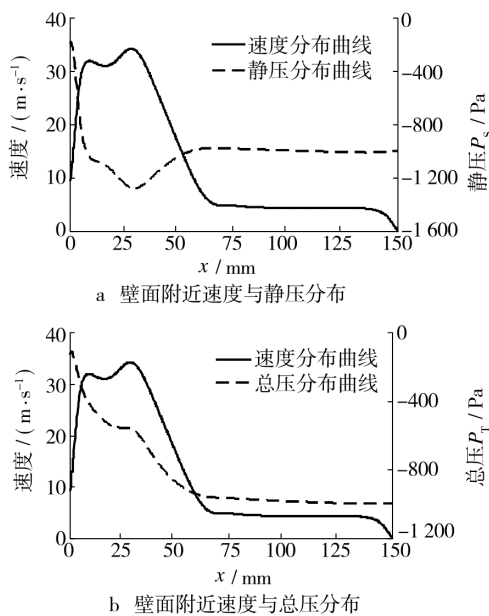


图 6 壁面附近的速度与压力分布

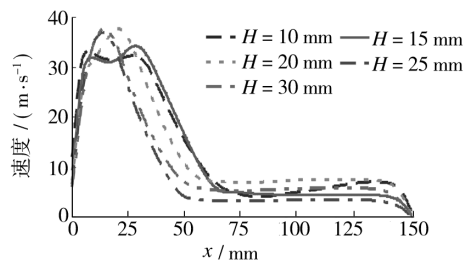
Fig. 6 Speed and pressure distribution near wall

由图 6a 和 b 可看出,射流沿壁面轴向的速度分布整体是先升后降,中间经过两波峰。第 1 个波峰出现的原因是在滞止区内,速度发生了  $90^\circ$  转向,速度由驻点处的 0 增大到一个极大值,此极大值的位置点在  $x=8\text{ mm}$  处;之后,发生壁面射流,在壁面射流的充分发展阶段出现第 2 个极值点,位置在  $x=30\text{ mm}$  处;随后,由于沿程阻力的原因,壁面射流速度逐渐减小。壁面附近的静压和总压的分布与壁面速度分布是相对应。

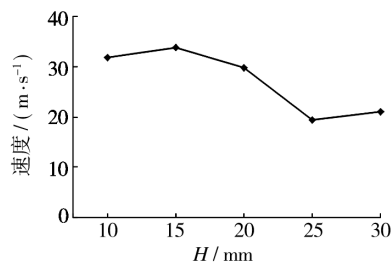
## 2.2 喷嘴高度对冲击壁面速度的影响

当喷嘴入口宽度为  $66\text{ mm}$ ,计算域入口速度为  $2\text{ m/s}$ ,计算域出口宽度  $30\text{ mm}$ ,喷嘴宽度为  $3\text{ mm}$ ,喷嘴出口到气流冲击壁面高度  $H=10,15,20,25$  和  $30\text{ mm}$  时,冲击壁面附近( $y=1\text{ mm}$ )的速度沿  $x$  轴变化曲线见图 7a;为了直观表示喷嘴高度对冲击壁面速度的影响,取  $x=30\text{ mm}$  处速度来表示与喷嘴高度之间的关系,见图 7b。

从图 7a 可看出,每条曲线的波峰即为喷嘴在此高度下速度的最大值。随着喷嘴高度的增大,壁面附近的射流速度的最大值在增大,但速度覆盖区域变窄,不利于干燥,因为在工程应用中,较大的速度可以获得较好的干燥效果。当  $H=10$  和  $15\text{ mm}$  时,曲线出现 2 个波峰,速度的覆盖区域较大,且壁面速度递减缓慢,说



a 喷嘴高度对速度的影响



b 不同喷嘴高度在  $x=30\text{ mm}$  处的速度分布

图 7 喷嘴高度对下壁面附近速度分布的影响

Fig. 7 Speed distribution of different height near wall

明在此喷嘴高度下,能够获得较好的干燥效果。

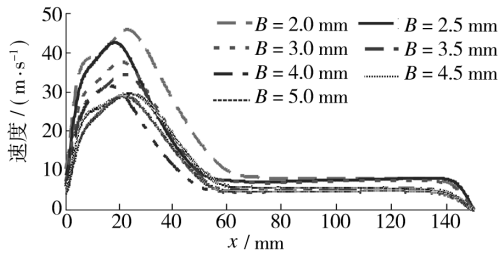
由图 7b 可知,当喷嘴高度  $H < 15\text{ mm}$  时,壁面附近速度随喷嘴高度的增大逐渐增大;当  $H > 15\text{ mm}$  时,壁面附近速度随喷嘴高度的减小而增大。这样在喷嘴高度为  $15\text{ mm}$  时,壁面附近速度达到最大值,因此,在工程应用中,一般将喷嘴高度设定在  $15\text{ mm}$  左右。

## 2.3 喷嘴宽度对冲击壁面速度的影响

当喷嘴入口宽度为  $66\text{ mm}$ ,计算域入口速度为  $2\text{ m/s}$ ,计算域出口宽度  $30\text{ mm}$ ,喷嘴高度  $H=15\text{ mm}$  时,喷嘴宽度  $B=2,2.5,3,3.5,4,4.5$  和  $5\text{ mm}$ ,冲击壁面附近( $y=1\text{ mm}$ )的速度沿  $x$  轴变化曲线见图 8。

由图 8a 可以看出,冲击壁面附近沿  $x$  轴正方向的速度整体变化趋势为先增大后减小。随着喷嘴宽度的增大,壁面附近的射流速度减小。这是因为在入口流量一定的情况下,喷嘴宽度增大,相应地喷嘴截面积增大,喷嘴出口射流速度减小,到达冲击壁面的速度也相应减小,不利于烘箱干燥。

图 8b 清晰地反映了壁面附近速度与不同喷嘴宽度的关系。取轴上同一位置点( $x=20\text{ mm}$ )处的喷嘴与速度关系,可以看出,当喷嘴宽度  $B < 2.5\text{ mm}$  时,壁面附近速度随喷嘴宽度增大而缓慢减小;当  $B > 2.5\text{ mm}$  时,壁面附近速度随喷嘴宽度增大迅速减小。况且喷嘴宽度越窄,其加工难度越大,因此,在实际的工程应用中,考虑到喷嘴效率和加工难度,较理想的喷嘴宽度为  $2.5\text{ mm}$ 。



a 喷嘴宽度对速度的影响

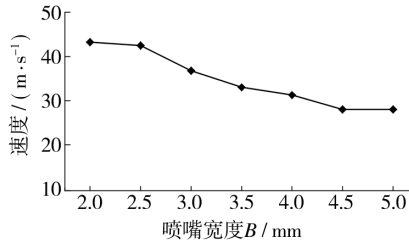
b 不同喷嘴宽度在 $x=20$  mm处的速度分布

图8 喷嘴宽度对下壁面附近速度分布的影响

Fig. 8 Speed distribution of different width shear wall

### 3 结论

1) 通过对壁面附近速度与压力的分布状况分析,了解烘箱V型喷嘴冲击射流流场特征分布。冲击射流总共包括3个区:自由射流区、滞止区和壁面射流区。在自由射流区内存在等速核区,在这个等速核区内,速度保持恒定;在滞止区内的速度和压力梯度变化最大,在此区间内的干燥效率最高;在壁面射流区,较大的壁面初始射流速度能够获得较薄的边界层,便于热量的传递,有利于烘箱干燥。

2) 对于V型条缝喷嘴,在实际工程应用中,为了使壁面射流初始速度最大,速度衰减缓慢,在冲击壁面形成较薄的边界层,并获得一个较长的干燥区域

段,从而能够保持较高干燥效率,喷嘴高度一般设定为15 mm。

3) 喷嘴宽度对射流速度的影响是明显的:当喷嘴的宽度不断减小时,壁面附近射流速度不断增大;但当喷嘴宽度 $B < 2.5$  mm时,壁面射流速度随喷嘴宽度的减小变化缓慢。综合考虑喷嘴加工难度和喷嘴效率等因素,较为理想的喷嘴宽度为2.5 mm。

### 参考文献:

- [1] 耿铁,李德群,周华民,等. 冲击射流及其强化换热的研究进展[J]. 机械设计与制造,2006(6):154-156.
- [2] COOPER D. Impinging Jet Studies of Turbulence Model Assessment—I. Flow-field Experiments[J]. Int J Heat Mass Transfer,1993,36(10):2675-2684.
- [3] BAUGHN J, SHIMIZU S. Heat Transfer Measurements from a Surface with Uniform Heat Flux and an Impinging Jet[J]. ASME J Heat Transfer,1989,111:1096-1098.
- [4] 何枫,谢峻石,郝鹏飞,等. 应用S-A模型的自由射流和冲击射流数值模拟[J]. 推进技术,2001,22(1):43-46.
- [5] 李文科. 工程流体力学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2007.
- [6] 董志勇. 射流力学[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [7] 王福军. 计算流体力学分析——CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [8] 王福军. 计算流体力学分析——CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [9] 齐学义,冯俊豪,李纯良. 三维湍流流动计算在混流式转轮水力设计中的应用[J]. 兰州理工大学学报,2006,32(5):48-52.
- [10] 陈琼,吕原君. 蜂窝纸板烘干过程的分析[J]. 包装工程,2009,30(8):19-21.

(上接第27页)

### 参考文献:

- [1] 孙和博,赵蕾. UV胶印油墨的制备及其触变性的研究[J]. 包装工程,2006,27(5):43-44.
- [2] 徐世垣. 浅析湿压湿胶印UV油墨的印刷性能[J]. 印刷技术,2007(12):37-38.
- [3] 肖忠良,巫桂英. UV油墨的制备与性能优化[J]. 精细化工中间体,2009,39(3):61-64.
- [4] 李元军. UV油墨在金属材料上的应用[J]. 丝网印刷,2009(9):27-29.
- [5] 邹洋. UV油墨在印铁中的应用浅析[J]. 印刷质量与标准化,2009(2):51-54.

- [6] PICHAVANT L. Optimization of a UV-curable Acrylate-based Protective Coating by Experimental Design[J]. Progress in Organic Coatings,2008,63(1):55-62.
- [7] 周震. 印刷油墨[M]. 北京:化学工业出版社,2000.
- [8] ELDRED Nelson R. What the Printer Should Know about Ink (Third Edition)[M]. GATF Press, 2001.
- [9] 牛一帆. 紫外固化油墨在柔印中的应用[J]. 印刷杂志,2008,37(12):18-19.
- [10] 钱军浩. 印刷油墨应用技术[M]. 北京:化学工业出版社,2003.