

## 纸浆模塑包装制品分体式吸滤成形模具的开孔问题

边兵兵<sup>1</sup>, 李伟平<sup>1</sup>, 沈新<sup>2</sup>, 李洪贵<sup>1</sup>, 张新昌<sup>1</sup>

(1. 江南大学, 无锡 214122; 2. 江苏新事达纸业有限公司, 无锡 214122)

**摘要:** **目的** 研究纸浆模塑制品分体式成形模具的开孔问题, 以保证制品厚度均匀、外观美观。 **方法** 通过分析纸模制品成形过程中滤液流动的能量损失, 建立滤液在分体式模具内的出流过程的能量方程, 以研究模具特定部位间应具有的开孔率关系。 **结果** 建立了模具不同部位之间的开孔率关系式, 并研究了模具各部位的布孔方法。 **结论** 为保证纸模制品壁厚一致, 模具不同部位间的开孔率需满足一定关系; 模腔底面宜采用 60° 错排的布孔方式, 而直立侧壁可划分成若干连续的单位开孔区, 采用非均匀性布孔方式。

**关键词:** 纸浆模塑; 分体成形模具; 能量损失; 开孔率; 布孔

**中图分类号:** TB486+.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)17-0044-05

## Opening Problem of Split Type Suck-filtration Mold for Molded Pulp Packaging Products

BIAN Bing-bing<sup>1</sup>, LI Wei-ping<sup>1</sup>, SHEN Xin<sup>2</sup>, LI Hong-gui<sup>1</sup>, ZHANG Xin-chang<sup>1</sup>

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Xinshida Paper Co., Ltd., Wuxi 214122, China)

**ABSTRACT:** The aim of the study was to research the opening problem of split type suck-filtration mold for molded pulp packaging products, in order to ensure that the product thickness is uniform, and the appearance was good. Through analyzing the energy loss of the filtrate flowing in the molding process of the molded pulp packaging products, the energy equation of filtrate flowing process in the split type mold was established, to research the relationship of the opening ratio between the specific parts of the mold. Equation for the opening ratio relationship between different parts of the mold was established, and the opening arrangement method in different parts of the mold was studied. In order to ensure uniform thickness of the product, the opening ratio between different parts of the mold need to meet a certain relationship; Cavity bottom should use 60° staggered opening arrangement method, and the vertical wall can be divided into several continuous unit opening areas, using heterogeneous opening arrangement method.

**KEY WORDS:** molded pulp; split suck-filtration mold; energy loss; opening ratio opening arrangement

纸浆模塑制品的成形是一个立体造纸的过程, 这样就使得成形模具存在顶角、棱边、表面有高低和倾斜程度的差别<sup>[1]</sup>。为使纸纤维能够沉积分布均匀, 模具各部位的开孔率应是不同的<sup>[2-3]</sup>。制品内腔深度较大或采用注浆工艺, 容易出现制品厚度不均的问题<sup>[4]</sup>, 可通过模具的合理布孔来避免。目前, 模具各部位的开孔率一般依靠经验<sup>[5]</sup>来确定。

文中以一种分体式成形模具为例研究模具的开孔问题, 该模具用于成形具有直壁形结构(相邻侧面呈 90° 角相交), 或具有封闭空腔, 或成形为小开口容器<sup>[6-8]</sup>的纸模制品。为保证制品在模具内成形厚度均匀, 重点研究了该类模具各部位的开孔率关系、开孔要求和布孔方法等内容, 以期能为模具的开孔提供一定的科学依据。

收稿日期: 2014-12-24

作者简介: 边兵兵(1989—), 男, 江西吉安人, 江南大学硕士生, 主攻纸质包装结构及加工装备开发。

通讯作者: 张新昌(1961—), 男, 河南人, 江南大学教授、硕导, 主要研究方向为产品包装整体解决方案、包装材料与结构。

## 1 分体式成形模具结构

分体式成形模具结构见图1,包括成形上模和成形下模两大部分,其中成形上模是对称的分体式结构。在成形过程中,成形上、下模合模形成一个模腔,通过注浆头往模腔中定量注浆,注浆的同时进行抽真空,滤液通过模具滤水孔排出模腔,而纸浆纤维逐渐沉积在网模上,直至定量的浆料全部吸滤完毕,得到一定厚度的制品湿坯。

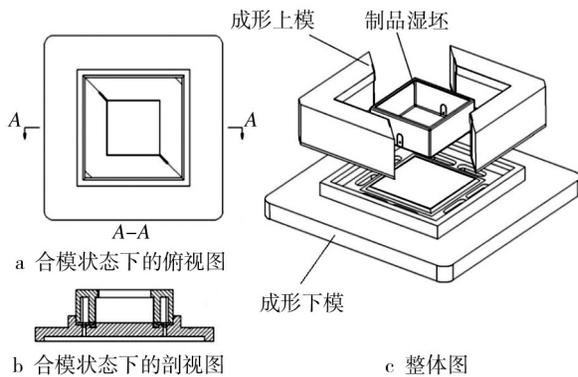


图1 分体式成形模具结构

Fig.1 Structure diagram of split type forming mold

该模具用于成形无脱模斜度的纸模制品,适用于注浆式真空吸滤成形工艺。模具模腔是直壁的方形结构,相邻工作面间交角为 $90^\circ$ ,不存在传统模具的各种倾斜面及其他复杂结构。模腔有5个工作面,分别是模腔底面和4个等效的直壁面。为保证制品的成形厚度均匀,各工作面的开孔率应不同。

## 2 分体式成形模具特定部位间的开孔率关系

### 2.1 滤液流动能量损失分析

浆料滤液流动的能量损失主要来自湿坯和成形模具的阻力<sup>[9]</sup>。纸浆模塑湿坯是典型的多孔介质,纸浆滤液流过湿坯的通道为不规则的网状孔隙,可将其简化为一个截面形状复杂多变而孔隙截面积维持恒定的流管道<sup>[10]</sup>。湿坯的一侧与浆料接触,另一侧与滤网和滤水孔口紧密接触,冲水和注浆对模腔中浆料扰动较大,且湿坯两侧的流速变化很大,则可认为滤液通过湿坯的流动为湍流。湍流时局部阻力对压强的变化影响很大,而粘滞能量损失较小,可忽略不计<sup>[11-12]</sup>。根据平均水力半径模型得到的Burke-Plummer方程,可得滤液

通过湿坯层的压强损失为:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{7a(1-\varphi)\rho v^2}{24\varphi} \quad (1)$$

式中: $\Delta p$ 为湿坯两侧压差(Pa); $L$ 为湿坯厚度(m); $a$ 为比表面积(1/m); $\varphi$ 为孔隙率; $\rho$ 为滤液密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $v$ 为平均流速(m/s)。

由式(1)可得滤液流过湿坯的水头损失为:

$$h_m = \frac{\Delta p}{\rho g} = \frac{7(1-\varphi)aL}{12\varphi} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

令 $\gamma = \frac{7(1-\varphi)aL}{12\varphi}$ ,称为湿坯的阻力系数,它与

湿坯的孔隙率、比表面积和厚度有关,则公式(2)可写成:

$$h_m = \gamma \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

在湿坯成形过程中,成形模具的阻力主要来源于滤水孔和网模,它远小于湿坯的阻力,可将成形模具抽象为并联的滤水孔与模腔的等效管串联<sup>[13-14]</sup>。管道内流体流动的能量损失由沿程损失和局部损失构成。用水头损失<sup>[15]</sup>表达时,滤液流经成形模具的能量损失计算式为:

沿程水头损失:

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

局部水头损失:

$$h_l = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

式中: $\lambda$ 为沿程阻力系数; $l/d$ 为管道长径比; $v$ 为平均流速(m/s); $g$ 为重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ ); $\zeta$ 为局部阻力系数。

### 2.2 模具不同部位间开孔率关系式的建立

理想不可压缩流体恒定元流中,各断面总水头相等,受单位重力作用的流体的总能量保持不变<sup>[11]</sup>。总流可以看作无数元流之和,总流的任意2个断面1,2间的恒定总流能量方程式为:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{12} \quad (6)$$

式中: $Z_1, Z_2$ 为1,2断面上任一点相对于基准面的高度(m); $p_1, p_2$ 为相应断面处的压强(Pa); $\alpha_1, \alpha_2$ 为相应断面处的动能修正系数; $v_1, v_2$ 为相应断面处的平均流速(m/s); $h_{12}$ 为流体流经断面1,2间的单位水头损失(m)。

注满浆液的模具模腔结构见图2,模腔壁厚 $L=10$  mm,滤水孔直径 $d=3$  mm,则滤水孔长径比满足 $l/d$ 为

3~4,则浆液通过滤水孔的出流可以当作圆柱形外管嘴出流<sup>[15]</sup>。

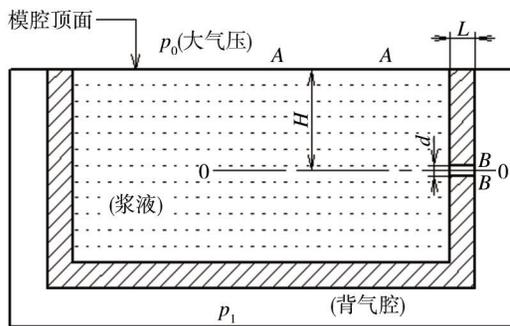


图2 成形模具滤水孔出流模型

Fig.2 The water filtering hole flow model of forming mold

假设浆料刚好充满模腔,将滤液看作是恒定流动的理想不可压缩流体。选取模腔顶面A-A与滤水孔尾端B-B 2个断面,滤水孔可以看作是管嘴,两断面间的水头损失主要来自湿坯和管嘴的阻力,可分别由公式(3)~(5)计算。以模具工作面任意位置的滤水孔中心线为基准线,根据伯努利方程,列A-A及B-B断面的能量方程:

$$H + \frac{p_0}{\rho g} + \frac{a_A v_A^2}{2g} = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{a_B v_B^2}{2g} + \gamma \cdot \frac{v_B^2}{2g} + \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v_B^2}{2g} + \zeta \cdot \frac{v_B^2}{2g} \quad (7)$$

式中: $H$ 为滤水孔位置离模腔顶面的距离(m); $\rho$ 为滤液密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $g$ 为重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ ); $\gamma$ 为湿坯阻力系数, $\gamma = \frac{7(1-\varphi)aL}{12\varphi}$ ;  $\lambda$ 为沿程阻力系数; $l/d$ 为滤水孔长径比; $\zeta$ 为局部阻力系数。

管嘴的水头损失主要是局部损失,沿程损失很小可略去。对比于断面B-B处平均流速 $v_B$ ,断面A-A处平均流速 $v_A$ 很小,可忽略不计,则公式(7)可化为:

$$H + \frac{p_0}{\rho g} = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{a_B v_B^2}{2g} + \gamma \cdot \frac{v_B^2}{2g} + \zeta \cdot \frac{v_B^2}{2g} \quad (8)$$

$$H + \frac{p_0 - p_1}{\rho g} = (\alpha_B + \gamma + \zeta) \frac{v_B^2}{2g} \quad (9)$$

滤水孔平均流速为:

$$v_B = \frac{1}{\sqrt{\alpha_B + \gamma + \zeta}} \cdot \sqrt{2g(H + \frac{p_0 - p_1}{\rho g})} \quad (10)$$

滤水孔流量:

$$Q_v = v_B \cdot A = \varphi A \sqrt{2g(H + \frac{p_0 - p_1}{\rho g})} = \mu A \sqrt{2g(H + \frac{p_0 - p_1}{\rho g})} \quad (11)$$

式中: $A$ 为滤水孔截面积( $\text{m}^2$ ); $\varphi$ 为孔口流速系数,

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha_B + \gamma + \zeta}}; \mu \text{ 为孔口流量系数,因出口断面}$$

无收缩,则 $\mu = \varphi$ 。

动能修正系数 $\alpha_B$ 根据流速在断面B上的分布的均匀性来确定,层流流动时 $\alpha = 1$ ,湍流流动时 $\alpha$ 为1.05~1.1,局部阻力系数 $\zeta$ 与滤水孔进口边缘类型有关,可查表得到。成形模具工作时的真空度 $p_0 - p_1$ 可当作固定值,令 $h_0 = \frac{p_0 - p_1}{\rho g}$ ,称为真空度产生的压强水头,则公式(11)可化为:

$$Q_v = \mu_A \sqrt{2g(H + h_0)} \quad (12)$$

公式(12)表明,若真空度一定,孔径相同,则模具滤水孔流量只与小孔离模腔顶面的距离有关。

分体式成形模具的模腔顶面与底面平行,离模腔顶面相同距离处的滤水孔流量相等。假如纸浆纤维在滤液中均匀分布,在单位时间内,若模具任意2个单位开孔区内的滤水孔总流量相同,则两开孔区截留的纸浆纤维量也相同。此时,若单位开孔区内开孔均匀,则可确保两开孔区内湿坯成形厚度相同,由此可得:

$$Q_{v1} \cdot \frac{K_1 \cdot \Delta S}{A_1} = Q_{v2} \cdot \frac{K_2 \cdot \Delta S}{A_2} \quad (13)$$

将式(12)代入式(13)可得:

$$\mu_1 A_1 \sqrt{2g(H_1 + h_0)} \cdot \frac{K_1 \cdot \Delta S}{A_1} = \mu_2 A_2 \sqrt{2g(H_2 + h_0)} \cdot \frac{K_2 \cdot \Delta S}{A_2} \quad (14)$$

式中: $A_1, A_2$ 为离模腔顶面不同距离处的滤水孔截面积( $\text{m}^2$ ); $H_1, H_2$ 为不同部位的滤水孔离模腔顶面的距离(m); $K_1, K_2$ 为离模腔顶面不同距离处的模具开孔率; $\Delta S$ 为选取的单位开孔区面积( $\text{m}^2$ )。

若两开孔区上湿坯厚度相同,则 $\mu_1 = \mu_2$ 。一般模具各处滤水孔孔径相等,则 $A_1 = A_2$ 。由公式(14)可得模腔任意两部位间的开孔率关系式:

$$\frac{K_1}{K_2} = \sqrt{\frac{H_2 + h_0}{H_1 + h_0}} \quad (15)$$

式(15)表明,若在保证制品厚度均匀,模腔任意两部位间的开孔率关系需满足式(15),它与部位离模腔顶面的距离有关。

### 2.3 分体成形模具的开孔要求分析

分体成形模具的模腔底面各处离模腔顶面的距离相等,模腔4个直壁工作面分别与模腔顶面垂直相交。由此,根据公式(15)分析模具各部位间的开孔率

关系,可知模具开孔要求:模腔4个侧壁面为等效的工作面,它们的开孔率要求相同,且侧壁工作面上部的开孔率大于下部;模腔底面各位置的开孔率相同,底面应为均匀开孔;由于棱边或角隅处位置的特殊性,其开孔率应比周围部位更大。

### 3 分体式成形模具各部位的布孔

#### 3.1 孔排列方式及开孔率计算方法

如图3所示,在纸浆模塑成形模具布孔时,滤水孔的排列方式主要有2种:直排和60°错排。均匀布孔时,直排孔的加工相对简单,而60°错排的方式可使开孔率范围更广,对模具强度影响小,且外观更好。非均匀布孔时,不宜采用错排的方式,而直排孔可通过改变行间距或列间距来实现。

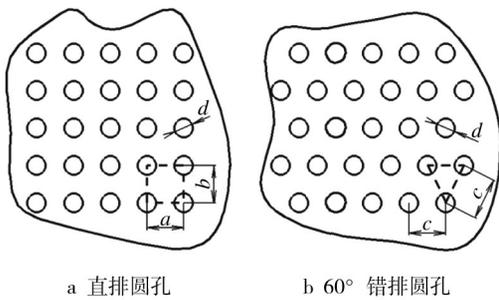


图3 滤水孔的2种排列方式

Fig.3 Two kinds of arrangement modes of water filtering hole

在一定大小的开孔区内,滤水孔的孔径、孔间距及孔数量决定了开孔率的大小。模具滤水孔为直圆孔,一般孔径为2~3 mm。开孔区内滤水孔排列方式不同,其开孔率计算方法也不同。对于直排的开孔区,取图3a中虚线区域为一个单位开孔区,整个开孔区由若干个单位开孔区组成,则可得到直排开孔区的开孔率计算公式:

$$K_1 = \frac{\pi d^2}{4ab} \times 100\% \quad (16)$$

同理,如图3b所示,取虚线区域为一个单位开孔区,可得到60°错排开孔区的开孔率计算公式:

$$K_2 = \frac{\pi d^2}{2\sqrt{3}c^2} \times 100\% \quad (17)$$

#### 3.2 模具各部位的布孔方法

##### 3.2.1 模腔底面的布孔方法

由3.1节分析可知,文中研究的分体模具模腔底面为均匀开孔,60°错排的方式可使底面抽吸力分布

更均匀。在60°错排方式中,隔行的孔排列是直排方式,所以在加工错排孔时,隔行的孔可互为定位参照,因此60°错排布孔前,需要确定孔间距和行间距。由公式(17)可得到孔间距的计算公式为:

$$c = \sqrt{\frac{\pi d^2}{2\sqrt{3}K_2}} \quad (18)$$

如图3b所示,60°错排的行间距应为孔间距的 $\frac{\sqrt{3}}{2}$ ,则隔行的间距为 $\sqrt{3}c$ 。

##### 3.2.2 模腔侧壁的布孔方法

分体模具模腔的侧壁工作面见图4。由公式(15)可知,模腔侧壁的L方向上开孔率相同,而在H方向上开孔率逐渐减小,则模腔侧壁整体为非均匀开孔,应采用直排孔的排列方式。按照开孔率要求,直排孔的列间距应始终不变,而行间距在H方向上应逐渐减小。显然,行间距的变化会给孔的定位与加工带来很大困难。

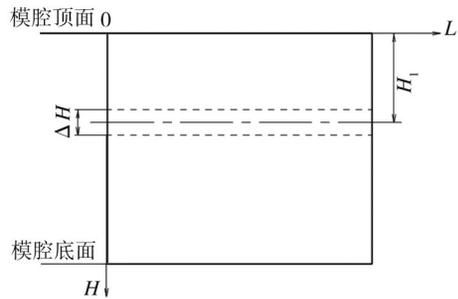


图4 模腔侧壁工作平面

Fig.4 The working plane of cavity side wall

由公式(15)可知,当2个部位离模腔顶面的距离之差足够大时,其开孔率才有足够的差别,即当 $H_1-H_2$ 的值较小时,可认为 $K_1 \approx K_2$ 。取图4中的虚线区域为一个单位开孔区,它在H方向的跨度为 $\Delta H$ 。当 $\Delta H$ 的值较小时,可认为单位开孔区内的开孔率相同,且用中心部位的开孔率代表整个区域的开孔率。由此,可将模腔侧壁划分为若干连续的单位开孔区,且单位开孔区内为均匀开孔。这种方法既能满足模腔侧壁非均匀开孔的要求,又利于模具开孔的加工操作。

### 4 结语

为避免制品厚度不均的问题,以一种分体式成形模具为例,研究了模具各部位的开孔问题:分体模具各部位的开孔率与该部位距模腔顶面的距离相关,距离相同的部位则开孔率相同,且开孔率大小随距离的增大而减小;模腔底面为均匀布孔,60°错排布孔可

使模腔底面的抽吸力分布更均匀;模腔侧壁为非均匀布孔,可将其划分成若干连续的单位开孔区,并在单位开孔区内均匀布孔。

建立的开孔率关系式可用于分析模具不同部位的开孔率要求,为模具的开孔提供了一定的科学依据。通过选取单位开孔区,可将非均匀开孔区划分成若干连续的均匀开孔区,为非均匀布孔提供了一种简单而有效的新方法。

#### 参考文献:

- [1] 黄丽飞,和克智,王大威. 纸浆模塑制品生产工艺、常见问题及对策的研究[J]. 包装与食品机械, 2009, 27(3): 51—54.  
HUANG Li-fei, HE Ke-zhi, WANG Da-wei. Research on Molded Pulp Production Process, Common Problems and Counter Measures[J]. Packaging and Food Machinery, 2009, 27(3): 51—54.
- [2] 黄俊彦,朱婷婷. 纸浆模塑生产实用技术[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2007.  
HUANG Jun-yan, ZHU Ting-ting. Practical Technology for Production of Molded Pulp[M]. Beijing: The Printing Press, 2007.
- [3] 杨广衍,于谨,赵元,等. 真空吸滤过程影响纸浆模塑制品质量问题的分析[J]. 真空, 2005, 42(3): 49—50.  
YANG Guang-yan, YU Jin, ZHAO Yuan, et al. Effect of Vacuum Suction/Filtering on Quality of Disposal Pulp Molded Food Wares[J]. Vacuum, 2005, 42(3): 49—50.
- [4] 求亚珍,俞威. 纸浆模塑中捞浆与灌浆方式对制品均匀一致性的影响[J]. 轻工机械, 2005(3): 121—122.  
QIU Ya-zhen, YU Wei. Influences on Pulp Homogeneity by Way of Dredging & Filling in Pulp Molding[J]. Light Industry Machinery, 2005(3): 121—122.
- [5] 侯秀菊. 纸浆模塑快餐具成形模具结构的设计[J]. 本溪冶金高等专科学校学报, 2004, 6(3): 19—20.  
HOU Xiu-ju. Structure Design of Molded Pulp Tableware Mold[J]. Journal of Benxi College of Metallurgy, 2004, 6(3): 19—20.
- [6] 曹国荣. 纸浆模塑制品的研究进展[J]. 包装工程, 2006, 27(1): 25—27.  
CAO Guo-rong. Progress in the Development of Molded Pulp Products[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1): 25—27.
- [7] 刘志忱,叶柏彰. 封闭式型腔制品使纸浆模塑产业更上一层楼[J]. 中国包装, 2006(3): 76—77.  
LIU Zhi-chen, YE Bai-zhang. Closed Cavity Products Make the Molded Pulp Industry Have a Further Improvement[J]. China Packaging, 2006(3): 76—77.
- [8] AKIRA N, YASUSHI Y, YASUSHI Y, et al. Method for Producing Pulp Molded Article: USA, US006605187B1[P]. 2003-05-18.
- [9] 于岩. 基于RE&RP的纸浆模塑模具关键技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.  
YU Yan. Study on Key Technology of Molded Pulp Products and Moulds Based on RE&RP[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [10] 张以忱,黄英,姜翠宁. 纸浆模塑真空吸滤成形机理研究[J]. 真空, 2003(3): 52—57.  
ZHANG Yi-chen, HUANG Ying, JIANG Cui-ning. Shaping Principle of Vacuum Filtering of Pulp-molding[J]. Vacuum, 2003(3): 52—57.
- [11] 吴金随. 多孔介质里流动阻力分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.  
WU Jin-sui. Analysis of Resistance for Flow through Porous Media[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [12] 冯劲梅. 流体力学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007.  
FENG Jin-mei. Fluid Mechanical[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2007.
- [13] 欧汉德. 纸塑吸滤模具中吸滤成形设计的改进研究[J]. 模具制造, 2011(1): 69—71.  
OU Han-de. Improvement of Design for Paper Suction Molding Mold[J]. Mold Manufacturing, 2011(1): 69—71.
- [14] 于永建,张新昌. 纸浆模塑真空吸滤成形阻力因素分析[J]. 包装工程, 2005, 26(1): 12—13.  
YU Yong-jian, ZHANG Xin-chang. Analysis on Resistance of Vacuum Filtering Molding Process[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(1): 12—13.
- [15] 龙天渝,蔡增基. 流体力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
LONG Tian-yu, CAI Zeng-ji. Fluid Mechanical[M]. Beijing: Chinese Building Industry Press, 2012.