

研究论文

管状模腔的气辅注射成型气体穿透机理
的数值模拟分析

李 倩 申长雨 王利霞 刘春太 董斌斌

(郑州大学橡塑模具国家工程研究中心, 河南 郑州 450002)

摘 要 介绍了圆管内气辅注射成型充填/后充填模拟的数学模型及其数值实现, 通过算例验证, 对圆管内的气辅注射成型气体穿透过程及其基本规律和影响因素进行了讨论和分析。

关键词 气体辅助注射成型 数值模拟 气体穿透

中图分类号 TQ 320.5

文献标识码 A

文章编号 0438-1157 (2003) 04-0575-06

NUMERICAL SIMULATION OF GAS PENETRATION IN
GAS-ASSISTED INJECTION MOLDING

LI Qian, SHEN Changyu, WANG Lixia, LIU Chuntai and DONG Binbin

(National Engineering Research Center of Advanced Polymer Processing Technology,
Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract This paper presents a mathematical model which describes the filling/post-filling during gas-assisted injection molding in a tube and its numerical solution. With the verification by an example, the principle and affecting factors of gas penetration during gas-assisted injection in a tube are studied and analyzed.

Keywords gas-assisted injection, numerical simulation, gas penetration

引 言

气体辅助注射成型技术 (Gas Assisted Injection Molding, 简称 GAIM) 是为克服传统注塑成型和发泡成型的局限性而发展起来的实用新技术。由于气辅注射成型过程引入了许多新的参数, 如气道尺寸、注气口位置、熔体预注射量、注气延迟时间、气体压力和气体注射时间等, 因此, 其设计和应用比传统注射成型复杂得多, 要精确地描述其中的熔体-气体两相流动过程十分困难。利用 CAE 技术对气辅注射成型过程进行模拟分析, 可以了解和掌握工艺关键和成型规律, 从而为工程应用提供科

学依据。

近十年来, 气体辅助注射成型数值模拟得到了广泛应用, 取得了不少进展。但仍有许多问题有待了解和解决。气体穿透机理正是目前气辅成型工艺研究中的热点问题。本文基于圆管内气辅注射成型充填/后充填模拟的数学模型, 选取一回形管作为模拟制件, 对圆管内气辅注射成型气体穿透机理进行了讨论和分析。

1 气辅成型气体穿透过程的物理描述

通常将气体辅助注射成型过程分为 4 个主要阶段: 熔体充填阶段, 气体充填阶段, 保压阶段, 冷

2002-11-15 收到初稿, 2003-03-04 收到修改稿。

联系人及第一作者: 李倩, 女, 40 岁, 硕士, 教授。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 2002AA336120)。

Received date: 2002-11-15.

Corresponding author: Prof. LI Qian. E-mail: qianli@zzu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 2002AA336120).

却阶段。其中，熔体充填阶段和传统注射成型相同，在这一阶段聚合物熔体注入模具型腔，一般在型腔充填至 70%~97%（随产品而异）时，停止熔体注射（称为欠料注射），然后进入气体注射阶段，将高压气体通过浇口、流道注入熔体芯部或直接进入型腔内部，熔体流动前沿在高压气体驱动下继续向前流动直至将整个型腔充满，此时的气体穿入称为气体首次穿透。接着进入保压阶段，制件在保持气体压力情况下冷却，在冷却过程中，气体由内向外施压，保证制品外表面紧贴模壁，并通过继续向型腔中注入高压气体，从内部补充因熔体冷却凝固而引起的体积收缩。气体在此阶段的穿入过程称为气体二次穿透，如图 1 所示。

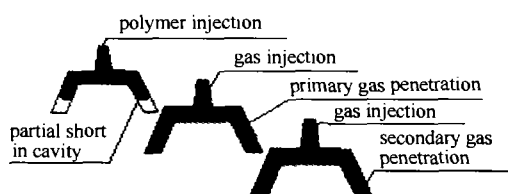


Fig. 1 Gas-penetration in short shot process

气辅成型熔体注射阶段熔体流动行为与常规的注射成型过程完全一样[如图 2(a)]，型腔中从入口处到熔体前沿的压力降 Δp_{total} 等于熔体沿流动方向上的压力降 Δp_{melt} [如图 3(a)]，即

$$\Delta p_{\text{total}} = \Delta p_{\text{melt}} \quad (1)$$

但随着气体的注入，与常规注射成型充填不同，气体推动型腔中已充填的熔体继续向前运动。对于喷嘴处进气的情况，从入口处到熔体前沿处的总压力降 Δp_{total} 就等于入口处到气体前沿处在气体上产生的压力降 Δp_{gas} 和气体前沿到熔体前沿处在熔体上产生的压力降 Δp_{melt} 两部分之和，即

$$\Delta p_{\text{total}} = \Delta p_{\text{gas}} + \Delta p_{\text{melt}} \quad (2)$$

由于气体和熔体相比黏度很小，可以忽略不计^[1,2]，认为气体上产生的压力降为零， $\Delta p_{\text{gas}} = 0$ ，

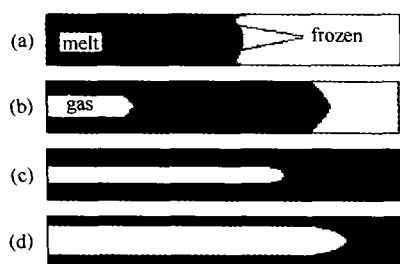


Fig. 2 Polymer melt and gas flow in filling/post-filling process

即气体可以没有压力损失地进行压力传递[如图 3(b)]，使成型压力明显降低。

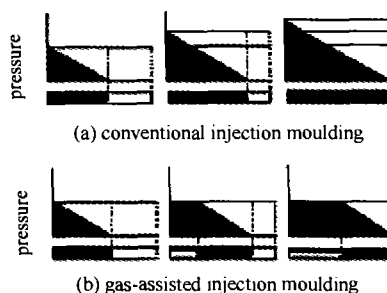


Fig. 3 Injection molding pressure distributing

通过控制熔体注射和气体注射之间的延迟时间，可控制型腔中熔体冷凝层的厚度，从而调节气体的流动空间。在一定的延迟时间之后（一般为几秒钟）开始注入气体。一旦进入气体充填阶段即首次气体穿入开始，气体将沿着阻力最小的路径前进，阻力最小的路径也是压力梯度变化最快的方向。在这个阶段，高压气体推动聚合物熔体向前流动，因此，此时实际上是气体/熔体两相流动[如图 2(b)]。在气体流过型腔的同时，气体推动先注入的聚合物进入型腔中仍然未充填的区域[如图 2(c)]，气体与熔体同时流动直到所有的区域被聚合物熔体填满。这个阶段非常短，但对聚合物在型腔中建立合理的分布却具有重要意义。型腔内聚合物在气体的推动下重新分布的结果是，等量的气体充入被移动的熔体所在位置。因此，此阶段结束时，制件中出现一系列的空气道[如图 2(d)]。在熔体充填结束、气体充填开始阶段，熔体/气体的切换时间是一个极其重要的工艺参数，如果聚合物充填过多，则很难形成所期望的气道流动，不能体现出气辅的优越性；若聚合物注入太少，那么气体流动过程就有可能渗透到气道之外，引起气体大量充入薄壁部分，出现气体吹穿现象。

从以上分析可以看出，在气体辅助注射充填过程，熔体的预注射量、熔体/气体的切换时间（延迟时间）对气体首次穿入的流动行为影响非常显著。充填过程结束后，塑料熔体在冷却作用下，密度变大，造成体积收缩，一般来讲，塑料从熔融态转变为固态时体积变化可高达 25%，因此在充填结束后若不采取措施向型腔中补料，则无法得到合格的塑料制品。为了得到满意的制品，常规的注射成型在充填结束时需在较高的保压压力作用下向型腔内继续注料以弥补由于温度、压力变化造成的体积收缩。

气辅成型则是通过二次气体穿入来解决这一问题。

2 数学模型的建立

根据上述气辅成型过程的物理描述，气体穿透贯穿于整个充填/后充填阶段，为了准确描述气体穿透规律和形成机理，需建立充填/后充填阶段统一的数学模型。

2.1 控制方程

由于气辅成型中的气体在运动中具有一些特性，如在模具型腔中的最大速度差一般小于 $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，可把其当作不可压缩流体来处理，即 $\nabla \cdot V=0$ ；气体黏性比塑料的黏性小得多，可忽略不计，即 $\eta=0$ ；传热能力很弱，可认为其内部无能量交换，即自动满足能量方程；密度与聚合物相比非常小，可忽略等，因此，在气体充填流动过程中，型腔中的流动仅以熔体区域内部、熔体-气体边界及熔体前沿界面为研究对象，气体对熔体的作用通过施加在熔体-气体边界上的边界条件来体现。

根据对气体运动的分析和假设，可推出气体运动的控制方程为

$$p=p(t), T=T(t) \quad (3)$$

即型腔中气体的压力和温度处处相等，仅随时间变化。

根据圆管内塑料熔体充模流动的特点，假设熔体在圆管中为完全发展流，并忽略其惯性力和质量力，且认为熔体不含内热源，即 $q=0$ 。在柱坐标下，根据黏性流体力学基本方程，利用以上假设和简化，可推导出气体辅助注射成型充填/后充填过程中熔体流动的控制方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) = 0 \quad (4)$$

$$0 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \eta \frac{\partial u}{\partial r}) - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5)$$

$$\rho c_p(T) \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (6)$$

式中 x 是圆形流道的轴向坐标； r 是径向坐标； u, v 分别是 x, r 方向上的速度分量； $\rho, c_p, k, \eta, \dot{\gamma}$ 分别表示密度、比热容、热导率、黏度和剪切速率； t 表示时间； p 表示压力； T 表示温度；剪切速率 $\dot{\gamma}$ 定义为

$$\dot{\gamma} = \left| \frac{\partial u}{\partial r} \right| \quad (7)$$

对于熔体流变模型的选择，由于本文所讨论的气体穿透是气辅注射成型过程充填/后充填阶段的主要特征，而这一阶段中压力变化幅度大，压力对

熔体黏度的影响不能忽略不计，即熔体不再作为不可压缩处理，因此，本文在讨论气辅注射成型过程熔体的流变行为时，采用 7 参数表征的 Cross-WLF 模型^[3,4]。

Cross-exp 模型为

$$\eta(\dot{\gamma}, T, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (8)$$

式中 τ^* 为材料常数， n 为非牛顿指数， η_0 为零剪切黏度。

WLF 型表达式为

$$\eta_0(T, p) = D_1 \exp \left(-\frac{A_1(T-T^*)}{A_2+(T-T^*)} \right) T > T^* \quad (9)$$

$$A_2 = \bar{A}_2 + D_3 p$$

$$T^*(p) = D_2 + D_3 p$$

$$\eta_0(T, p) = \infty \quad T \leq T^* \quad (10)$$

式中 $D_1, D_2, D_3, A_1, \bar{A}_2$ 都是材料常数。

2.2 边界条件

在径向方向采用如下边界条件

$$u=0=v, T=T_w \quad (\text{在 } r=R \text{ 处}) \quad (11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial T}{\partial r} = 0, v=0 \quad (\text{在 } r=0 \text{ 处}) \quad (12)$$

式中 T_w 为模壁温度， R 为圆管直径。

在熔体前沿处

$$p=0 \quad (13)$$

在型腔边界上满足无渗透边界条件

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (14)$$

在熔体-气体边界处

$$p=p_g \quad (15)$$

式中 p_g 为气体注射压力。

3 数值实现

选用有限元/有限差分耦合法进行数值求解，在流动平面内将各待求量用有限元法近似，在型腔壁厚方向以及时间用有限差分法近似。采用控制体积法确定熔体前沿位置和熔体-气体边界位置。

3.1 温度场的离散

熔体温度在流动平面内和沿型腔壁厚方向均发生变化，因此，为求解温度场，需沿厚度方向引入差分网格，并在单元结点处求解能量方程，在 z 向引入均匀差分网格，即

$$Z_j = (j-1)\Delta z \quad (j=1, 2, \dots, NZ+1) \quad (16)$$

同时，采用可变时间增量

$$t_1=0, \quad t_{k+1}=t_k + \Delta t_k \quad (k \geq 1) \quad (17)$$

单元内的温度采用线性插值, 对于一维柱单元, 有

$$T^{(i)}(x, r, t) = \sum_{k=1}^2 L_k^{(i)}(x) T_k^{(i)}(r, t) \quad (18)$$

式中 $L_k^{(i)}(x)$ 为一维柱单元的插值函数

$$L_k^{(i)}(x) = \frac{1}{L^{(i)}} [b_{1k}^{(i)} + b_{2k}^{(i)} x] \quad k=1, 2 \quad (19)$$

式中 $L^{(i)}$ 是一维柱单元的长度, 对 $k=1, 2$ 有

$$\begin{aligned} b_{1k}^{(i)} &= x_2^{(i)}, \quad -x_1^{(i)} \\ b_{2k}^{(i)} &= -1, \quad 1 \end{aligned}$$

对于能量方程中的瞬态项和热传导项分别采用向后差分法和隐式差分近似, 对于热对流项和黏性热项采用“上风法”进行计算。

3.2 压力场的离散

一旦求得温度场, 便可更新黏度场、密度场, 然后根据压力控制方程求出压力场。用伽辽金 (Galerkin) 加权余量法对压力控制方程进行离散。

单元内压力分布采用线性插值表示, 即

$$p^{(i)}(x, t) = \sum_{k=1}^2 L_k^{(i)}(x) p_k^{(i)}(t) \quad (20)$$

根据圆管内熔体充填流动的压力场控制方程, 利用伽辽金法, 得到压力场的有限元方程如式 (21), 并采用松弛迭代法求解压力场。

$$\begin{aligned} \sum_i \left[\frac{L^{(i)}}{2} G^{(i)} \sum_{j=1}^2 E_{ij}^{(i)} \frac{p_{N'} - \bar{p}_{N'}}{\Delta t} + \bar{S}^{(i)} \sum_{j=1}^2 D_{ij}^{(i)} p_{N'} \right] \\ = - \sum_i \left[\frac{L^{(i)}}{2} F^{(i)} \right] \end{aligned} \quad (21)$$

3.3 熔体流动前沿位置与熔体/气体边界位置的确定

在气体辅助注射成型充填过程中, 型腔中有两种移动边界: 一是气体充填区域和熔体充填区域之间的熔体-气体边界, 二是熔体充填区域和空区域之间的熔体前沿面, 它们直接反映了型腔的充填程度和型腔内熔体和气体的空间分布。因此准确地跟踪这两种移动边界十分重要。

本文采用控制体积^[5]方法对熔体前沿和熔体-气体边界这两类运动边界进行跟踪^[1,6], 对每个控制体积引入量纲 1 系数充填因子 f 和厚度比因子 f_s 。定义充填因子 $f = \frac{V_m}{V}$, 这里 V 和 V_m 分别表示节点的控制体积和该控制体积已被充填部分的体积。因而 f 的大小反映了控制体积的熔体充满程度。厚度比因子 $f_s = \frac{a}{b}$, 其中 a 为气体外层聚合物的厚度, 由冷凝层和黏附层形成, b 为型腔的厚度,

因而 f_s 的大小反映了控制体积的气体充填程度。

对移动边界的跟踪, 可根据当前的压力场、流动区域及所选时间步长, 确定下一个时刻熔体区域各个控制体积被熔体充满情况及熔体-气体边界上的有效控制体积内的气熔分布情况, 更新 f 、 f_s , 确定新的计算区域。再计算新一时刻的温度场和压力场, 如此进行下去, 直至整个型腔被充满。

3.4 时间步长的确定

时间步长的选择应兼顾收敛性和计算时间的要求。

熔体充填阶段, 时间步长的选取原则是: 计算出使每一个前沿结点控制体积充满所需时间, 选取最小值作为时间步长, 即每一时间步长中刚好有一个控制体积被充满, 与其相邻的所有空结点成为新的前沿结点。

气体充填阶段, 首先计算流入每一前沿控制体积的净流率及其完全充满所需时间和流出每一个气熔界面有效控制气体的净流率及可流动熔体部分被完全吹空所需时间, 取其最短的充满或吹空时间作为时间增量。

后充填阶段, 保压过程开始时, 压力梯度有一个急骤变化过程, 所经历时间很短, 对该阶段模拟时, 时间步长应取得小一点。随后的压实冷却过程, 时间步长可取得大一点。

3.5 相界面及不流动层的确定

在气辅成型过程中, 由于冷却作用, 熔体不断凝固, 熔体区域及不流动层不断变化, 影响着压力场控制方程中 G 、 F 、 S 项的计算。熔体区域的确定以转换温度为判据, 若温度高于转换温度, 则为熔体, 否则为固体。在固体层聚合物的流动速度为 0, 不存在对流传热和黏性热。不流动层确定后, 有效型腔厚度随之改变。因此, 温度场确定之后, 应该先确定相界面及不流动层的位置, 再求解压力场。

4 算例分析

为验证数值模型的可行性, 选取一回形管作为模拟物件^[7] (见图 4), 在 3 种情况下对气体穿透情况进行讨论, 通过分析气体压力、熔体温度、延迟时间对气体穿透结果的影响, 了解和认识气辅成型中的气体穿透机理。

选取一组工艺参数, 作为评估气体注射压力、熔体温度和延迟时间的参照对比基准, 在基准工艺条件下气体充填情况如图 5 所示, 其基准工艺参数与 A 点皮层厚度值列入表 1。

Table 1 Skin-polymer fraction and technics parameter

Technic	$\phi/\%$	t/s	t_1/s	p/MPa	t_2/s	t_3/s	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	H_A
reference	80	1.5	1.2	31	0	25	46	236	0.545
variety1	80	1.5	1.2	50	0.3	25	46	236	0.613
variety2	80	1.5	1.2	31	0	25	46	236	0.772
variety3	80	1.5	1.2	31	0	25	46	200	0.759

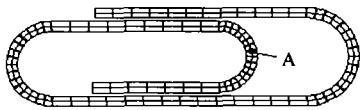


Fig. 4 Part discrete model (A is a reference point)

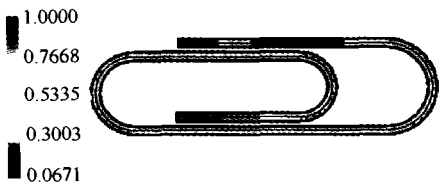


Fig. 5 Reference quantity

4.1 气体压力对气体穿入长度和皮层厚度的影响

将气体注射压力从已知基准的 31 MPa 提高至 50 MPa，其他工艺参数不变，其气体穿入长度和皮层厚度如图 6 所示，A 点的值列入表 1。将图 6 与图 5 对比，可以看出，当其他工艺条件不变时，气体注射压力提高，气体的穿入长度反而减小，图中标尺标注的厚度比因子表明，回形管上游聚合物皮层厚度也有所减小。这是因为较高的气体压力推动较多的熔体向前，因而型腔后部堆积了较多的熔体，没有气体穿入空间，造成气体穿入距离短，皮层厚度小。基于同样的原因，保压阶段气体压力的大小，对气体二次穿入距离也有相同趋势的影响。

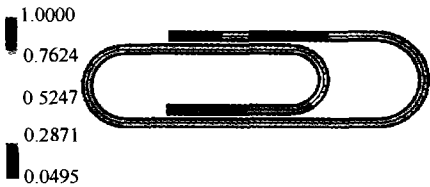


Fig. 6 Skin-polymer fraction and gas penetration influenced by gas pressure

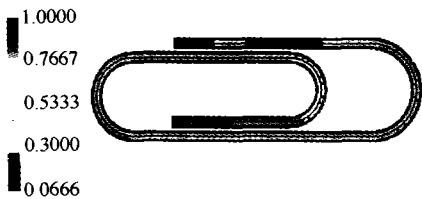


Fig. 7 Skin-polymer fraction and gas penetration influenced by delay time

4.2 延迟时间对气体穿入长度和皮层厚度的影响

将延迟时间从 0 增加至 0.3 s，其他工艺参数不变，其气体穿入长度和皮层厚度如图 7 所示，A 点的值列入表 1。

将图 7 与图 5 对比，可以看出，当其他工艺条件不变时，延迟时间增加，气体的穿入长度减小。这是因为延迟时间太长，熔体所受压力下降，而气体压力尚未到达，熔体前沿速度随之下降，冷凝层和黏性层厚度增加，熔体流动发生滞留现象，气体难以推动熔体前沿，导致气体穿入截面缩小而穿入距离缩短。

4.3 熔体温度对气体穿入长度和皮层厚度的影响

将熔体温度从基准的 236 °C 减至 200 °C，其他工艺参数不变，其气体穿入长度和皮层厚度如图 8 所示，A 点的值列入表 1。将图 8 与图 5 对比，可以看出，当其他工艺条件不变时，熔体温度降低，气体穿入长度减小。这是因为温度太低时，熔体黏度增大，气体前进阻力变大，气体难以推动熔体前沿，导致气体穿入截面缩小而穿入距离缩短。

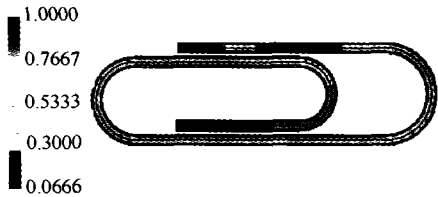


Fig. 8 Skin-polymer fraction and gas penetration influenced by temperature

5 结 论

本文介绍了圆管内气辅成型充填/后充填过程控制方程，利用有限元/有限差分耦合法对方程进行求解，实现气辅成型过程的充填流动模拟，通过实例计算，对影响气体穿透效果的因素进行了分析。

符 号 说 明

H_A ——A 点皮层厚度 (Skin-polymer fraction of A)
 p ——气体注射压力，MPa

- T_1 ——模温, $^{\circ}\text{C}$
- T_2 ——熔体温度, $^{\circ}\text{C}$
- t ——充填时间, s
- t_1 ——熔体注射时间, s
- t_2 ——延迟时间, s
- t_3 ——气体注射时间, s
- ϕ ——熔体充填体积分

References

1 Wang Lixia (王利霞), Shen Changyu (申长雨), Chen Jingbo (陈静波), Li Qian (李倩). Process and Numerical Simulation in Filling Stage of Gas-Assisted Injection Molding. *Journal of Chemical Industry and Engineering(China)* (化工学报), 2003, **54** (2): 176—181

2 Turng L S. Development and Application of CAE Technology for the Gas-Assisted Injection Molding Process. *Advance in Polymer Technology*, 1995, **14** (1): 1—13

3 Li Qian (李倩), Liu Chuntai (刘春太), Shen Changyu (申长雨), Dong Binbin (董斌斌). Numerical Analysis of Packing Process in Gas-Assisted Injection Molding. *China Plastics* (中国塑料), 2001, **15** (11): 79—82

4 Liu Chuntai (刘春太), Chen Jingbo (陈静波), Wang Lixia (王利霞), Shen Changyu (申长雨). The Viscosity Model of Non-Newtonian Plastics Melt in Injedition Molding. *China Plastics* (中国塑料), 1997, **11** (1): 48—52

5 Wang V W, Hieber C A, Wang K K. Dynamic Simulation and Graphics for the Injection Molding of Three-Dimensional Thin Parts. *Journal of Polymer Engineering*, 1986, **7** (1): 22

6 Wang Lixia (王利霞), Chen Jingbo (陈静波), Liu Chuntai (刘春太), Shen Changyu (申长雨). Numerical Simulation of Gas-Assisted Injection Molding Process. *China Plastic Industry* (塑料工业), 1998, **26** (5): 15—17

7 Chen Shia C, Hsu Ke S, Huang Jang S. Experimental Study on Gas Penetration Characteristics in a Spiral Tube During Gas-Assisted Injection Molding. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1995, **34** (1): 416—420

值此《化工学报》创刊 80 周年之际，谨向所有关心和支持《化工学报》工作、对《化工学报》的发展做出贡献的专家、学者致以崇高的敬意！对长期支持《化工学报》的广大读者、作者表示深深的感谢！

《化工学报》编辑部