

湍流混合动力学机理研究

武道吉^{1,2}, 张永吉¹, 李圭白¹, 谭风训²

(1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 山东建筑工程学院, 山东 济南 250014)

摘要: 在分析传统混合动力学机理基础上, 通过宏观混合与微观混合时间量级的对比, 提出了湍流条件下, 涡流扩散主导宏观混合, 分子扩散主导微观混合, 而混合过程由宏观混合主导, 欧拉数 Eu 可作为混合效果的控制指标, 并通过 3 种不同容积反应器的混合搅拌试验, 进一步证实了该指标的实用性。

关键词: 湍流; 混合; 涡流扩散; 动力学机理

中图分类号: X143 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2003)06-706-04

混合在环境、化工、采矿、医药、食品和造纸等行业中都有广泛的应用。在水质混凝处理过程中, 混凝效果与混凝剂在水中迅速扩散有密切关系, 原水中加入混凝剂后, 产生 2 种效应: 混凝剂在水中扩散与混合; 混凝剂水解, 水解产物与胶体颗粒作用使其脱稳。由于水解、脱稳速率远远大于混凝剂在水中的扩散速率, 故水中胶体颗粒能否迅速脱稳, 混凝剂的扩散作用就成为决定因素。因此, 混凝剂迅速混合对于提高絮凝效果是至关重要的, 如果混凝剂不能迅速而均匀混合, 则在混凝剂较多的部位, 胶体颗粒迅速脱稳结大, 而混凝剂不足的地方胶体颗粒就缺少结大的条件。

1 混合机理

对混合现象的认识, 1953 年是一个转折点, Danckwerts 在这一年发表了 3 篇论文, 提出停留时间分布、混合标准、分割尺度和分隔强度。随后 Danckwerts 以及 Krevler、Zwietering 等提出 2 种混合: 宏观混合与微观混合; 2 种流体: 宏观流体与微观流体; 2 种极限混合状态: 最大混合与完全分隔。这些先驱者的研究工作, 奠定了混合理论的基础。从那时开始, 人们在理论和实验两方面对宏观混合和微观混合进行了大量研究, 并取得了很大的进展, 但直到 20 世纪 80 年代末, 对宏观混合与微观混合的概念一直众说纷纭, 模糊不清, 在研究中, 大体上倾向于用停留时间分布描述宏观混合, 用分隔指数描述微观混合^[1,2]。90 年代初, 对宏观混合和微观混合的认识有了进一步发展, 其概念也从定性转变为定量描述。

混合过程是在强制对流作用下通过主体扩散、涡流扩散和分子扩散, 最终达到分子级均匀混合^[3]。刚加入的药剂首先形成大尺度的涡旋微团, 在湍流拉伸、剪切作用下, 大涡旋分裂成较小尺度的涡旋, 能量从大涡旋传递到小涡旋, 小涡旋则向更小的涡旋传递, 直到更小尺度即 Kolmogoroff 尺度的涡旋, 最后因粘性应力的作用耗散为热。这个过程表明, 混合首先将从大尺度对流运动开始, 继之以小尺度, 即涡流扩散把较大的液滴微团进一步变形、分割成更小的微团, 通过小微团界面之间的涡流扩散, 把不均匀程度降低到涡流本身的大小。直达到 Kolmogoroff 尺度, 这就是宏观混合的最大限度。

微观混合是指分子尺度上的混合, 它的最终实现只能靠最小尺度微团内的分子扩散, 因此, 分子扩散是最终实现微观混合的控制因素, 当然分子扩散在宏观混合中已经存在着, 只是因为物料团块尺度大, 分子扩散作

收稿日期: 2001-08-21; 修订日期: 2002-01-20

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目 (Y2002F25); 山东省科委攻关项目 (961216608)

作者简介: 武道吉(1966-), 男, 山东肥城人, 教授, 博士, 主要从事水环境技术研究。E-mail: wdj@sdaei.edu.cn

用不明显, 湍流运动使料液的涡流微团尺度不断减小, 从而加剧了分子扩散的进行, 最后达到分子水平上的均匀。

1.1 宏观混合

湍流条件下固壁装置内的水流, 沿垂直水流方向可分为3层: 粘性底层、过渡区和湍流区。粘性底层是一个紧贴固体壁面的极薄层, 其中粘性切应力是主要特征因素, 湍流切应力极小可忽略, 所以流动近似层流状态, 流速呈线性分布且极小, 因此该层对混合的影响可忽略不计。湍流区是主流区, 占据绝大部分断面, 区域内湍流切应力是主要特征因素, 粘性切应力很小, 只能产生尺度大而强度低的涡流, 以涡流扩散为主。在这两层之间存在一速度梯度相当大、涡能量最大的区, 这一区就是过渡区, 该区中流体受粘性切应力和湍流切应力的影响接近于相同的量级, 可认为满足局部平衡条件, 涡旋尺度等于 kolmogoroff 微尺度。同时由于强烈的涡流扩散作用, 使过渡区和湍流区之间产生连续的质量交换, 从而使药液达到宏观混合。达到宏观混合均匀所需的时间为^[4]

$$T = \alpha R^2 / E \quad (1)$$

式中 T 为宏观混合时间; R 为断面特征尺度; E 为湍流扩散系数; α 为系数, 与药剂投加位置有关。

1.2 微观混合

涡流扩散仅能使药剂达到宏观混合, 在 kolmogoroff 微涡内, 药剂最终达到分子级均匀只有靠分子扩散, 借助式(1)的推导方法, 则微涡内达到分子混合均匀所需的时间可表示为

$$T_\lambda = \alpha \lambda^2 / D \quad (2)$$

式中 T_λ 为微观混合时间; D 为分子扩散系数; λ 为 kolmogoroff 微涡尺度。

$$\lambda = \left(\frac{\nu^3 \rho}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (3)$$

式中 ν 为水的运动粘度; ρ 为水的密度; ε 为单位体积水体所消耗的功率。

根据水处理混合工艺中的施能水平为 250 ~ 1 000 W/m³, 可推算出涡旋微尺度见表1。

实际混合装置的尺度一般为分米级以上, 而涡旋微尺度的量级为 10⁻⁵ m, 即 $R \sim 10^4 \lambda$; 另外湍流扩散系数 E 一般比分子扩散系数 D 大 10⁶ ~ 10⁷ 倍^[5], 以上分析代入式(1)、式(2)可得

$$T \sim 10^{(1-2)} T_\lambda \quad (4)$$

在分析微观混合过程中, 仅考虑了涡旋内的分子扩散, 实际上由于微涡内粘性切应力占主导地位, 剪切速度梯度大, 离散作用不可忽略。微观扩散速度将大大提高, 其混合时间也会进一步减小。由此可以断定, 在整个药剂混合过程中, 混合时间由宏观混合主导。

1.3 混合效果控制指标

涡流扩散系数可表示为^[6]

$$E = \beta R V \quad (5)$$

式中 β 为系数, 与混合装置形式有关; V 为水流特征速度; 其余符号意义同前。

将式(4)代入式(1)得

$$T = \alpha R / \beta V \quad (6)$$

将 $T = L / V$, 并令 $H = \frac{\Delta L}{g R} V^2$ 代入式(5)整理得

$$\frac{Hg}{V^2} = \alpha \frac{A}{\beta} \quad (7)$$

表1 涡旋微尺度 λ

Table 1 Kolmogoroff microscale λ		
项目	输入能量/(W·m ⁻³)	微涡尺度 10 ⁶ λ/m
施能 水平	250	44.7
	360	40.8
	490	37.8
	640	35.3
	810	33.3
	1000	31.6

注: 取 $\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ 。

式中 H 为水头损失; A 为系数; 其余符号意义同前。

将欧拉数 $Eu = \frac{H\rho g}{V^2}$ 代入式(6)得

$$Eu = \alpha A / \beta \quad (8)$$

式(7)的右边项是由各系数组成。由此可以看出, 在混合装置形式与投药位置相似条件下, 达到宏观混合均匀时的欧拉数相等, 欧拉数 Eu 可作为混合效果的相似准数即控制指标。

2 试验结果与分析

试验的目的是验证欧拉数作为混合效果控制指标的可行性。为使试验能够直接反映混合对混凝效果的影响, 试验水样用高岭土加自来水配制而成, 分别在有效容积 1 L、2 L、3 L 三个方形杯做混凝搅拌试验。试验中投加定量的硫酸铝絮凝剂 50 mg/L, 设定固定的絮凝搅拌转速和时间, 测定不同混合强度和时间条件下的混和效果, 混合效果以静沉 5 min 后的水样浊度去除率为评价指标。

主要特征参数计算为

$$P = \frac{C\rho}{32} b\omega^3 D^4 \quad (9)$$

$$Re = \frac{nD^2}{\nu} \quad (10)$$

$$Eu = \frac{PT}{\rho W V^2} = \frac{C\rho\pi^3 n^3 b D^4 T}{4\rho k_2 D^3 (nD)^2} = \frac{C\pi k_1}{4k_2} n T = k n T \quad (11)$$

式中 P 为搅拌功率; Re 为搅拌雷诺数; T 为搅拌时间; W 为搅拌池体积; V 为桨叶旋转线速度; b 为桨叶高度; D 为桨叶直径; n 为桨叶转速; C 为阻力系数, 一般 $C = 0.2 \sim 0.5$, 本文取 $C = 0.35$; $k_1 = b/D$, $k_2 = W/D^3$, $k = C\pi k_1/4k_2$ 。

在混合搅拌过程中, 为使水体处于完全湍流状态, Re 控制在 1000 以上。图 1~图 3 是水样浊度分别为 110 NTU、240 NTU、350 NTU 的混合试验结果, 每个搅拌杯进行 3 组试验, 每组试验数据可作出一条拟合曲线。可以看出, 在混合初期存在一个去除率随 Eu 迅速增加的直线段, 后期存在一个去除率随 Eu 增加缓慢的直线段, 即混合效果已趋于稳定, 同时伴随着颗粒絮凝, 开始形成微小的絮体, 位于两直线段间的曲线段为过渡段, 过渡段上曲率最大的点为临界点, 该点可认为是混合与絮凝过程的临界点, 其对应的欧拉数为临界欧拉数, 混合过程中只要控制欧拉数超过临界欧拉数, 就能达到较高的混合效果, 该点可通过等分角线法确定。对试验结果统计表明, 不同搅拌杯、不同混合强度条件下, 各浓度水样达到临界欧拉数 Eu 时的值接近, 集中在 8.0~10 之间, 这进一步验证了 Eu 作为混合控制指标的可行性。事实上, 在混合过程中水流运动相似是混合效果相似

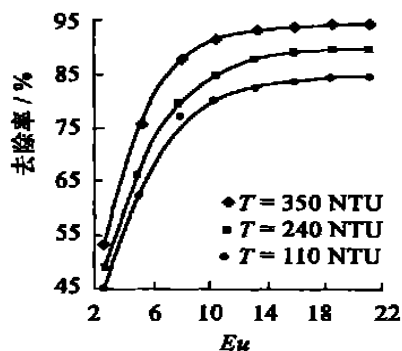


图 1 1L 杯试验结果 ($n = 6.6$ r/s)

Fig. 1 Tested results in 1L beaker

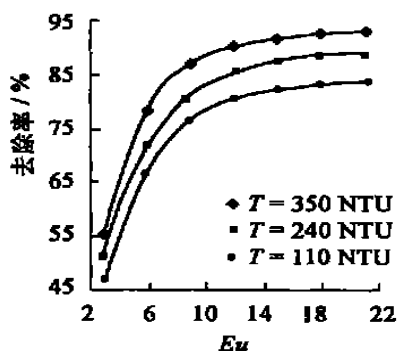


图 2 2L 杯试验结果 ($n = 8.5$ r/s)

Fig. 2 Tested results in 2L beaker

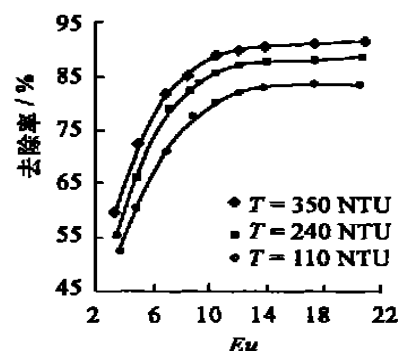


图 3 3L 杯试验结果 ($n = 11$ r/s)

Fig. 3 Tested results in 3L beaker

的基础,根据流体运动相似理论,在完全湍流条件下, Eu 是水流运动相似的唯一判定准数。

3 结 语

(1) 在混合工艺过程中主体对流扩散、涡流扩散、分子扩散 3 种机理同时存在, 涡流扩散仅能使凝聚剂达到宏微观混合, 通过分子扩散达到微观混合, 涡流扩散对混合时间起主导作用, Eu 可作为混合效果的控制指标。

(2) 若令 $E = \kappa \rho V^3 / d$, 则欧拉准数 Eu 也可表示为 $Eu (\kappa^2 E / \rho d^2)$ 或 $Eu = \sqrt{\kappa} GT / \sqrt{Re}$, 可以看出该指标实际包含了目前已提出的所有其它指标: GT 、 $E^{1/3} T$ 和 $GT / \sqrt{Re}$, 应该说它更完善。

参考文献:

- [1] Fischer H B. The mechanics of dispersion in natural streams[J]. Hydr Engg, ASCE, 1967, 93(6):187 - 216.
- [2] Fischer H B, List E J, Koh R C Y. Mixing in inland and coastal waters[M]. New York: Academic Press, 1979. 110 - 130.
- [3] 时 钧, 汪家鼎, 等. 化学工程手册(上卷)[M]. 北京: 化学工业出版社, 1996. 39 - 40.
- [4] 赵文谦. 环境水力学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1986. 29 - 50.
- [5] 潘祖仁, 翁志学, 等. 悬浮聚合[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997. 193 - 230.
- [6] 戴莱 J W, 哈里曼 D R F. 流体动力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981. 463 - 480.

Kinetics mechanism of rapid mixing in turbulence^{*}

WU Dao-ji¹, ZHANG Yong-ji¹, LI Gui-bai¹, TAN Feng-xun²

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Shandong Institute of Architecture and Engineering, Jinan 250014, China)

Abstract : Based on the analysis of the traditional kinetics mechanism about mixing and the comparison of the relative magnitude of macroscopic and microscopic mixing time, a new kinetics mechanism on mixing in turbulence is presented. The speed of macroscopic mixing is controlled by eddy diffusion, and the speed of microcosmic mixing is controlled by molecular diffusion. The mixing process is dominated by macroscopic mixing. The Euler number can be used as the control parameter that determines the mixing efficiency. The mixing tests are conducted in three reactors of different volumes to verify the practicality of this index.

Key words : turbulence; mixing; eddy diffusion; kinetics mechanism

* The project is supported by Shandong Province Natural Science Foundation of China(No. Y2002F25).