

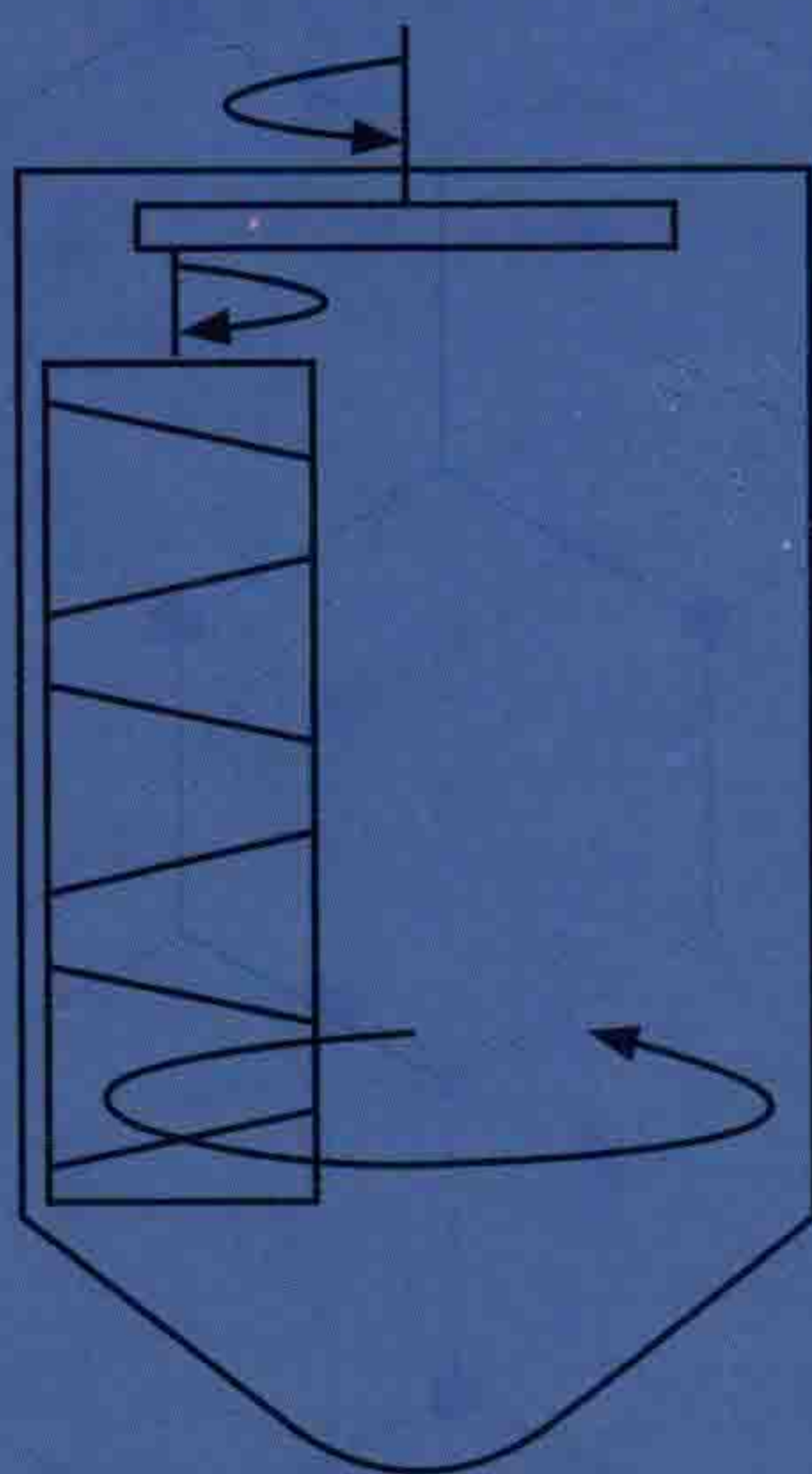
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

 Springer

# 固态发酵生物反应器

## 设计和操作的基本原理

SOLID-STATE FERMENTATION BIOREACTORS  
Fundamentals of Design and Operation



[巴西] D.A. 米切尔 [巴西] N. 克里格 [斯洛文尼亚] M. 贝罗维奇 主编  
李占勇 译



“十三五” 国家重点出版物出版规划项目

# 固态发酵生物反应器

## 设计和操作的基本原理

SOLID – STATE FERMENTATION BIOREACTORS  
Fundamentals of Design and Operation

[巴西] D. A. 米切尔

[巴西] N. 克里格

主编

[斯洛文尼亚] M. 贝罗维奇

李占勇

译

 中国轻工业出版社

## 图书在版编目 ( CIP ) 数据

固态发酵生物反应器:设计和操作的基本原理/(巴西)米切尔,(巴西)克里格,(斯洛文)贝罗维奇主编;李占勇译. —北京:中国轻工业出版社,2017.6

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978 - 7 - 5184 - 1146 - 7

I. ①固… II. ①米… ②克… ③贝… ④李… III. ①固态发酵—生物—反应器 IV. ①Q814.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 240195 号

Translation from the English language edition:

SOLID-STATE FERMENTATION BIOREACTORS. FUNDAMENTALS OF DESIGN AND OPERATION

by David A. Mitchell, Nadia Krieger, Marin Berovič (Eds. )

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.

Springer is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

责任编辑:江 娟 王 朗

策划编辑:江 娟 责任终审:唐是雯 封面设计:锋尚设计

版式设计:宋振全 责任校对:吴大鹏 责任监印:张 可

出版发行:中国轻工业出版社(北京东长安街6号,邮编:100740)

印 刷:三河市万龙印装有限公司

经 销:各地新华书店

版 次:2017年6月第1版第1次印刷

开 本:787×1092 1/16 印张:25.25

字 数:550千字

书 号:ISBN 978 - 7 - 5184 - 1146 - 7 定价:120.00元

著作权合同登记 图字:01 - 2010 - 1640

邮购电话:010 - 65241695 传真:65128352

发行电话:010 - 85119835 85119793 传真:85113293

网 址:<http://www.chlip.com.cn>

Email:club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

100079K1X101ZYW



## — 前 言 —

虽然固态发酵在制造传统发酵食品方面已经实践了几个世纪,但是在现代生物技术框架内其在新产品的应用上相对有限。它在 20 世纪早期被用于生产酶,又在 20 世纪 40 年代生产青霉素,但是对固态发酵的兴趣随着深层液态发酵技术的进展而消减。深层液态发酵目前的优势并不令人惊讶,因为对大部分发酵产品,它提供了更好的收益,更容易应用。而控制固态发酵条件是非常困难的,这些困难在实验室小规模下已经很明显,随生产规模的增大其难度加剧。固态发酵技术适合特殊情况和产品,例如,农业和食品加工中希望再利用固体有机废弃物,而不是简单地将之丢弃,这种期望自然地导致固态发酵的使用。此外,一些微生物产品,如其中的真菌酶和孢子,在固态发酵系统提供的环境下有更高的产率和更好的性能。

随着对固态发酵潜力的认识,在 20 世纪 70 年代中期其研究兴趣开始复兴。然而,固态发酵生物反应器技术的理论基础只是在 1990 年前后才开始建立。在这之前,有很多固态生物反应器事例,特别是那些用于制曲行业的设备,但是很少有或没有关于其内发生的传热传质过程效率的资料。过去 15 年来已经开展的工作足以建立固态发酵生物反应器工程原理的一般基础。本书汇集了这些工作,以提供其基础。鉴于系统的复杂性,它的关键点是,固态发酵生物反应器高效的性能将只能通过以下两点来实现:(1)利用数学模型为生物反应器进行设计和操作决策;(2)应用控制理论。

首先,必须指出,我们意识到使用“发酵”这个词潜在的问题。本书中,其使用不是在代谢意义上而是在更一般意义上“控制微生物培养”。虽然有一些术语用来表示此发酵技术,但是到目前为止最普遍的仍是“固态发酵”。

本书聚焦于固态发酵生物反应器。我们的目的不在于介绍固态发酵本身。我们假定,感兴趣于学习固态发酵生物反应器的读者已熟悉固态发酵过程。即使不是这样,读者若了解深层液态发酵过程的基本原理和深层液态发酵生物反应器设计,也能够理解本书。读者若需要固态发酵的一般背景资料,可查阅有关书籍或综述论文(例如,第 1 章的深入阅读部分)。

即使聚焦在固态发酵生物反应器,本书也特意讲解一般的问题和概念。给出具体的例子来解释概念,但本书既不考虑所有类型的生物反应器,也不提供已开发的所有数学模型。我们不提供到目前为止形成的固态发酵生物反应器的所有工程技术要点。相反,我们的目的是介绍基本概念和想法。



本书的主要读者是正在开发固态发酵过程、意在使之最终商业化的固态发酵领域的研究人员或工作者。我们的目的是给此类读者一个关于生物反应器设计和性能优化的概述。

我们认识到,许多读者可能不具备建立和求解生物反应器性能数学模型的必要背景知识。本书并不试图教授建模所需的技能。这样的工作需要关于各种数学和工程基础的冗长论述。基本了解微分和积分将有助于读者对一些章节的理解,但是这并不意味着一定是专家。

读完此书,“非工科的读者”应该:

- 定性了解各种传质传热和生物现象在固态发酵系统中的重要性,以及这些不同现象之间的相互作用;

- 了解生物反应器数学模型可以做些什么。如果你了解模型可以做什么,那么即使你自己不具备这些建立模型的技能,你也会知道在适当时机向具有建模技能的人(“建模者”)寻求帮助;

- 能够与“建模者”用共同语言沟通。换句话说,你能够明确你想要建模者做什么,能够明白建模者提出的问题。这样,你能够与建模者互动,即使他们毫无固态发酵的经验。

本书也对虽有建模技巧但首次接触固态发酵的读者有用。简言之,它概述了固态发酵生物反应器设计和操作的重要现象和基本原理。

我们欢迎对本书提出意见、建议和批评。我们的目标是帮助您更好地理解固态发酵生物反应器。若能获知对此目标的达成情况,我们将非常感谢。在目录之前有编辑和作者的地址。

David A. Mitchell, Nadia Krieger, Marin Berovič

2005年11月



## —— 译者序 ——

固态发酵技术历史悠久,在生产如中国传统发酵食品等特色产品及利用固体有机废弃物和木质纤维素类生物质生产可再生资源等方面,具有明显的优势和发展潜力。

固态发酵的内在特性(如异质性)致使其工艺条件控制难度大,尤其当生产规模扩大时,实现与成功的实验室工艺技术相匹配的固态发酵环境很困难。而且,我们对固态发酵设备的工程原理还不是很清楚(有的甚至是“闭门绝艺”),也没有系统化的总结,这样就使得固态发酵技术的应用受到制约。对于过程工程总体而言,规模放大和缩小(Scale-up/down)仍然是困扰技术创新的瓶颈之一,值得开展研究。

本书聚焦于实现固态发酵过程的生物反应器,具体介绍了固态发酵及其过程中发生的传递现象和生长动力学,阐述了各种类型的固态发酵生物反应器以及过程监测、控制等相关问题,尤其是针对商业化应用所面临的巨大挑战,提供了数学建模基础,并通过案例研究分析了数学模型对于固态发酵生物反应器设计、性能优化以及过程控制的重要作用。

本书基于作者们从事固态发酵课题研究的成果,以问题为导向,涵盖了固态发酵过程工业化应用以及实验研究所需的知识、技术及案例,可以帮助不同专业背景的学生、研究者及工程技术人员从过程工程的角度较完整地了解固态发酵技术,从而彼此能“搭上话”,而这种学术交叉有助于促进固态发酵技术的发展,尤其是基于传递理论和发酵动力学的数学模型建立,有助于使固态发酵技术从实验室走向实际应用。书中所指出的挑战、需要关注的研究领域还未过时,仍需要进一步研究和创新,而随着计算机科学技术的发展,个人计算机计算速度已得到很大的提高,多孔介质传递理论、颗粒技术、计算流体动力学的发展以及一些商用软件的推广将为固态发酵的理解、过程模拟和生物反应器设计提供有力的支持。快速求解模型简单实用,在预测控制方面将发挥很好的作用,可惜书中所附程序可供用户自定义的内容较少,不便于进一步改进和拓展。

译者在过程装备与控制工程专业任教,也从事干燥技术及设备等方面的研究工作,颗粒干燥过程中的传质传热现象、流体流动以及产品品质变化等与固态发酵过程类似,最近承担的研究课题也涉及此方面的内容,对此有了粗浅认识和领悟。翻译出版此书对于本专业和其他相关专业的本科生、研究生、工程技术人员会有所裨益。翻译过程中,译者对能察觉到的原书笔误也做了相应的修正。

田玮博士和徐庆博士帮助翻译了部分章节,李广宗、刘建波同学帮助整理了插图和

文稿,在此对他们表示衷心的感谢。

由于译者知识程度有限,难免有翻译不当之处,敬请读者批评指正。

译者注:书中的程序可通过扫描下列二维码获得。



李占勇

2016年5月于天津科技大学

E-mail: zyli@tust.edu.cn



## —— 致 谢 ——

作为本书编辑团队的带头人和主要著作者,我首先要感谢我的博士生导师保罗·格林菲尔德(Paul Greenfield)和霍斯特·德勒(Horst Doelle),是他们在过去的二十多年来将我引入此富有挑战性和有趣的道路上。事实上,我仍然记得那一刻,在1984年中期,当我决定在固态发酵领域从事我的博士研究时,保罗对我说:“我听说过称为固态发酵的这个领域,我认为你能够在此领域做出一些贡献。”保罗,你是正确的,我已经做了一些事。谢谢!当然,还有许多事需要做。

我也必须感谢我的共同编辑和作者。没有你们的投入,这本书不会完成。我从你们每一个人身上都学到了固态发酵的知识。此外,我要感谢我的许多同事,他们虽不是共同作者,但帮助我更好地理解固态发酵。我将不列出他们的名字,因为这个名单很长。它不仅包括我直接合作的同事,也包括在固态发酵领域发表论文、帮助我对此领域加强理解的同行们。

这本书在某种程度上代表了我研究组承担的和被多个基金机构支持的综合工作。承蒙这些机构在过去15年来资助我的研究。我从“澳大利亚研究理事会小额资助计划”获得了两项关于固态发酵生物反应器的研究资助。自从我移居巴西,我获得了一些来自国家和联邦基金团体给予的资助。这些包括:(1)“南洋杉基金会”,位于巴拉那州的一个研究机构;(2)巴西国家科技发展委员会(CNPq);(3)巴西-阿根廷生物技术委员会(CBAB),基金来自巴西科技部(MCT),由巴西国家科技发展委员会管理。也承蒙巴西国家科技发展委员会的好意,提供我研究奖学金。

最后,感谢Springer的工作人员,特别是Marion Hertel, Beate Siek和Joern Moh,谢谢他们的耐心和指导。

David Mitchell



## — 共著者 —

Eduardo Agosin 教授

智利天主教大学, 化学工程与生物工程系

E-mail: agosin@ing.puc.cl

Marin Berovič 教授

斯洛文尼亚卢布尔雅那大学, 化学与化工学院, 化工、生物化学与环境工程系

E-mail: marin.berovic@Uni-Lj.si

Mario Fernández 博士

智利塔尔卡大学, 科学与工程系

E-mail: mafernandez@utalca.cl

Matthew T. Hardin 博士

澳大利亚昆士兰大学, 化学工程部

E-mail: matth@cheque.uq.edu.au

Lilik Ikasari 博士

印度尼西亚奎斯特公司( Quest International), 食品部

E-mail: lilik.ikasari@questintl.com

Morteza Khanahmadi 博士

伊朗农业科学与自然资源研究伊斯法罕中心, 农业工程研究室

E-mail: khanahmadi@yahoo.com

Nadia Krieger 博士

巴西巴拉那联邦大学, 化学系

E-mail: nkrieger@ufpr.br



Luiz Fernando L. Luz Junior 博士  
巴西巴拉那联邦大学, 化学工程系  
E-mail: luzjr@ufpr.br

David A. Mitchell 博士  
巴西巴拉那联邦大学, 生物化学与分子生物学系  
E-mail: davidmitchell@ufpr.br

Montira Nopharatana 博士  
泰国国王科技大学, 食品工程系  
E-mail: montira.nop@kmutt.ac.th

J. Ricardo Pérez-Correa 博士  
智利天主教大学, 化学工程与生物工程系  
E-mail: perez@ing.puc.cl

Luis B. Ramos Sánchez 博士  
古巴卡马圭大学, 化学工程系  
E-mail: lramos@qui.reduc.edu.cu

Penjit Srinophakun 博士  
泰国农业大学, 化学工程系  
E-mail: fengpjs@ku.ac.th

Deidre M. Stuart 博士  
澳大利亚新英格兰大学, 环境科学与资源管理学院  
E-mail: deidre.stuart@pobox.une.edu.au

Graciele Viccini 女士  
巴西巴拉那联邦大学, 生物化学与分子生物学系  
E-mail: gvic@pop.com.br

Oscar F. von Meien 博士  
巴西国家石油公司  
E-mail: meienov@petrobras.com.br



## —— 缩略语 ——

A/D	模拟/数字信号
ASFB	气固流化床
$a_w$	水活度
CER	二氧化碳的释放率
COU	氧气累计吸收量
CRDB	连续转鼓生物反应器
CSSF	连续流固态发酵生物反应器
CSTB	连续搅拌罐生物反应器
CTFB	连续管流式生物反应器
DM	干物质
D/A	数字/模拟信号
DMC	动态矩阵控制
FCV	流量控制阀
GA <sub>3</sub>	赤霉酸
GC	气相色谱
GC/MS	气相色谱/质谱
GPM	加仑/分钟 (gal/min)
HEPA	高效过滤颗粒的空气过滤器
HPLC	高效液相色谱法
IBM	国际商用机器公司
IDS	初始干颗粒
IDM	初始干物质
INRA	法国国家农业研究科学院
ISFET	离子敏感场效应晶体管
IR	红外
IWC	初始含水量
$k_f a$	生物膜传导系数 (用于表征固态发酵中气体和生物膜相间氧传递)



	效率)
$k_L a$	总传质系数 (用于表征液态发酵中气液相间氧气传递效率)
$L/D$	长径比
MPC	模型预测控制
NLMPC	非线性模型预测控制
ODE	常微分方程
OUR	氧气吸收率
PDE	偏微分方程
PI	比例/积分
PID	比例/积分/微分 (在 27.2.2 节有定义)
PLC	可编程逻辑控制器
PUC	智利天主教大学
RTD	电阻温度探测器
RQ	呼吸商
SI	国际公制系统
SLF	深层液态发酵
SSF	固态发酵 (在第 1 章有定义)
$t_{90}$	生物量达到其最大值 90% 的时间
TC	热电耦
TDR	时域反射仪
$T_{opt}$	最适温度
$T_{下标}$	温度, 下标说明其意义
UV	紫外线
vvm	每分钟内单位床层体积中空气的体积
WC	含水量
wt	质量
X	干生物量
Z - N	齐格勒 - 尼柯尔斯 (Ziegler - Nichols) (与控制器整定规则相关)

## —— 符号说明 ——

请注意,由于不同的模型使用不同的命名法和单位,对每章的符号分别说明。在大多数情况下,符号也在其第一次出现处进行解释。

### 第3章

$Pr$	生产能力 [ $\text{kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^3)$ ]
$t_{\text{过程}}$	收获间隔时间(h)
$V_{\text{生物反应器}}$	生物反应器容积( $\text{m}^3$ )
$X_{\text{收获}}$	收获时生物量(产品)(kg)
$X_{\text{初始}}$	初始生物量(产品)(kg)

### 第4章

$T_{\text{下标}}$	用下标表示相或子系统的温度( $^{\circ}\text{C}$ )
-----------------	-------------------------------------

### 第5章

$H$	床层高度(m)
$T_{\text{下标}}$	相或子系统的温度,下标表示意义( $^{\circ}\text{C}$ )
$V_z$	空气表观速度(m/s)

### 第6章

$C$	周围大气中氧气浓度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
$D$	床层内氧气的有效扩散系数( $\text{cm}^2/\text{h}$ )
$D_c$	临界托盘深度(cm)
$k$	床层导热系数 [ $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ]
$N_{\text{Bi}}$	Biot 数



$R_Q$	体积产热率( $W/m^3$ )
$R_X$	总生长速率[ $kg$ 干生物体/ $(m^3 \cdot h)$ ]
$R_{XM}$	最大生长速率[ $g$ 干生物体/ $(cm^3$ 床层 $\cdot h)$ ]
$T_a$	周围空气温度( $^{\circ}C$ )
$T_s$	床层表面温度( $^{\circ}C$ )
$X$	生物量( $kg$ 干生物体/ $m^3$ )
$X_{max}$	最大可能的生物量( $kg$ 干生物体/ $m^3$ )
$Y_{XO}$	源于氧气的生物量产率系数( $g$ 干生物体/ $g O_2$ )
$z$	空间坐标,为床层总高度的一个无量纲分数
$Z$	床层总高度( $m$ )
$\alpha$	在床层顶部的床层与空气间的传热系数[ $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ ]
$\alpha_b$	在床层底部的床层与空气间的传热系数[ $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ ]
$\mu$	比生长速率常数( $1/h$ )
$\Theta$	在托盘底部无传热时,床层底部与托盘表面之间的温差( $^{\circ}C$ )
$\mu_{FO}$	基于氧气的比生长速率分数(无量纲)
$\mu_{FT}$	基于温度的比生长速率分数(无量纲)
$\mu_{max}$	比生长速率参数可能的最大值( $1/h$ )

## 第 8 章

$A_{\text{下标}}$	面积,下标表示其意义( $m^2$ )
$D$	转鼓直径( $m$ )
$F_{\text{mix}}$	死区和柱塞流区之间的体积交换率,相对于筒体的体积和平均停留时间(无量纲)
$h$	床层与顶空之间的传热系数[ $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ ]
$N_C$	临界转速( $r/min$ )
$R_B$	床层裸露表面积与床层体积之比( $1/m$ )
$R_{\text{conv}}$	向顶空气体的对流散热率( $W$ )
$T_{\text{下标}}$	相或子系统的温度,下标表示其意义( $^{\circ}C$ )
$V_{\text{下标}}$	体积,下标表示其意义( $m^3$ )
$\theta_{\omega}$	部分充填时床层表面的中心角(弧度)
$\omega$	转鼓内填充率( $m^3$ 床层/ $m^3$ 生物反应器总容积)

## 第 11 章

$F$	新鲜固体颗粒的质量流量( $kg/h$ )
-----	-----------------------

$f_m$	通过良好混合区的固体颗粒流量(kg/h)
$f_p$	通过柱塞流区的固体颗粒流量(kg/h)
$f_R$	再循环固体颗粒流量(kg/h)
$M$	在生物反应器中固体颗粒的总质量(kg)
$M_m$	在均匀混合区的固体颗粒的质量(kg)
$M_p$	在柱塞流区的固体颗粒的质量(kg)
$X$	在产品 and 再循环流中生物量(g/kg 干物质)
$X_{\max}$	可能的最大生物量(g/kg 干物质)
$X_0$	在新鲜进料中的初始生物量(g/kg 干物质)
$X_0'$	新鲜进料和再循环料混合后的生物量(g/kg 干物质)
$\alpha$	柱塞流区流动的分數( $f_p/f_m$ )
$\beta$	在柱塞流区中“内生物反应器”质量的分數( $M_p/M_m$ )
$\gamma$	再循环比(无量纲)
$\mu$	比生长率参数(1/h)

## 第12章

$a$	双 Arrhenius 方程的常数(1/h)
$A$	传热面积( $m^2$ )
$b$	双 Arrhenius 方程的常数(无量纲)
$C_{P\text{空气}}$	干空气的比热容[J/(kg 干空气·°C)]
$C_{PB}$	整体床层的比热容[J/(kg·°C)]
$C_{P\text{水蒸气}}$	水汽的比热容[J/(kg 水蒸气·°C)]
$E_{a_1}, E_{a_2}$	双 Arrhenius 方程的常数(J/mol)
$F$	干基空气流量(kg 干空气/h)
$h$	传热系数[J/( $m^2 \cdot s \cdot ^\circ C$ )]
$H$	出口空气湿度(kg 水蒸气/kg 干空气)
$H_{in}$	入口空气湿度(kg 水蒸气/kg 干空气)
$M$	总床层质量(kg)
$R$	通用气体常数[J/(mol·K)]
$S$	干基质浓度(kg 干基质/ $m^3$ )
$t$	时间(h)
$T$	基质床层和出口空气温度(°C)
$T_{in}$	入口空气温度(°C)
$T_{surr}$	周围环境的温度(°C)
$W$	干基含水量(kg 水/kg 干基质)
$X$	生物反应器中的生物量(kg)



$X_{\max}$	生物反应器内可能最大的生物量(kg)
$Y_Q$	生长代谢热产量(J/kg 生物体)
$\mu$	比生长速率参数(1/h)
$\Delta H_{\text{vap}}$	水的汽化焓(J/kg 水)

### 第 13 章

$A$	传热面积( $\text{m}^2$ )
$a_w$	水活度
$D_S$	基质的扩散系数( $\text{m}^2/\text{h}$ )
$h$	传热系数[ $\text{J}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ]
$H$	湿度(kg 水蒸气/kg 干空气)
$k$	传质系数[ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ]
$K_S$	Monod 方程的饱和常数(g/L)
$r$	径向位置(m)
$S$	基质浓度(g/L)
$S _r$	在径向位置 $r$ 处的基质浓度(g/L)
$t$	时间(h)
$T$	温度( $^\circ\text{C}$ )
$X$	生物量(g/L)
$X _r$	在径向位置 $r$ 处的生物量(g/L)
$Y_{XS}$	单位基质的生物量产量(g 干生物/g 基质)
$\mu_{\max}$	最大比生长速率参数(1/h)

### 第 14 章

$A$	降速生长方程的常数(无量纲)
$C$	生物量(未指定基准)
$C_m$	最大生物量(未指定基准)
$C_o$	初始生物量(未指定基准)
$C_{XA}$	零时刻干物质的生物量(g 干生物体/g 初始干固体)
$C_{XM}$	取样时新鲜物质的生物量(g 干生物体/g 湿固体)
$C_{XR}$	取样时干物质的生物量(g 干生物体/g 干固体)
$C_{XW}$	零时刻新鲜物质的生物量(g 干生物体/g 初始湿颗粒)
$D$	干固体颗粒质量(g)
$D_o$	干固体颗粒初始质量(g)
$k$	生长方程的参数(线形方程:g 干生物体/h;降速方程:1/h)

$M$	湿颗粒的质量(g)
$M_0$	湿颗粒的初始质量(g)
$S$	干剩余基质的质量(g)
$S_0$	干剩余基质的初始质量(g)
$t$	时间
$W$	水分的质量(g)
$W_0$	初始水分质量(g)
$X$	干生物量(g)
$\mu$	比生长速率参数(1/h)

## 第 15 章

$C_{XR}$	生物量,相对基准(g 干生物体/g 干固体)
$C_{XA}$	生物量,绝对基准(g 干生物体/g 初始干固体)
$C_{CA}$	某种生物体组分的浓度(mg 组分/g 初始干固体)
$C_F$	某种生物体组分在生物体中的含量(mg 组分/g 生物体)
$d_i$	为了测定含水量,从第“ $i$ ”瓶中取出的样品的干质量(g)
$D_i$	为了测定生物量,取样中固体颗粒的干质量(g 干固体)
$d_0$	零时刻取样的干质量(g)
$G_x$	生物量的氨基葡萄糖含量(mg 氨基葡萄糖/mg 干生物体)
$IDS_i$	最初加入到第“ $i$ ”瓶的干基质(g)
$IWC$	初始含水量,湿基(质量%)
$m_i$	为了测定含水量,从第“ $i$ ”瓶中取出的样品的湿质量(g)
$m_0$	零时刻样品的湿质量(g)
$M_i$	为了测定生物量,取样的湿质量(g 湿颗粒)
$M_{oi}$	最初加入到第“ $i$ ”瓶的基质质量(g)
$WC_i$	取样时第“ $i$ ”瓶的含水量,湿基(质量%)
$X$	生物体或其组分的质量(g)
$\lambda$	滞后时间(h)

## 第 16 章

$a_0 \sim a_4$	公式(16.14)的拟合参数
$a_{ws}$	固体基质的水活度
$A$	降速方程的参数(无量纲)
$A$	双 Arrhenius 方程的拟合参数(1/h)
$A_d$	死亡反应的频率因子(1/h)