

 Springer

Jennifer Wilcox 著  
西安热工研究院 译

# 碳捕集

## Carbon Capture

 中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

 Springer

# 碳捕集

## Carbon Capture

Jennifer Wilcox 著  
西安热工研究院 译



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书系统阐述了目前最先进的3种CO<sub>2</sub>捕集技术的原理,即吸收法、吸附法和膜技术。同时,介绍了以氮气、氧气和氩气为主要产品的空气分离技术,该技术的低温蒸馏过程可用于进一步提高碳捕集后含CO<sub>2</sub>混合气中的CO<sub>2</sub>纯度。此外,本书还对几种将CO<sub>2</sub>转化为生物燃料的技术(如利用藻类或电化学/光催化CO<sub>2</sub>等方法),以及可将CO<sub>2</sub>的捕集和存储相结合的技术(矿物碳化)进行了介绍,这些技术有望通过将CO<sub>2</sub>转化为替代燃料来减少化石燃料的使用,对缓解全球气候变暖具有积极的意义。

结合工程实际,书中给出了大量实例计算,并针对各章主要内容设置了章后练习题。

本书可用于本科生和研究生在碳捕集和气体分离方面的课堂教学,还可用作从事气体分离和碳捕集技术工作人员的学习材料。

### 图书在版编目(CIP)数据

碳捕集 / (美) 威尔科克斯 (Wilcox, J.) 著; 西安热工研究院译. —北京: 中国电力出版社, 2015.12

书名原文: Carbon Capture

ISBN 978-7-5123-8408-8

I. ①碳… II. ①威… ②西… III. ①二氧化碳—收集—研究 IV. ①X701.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第238367号

Translation from English language edition:

Carbon Capture

By Jennifer Wilcox

Copyright ©2012 Springer New York

Springer New York is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2015年12月第一版 2015年12月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 21.25印张 338千字

印数0001—2000册 定价60.00元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 译者序

目前，全球的能量供应依赖于化石燃料的燃烧。然而，由此引起的“温室效应”不断加剧，导致全球变暖、极端气候频发等环境问题愈演愈烈。研究如何控制温室气体的排放，以及集中分离捕集、储存，乃至利用这些温室气体，成为科学界关注的热点问题。作为最主要的温室气体，CO<sub>2</sub>的捕集存储（CCS）和捕集利用（CUU）技术在很大程度上决定了能否在全球范围内有效控制温室气体的排放总量，进而改善环境质量。因此，研究碳捕集技术具有重大的现实意义和紧迫性。


Jennifer Wilcox 教授，就职于斯坦福大学地球科学学院能源资源系（Energy Resources Engineering in the School of Earth Sciences），为环境与资源 Emmet 跨学科项目（E-IPER）组成员，担任地球科学学院清洁转化实验室负责人，在美国物理学会（American Physical Society）及美国国家科学院（National Academy of Sciences）等单位的数个研究团队进行 CO<sub>2</sub> 减排方面的研究。在碳捕集及存储等领域具有丰富的教学和研究经验。《Carbon Capture》一书中，她系统阐述了 CO<sub>2</sub> 的捕集技术，并重点介绍了目前最先进的 3 种捕集技术，即吸收法、吸附法和膜捕集技术。此外，她还对藻类和电化学/光催化 CO<sub>2</sub>-燃料转化过程进行了介绍，该技术有望通过将 CO<sub>2</sub> 转化为替代燃料来减少化石燃料的使用，对缓解全球气候变暖具有积极的意义。因此该书出版后，西安热工研究院有限公司立刻筹备组织该书的中文翻译及中文译本出版工作，以期传播先进的碳捕集技术研究成果，促进国内碳捕集利用技术的发展。

本书涵盖的学科范围较广，且学科交叉性较强。第 1 章介绍了 CO<sub>2</sub> 的生成机理、排放和捕集等过程，对 CO<sub>2</sub> 的分离原理及一些基本概念进行了概述；第 2 章讨论了 CO<sub>2</sub> 的压缩和运输过程；第 3、4、5 章为核心章节，系统阐述了目前最先进的几种 CO<sub>2</sub> 捕集技术，即吸收法、吸附法和膜捕集技术；基于混合气体分离技术，第 6 章介绍了以氮气、氧气和氩气为主要产品的空气分离技术，通过其中的低温蒸馏过程来提高 CO<sub>2</sub> 产气的纯度；第 7、8 章分别介绍了如何从藻类中获取生物燃料和通过电化学、光催化的方法实现 CO<sub>2</sub> 的还原，以此达到减少

CO<sub>2</sub> 排放和获取石油替代燃料的目的；第 9 章介绍了矿物碳化过程，该过程可能成为未来将 CO<sub>2</sub> 捕集与长期储存过程相结合的主要途径。针对各种基本概念，书中各章给出了大量的实例计算和章后练习题。

本书由西安热工研究院林伟杰主译并承担技术审核。李园参与了前言、第 1 章及词汇表的翻译；张发捷参与了第 2 章的翻译；谭增强参与了第 3 章及缩写词部分的翻译；程广文参与了第 4 章的翻译；美国达特茅斯学院柴紫仪参与了第 5 章的翻译；杨俊参与了第 6 章的翻译；王乐参与了第 7 章的翻译；余昭参与了第 8 章的翻译；董方奇参与了第 9 章翻译；杜智华参与了附录部分的翻译。柴华强承担了本书翻译工作的组织策划、组稿、协调等工作。蔡铭对缩写词和词汇表部分的翻译进行了审核。

本书可供本科生和研究生课堂教学使用，也可用作气体分离、碳捕集技术等方面的学习研究材料。因编译者水平有限，缺乏经验，书中难免存在疏漏、曲解或错误之处，衷心欢迎读者、专家不吝指正。



2015 年 9 月

# 序



煤、石油和天然气等化石燃料的燃烧为当今世界提供了 85% 以上的能源需求量，但与之相关的  $\text{CO}_2$  排放对全球气候造成了负面影响。科学界认为减少  $\text{CO}_2$  排放应综合利用多种技术，包括碳捕集和储存 (CCS) 技术，以及潜在的碳捕集和利用 (CUU) 技术等。通过从混合气体 (如电厂烟气) 中分离  $\text{CO}_2$  来减少  $\text{CO}_2$  排放的技术即为碳捕集技术，该技术有望对缓解全球气候变暖做出巨大贡献。利用胺类洗涤剂捕集天然气中的  $\text{CO}_2$  已有 70 多年的历史，但该技术能否应用于大规模的  $\text{CO}_2$  捕集 (全球  $\text{CO}_2$  年排放量约 30Gt) 目前尚无定论。在未来几十年中，工程师、化学家、物理学家、地球科学家、数学家和社会学家将致力于发展传统分离技术。因此，本书涵盖的学科范围较广，且交叉性较强。

本书集中讨论目前最先进的  $\text{CO}_2$  捕集技术：吸收法、吸附法和膜捕集技术，并安排了部分章节对藻类和电化学/光催化  $\text{CO}_2$ -燃料转化过程进行介绍。通过光合作用或电化学/光催化还原  $\text{CO}_2$  是将  $\text{CO}_2$  转化为替代燃料的一种途径，而全球气温的持续变暖将成为以原油替代品作为运输燃料发展政策的强劲推动力。这两种推动力极有可能在相当长的时间内存在。目前  $\text{CO}_2$  的捕集和储存 (CCS) 主要分三步进行：捕集、压缩和储存，也许将来这三步可压缩为一步完成，这将极大地推动碳捕集技术的发展，进而缓解温室效应。本书只集中讨论  $\text{CO}_2$  的捕集方法，对其地质储存不作介绍。

本书首开先河，系统介绍了  $\text{CO}_2$  的捕集技术。作为一门新兴学科，该技术涉及多个学科领域，因为单纯的一门学科知识已不足够解释气体分离原理及其与过程设计的联系。虽然此前 2005 IPCC 关于 CCS 的特别报告中介绍了 CCS 技术，但该报告仅仅进行了简单概述。基于此，本书系统地阐述了 CCS 技术，旨在使读者认识到传统气体分离 (主要指  $\text{CO}_2$  捕集) 技术的局限性，并使其有能力迎接大规模  $\text{CO}_2$  减排的挑战。

本书可用作碳捕集和气体分离专业本科生和研究生教学，也可用于从事气体分离和碳捕集技术工作人员的学习资料。书中内容对活跃在碳

捕集技术研究、开发领域的科学家、工程师大有裨益。此外，评估气体分离过程在碳捕集中的作用也将用到本书相关知识。

书中三大核心章节详细阐述了吸收法、吸附法和膜法  $\text{CO}_2$  捕集技术的原理，并给出了大量实例计算和章后练习题。这些实例主要针对各种基本概念进行测试，从与结合  $\text{CO}_2$  给定材料相关的化学物理学到机组的运行过程，均与传质密切相关。除一些例子中考虑到工业标准使用了美国工程单位外，全书统一使用公制单位（如 t）。

**封面设计：**本书封面设计基于目前最先进的  $\text{CO}_2$  捕集技术——胺洗涤技术。图片意在说明石油和煤等化石燃料的氧化导致了  $\text{CO}_2$  的生成，且排入大气的  $\text{CO}_2$  具有相当稳定的线性结构。胺捕集过程涉及碳酸盐和氨基甲酸盐等物质的复杂反应，该过程受 pH 值、温度和压力等因素的影响。氧气（碳酸盐）或氮气（氨基甲酸盐）与  $\text{CO}_2$  的碳原子的结合使  $\text{CO}_2$  分子由线性结构（右图）变为弯曲结构（左图）。相比于与其他已经具有弯曲结构的气体分子（如  $\text{SO}_2$ ）的结合过程，与  $\text{CO}_2$  分子的结合往往伴随着熵变。因此，氧气（碳酸盐）或氮气（氨基甲酸盐）与  $\text{SO}_2$  的反应速率更快。吸收过程中， $\text{CO}_2$  分子必须保持弯曲结构（见封面图片）以利于反应进行。弯曲结构表明  $\text{CO}_2$  处于气相与液相之间的状态，这也是其最终被捕集时的状态。封面由 Karen Miller 和 Deborah Hickey 设计。

# 致 谢

几年前，我应邀加入由 Robert Socolow、Bill Brinkman、Arun Majumdar 和 Michael Desmond 等人共同领导的团队，在美国物理学会的带领下研究利用化学品直接从大气中捕集 CO<sub>2</sub> 的技术。我们团队意识到，要推动碳捕集研究的发展，必须具备一定的技能和工具。本书正是在此基础上完成的。

我要特别感谢 Robert Socolow 教授，本书是在他的鼓励和具有感染性的教育、学习热情下完成的。我还要感谢 APS 课题组的其他成员：Roger Aines, Jason Blackstock, Olav Bolland, Michael Desmond, Tina Kaarsberg, Nathan Lewis, Marco Mazzotti, Allen Pfeffer, Jeffrey Sirola, Karma Sawyer, Berend Smit, 如果没有你们的积极探讨和不断鼓励，我不可能完成这样的挑战。

本书各章节的草稿分别由以下各位专家进行审验检查，感谢你们的辛苦工作：

Shela Aboud, Stanford University

Antonio Baclig, C12 Energy, Inc.

Abhoyjit Bhowan, Electric Power Research Institute (EPRI)

Heinz Bloch, P.E.

Gordon Brown, Stanford University

Stefano Consonni, Politecnico di Milano

Christopher Edwards, Stanford University

Brice Freeman, Electric Power Research Institute (EPRI)

Thomas Jaramillo, Stanford University

Marco Mazzotti, Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH)

Lisa Joss, Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH)

Anthony Kavscek, Stanford University

Nichola McCann, University of Kaiserslautern

Sean McCoy, International Energy Agency (IEA)

Keith Murphy, Air Products & Chemicals, Inc.

Andrew Peterson, Brown University



Valentina Prigiobbe, University of Texas, Austin

Gary Rochelle, University of Texas, Austin

Edward Rubin, Carnegie Mellon University

Douglas Ruthven, University of Maine

Douglas Way, Colorado School of Mines

感谢我在斯坦福大学的研究团队，如果没有你们，本书不可能完成得如此顺利、高效。Abby Kirchofer, Mahnaz Firouzi, Guenther Glatz 和 Dong-Hee Lim 提供了部分章节的内容。Jasper van der Bruggen 利用他的 GIS 技能帮我绘制了多幅地图。多谢 Keith Mosher 和 Ekin Ozdogan 协助进行了大量数据查询，我才能顺利制作出多个章节的图表。Yangyang Liu 除校对各章节内容外，还制定并整理了附录。全书的实例和章后问题由 Erik Rupp 协助完成，其中 3、4、5 章章后问题的答案由 Kyoungjin Lee, Jiajun He, Feng Feng 提供。此外，我还要感谢 Panithita Rochana，她认真仔细的制图和制定符号列表使本书更趋完美。

最后我还要感谢我的丈夫，Austin，谢谢你每天的支持与鼓励。谢谢你。

# 缩略词

## 符 号

$A$	塔横截面积 (3.64), $L^2$ 或吸附质的横截面积 (4.13), $L^2$ 或膜表面积 (5.29), $L^2$
$a$	单位体积填料的比表面积 (3.55), $L^2/L^3$ 或孔半径, $a=r-l$ , 其中 $r$ 是孔隙外半径, $l$ 是孔表面膜厚度 (4.17), $L$ 或吸附剂颗粒的外表面积, 对半径为 $r$ 的球形颗粒, $a=3(1-\varepsilon)/r$ (4.41), $1/L$
$B(T)$	对应双分子间作用力的第二维里系数 (4.8), $L^3/\text{mol}$
$b$	Langmuir 亲和常数 (5.10), $P^{-1}$
$C$	BET 常数 (4.14), 无量纲 或无量纲浓度= $c/c_0$ , 其中 $c_0$ 为初始浓度 (4.21), 无量纲
$C_{\text{avo}}$	火力发电厂的 $\text{CO}_2$ 减排成本 (1.13), $\$/\text{t CO}_2$
$C_{\text{avo,DAC}}$	直接空气捕集系统的 $\text{CO}_2$ 减排成本 (1.16), $\$/\text{t CO}_2$
$C_{\text{cap}}$	火力发电厂捕集每吨 $\text{CO}_2$ 的成本 (1.14), $\$/\text{t CO}_2$
$C_{\text{cap,DAC}}$	直接空气捕集系统捕集每吨 $\text{CO}_2$ 的成本 (1.15), $\$/\text{t CO}_2$
$C(T)$	对应三分子间作用力的第三维里系数 (4.8), $L^6/\text{mol}^2$
$c$	光速, 取 $2.998 \times 10^8 \text{m/s}$
$c_{A1}$ 、 $c_{A2}$	膜高压侧和低压侧的气体 A 的浓度 (5.1), $\text{mol}/L^3$
$c_B$	水溶液中活性物质的浓度 (3.17), $\text{mol}/L^3$
$c_H$	双模模型中亨利 (Henry) 定律物质的浓度 (5.7), $\text{mol}/L^3$
$c'_L$	Langmuir 容量常数 (5.7), $\text{mol}/L^3$ 或氢的原子浓度 (5.11), $\text{mol}/L^3$
$c_i$	混合物中组分 $i$ 的浓度, $\text{mol}/L^3$ 或溶液中电荷为 $z_i$ 的离子的浓度 (3.4), $\text{mol}/L^3$

注: 括号中的数字对应公式、章节、图表的序号, 其中各符号是第一次定义或使用的。量纲有质量 (M)、长度 (L)、时间 (t)、温度 (T)、物质的量 (mol)、电压 (V)、电流 (I)、能量 ( $E=ML^2/t^2$ )、压力 ( $P=M/Lt^2$ )。未列出不常用符号, 未列出常用符号所在的方程、章节或图表。

$c_p$	产物浓度 (3.13), mol/L <sup>3</sup>
$c_L$	双模模型中的 Langmuir 物质的浓度 (5.7), mol/L <sup>3</sup>
$c_{s,CO_2}$	吸附剂表面的 CO <sub>2</sub> 浓度 (4.33), mol/L <sup>3</sup>
$c_0$	CO <sub>2</sub> 的初始浓度 (4.43), mol/L <sup>3</sup>
$c_{i,CO_2}$	气液界面的 CO <sub>2</sub> 浓度 (3.34) 或气膜界面的 CO <sub>2</sub> 浓度 (4.33), mol/L <sup>3</sup>
$c_{\infty,CO_2}$	气相主体的 CO <sub>2</sub> 浓度 (3.34) 或液相主体的 CO <sub>2</sub> 浓度 (3.35), mol/L <sup>3</sup>
$D$	扩散率, L <sup>2</sup> /t
$D_A$	组分 A 的扩散率 (3.7), L <sup>2</sup> /t
$D_{AB}$	液体 B 中气体 A 的扩散率 (表 3.3), L <sup>2</sup> /t
$D_B$	结合物 B 的液体扩散率 (表 3.5), L <sup>2</sup> /t
$D_b$	液相主体扩散率 (4.32), L <sup>2</sup> /t
$D_{G,CO_2}$	气相中 CO <sub>2</sub> 的分子扩散系数 (3.34), L <sup>2</sup> /t
$D_{L,CO_2}$	液相中 CO <sub>2</sub> 的分子扩散系数 (表 3.5), L <sup>2</sup> /t
$D_c$	塔径 (3.77), L
$D_{He}$	双模模型中亨利 (Henry) 定律物质的扩散系数 (5.9), L <sup>2</sup> /t
$D_e$	有效 (或测得的) 扩散系数 (4.19), L <sup>2</sup> /t
$D_{eA}$	组分 A 的有效扩散系数 (5.17), L <sup>2</sup> /t
$D_f$	膜中 CO <sub>2</sub> 的分子扩散系数 (4.33), L <sup>2</sup> /t
$D_H$	氢原子的扩散系数 (5.12), L <sup>2</sup> /t
$D_i$	管道内径 (2.13), L
$D_K$	克努森 (Knudsen) 扩散系数 (4.28), L <sup>2</sup> /t
$D_L$	轴向混合扩散系数 (4.47), L <sup>2</sup> /t
$D_{La}$	双模模型中 Langmuir 物质的扩散系数 (5.9), L <sup>2</sup> /t
$D_m$	分子扩散系数 (4.46), L <sup>2</sup> /t
$D_{Pois}$	圆柱孔的泊肃叶流的扩散系数 (4.31), L <sup>2</sup> /t
$D_p'$	孔内扩散系数 (4.36), L <sup>2</sup> /t
$D_A/D_B$	移动选择性 (5.6), 无量纲
$d$	管道直径 (4.58), L
$dp$	颗粒直径 (4.34), L
$E$	吸附过程的增强因子 (3.41), 无量纲 或电场强度 (4.5), V/t 或 ML/t <sup>3</sup>

$E_{\text{abs}}$	晶体内原子的结合能 (5.8), E/mol
$E_{\text{d}}$	气体分子的解离能 (5.8), E/mol
$E_i$	瞬时反应的增强因子 (3.42), 无量纲
$E_{\text{full}}$	全谱太阳能 (7.2), E/mol
$E_{\text{L}}$	液相冷凝能 (4.15), E/mol
$E_{\text{ph}}$	光子能 (7.2), E/mol
$E_0$	标准势能 (8.2), E/mol
$E_1$	克服第一层吸附阻力的活化能 (4.15), E/mol
$F$	法拉第 (Faraday) 常数=96485.3 C/g 当量 或朗缪尔 (Langmuir) 与亨利 (Henry) 定律的扩散系数之比 (5.10) $=D_{\text{La}}/D_{\text{He}}$ , 无量纲
$F_{\text{CO}_2}$	吸附床的 $\text{CO}_2$ 供给速度 (4.50), mol/L <sup>2</sup> t 或 M/L <sup>2</sup> t
$F_{\text{p}}$	填料因子 (3.49), 无量纲
$f$	摩擦系数 (4.63), 无量纲
$f_{\text{F}}$	范宁 (Fanning) 摩擦系数 (2.13), 无量纲
$f_1$	液体黏度校正系数 $= (\mu/\mu_{\text{w}})^{0.16}$ (3.77), 无量纲
$f_2$	液体密度校正系数 $= (\rho/\rho_{\text{w}})^{1.25}$ (3.77), 无量纲
$f_3$	表面张力校正系数 $= (\sigma/\sigma_{\text{w}})^{0.8}$ (3.77), 无量纲
$G_i^0$	标准状况下气体组分 $i$ 的 Gibbs 自由能 (1.8), E
$g$	重力加速度, L/t <sup>2</sup>
$g_{\text{c}}$	力单位的转换系数 (2.13), 无量纲
$H$	亨利 (Henry) 定律常数。亨利 (Henry) 定律常数的单位取决于 (3.2) 使用的亨利 (Henry) 定律方程, $p$ 或 $p\text{L}^3/\text{mol}$ 或亨利 (Henry) 定律吸附平衡常数 (4.55), 无量纲
$H^0$	纯水中物质的亨利 (Henry) 定律常数 (3.3), $p$ 或 $p\text{L}^3/\text{mol}$
$H_{\text{CO}_2}$	$\text{CO}_2$ 的亨利 (Henry) 定律常数 (表 3.5), $p$ 或 $p\text{L}^3/\text{mol}$
$H_{\text{G}}$	气膜分传质单元高度 (3.72), L
$H_{\text{L}}$	液膜分传质单元高度 (3.72), L
$H_0$	某些初始温度工况下亨利 (Henry) 定律的无量纲吸附平衡常数 (4.55), 无量纲
$H_{\text{OG}}, H_{\text{OL}}$	基于气相和液相的总传质单元高度 (3.68~3.69), L
$h$	普朗克常数 $=6.63 \times 10^{-34}$ Js 或高度变化 (2.13), L

	或溶解系数 (3.3), $L^3/mol$
	或颗粒与液体间的总传热系数 (4.45), $E/L^2/t^2$
$h_G$	气体对溶解度系数的作用 (3.5), $L^3/mol$
$h_+$	电解质溶液解离的正离子 (3.5), $L^3/mol$
$h_-$	电解质溶液解离的负离子 (3.5), $L^3/mol$
$I$	电解质溶液的离子强度 (3.3), $ML^3$
	或分子的惯性力矩 (5.8), $ML^2$
$i$	电极电流密度 (8.15), $I/L^2$
$i_0$	交换电流密度 (8.15), $I/L^2$
$J$	单位面积吸附速率 (流量) (3.7), $mol/L^2t$ 或 $M/L^2t$
$J_{f,CO_2}$	$CO_2$ 在吸附剂气液界面的摩尔流量 (4.33), $mol/L^2t$
$J_{H_2}$	穿过膜的氢分子流量 (5.12), $mol/L^2t$
$J_{L,CO_2}$	溶液中 $CO_2$ 的摩尔流量 (3.35), $mol/L^2t$
$K$	Langmuir 吸附平衡常数 (4.10), 无量纲
$K_c$	总传质系数 (4.42), $L/t$
$K_{eq}$	平衡常数 (3.15), 平衡常数的单位取决于反应中反应物与产物的摩尔数
$K_{eq}^{VL}$	$CO_2$ 的气液平衡比 (3.6), 无量纲
$K_s$	西韦特 (Sieverts) 常数 (5.11), $mol/L^3 p^{1/2}$
$K_x$	液相总体积传质系数, 基于浓度推动力 (3.58), $mol/L^2t$
$K_y$	气相总体积传质系数, 基于浓度推动力 (3.57), $mol/L^2t$
$K_3$	泛点校正因子的百分比 (3.78)
$k$	波尔兹曼常数, 取 $1.38066 \times 10^{-23} J/K$
	或比热容比值, $c_p/c_V$ , 其中 $c_p$ 是比定压热容, $c_V$ 为比定容热容, 无量纲
	或速率常数 (3.12)。速率常数的单位取决于反应的总级数或反应速率常数 $=sk_s$ , 其中 $s$ 是单位体积的表面积, $k_s$ 是表面反应速率常数, (4.19) $L/t$
	或液体分子的作用常数 (4.27), $EL^3$
$k_D$	亨利 (Henry) 常数 (5.10), $p$ , $pL^3/mol$ 或无量纲
$k_f$	膜的外传质系数 (4.33), $L/t$
$k_{G,CO_2}$	$CO_2$ 的外传质系数或传质速率 (3.34), $L/t$
$k_{L,CO_2}$	$CO_2$ 的液相传质系数或气相传质速率 (3.35), $L/t$

$k_p$	基于分压驱动力的气相体积分传质系数 (3.59), $\text{mol/L}^3\text{t}$ 或孔内扩散的传质系数或内部传质系数, 如球状颗粒 $k_p \approx 10D_c/d_p$ , 其中 $d_p$ 为颗粒直径 (4.39), $\text{L/t}$
$k_x$	液相体积分传质系数, 基于浓度驱动力 (3.55), $\text{mol/L}^3\text{t}$
$k_y$	气相体积分传质系数, 基于浓度驱动力 (3.55), $\text{mol/L}^3\text{t}$
$k_0$	气相速率常数 (3.12), 速率常数的单位取决于反应的总级数, 或电化学反应的标准速率常数 (8.13)
$k_1, k_{-1}$	正反应与逆反应的一阶速率常数 (3.13), $1/\text{t}$
$k_2$	二阶速率常数 (3.17), $\text{L}^3/\text{mol}$
$L$	管道长度 (2.13), $\text{L}$ 或液体速度 (对流) (3.35), $\text{L/t}$ 或吸收塔任一截面的液体的摩尔流率 (3.52), $\text{mol/t}$ 或吸附床长度 (4.43), $\text{L}$
$L_w$	单位塔截面积的液体质量流速 (3.77), $\text{M/L}^2\text{t}$
$LUB$	未使用的吸附床的长度 (章节 4.4.2), $\text{L}$
$L_1$	进入吸收塔顶部的液体摩尔流速 (3.50), $\text{mol/t}$
$L_2$	离开吸收塔底部的液体摩尔流速 (3.50), $\text{mol/t}$
$L$	膜厚度 (4.1.3), $\text{L}$
$L_c$	临界层厚度 (4.17), $\text{L}$
$M$	分子量, $\text{M/mol}$
$M_i$	混合物中组分 $i$ 的分子量, $\text{M/mol}$
$m$	质量, $\text{M}$ 或平衡曲线的斜率 (3.62)
$\dot{m}$	$\text{CO}_2$ 的质量流速 (2.14), $\text{M/t}$ 或入口气体的质量流速 (3.81), $\text{M/t}$
$N$	平衡段的数目 (传质单元), 无量纲
$N_A$	阿伏伽德罗 (Avogadro) 常数, 取 $6.0221415 \times 10^{23}/\text{mol}$
$N_i$	组分 $i$ 的扩散流量, $\text{mol/L}^2\text{t}$ 或 $\text{M/L}^2\text{t}$
$N_m$	单位面积的单层吸附质分子数 (4.11), $\text{mol/L}^2$
$N_{OG}, N_{OL}$	气相和液相的总传质单元数 (3.68~3.69), 无量纲
$n$	多变指数 (2.3), 无量纲 或电子数 (8.3)
$n_i$	混合物中组分 $i$ 的摩尔数, $\text{mol}$

$n_i^{\text{CO}_2}$	气流 $i$ 中 $\text{CO}_2$ 的摩尔数 (1.10), mol
$n_i^{i-\text{CO}_2}$	气流 $i$ 中其余气体的摩尔数 (1.10), mol
$\dot{n}$	摩尔流速, mol/t
$P$	功率, E/t
$p_A$	混合气体中组分 A 的渗透率= $D_A S_A$ (章节 5.3.1), bar
$\bar{p}_A$	混合气体中组分 A 的渗透系数= $\frac{D_A S_A}{z}$ (5.5), 气体处理单元 (GPU)
$P_{\text{ad}}$	绝热状态下的单级马力 (2.4), P
$p_{\text{ave}}$	$\text{CO}_2$ 管道的平均压力= $\frac{2}{3} \left( p_2 + p_1 - \frac{p_2 p_1}{p_2 + p_1} \right)$ (2.14), P
$P_{\text{H}_2}$	通过膜的氢气渗透率 (5.14), mol/LtP <sup>0.5</sup>
$P_{\text{iso}}$	等温压缩功率 (2.7), P
$P_{\text{AR}}$	光合有效辐射 (7.2), M/L <sup>2</sup> t
$P_{\text{FD}}$	年光子通量摩尔密度 (7.2), M/L <sup>2</sup> t
$p$	压力, P
$p_{A1}$	进料侧或膜上 A 处的分压 (5.3), P
$p_{A2}$	膜的渗透侧上 A 处的分压 (5.3), P
$p_{\text{CO}_2}$	$\text{CO}_2$ 的溶液平衡分压 (3.2), P
$p_c$	临界压力, P
$p_{c1}, p_{c2}$	冷凝液体颗粒分别与第一层和第二层分子层碰撞的概率 (4.15), 无量纲
$p_i$	混合物中组分 $i$ 的分压, P
$p_{\text{H}_2}$	与金属平衡时的 $\text{H}_2$ 分压 (5.11), P
$p_r$	折算压力, P
$p_v$	混合气体中所含水分的蒸汽压 (2.12), P
$p_0$	蒸汽压 (饱和压力), P
$p_1, p_2$	压缩段入口和出口的气体压力 (2.1), P 或膜入口和渗透侧的总压 (5.19), P
$pK_a$	酸离解常数的对数值= $-\lg K_a$ (表 3.4), 无量纲
$Q$	所涉及系统的供热量 (1.6), E 或体积流率, L <sup>3</sup> /t 或四极矩 (4.5), L <sup>2</sup> I

$q(\rho, \theta)$	系统中心 $(\rho, \theta)$ 点处的局部电荷密度 (4.6), $I/L$ , $I/L^2$ 或 $I/L^3$
$R$	理想气体常数 或颗粒的无量纲半径 $=r/R_p$ (4.21), 无量纲
$R_p$	颗粒半径 (4.19), L
$r$	压缩比 (2.4), 无量纲 或反应速率 (3.13), 反应速率的单位取决于反应的总级数 或颗粒间距 (4.3), L 或孔径 (4.27), L 或膜的渗透侧和进气侧的压力比 $=p_2/p_1$ (5.20), 无量纲
$r_{12}$	孤立系统 1 与 2 的距离 (4.1), L
$r_f$	电化学反应的正反应速率 (8.6)
$r_r$	电化学反应的逆反应速率 (8.7)
$r_s$	每级的压缩比 (2.10), 无量纲
$r_t$	总压缩比 (2.10), 无量纲
$r, \theta, z$	柱坐标
$r, \theta, \varphi$	球坐标
$S_i$	混合气体中组分 $i$ 的溶解系数 (5.2), $M/L^3P$
$S$	吸附剂的总表面积 (4.13), $L^2$
$S_A/S_B$	溶解度选择性 (5.6), 无量纲
$s$	压缩级数 (2.10), 无量纲 或表面更新比率 (3.40), $L^2/t$
$T$	温度, K
$T_{ave}$	平均温度, 在 $CO_2$ 管道模型中通常假定不变, 为地面温度 (2.14), T
$T_c$	临界温度, T
$T_g$	玻璃化温度, T
$T_r$	对比温度, T
$t$	时间, t
$t_b$	穿透时间 (4.53), t
$t^*$	没有传质阻力时的理想时间 (4.52), t
$\bar{t}$	无量纲时间 $=t/t^*$ 其中 $t^*$ 是没有传质阻力时的理想时间 (4.43), 无量纲
$\mu$	液体速度, L/t
$\mu_n$	最小流化速度 (4.66), L/t



$\mu_{\max}$	填料床内最大允许上升流速 (4.66), L/t
$\mu_0$	液体的空塔速度, L/t
$\mu_{12}$	分子 1 和 2 间的相互作用势能 (4.9), E
$V$	体积, L <sup>3</sup> 或吸收塔任一截面的蒸汽 (气体) 摩尔流速 (3.52), mol/t
$V_{\text{out}}$	渗透流的体积流率 (5.28), L <sup>3</sup> /t
$V_{\text{W}}^*$	基于总塔横截面的气体质量流速 (3.80), M/L <sup>2</sup> t
$V_1$	离开吸收塔顶部的蒸汽 (气体) 摩尔流速 (3.50), mol/t
$V_2$	进入吸收塔底部的蒸汽 (气体) 摩尔流速 (3.50), mol/t
$\tilde{V}$	摩尔体积, L <sup>3</sup> /mol
$\dot{V}_{\text{pl}}$	压缩机入口的理想气体体积流速 (2.4), L <sup>3</sup> /t
$\dot{V}_{\text{rl}}$	压缩机入口的真实气体体积流速 (2.6), L <sup>3</sup> /t
$V_1, V_2$	初始和最终的气体体积 (2.1), L <sup>3</sup>
$W$	系统做功 (1.6), E/mol; 或吸附剂负载量 (4.10), mol/L <sup>3</sup> 或 mol/M 或无量纲
$W_e$	生成每摩尔产物理论上需要的最大电能 (8.5), E/mol
$W_m$	基于单层假设的最大吸附质负载量 (4.10), mol/L <sup>3</sup> 或 mol/M
$W_{\text{min}}$	分离过程所需的最小理论功, 也指可逆功 ( $W_{\text{rev}}$ ) (1.7), E/mol
$W_{\text{real}}$	分离过程所需的实际功 (1.12), E/mol
$W_{\text{sat}}$	多孔吸附剂中 CO <sub>2</sub> 的平衡饱和浓度 (4.43), mol/L <sup>3</sup> 或 mol/M
$W_0$	多孔吸附剂中 CO <sub>2</sub> 的初始浓度 (4.43), mol/L <sup>3</sup> 或 mol/M
$w_b$	与鼓风机相关的功, E/mol
$w_c$	与压缩机相关的功, E/mol
$w_f$	与风机相关的功, E/mol
$x$	液相中给定组分的摩尔分数, 无量纲 或入口中易渗透组分的摩尔分数 (5.18), 无量纲
$x_{\text{CO}_2}$	液相中 CO <sub>2</sub> 的摩尔分数, 无量纲
$x_e$	液相中给定组分的平衡摩尔分数 (3.58), 无量纲
$x_i, x_j$	给定膜入口进气流中组分 $i$ 和 $j$ 的摩尔分数 (5.6), 无量纲
$x_{1, \text{CO}_2}$	吸收塔顶部入口液体中 CO <sub>2</sub> 的摩尔分数 (3.51), 无量纲
$x_{2, \text{CO}_2}$	吸收塔底部出口液体中 CO <sub>2</sub> 的摩尔分数 (3.51), 无量纲