

多相催化: 基本原理与应用

Heterogeneous Catalysis:
Fundamentals and Applications

[爱尔兰] 朱利安 R.H. 罗斯 (Julian R.H. Ross) 著

田野 张立红 赵宜成 李永丹 译



化学工业出版社

多相催化: 基本原理与应用

Heterogeneous Catalysis: Fundamentals and Applications



[爱尔兰] 朱利安 R.H. 罗斯 (Julian R.H. Ross) 著

田野 张立红 赵宜成 李永丹 译



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

多相催化: 基本原理与应用/ [爱尔兰] 朱利安 R. H. 罗斯 (Julian R. H. Ross) 著; 田野, 张立红, 赵宜成, 李永丹译. —北京: 化学工业出版社, 2015. 9

书名原文: Heterogeneous Catalysis: Fundamentals and Applications
ISBN 978-7-122-24639-4

I. ①多… II. ①朱… ②田… ③张… ④赵… ⑤李… III. ①多相催化-教材 IV. ①O643. 32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 161443 号

< HETEROGENEOUS CATALYSIS: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS >, < 1st edition > < Julian R. H. Ross >

ISBN: 978-0-444-53363-0

Copyright ©2012 Elsevier B. V. All rights reserved

Authorized Simplified Chinese translation edition published by Chemical Industry Press and Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

Copyright ©2016 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

Copyright ©2016 by Chemical Industry Press.

All rights reserved.

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong, Macau and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予化学工业出版社在中国大陆地区 (不包括香港、澳门以及台湾地区) 出版与发行。未经许可之出口, 视为违反著作权法, 将受刑法及民法之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2013-1008

责任编辑: 徐雅妮

文字编辑: 丁建华

责任校对: 王素芹

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 北京云浩印刷有限责任公司

装订: 三河市瞰发装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 14¼ 字数 230 千字 2016 年 4 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 59.00 元

版权所有 违者必究

| 译者前言 |

| FOREWORD |



催化反应过程在现代工业文明中占据极为重要的地位。在合成氨、炼油、石油化学品、精细化工、制药、环境保护等行业中，催化剂和催化反应都是起主导作用的核心支柱技术。因此长期以来，催化科学在国内外都是化工专业本科生和研究生教学的重要内容。以催化为主题的论著和教科书在近几十年中也层出不穷，其中有些已堪称经典，但它们大多或侧重于对基础理论的阐述，或侧重于对生产工艺的介绍。实际上仍然很难找到一本教科书，能够将这一领域的基本理论、工业应用和最新的研究进展三者紧密结合，使刚开始接触该领域的青年学生对催化科学和催化过程形成全面的认识和理解。

“Heterogeneous Catalysis: Fundamentals and Applications”一书自2012年由Elsevier集团出版发行后，在世界范围内受到广大读者和专家的一致好评。本书详细阐述了吸附过程、反应机理和反应动力学等非均相催化科学的核心理论，并从工业应用的角度对催化剂的制备和催化反应器进行了全面的介绍。在介绍基础知识的同时，本书更重视培养学生使用检索工具，获取新知识的能力。因此，本书不仅对重要的催化理论和催化反应进行了专题讨论，更为读者提供了进一步查阅相关材料的线索，使读者能够根据自己的研究兴趣，深入了解这些专题的发展历史和最新进展。本书不仅适合用作催化专业高年级本科生和研究生的教科书，还可作为学生的课外自学参考书。

本书的作者 Julian R. H. Ross 教授是国际著名的催化和表面化学专家，是爱尔兰皇家科学院成员，曾担任催化领域国际知名期刊“Catalysis Today”主编25年（1986~2010年），在催化理论研究和工业应用等领域均有开拓性的建树。此外，他先后在英国 Bradford 大学、荷兰 Twente 大学和爱尔兰 Limerick 大学任教四十余年，具有丰富的教学经验。我们与 Julian R. H. Ross 教授之间有二十余年的密切合作，有幸在本书出版的同时获赠本书。在认真阅读之后，我们深感这是近年来催化领域难得的好书，对催化科学和工业催化的教学具有重要的借鉴意义。我们希望通过将此书翻译出版，介绍给国内读者，能够对我国催化科学基础和应用教育起到推动作用。在翻译的同时，我们也从中学到了许多东西。但由于水平有限，可能存在许多翻译不准确的地方，欢迎广大读者提出宝贵的意见。

2015 年 10 月

I 序言 I

PREFACE



以前的一位同行常说的一句话听起来很有道理：一个人每次只能找一个借口。尽管如此，我想为再次撰写催化方面的教材给出几个理由。

第一个理由是，尽管有大量的书籍覆盖了催化领域，但我还没有发现哪本书完全如我所希望的那样：首先给出该学科主要方面的概述，然后不是给出太多细节，而是给出一些最重要的专题的讨论。许多学术性的书籍（我在本书中会非常频繁地提到其中的一些）对该学科讨论非常详尽，对相关文献的引述也非常全面，但从许多方面来讲，它们对于普通大学生来说太深奥了。也有一些书籍以更可读的方式介绍该学科，更适合学生阅读，但这些书籍并未涵盖这一学科的所有重要方面。

第二个理由是，我想尝试些许创新。多年前，一位前同事的一句评论“化学文献的未来在于检索工具，例如《科学引文索引》”把我引向了引文索引这一概念。科学信息研究所的 Eugene Garfield 博士在“现刊目录”中发表了一系列致力于推荐这种工具使用的论文。在随后的这些年里，我饶有兴趣地“追随”Eugene Garfield 博士发表的这些论文并从中受到很大的启发。其实，引文索引可让人追踪近期的文献——而不仅仅是按我们已经学会的方式使用《化学文摘》及其他类似检索工具进行文献溯源。在这本书中我所努力做的是鼓励学生使用该类工具从一个特定主题的重要文献向近期推进，以便了解该领域的最新进展^①。我鼓励学生在进行检索的时候尽可能使用“二次文献”（换句话说，文献综述及其类似出版物），而不是被研究论文中太多的细节所束缚。同时，我想鼓励学生不要尝试去读一篇文章的所有细节（如果兴趣改变随时都可以回顾），而是针对现有目的挖掘最相关的细节。

第三个理由是，我曾经在三个不同国家的三所大学里工作（并曾经在另一个机构中学习），有幸遇到工作在不同催化领域的科学家。此外，我也有幸担任“Catalysis Today”（由 Elsevier 科学出版社出版）20 多年的主编，因此有机会拓展相关主题的大量知识（但对某些领域的了解仍是相当肤浅的）。恰逢电子通信技术蓬勃发展，我越来越意识到电子文献资源在日常科学生活中使用的优势。因此，我想充分利用这一知识。

第四个理由是，对于这里所要求的基于研究项目的学习，我已经有非常好的使用体验。在 Twente 大学期间（1982~1991 年），我非常有效地使用了这种方法，例如在一个应用催化方面的相当基础的短期课程讲座中，我要求每个学生在我的指导下针对某个命题进行详细的文献检索，然后针对结果进行全班讨论。效果非常好，有几个项目甚至成

^① 使用 Scopus 或类似检索工具的另一个优点是它能确保所用的文本不因时间的推移而过时：学生随时能够发现某一特定主题的最新进展。主要问题是可能有新的“热点课题”，因此可能需要针对这些主题更新文本，给出这些主题的线索。

为我课题组新的研究主题。

最后的理由是，我相信催化是一门需要掌握更广泛知识的学科。催化过程会影响化学与化学工程的诸多方面，每个化学家和化学工程师都该学习该学科的基本原理；此外，如果有必要的话，他们还应该阅读催化方面的科学与技术文献，使其能成长为特定领域的专家。

你面前的这本书在写作的过程中已经逐渐地从一本纯粹的教科书变为交互式的、开放式的且允许学生探究他们感兴趣的专题辅导书。本书没有试图给出太多细节，至少在学生第一次阅读时，鼓励他们以了解基础知识为目的，而不是深入钻研^②。本书中包括一系列的拓展阅读和任务，学生在第一次阅读时可以忽略这些，或选择某些部分进行详细阅读。这本书既可以用于个人学习，又可以作为教科书。对于后一种情况，教师可以指导学生使用文献，并在特定方面引导他们。

读者将会清楚地看到我使用了很多来自于我自己的例子。此外，我用到了许多从 Elsevier 期刊（特别是“Catalysis Today”“Applied Catalysis”和“Journal of Catalysis”）收集的重要参考文献。虽然我也使用了其他出版社发表的论文，但是我试图尽可能地使用那些能够从 Science Direct 数据库中轻松获取的论文。这并不意味着你应该一直局限于使用 Scopus 或 Science Direct 数据库。如果你有访问 Web of Science 或 Scifinder 数据库或其他电子资源的权利，在你的工作中务必要使用这些资源，如果你愿意，也可以忽略 Elsevier 的资料。最终的结果应该是相似的：在了解书中课程梗概之后，应该充分认识到催化及其诸多应用的重要性。

附录：使用方法

既然我们将使用引文的方法作为这本书不可分割的部分，现在有必要多说一些科学文献的研究方法^③。当一篇新发表的文章被检索的时候，文章中所引用的文章就会被链接到这篇新的文章中，并且这篇文章的作者和摘要的全部细节也会被存储。同时会提供文章的全文版本的链接，但只有在订阅之后才有权进行全文检索。更重要的，由于使用引用列表，使得学术工作有可能从源文章开始推进。假定一个人知道了一篇 10 年前出版的非常重要的源文献（可能是一个特定主题的综述），这个人想知道该领域在这篇文献发表之后有什么进展，就可以检索这篇源文献并得到一份引用了该文的文章列表。依据“引用”数量，这个人可以查找每篇文章（或摘要），或者先排除一些不太感兴趣的课题来精简列表^④（也可以通过引用数排序，找到最重要的施引文献）。

② 如果有必要，之后你可以回到特定主题上。记住，在你今后事业中最重要的不是你知道了什么，而是知道去哪里寻找相关的信息。

③ 应该指出，由于引文分析易于查找特定作者被引次数和确定 Hirsch 因子（ h 因子、 h -index，即该作者发表的论文中，有 h 篇已至少被引用 h 次），它已成为评估科学产出的方法。应该注意到，这些数量主要取决于某科学家从事该领域的普遍程度，以及该作者是否写过重要的综述或方法论的文章等其他因素（如果某人从事相对冷门领域的研究并且每年仅发表一两篇非常重要的文章，相对于那些从事热门领域研究并发表大量文章的人，他的被引用数一定是很少的）。这里介绍的方法应该十分小心使用，否则很容易被随意滥用。

④ 目前对特定主题的跟踪，也可以通过保存该主题的一些关键的参考文献，并且针对这些文献设定施引文章电子提醒的方式来达到。

我们将使用 Scopus 或 Web of Science 进行文献研究，并以“任务”的方式出现在本书中。本书推荐了许多需要进一步学习的主题，并提供了该领域内作者发表论文的详细信息或几篇重要的研究文章或综述。然后鼓励学生通过 Scopus 或 Web of Science 跟进每个主题（从这些数据库中可以获得链接），选择最近的和重要的出版物，也就是与主题相关的综述或者科技论文全文。每个学生将依据其自身的兴趣或特定需要通过不同的方式跟进主题：有的学生可能对催化材料更感兴趣，有的对反应过程感兴趣，有的可能对新过程的经济评估感兴趣，等等。当本书与讲座课结合时，该方法也允许教师根据授课对象的研究兴趣，提供或推荐新的主题以供选择。如有需要，教师也可以将这些学习的情况作为考核的依据，而不是进行正式的考试。我认为这种方法更可取，因为这一方法能够让学生发挥自己的主动性，与应试相比，能够加深学生对主题的理解。

致谢

我有太多需要感谢的人，首先要感谢曾经与我一起工作多年的研究生和博士后，感谢他们辛勤的工作和热情。通过他们，我才能够拓展催化（这一我从学生时代起就迷上了的学科）方面的知识。我还要感谢所有我曾经工作过的三个不同大学（Bradford，英国，1966～1982 年；Twente，荷兰，1982～1991 年和 Limerick，爱尔兰，1991 年至今）的同事在我工作期间以各种方式对我的帮助。

最重要的是，我想感谢我的妻子 Anne，感谢她不懈的支持。没有她的理解和帮助，就不会有这本书。

Julian Ross

2011 年 1 月

I 目录 I CONTENTS I

第 1 章 多相催化——二维化学	1
1.1 引言	3
1.2 催化的历史背景	4
1.2.1 氨分解	5
1.2.2 催化氧化	5
1.2.3 Berzelius 和催化概念	6
1.2.4 第一个工业催化过程	7
1.2.5 氨的合成	8
1.2.6 烃的水蒸气重整	12
1.2.7 催化基础研究	13
第 2 章 表面与吸附	17
2.1 引言	19
2.2 清洁的表面	19
2.3 Langmuir 对吸附的研究	22
2.4 Langmuir 等温线	22
2.5 氢气的化学吸附	25
2.6 复杂分子的化学吸附	26
2.7 非均匀表面	27
2.8 非平衡吸附	28
2.9 吸附过程	30
2.10 化学吸附的归纳	34
2.11 物理吸附	36
2.12 $p/p^* \geq 0.3$ 时物理吸附等温线的特征	41
第 3 章 催化剂是如何工作的?	45
3.1 引言	47
3.2 催化过程	47
3.2.1 双分子过程	47
3.2.2 单分子过程	50
3.2.3 催化过程的可逆性	52
3.2.4 催化过程的选择性	52

3.2.5 动力学和机理	53
3.3 催化剂和催化活性位	53
3.4 金属催化	55
3.4.1 引言	55
3.4.2 非负载金属催化剂	57
3.4.3 负载型金属催化剂	59
3.5 氧化物	61
3.6 硫化物	63
3.7 结论	64
第4章 催化剂的制备	65
4.1 活性表面积和催化剂结构的重要性	67
4.2 活性表面	68
4.3 催化剂载体	71
4.3.1 导论	71
4.3.2 氧化铝 (Al_2O_3)	72
4.3.3 二氧化硅 (SiO_2)	76
4.3.4 SiO_2 - Al_2O_3 和沸石	79
4.3.5 二氧化钛 (TiO_2)	80
4.3.6 氧化锆 (ZrO_2)	81
4.3.7 碳	83
4.3.8 载体的“成型”	83
4.4 负载型催化剂	84
4.4.1 催化剂的浸渍	84
4.4.2 共沉淀催化剂	86
4.4.2.1 单离子沉淀	86
4.4.2.2 几个物种在一起的沉淀：共沉淀	87
4.4.2.3 尿素分解沉淀和共沉淀	91
4.4.2.4 氨基配合物的分解	93
4.5 催化剂表征	93
4.5.1 化学组成	93
4.5.2 相结构	95
4.5.3 物理结构	95
4.5.4 操作条件下的催化活性、选择性和稳定性	96
第5章 催化反应器及催化反应动力学参数测量	97
5.1 引言	99

5.2	静态反应器	100
5.3	搅拌反应器与强制循环反应器	103
5.3.1	搅拌反应器	103
5.3.2	强制循环反应器	104
5.4	流过式反应器	106
5.5	流化床反应器	110
5.6	脉冲反应器	112
5.7	TAP 反应器	114
5.8	SSITKA	116
5.9	“原位/Operando” 法	117
5.10	微反应器法	119
5.11	结论	121
第6章	催化反应动力学及反应机理	123
6.1	引言	125
6.2	单分子反应	125
6.3	双分子反应——Langmuir-Hinshelwood 动力学	129
6.4	双分子反应——Eley-Rideal 动力学	132
6.5	Mars-van Krevelen 机理	132
6.6	反应动力学表达式的实例	135
6.6.1	Langmuir 方程及压力函数	135
6.6.2	合成氨	136
6.6.3	乙烷氢解	138
6.6.4	甲烷化	140
第7章	大型催化反应器	143
7.1	引言	145
7.2	催化剂的形状	145
7.2.1	压片	145
7.2.2	挤出成型	146
7.3	传质在催化反应中的重要性	147
7.3.1	外扩散	148
7.3.2	内扩散	151
7.3.3	扩散限制对选择性的影响	156
7.3.4	扩散限制对催化剂中毒的影响	157
7.4	催化反应中的传热	158
7.4.1	连续反应	158

7.4.2	可逆反应	160
7.4.3	可逆放热反应的反应器	162
7.4.4	化学热管：“Adam 和 Eva 过程”	165
第 8 章	催化反应	169
8.1	引言	171
8.2	天然气催化转化	171
8.2.1	天然气转化制合成气	173
8.2.2	费托合成	176
8.2.3	甲醇合成和甲醇重整	180
8.2.4	甲醇转化为其他产品	186
8.3	原油转化催化	188
8.3.1	原油蒸馏和原料净化	188
8.3.2	加氢处理	191
8.3.3	轻质石脑油异构化	194
8.3.4	重质石脑油重整	195
8.3.5	流化催化裂化 (FCC)	196
8.4	石油化工产品和工业有机化学	200
8.5	环境催化	202
8.5.1	NO_x 的选择性还原	203
8.5.2	汽车尾气处理催化剂	205
8.6	生物质催化转化	212
8.7	结论	218

第 1 章

多相催化——二维化学

本章要点

- 1.1 引言 /3
- 1.2 催化的历史背景 /4
 - 1.2.1 氨分解 /5
 - 1.2.2 催化氧化 /5
 - 1.2.3 Berzelius 和催化概念 /6
 - 1.2.4 第一个工业催化过程 /7
 - 1.2.5 氨的合成 /8
 - 1.2.6 烃的水蒸气重整 /12
 - 1.2.7 催化基础研究 /13

1.1 引言

如果你是一个化学家，或至少对化学有足够的了解，能够理解化学的语言和符号，懂得化学方程式，例如^①：



甚至是抽象的方程式，如：



你会认识到等号（=）意味着该方程是平衡的，该反应（通常）处于平衡状态；在一些情况下，是一个可逆的箭头（ $\rightleftharpoons$ ），表示同时发生正向反应和逆向反应。你也能认识到方程具有与其相关联的反应焓 [式(1.1)， $\Delta H^\circ = -40.6 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$]^②。此外，如果以箭头（ $\longrightarrow$ ）代替方程中的等号，反应更有可能是动力学控制的而不是热力学控制的。然而，当学习有机化学或无机化学时，我们有时会忘记这些细节，而只是关心两种化学物质放到一起会生成什么样的产物。当我们看到一个方程式，如：



我们会认识到这个反应以 Ni 作为催化剂，但往往不问为什么以 Ni 作为催化剂或是如何实现该催化过程的。阅读你的有机化学课本（如果和我还是学生的时候用的课本是一个类型的），你会看到很多这样的“定性”的箭头，往往没有任何解释或理由，催化剂是一个“黑盒子”。我写这本教科书的目的是希望无论是否有教师的讲解，读者都能够受益很多，在学完这本书的时候，能够懂得这些方程所关联的所有的参数，并且能深入地理解这些反应的催化剂是什么，它是如何制备和应用的，以及催化剂是如何起到催化作用（或者没有起到催化作用）的；为了得到感兴趣的化学反应的相关信息，阅读文献是一个重要的学习方法。从本章开始，我们将简单介绍催化的历史，特别是有关多相催化的历史，然后介绍催化基本原理方面的一些知识（催化剂的制备、表征、催化研究的实验方法、催化反应

① 这就是水煤气变换反应。这个反应非常重要，由于它的存在，使得许多过程接近平衡状态，因此在甲烷的水蒸气重整或甲醇的合成等反应中，可以按热力学平衡计算体系组成。

② 这个给定值应该是标准焓， ΔH°_{298} （即，反应物和产物在其标准状态下，反应温度为 298K 时的反应热），但它也可能是在给定反应温度下的焓。在俄罗斯的文献中，焓通常包含在方程中；在这种情况下，如果该反应放出热量，反应焓作为正值出现在方程的右侧（即反应是放热的）；如果该反应吸收热量，反应焓会作为负值出现在方程的右侧（即反应是吸热的）。

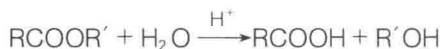
动力学等)，最后再讨论一些当前重要的催化反应。正如前言中所讨论的一样，促进学习的一个方法就是要充分利用互联网上可得到的文献，在学习现代催化过程的章节中，这种方法特别重要。我一直鼓励大家围绕课题广泛地阅读，探索每个研究课题的最新文献。

1.2 催化的历史背景

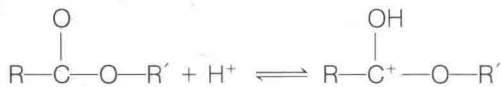
几个世纪以前，人们就已经知道了均相催化和多相催化的多个例子。最早的催化的例子也许是酵母的使用。酵母是一种含有酶的物质，酶能使谷物或葡萄等含糖的生物物质发酵得到乙醇。在 8000 多年前，人类就已经知道发酵：最早的啤酒是在古埃及和美索不达米亚（今天的伊拉克）酿造出来的，而最早的葡萄酒是在格鲁吉亚和伊朗酿造出来的。

拓展阅读 1.1 均相催化与多相催化的比较

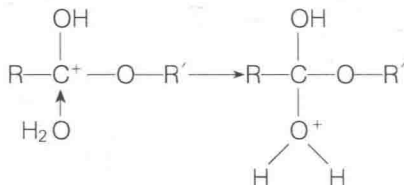
均相催化是指催化剂与反应物和产物处于同一物相中的催化过程。一个简单的例子是酸催化的酯水解反应（或是它的逆反应，酯化反应）：



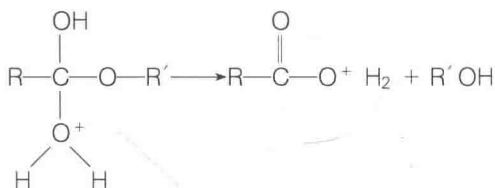
H^+ 存在时的反应速率远高于无 H^+ 离子存在时的速率，但 H^+ 不出现在化学计量方程中，因此 H^+ 是催化剂。液相中酸的质子与酯的反应如下：



酯分子接受质子形成离子后更易于受到水分子的亲核进攻：



形成的化合物通过电子的作用发生重排：



最后得到产物，同时，质子再次释放出来。

其他均相催化反应包括一些无机配合物参与的催化反应。其中一个例子是威尔金森催化剂：



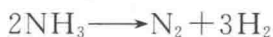
这种催化剂可用于双键加氢和一些其他液相反应 (http://en.wikipedia.org/wiki/Wilkinson's_catalyst)。

相反，多相催化剂与反应物存在于不同的物相中，催化剂通常是固体，而反应物是气体或液体。本书主要介绍一些多相催化反应的催化剂，多相催化反应的机理将在第 6 章详细讨论。值得注意的是前面讨论的酯的水解及其逆反应（酸的酯化）也可以使用固体酸催化剂。

如大家所知，炼金术士寻找由普通金属获得黄金的方法，或许就是最早的多相催化研究。然而，首个关于使用多相催化剂的正式的科学报告撰写于 1800 年，Joseph Priestly 和 Martinus van Marum 分别报告了乙醇在金属催化剂上脱氢的研究工作。令人惊讶的是，至少对于现代科学家来说，他们两个都没有认识到金属是作为催化剂在起作用的，他们似乎认为金属只是提供了反应热。

1.2.1 氨分解

现在看来，1813 年巴黎高等理工学院的教授 Louis Jacques Thénard 第一次真正认识到了非均相催化作用。他报道了氨流过红热金属时分解为氢气和氮气：



十年后，Thénard 和 Pierre Dulong 共同发现该反应能在铁、铜、银、金和铂的表面发生，反应速率按照这个顺序依次递减。这似乎是第一个关于催化活性变化趋势的报告。

1.2.2 催化氧化

在 Thénard 报道关于多相催化的最初观察后不久，1817 年，在英国伦敦的皇家研究所的实验室里，Humphrey Davy 和他的年轻助手 Michael Faraday 进行了多相催化发展历史早期最重要的实验之一，他们发现在没有火焰的情况下，加热的铂丝能使空气和煤气（主要是 CO 和 H_2 ）发生化合反

应。这是首次报道催化氧化的例子。Davy 用钯可以重复出这一结果，而用铜、银、铁、金和锌却不能得到这一结果。1820 年在位于科克的大学学院，Davy 的表弟 Edmond Davy 证实铂的表面积是极为重要的，高度分散的铂能在室温下使乙醇氧化。1823 年，在耶拿大学工作的 J. W. Dobreiner 改进了 Edmond Davy 制备高表面积铂的技术，他制备了类海绵体材料，在室温下，氢还原的高度分散的金属铂使氢气和氧气发生化合反应。同年晚些时候，Dulong 和 Thénard 发现在室温条件下，在钯和铑上能发生同样的反应，如果升高温度，在钴、镍、铑、银和金上也会发生同样的反应。

拓展阅读 1.2 矿工灯

铂使得燃烧反应顺利进行，不会发生爆炸，但会使铂丝炽热发光，这是矿工安全灯的基础。L. B. Hunt 在 *Platinum Metal Rev.*, 1979, 23, (1), 29-31 中描述了 Davy 的工作 (<http://www.platinummetalsreview.com/dynamic/article/view/pmr-v23-i1-029-031>)。A. J. B. Robertson 在 *Platinum Metal Rev.*, 1975, 19, (2), 64-69 中总结了早期的催化工作 (<http://www.platinummetal-sreview.com/dynamic/article/view/pmr-v19-i2-064-069>)。请注意，实用的矿工灯不含 Pt 而只有一个铁丝网，这种铁丝网在高水蒸气分压下会生锈，所以实际上这个灯是不起作用的。

任务 1.1 Humphrey Davy 爵士

使用 Google 等搜索引擎搜索 Humphrey Davy 爵士，阅读他在英国皇家研究所所做的工作。要特别注意他在矿灯方面做的工作（拓展阅读 1.2），以及由 Clanny 和 Stephenson 所做的相关工作。研究网上关于矿灯的材料，看看矿灯上进行催化反应的程度，以及灯的金属网仅在多大程度上阻碍了火焰和金属网表面气体间的热传导。同时查阅灯作为气体探测器的应用情况。

查阅 Davy 的其他成就，以及他与同时期其他科学家之间的关系。

1.2.3 Berzelius 和催化概念

除了作为一系列例子说明催化氧化的发展，上面概括的工作还展示了在 19 世纪新思想在国际范围内的发展方式。当时有很多关于催化剂如何起作用的讨论。在 1835 年提交给斯德哥尔摩科学院的一篇文章中，