



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

纳米技术与能源

Nanotechnology and Energy:
Science, Promises, and Limits

Jochen Lambauer

(德)

Ulrich Fahl 著

Alfred Voß

孙鹏飞 孔新新 等译

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



关于本书

“能源是我们社会面临的众多挑战之一，同时还是一个涉及技术、社会、经济和环境等多个层面的复杂问题，本书涵盖了最新的能源发展水平，尤其是碳捕捉薄膜及其未来的使用需求。”

—Joe da Costa 教授
昆士兰大学，澳大利亚

“印象很深刻！读过本书后，读者会对能源领域内纳米技术应用的各方面有一个完整的认识。从技术上的机遇和挑战到应用纳米解决方案的可能性和风险方面、市场需求以及未来愿景和方案的选择等，本书各章节对此进行了完整阐述。为一个崭新且有前景的技术应用领域的发展做出了宝贵的贡献。

Gerd Bachmann博士
Zukünftige 技术咨询，德国

假定资源有限，而且资源的使用会对全球环境产生影响，如气候变化，那么，当前能源供给方式上创新的重要性是不言而喻的。优化现有的能源供给和能源需求模式或发展新的传统能源技术或可再生能源技术以满足日益增长的全球能源需求，这将需要在研究上取得突破性的进步。作为一项跨领域技术的纳米技术，其尖端领域内的新突破体现为在能源领域（能源资源、能源转换、能源分配和能源储存）的整个价值链间实现应用的能力。本书对能源领域价值链内的多个纳米技术应用进行了概述，令人印象深刻，并且还对所选择的应用及其对能源领域的直接和间接影响进行了评价。本书全面阐述了所选择的纳米技术应用对德国的能源消费、能源资源、能源供给和能源产业等带来的影响和后果，并表明到2030年，这些应用在节能、能效提高和废弃减少等方面具有潜力。



国际电气工程先进技术译丛

纳米技术与能源

Jochen Lambauer

(德) Ulrich Fahl 著

Alfred Voß

孙鹏飞 孔新新 等译



机械工业出版社

本书描述了纳米技术在能源领域的应用全景，立足于前沿技术面临的机遇挑战及存在的风险、分析市场需求及可选发展方向，涉及能源供应、转化、输送、储存及使用全产业链，并详列其各环节中纳米技术提供的解决方案。阐述纳米技术在陶瓷薄膜、太阳能电池、热电效应、储能材料等领域的应用，并全面描述了这些应用在德国的能源消费、能源资源、能源供应和能源工业中的影响，并展望了到 2030 年纳米技术对于能源领域中能源节约、提高能效和降低排放的潜力。

本书适合能源及纳米行业相关专业高校师生以及研究人员和应用工程师参考。

译者序

《纳米技术与能源》这本书给我的第一印象是严谨，书里各式各样详尽的图表林林总总，作者必然做了大量的调研和推理工作。其重点分析了纳米技术对能源产业的量化影响，不再仅仅概述简单的相互关系，利用书中的分析，相关学者就可有针对性地研究特殊的纳米技术或应用，给研究工作提供了较好的前期基础。

作者从能源领域面临的挑战出发，引出应对这些挑战的未来角色——纳米技术，概括了纳米技术的原理、应用、潜力和局限，非常全面地分析了纳米技术与能源领域的相互关系，其风险评估就很好地证明了全面性。针对每一个环节，作者都做了大量的调研和仿真，系统地给出了纳米技术对能源领域好处、害处和应用潜力的量化因子，科学地将两者联系起来，逻辑性强，简单易懂、有理有据。

本书撰稿人简介由赵丽梅翻译，原书前言和第1章由孔新新、张珍珍翻译，第2章由孙鹏飞、孔青、张超负责翻译，第3章由孔令晶、李怀强、赵桂梅、钟洪文负责翻译、第4章由张亮、赵呈呈负责翻译，另外罗玉芳、张文春等人也参与了本书部分内容的翻译和校对工作，在此对他们的辛勤工作表示感谢！

全书内容层次清晰、覆盖面广、参考性极强，由于译者能力有限，不足之处请读者批评指正。

译者

撰稿人简介

Severin Beucker 是柏林 Borderstep 创新和可持续发展研究所的共同创始人和高级研究员。他的研究主要聚焦于新技术的创新以及技术分析。在 ColorSol 项目中，他负责分析市场潜力和开发染料敏太阳能电池应用场景。

Niels Boeing 毕业于柏林理工大学物理和科学理论专业。2002 年以来，他一直为主要的德国刊物作自由科学作家，包括德国的《时代周报》和《麻省理工技术评论》（德国版）。在 2004 年，他发表了对 nanotechnology Nano?! Die Technik des 21. Jahrhunderts (Rowohlt, Berlin) 的通俗科学介绍。现居德国汉堡。

Herald Böttner 是德国弗莱堡物理测量技术弗劳恩霍夫研究所-热电和集成传感器系统部的负责人。1974 年毕业于德国明斯特大学化学专业，并于 1977 年因其在四价半导体 II-VI/IV-VI 材料系统的扩散和固态反应方面的理论，在此校获取了博士学位。1978 年他加入了德国维尔茨堡弗劳恩霍费尔研究所 für silicatiforschung, 1980 年，他改为加入德国弗莱堡弗劳恩霍费尔研究所物理测量技术部，直到现在。自 1980~1995 年，在保持基于铅碲的薄膜温差电学领域活跃度的同时，他还开发了 IV-VI 红外线半导体激光。他还是全世界首项用于“Micropelt”垂直热电的晶圆级技术的主要发明者之一。他还是国际热电学会、欧洲热电学会的董事会成员，也是德国热电学会的共同创始人。

Martin Bram, 1995 年以材料科学家毕业于埃尔朗根纽伦堡-弗里德里希亚历山大大学，并在 1999 年获取了萨尔布吕肯大学的博士学位。1999 年加入 Forschungszentrum Jülich 之后，他的主要研究课题便为能源系统中的材料。他现在是“粉末冶金与复合材料”研究小组的负责人。如金属或者陶瓷制品，亦或复合材料需要有明确的功能性孔隙度，Bram 博士就一直寻找新的解决方法。他在材料科技方面的专业技术使他能够成功地在处理和操作过程中，将材料合成、物相组成、热处理、晶粒成长与化学反应组合到一起。

Ulrich Fahl, 1978~1983 年在弗莱堡大学学习经济学，1990 年获取斯图加特大学能源经济和能源政策的决策支持系统方面的博士学位。1990 年来，他在能源经济与能源合理利用研究所 (IER) (20 名研究员之一) 中，领导能源经济与系统分析部。他负责能源和电力需求与供应分析、能源和电力建模、工商业的能源和环境管理、能源系统的可持续发展、能源与交通问题以及能源和气候领域的国家和国际研究活动。

Regine Geerk-Hedderich 是一个物理学家。她有在德累斯顿工业大学固相物理学与材料研究中央研究所 (Dr. rer. nat.), 还有耶拿大学 (Dr. sc.) 学习过固相物

理学。1980~1989年,她又在莫斯科科学院卡皮查研究所和弗罗茨瓦夫的高场磁铁实验室作过几个月的访问科学家。1990~1991年,Geerk-Hedderich博士在格勒诺布尔的高场磁体实验室拥有研究席位。1991年来,她就职于卡尔斯鲁厄理工学院(Forschungszentrum Karlsruhe)。1992~1993年,她在东京的超导实验室作客座科学家。1998年来,她主管 NanoMat 网络(纳米材料的超区域网络 www.nanomat.de),这个网络拥有 29 名来自工业和学术界的合作者。

Antje Grobe 获取了德国斯图加特大学的硕士学位,在那里,她发表关于对话管理的演讲,领导过几个国家和欧盟赞助的关于风险评估和风险感知的研究项目,重点强调纳米技术和气候变化问题。Grobe 担任 DialogBasis 的常务董事,这是一个基于科学的智囊团和对话平台。15 年来,她一直代表政府机构、学术界、工业和民间社会组织,促进欧洲的股东对话和公民参与活动。她还是欧洲委员会和瑞士联邦的纳米技术专家,并在 2006~2011 年与德国政府的纳米委员会共过事。

Karl-Heinz Haas 学习过化学,并于 1983 年从德国卡尔斯鲁厄大学获取博士学位。他加入过弗劳恩霍费尔 ISC(溶胶凝胶、材料、聚合物),并从 1988~1995 年,在中央聚合物研究实验室为 BASF 工作。在 1995 年,Haas 博士成为 ISC 聚合物部的负责人。2004 年以来,他一直担任弗劳恩霍费尔联合纳米技术联盟的常务董事,现在还是 ISC 新事业开发部的负责人。

Hartmut Hillmer 在 1989 年获得了斯图加特大学物理学的博士学位,在那之后,他加入了达姆施塔特德国电信研究中心。1991 年,他成为日本 NTT 光电实验室的客座科学家。1999 年以来,他在德国卡塞尔大学-纳米技术和分析研究所担任技术电子学的教授。2006 年,他因“微镜阵列”的专利获得了欧洲大奖赛创新奖。Hillmer 博士的研究兴趣包括用于智能个人环境的网络化传感器与驱动器、智能窗口中的微镜阵列、呼吸和组织中的非侵入性的光学生物标记物探测、半导体激光还有电信用的滤光片。

Andress Hinsch 是一位物理学家,多年来一直担任研究员。他负责德国弗莱堡-弗劳恩霍费尔研究所太阳能系统(ISE)的染敏太阳能电池研究。对于 ColorSol 项目,他曾负责技术与开发,还有向参与公司的技术转让。

Andreas Jäkel 于 2001~2008 年在德国卡塞尔大学学习物理学。2008 年 5 月,他加入卡塞尔大学技术电子系,在那里,他攻读微光学和机电系统的博士学位,侧重微镜应用。他是纳米结构技术与分析研究所的项目领头人之一,负责为活动窗口开发微镜阵列。

Jan D. König 是德国弗莱堡物理测量技术弗劳恩霍费尔研究所(IPM)-热电系统部的热电能源转换分部的团队领导人。他是与热电材料研究、测量系统和热电发生器开发相关的多种项目的项目经理。一些其他引人注目的项目包括设计和制造一种全自动的材料测量装置、热电度量的标准化,还有为高温应用而开发的小规模生产热电发电机。König 现有的活动包括研究 Bi_2Te_3 、 PbTe 和硅化物材料的纳米级部

分和薄膜，还有为自动化应用开发一种高温发电机。2009 年来，他担任德国热电协会的执行董事会成员。

Nico Kreinberger，德国斯图加特大学的文学学士，大学中学习了政治学、社会学并做社会研究。在 EU-FP-7 资助的 NanoCode 项目中，他做了一项国际性调查，还召开了几次关于纳米技术的尽职研究的会议。在瑞士风险对话基金会的数次股东对话中，他在纳米技术、微系统技术和气候变化等领域从事工作。

Jochen Lambauer 在德国斯图加特大学和冰岛的冰岛大学（Haskoli Islands, Reykjavik）学习过环境工程学（Dipl, Ing, B. Sc.）。2005 年以来，他一直在斯图加特大学的能源经济与能源合理利用研究所（IER）作助理研究员。Lambauer 负责能源合理利用、能源效率、虚拟发电厂、需求回应和创新活动的能源影响（例如纳米技术）等领域的研究活动。另外，他还是斯图加特大学能源有效利用研究生与研究学院（GREES）的常务董事和科学协调人。

Claus Lang-Koetz 是一位环境工程师。他获有斯图加特大学的博士学位。他是德国斯图加特工业工程 IAO 弗劳恩霍费尔研究所“创新科技”团队的管理人，也是 ColorSol 研究项目的协调人。他现在在机器与工厂制造业中担任创新经理。

Qingdang Li，1993 ~ 1997 年在中国武汉理工大学学习电子工程专业，2000 ~ 2002 年在中国哈尔滨工业大学学习经济学，2003 ~ 2005 年在帕德博恩大学学习机械工程专业。2006 年 8 月，Li 加入德国卡塞尔大学技术电子系，在那里，他攻读了微光学与机电系统的博士学位，专注微镜应用。

Wiebke Lohstroh 于 1999 年获取了德国哥廷根大学物理学博士学位。在牛津大学（英国）和阿姆斯特丹自由大学（荷兰）作博士后研究员停留期间，她研究了吸氢过程中薄膜的机构和光学性能。2005 ~ 2011 年，她在德国卡尔斯鲁厄理工学院（KIT）纳米研究所工作。2011 年，她加入德国慕尼黑工业大学 Forschungsneutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz（FRM II）。她的工作主要集中在为能源储存开发材料，也就是固态氢的储存系统和蓄电池的电极材料。

Wolfgang Luther 自 1999 年来，在德国杜塞尔多夫 VDI technologiezentrum 股份有限公司担任顾问和项目经理。他拥有化学学位、经济学学位和分析化学的博士学位。Luther 博士的具体擅长领域为新兴技术的社会经济学评估，尤其是纳米技术。他现在的主要活动领域为创新协调与联邦研究与教育部资助项目中的纳米技术措施。

Gudrun Reichenauer 从事材料科学和物理学领域的工作已 20 多年，尤其重视气凝胶与干凝胶的合成和特性描述。1999 ~ 2000 年，她在美国新泽西普林斯顿大学 Prof. G. W. Scherer 和普林斯顿材料研究所担任研究助理。在回到德国后，她成为巴伐利亚应用能源研究中心纳米材料团队的负责人（部门：能源技术的功能性材料）。

她现在的研究大体集中在纳米多孔材料的合成与特性描述上，特别关注溶胶凝

胶法制备的材料和化学气相沉淀合成的纳米纤维。应用指向型的活动尤其关注热绝缘、电化学装置中的电极、IR 遮光剂还有用于气分离和气储存的材料。

Michael Steinfeldt 拥有工程师证书，2005 年来是德国不来梅大学生产工程学院的一位高级科学家。他的研究重点是环境评估和技术与寿命期评估方法。现有的研究主题为绿色可持续的纳米技术。在工业企业作过几年工艺工程师后，他在柏林生态经济研究院 (IÖW) g 股份有限公司担任现场企业环境管理高级研究员和项目经理 (1992 ~ 2004 年)。

Volker Viereck 于 1997 ~ 2004 年在柏林洪堡大学和德国卡塞尔大学学习过物理学。2003 年，他在沃尔夫斯堡大众汽车 konzernforschung 完成了他关于纳米粒子测量的毕业论文。2004 年 6 月，他加入卡塞尔大学技术电子系，并在那里攻读了微光电和机电系统方面的博士学位，侧重微镜应用。他现在是那里光电 MEMS 技术团队的负责人。

Alfred Voß 在 1970 年获取了亚琛技术大学能源工程学的工学学位，1973 年获得博士学位 (工学学位)。1990 年，斯图加特大学任命他为能源经济学与能源合理利用研究院院长。他擅长的领域是新能源技术，包括可再生能源、能源系统与能源建模、能源的合理利用还有能源与可持续性。

Wenzhong Zhu 是西苏格兰大学工程学院苏格兰建筑材料纳米技术中心的讲师和管理人。他的主要兴趣点和专长是自密实混凝土和特殊混凝土的技术和性能、建筑方面的纳米技术，尤其是材料的纳米和微机械特性描述。

原 书 前 言

热量、光照和运动对我们的现代生活来说必不可少。然而，这些资源中有一些，例如汽油和柴油等石油资源并不是无限可用的。能源专家预计在近几年全球的能源需求还会进一步增加。举例来说，我们预测到 2050 年实际数字会加倍。同时，全球石油生产似已经达到了产能极限。为了应对日益加剧的能源短缺问题，能源方面的研究正在全球得到促进。纳米材料在这方面发挥有重要作用，因为能源材料的许多宏观特性都是源自纳米级。

与过去的大技术革命相比，是那些小但是却富有创造力的思想在今天激发了重要的创新活动。通过纳米技术获取的知识使我们可以改善许多现有的技术，使它们更可靠、更高效、更加具有资源友好性。纳米技术会强势进入许多不同的行业，而且能源行业将会见证拥有更佳性能新材料的出现，或者是材料需求量在降低：高效蓄电池、太阳能光伏、小型燃料电池、表面涂层。在汽车行业，我们将发现轻型的部件制品、拥有最佳粘合度的轮胎、可自我修复的清漆、LED 还有电动性能的提高。建筑行业和工艺技术也将从纳米技术中受益。

本书提供了一种展示纳米材料在各种能源应用方面研究结果的多元跨学科研究方法。我们将单项技术置于全球背景下来审视，处理所产生的科技问题，商业推广，还有生态的、伦理的和社会的方方面面。不仅审查物理-化学基础，还处理关于沟通风险，对环境、健康规则或科学要求的保护，还有推行中经济和社会的问题。

尤其随着可再生能源的大规模扩张，大量储存电能也是我们未来将面临的挑战之一。

为了得到一个关于这些数量的更精确的概念，我们以假设方式看一下 2030 年。假设到那个时候，德国总电力的 30% 将为风能，将需要大约 3000GWh 的储备或者缓冲容量来弥补一个基本无风周所带来的能量缺失。这是我们现有泵储存能力，即 40GWh 的 70 多倍。面对临时的能源过剩情况时，类似的问题也将产生。伴随泵储存设备和气压储存器，还需要开发静态储存的解决方案，以便智能化地储存能源，在需要时供应电网，电-化学储存法在 3.3.1 节“能源储存所需材料”中有介绍。

3.4.1 章“建筑中的纳米技术”综述了纳米技术在建筑行业中的应用。

在全世界，科学家们寻找新的工艺，以便能够增强水泥生产中的能源和生态资本。水泥生产中的二氧化碳释放要比整个空中交通排放量高出 3~4 倍。基于依旧未识别的水压活性钙含水硅酸盐，卡尔斯鲁厄理工学院（KIT）的科学家们用 Celitement 制造出一种新型粘合剂，这种粘合剂可与波特兰水泥（OPC）中的粘合剂相媲美。与波特兰水泥的标准制作方法相比，可在生产中减少 50% 的能源和二

氧化碳排放量。

3.2.2 节“纳米级热电学”的主题是关于如何在热电效应和充足材料的帮助下，高效利用流失的热力。拥有高塞贝克系数的纳米级热电材料展示了在科技方面应用的卓越特性，例如在汽车产业的应用。

光是影响工作质量的一个基本方面，也影响着我们的幸福健康。约 10% 的电源需求是用在照明设备，这其中的一半是用在了贸易和工艺领域、25% 由工业使用、另 25% 由私人家庭使用。节能照明设施不仅旨在降低电力成本，也意在确立重要的生态重点，这一主题在 3.4.2 节“日光引导程序的活动窗户”中有详细描述。

煤电厂的下一步开发活动将集中在通过在地面或者海平面下进行储存来消除二氧化碳。3.2.3 节，讲述用来碳捕获或者碳储存的纳米结构陶瓷膜（CCS），描述了一种在发电厂中提高二氧化碳消除技术的方法。

第 4 章，对到 2030 年纳米技术将对能源部门带来的潜在影响做了分析和评估，不仅包括一些很有趣的主题，还对其他章节做总结。

由于现行的生态和社会问题与我们所有人息息相关，所以本书中的所有话题都对我们今天具有很重要的意义。通过新技术的帮助和大家的共同努力，我们可以唤起更高的意识，激励到我们未来的子子孙孙。

Regine Geerk-Hedderich 博士
NanoMat 公司常务董事

目 录

译者序

撰稿人简介

原书前言

第 1 章 能源部面临的挑战和纳米技术的未来角色..... 1

1.1 德国能源行业及其未来的挑战 1

1.1.1 人口和经济发展 1

1.1.2 化石能源的价格趋势 2

1.1.3 一次能耗 2

1.1.4 发电量 3

1.1.5 终端能源消费 5

1.1.6 能源生产强度 6

1.1.7 排放物 7

1.2 纳米技术和能源 8

参考文献 11

第 2 章 纳米技术的原理 12

2.1 定义和分类..... 12

参考文献 13

2.2 科学技术背景..... 14

2.2.1 纳米材料 14

2.2.2 自上而下和自下而上策略 17

2.2.3 方法和生产过程 19

参考文献 23

2.3 创新和潜在的经济价值..... 24

2.3.1 纳米技术处在一种交叉创新领域 24

2.3.2 纳米技术与经济的关联 25

2.3.3 增值链中的纳米技术公司 30

参考文献 31

2.4 风险和安全问题..... 31

2.4.1 纳米技术的三个阶段 32

2.4.2 纳米技术风险的系统化	33
2.4.3 小结	37
参考文献	37
2.5 纳米技术的公众认知：对传播策略和语言概念的挑战与建议	40
2.5.1 简介	40
2.5.2 风险认知的心理、社会和文化因素	41
2.5.3 纳米技术的公众认知：国际对比	42
2.5.4 德语范围的纳米技术普及性	45
2.5.5 能源行业对纳米技术的态度	47
2.5.6 消费者交流的必要条件	49
2.5.7 小结：传播策略和对话概念的建议	50
参考文献	51
第3章 纳米技术在能源部门的应用例子	53
3.1 气凝胶：能源技术中多孔熔凝胶固体的应用	53
3.1.1 气凝胶的合成和性能	53
3.1.2 性能与应用	56
3.1.3 气凝胶应用到能源相关领域所面临的问题	64
3.1.4 小结	65
参考文献	65
3.2 能源资源和转化	70
3.2.1 染料敏太阳能电池	70
参考文献	77
3.2.2 纳米热电——一种高能效的概念	78
参考文献	87
3.2.3 用于碳采集和储存的纳米机构陶瓷膜	88
参考文献	97
3.3 能源储存和分布	99
3.3.1 能源储存所需材料	99
参考文献	112
3.4 能源使用	116
3.4.1 建筑中的纳米技术	116
参考文献	122
3.4.2 日光引导程序的活动窗户	124
参考文献	130
3.4.3 生产流程中纳米技术的能源效率潜力	131

参考文献..... 142

第 4 章 至 2030 年，纳米技术对能源行业影响的潜力分析和评估 149

4.1 方法论 149

参考文献..... 153

4.2 纳米技术的环境影响和能源需求 153

4.2.1 纳米技术的环境救济潜力 153

4.2.2 具体应用背景的评价：LCA 155

4.2.3 具体人造纳米粒子的评估 158

参考文献..... 162

4.3 纳米技术提高能源效率和减少排放物的潜力 165

4.3.1 能源资源和转化 165

4.3.2 能源储存和分配 169

4.3.3 能源使用 169

4.3.4 纳米技术的理论潜力 176

参考文献..... 179

4.4 对纳米技术影响的方案和敏感度分析 185

4.4.1 能源资源和转化 185

4.4.2 能源储存和分配 193

4.4.3 能源使用 194

参考文献..... 203

4.5 能源领域纳米技术的综合归类 207

参考文献..... 212

第 1 章 能源部面临的挑战和纳米技术的未来角色

Jochen Lambauer、Ulrich Fahl 博士和 Alfred Voß 博士，德国斯图加特大学，能源经济和应用理论研究所（IER）

1.1 德国能源行业及其未来的挑战

在资源有限和环境气候变化的情况下，能源供给创新迫在眉睫。优化现行能源供给和能源需求模式，发展新的传统的和可再生能源技术来满足全球日益增长的能源需求，这种要求在不同的领域已取得突破性进步，例如提高能源利用率和市场对可再生能源的使用率。作为一项跨学科技术，纳米技术尖端领域的新突破可能会应用到整个能源领域（包括能源资源、能源转化、能源分配、能源储存和能源使用）的价值链中。

在这样的背景下，调查过去几年里德国能源供需的发展史、影响能源使用和供需发展的关键因素是有必要的。

1.1.1 人口和经济发展

人口和经济发展是一个国家能源消耗的重要决定因素。在东、西德合并之后，人口数量呈上升趋势，直到 2003 年才稍微下降（见表 1.1）。2010 年，德国人口总数达到 8170 万，与 1990 年相比人口增长了 230 万左右，增长比例为 2.9%。1990 ~ 2010 年，家庭数增长迅猛，从 3490 万户增加到 4030 万户，从数字角度来说增长了大约 500 万户。

表 1.1 德国人口和经济发展

时间/年	1990	1995	2000	2005	2009	2010	1990 ~ 2010 变化幅度
常住人口数（百万）	79.4	81.7	82.2	82.5	81.8	81.7	2.9%
户数（百万）	34.9	36.9	38.1	39.2	40.4	40.3	15.5%
每户人数	2.27	2.21	2.16	2.10	2.02	2.03	-10.9%
人均居住面积/m ²	35.0	36.8	39.5	41.2	42.7	42.9	22.7%
生产总值/十亿欧元（2005 年 欧元货币价值）	1830	1969	2159	2224	2285	2369	29.5%

来源：BMW i（2011）。

虽然 2009 年全球金融危机造成德国的 GDP 比 2008 年下降了 5%，但 2010 年相比 2009 年增长了 3.7%。综合来算，1990 ~ 2010 年德国经济总体增长超过了 29%。

1.1.2 化石能源的价格趋势

20 世纪 90 年代是一个低能源价格的年代，1997 ~ 1998 年的亚洲金融危机造成能源价格进一步下跌，此时世界原油市场的价格暴跌，降至每桶 12 美元左右。直到 2000 年，每桶上升到 28 美元。2004 年后经过一段时期的缓和，原油价格在 2008 年出现另一轮急剧增长且达到了顶峰，每桶超过 130 美元。直到 2008 年全球金融危机爆发，油价才停止增长，同年 12 月，原油价格跌至每桶 40 美元左右。之后油价再次明显增长，到 2010 年原油年均价约每桶 77 美元。去年化石燃料全球价格明显增长，自 2008 年以来的短暂增长已经在德国能源消费价格和电力价格中体现出来。

1.1.3 一次能耗

尽管经济效益在增长，但德国的一次能耗在东、西德统一后却适度地下降，主要得益于由于重新统一后的德国在经济和能源相关领域的结构调整。从 1995 年以来，除了随着气温和经济的改变而发生的波动，德国的能源需求是相对稳定的，如图 1.1 所示，2007 年的一次能耗在 14000PJ 左右。

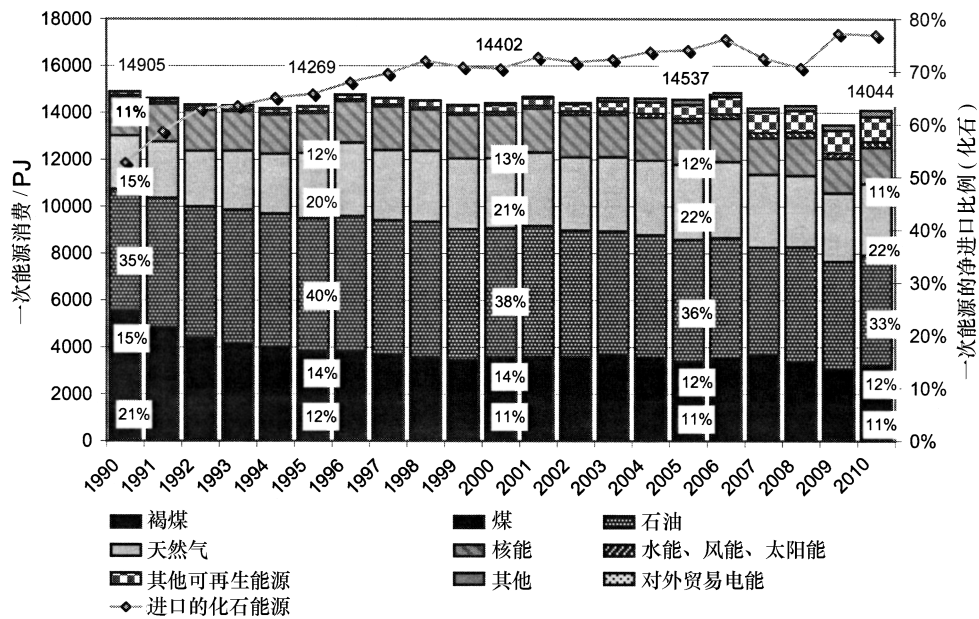


图 1.1 德国的一次能源消费 (BMWi, 2011)

2009 年一次能耗的明显降低主要是由于 2008 年能源价格的强进增长和后续的金融危机。

化石燃料在一次能耗中仍占主导地位，其市场占有率从 1990 年的 87% 减少到 2010 年的 78%。煤炭和褐煤市场占有率下降，同时期天然气的占有额由 15% 上升至 22%。2010 年主要在交通行业的推动下，石油产品的需求几乎又回到 1990 年的水平。在过去几年中核能的占有率稍微下降，2010 年降到约 1530PJ。

德国严重依靠进口来满足能源需求，所需化石燃料的净进口份额由 1990 年的 53% 增加到 2010 年的 77%。德国最重要的外国能源供应商是俄罗斯，份额几乎占到整个能源进口的 30%。

可再生能源在一次能耗中的贡献由 1995 年的 275PJ（1.9%）上升至 2010 年 1322PJ（9.4%），如图 1.2 所示。

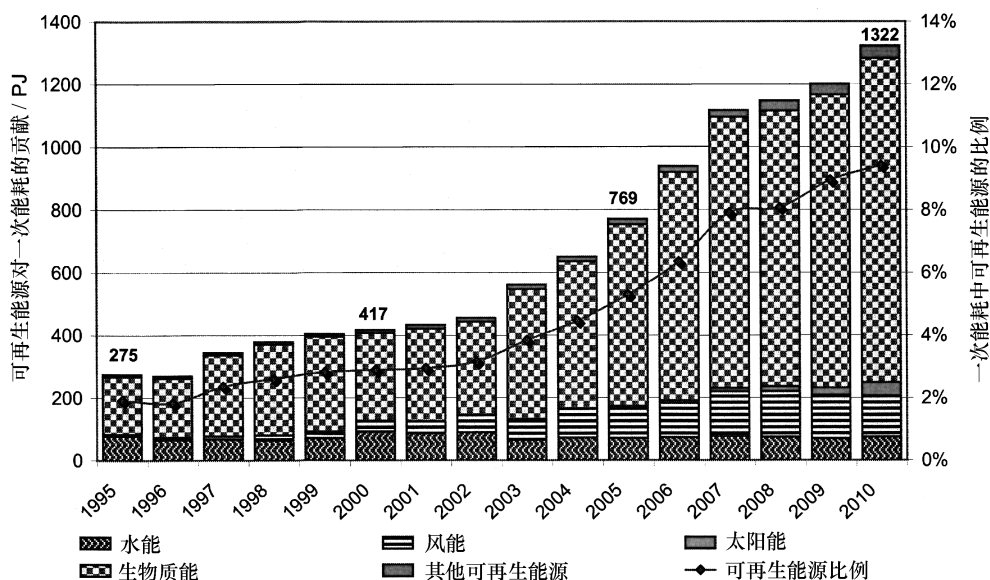


图 1.2 德国一次能耗中可再生能源的贡献 (BMWi, 2011)

这样大幅度的增长要归因于生物质能，该物质主要用于产生热，今后会用于生物质燃料，生物质能和生物垃圾处理的份额将超过可再生能源的 78%。另外 10% 主要是风能，从 2000 年起风能增长势头很高。利用太阳热量和光伏电池使用太阳能的形式在过去几年中也明显增加，但其对能源供给的贡献率仍然非常低，地热能的情况也一样。水电能源的利用份额在 1995 年已达到约 77PJ，之后未能再增加。

1.1.4 发电量

自 1995 年起，总电量消耗在 20 世纪 90 年代初略有增长，2010 年约为