



# 煤炭革命的战略与方向

谢和平 王金华 鞠杨 刘见中/著

**Coal Industry Reform:  
Strategies and Directions**



科学出版社

# 煤炭革命的战略与方向

Coal Industry Reform: Strategies and Directions

谢和平 王金华 鞠 杨 刘见中 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

落实习近平主席关于“推进能源生产和消费革命,构建清洁低碳、安全高效的能源体系”的讲话精神,煤炭必须自身进行革命,真正革落后产能的命,革污染排放的命,全面实现煤炭绿色生态开采、清洁低碳利用,使煤炭成为清洁能源。依托中国工程院重点咨询研究项目,谢和平院士领衔由行业协会、科研机构、大学、企业等行业核心研究力量组成的科研团队,系统研究并阐明了煤炭革命的科学基础、四大理论和六大理念;提出了煤炭革命的绿色安全开发、清洁低碳利用、多元协同发展、国际化发展、新型人才培养五大战略;提出了煤炭 3.0 阶段、4.0 阶段、5.0 阶段的战略发展蓝图和煤炭技术革命路线图;勾勒了近零生态损害的科学开采、近零排放的清洁低碳利用、矿井建设(设计)与地下空间一体化利用、流态化开采四大领域的煤炭革命颠覆性理论和技术以及不同历史发展阶段的技术发展构想。为我国煤炭行业绘制了科技发展路线图,为煤炭科技发展提供了方向性指南。

本书可作为政府部门制订关于煤炭产业政策决策的科学参考,国内外研究机构的重要借鉴,大型煤炭企业转型升级发展的指南,可供行政管理人员、科学研究人员、企事业管理人员阅读并且可作为国内外相关专业高等院校研究生、本科生、专科生教学用书。

审图号:GS(2018)1975 号

### 图书在版编目(CIP)数据

煤炭革命的战略与方向=Coal Industry Reform: Strategies and Directions / 谢和平等著. —北京:科学出版社,2018.5

ISBN 978-7-03-057310-0

I. ①煤… II. ①谢… III. ①煤炭工业—经济发展战略—研究—中国 IV. ①F426.21

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第083105号

责任编辑:李 雪 / 责任校对:彭 涛  
责任印制:张克忠 / 封面设计:无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市春园印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018 年 5 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2018 年 5 月第一次印刷 印张:19 1/2

字数:340 000

定价:160.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 作者简介



谢和平, 1956 年 1 月出生, 湖南双峰人, 能源与力学专家, 2001 年当选为中国工程院院士。深圳大学特聘教授, 深圳大学深地科学与绿色能源研究院院长, 四川大学原校长、教授、博士生导师。国务院学位委员会委员, 中国科学技术协会常委。国家重点研发计划“深部岩体力学与开采理论”项目负责人。

谢和平院士长期致力于采矿工程、矿山工程力学、绿色能源开发利用及深地科学领域的基础研究与工程实践, 特别是在破断煤岩体力学研究方面具有突出成果。在我国最早建立矿山裂隙岩体宏观损伤力学模型, 开拓了矿山裂隙岩体损伤力学研究新领域。1985 年起, 创造性地将分形方法引入对裂隙岩体的非连续变形、强度和断裂破坏研究, 并与损伤力学结合, 在国际上开创了岩石力学分形研究新领域。近年来, 在深地科学探索领域, 包括深地固体资源流态化开采、中低温地热发电、地下空间开发利用、海水能源化及深地医学等领域提出了创新性理念与构想, 并在绿色能源、低碳技术与  $\text{CO}_2$  矿化及综合利用技术领域进行了深入探索, 取得了重要进展。

谢和平院士两次作为首席科学家主持国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目, 担任国家自然科学基金委员会创新研究群体首席科学家。荣获首届中国青年科学家奖(技术科学)、何梁何利科学与技术进步奖(技术科学奖)。作为第一获奖人获国家自然科学奖二等奖、三等奖, 国家科学技术进步奖二等奖、三等奖。被英国诺丁汉大学、德国克劳斯塔尔工业大学、香港理工大学授予“荣誉博士”学位, 获牛津大学授予的“牛津大学圣艾德蒙 Fellow”学术称号。

## 前 言

2014年6月13日习近平总书记在中央财经领导小组第六次会议上，提出“推动能源生产和消费革命”；在2017年10月18至24日中国共产党第十九次全国代表大会上提出“推进能源生产和消费革命，构建清洁低碳、安全高效的能源体系”。能源是国家繁荣和经济可持续发展的基础和支撑，随着我国经济发展，人们生活质量逐步提高，能源需求也越来越大，能源供给和消费带来的相关问题逐步凸显，如能源开发利用造成严重的环境污染、极端气候事件等，传统的能源生产、消费方式不可持续。而未来较长时间内，我国能源生产和消费量仍将持续增长，如何在能源消耗绝对量增加的同时，通过调整产业结构、转变发展方式、提高能源效率、发展清洁能源等方式，减少能源生产和利用过程中对资源、生态、环境等的破坏，减少污染物和二氧化碳排放，实现能源的清洁、绿色、低碳、循环发展，是我们面临的紧迫现实问题。在全面推进能源生产和消费革命的高质量经济发展新阶段，作为我国的主要能源，煤炭必须自身进行革命，即通过煤炭开发利用的理念革命、技术革命、管理模式革命等，来全面实现煤炭的绿色生态开采、清洁低碳利用，即近零生态损害的绿色开采，近零到零排放的消费利用，使我国能源结构全面优化，建成先进能源体系，支撑国民经济高质量的发展。

煤炭必须自身革命，是由人们对美好生活的追求、我国能源基本国情、煤炭自身开发利用特征、社会经济发展阶段等因素所决定的。首先，煤炭革命是能源革命的重要内容，只有煤炭开发利用发生了根本性的变革，实现了煤炭革命，才能整体上实现我国的能源革命，实现能源的安全、高效、绿色、清洁、低碳、经济、持续稳定供应；其次，煤炭革命是实现煤炭行业可持续发展的必然要求，依靠理念创新、科技创新实现自身革命，提高煤炭行业安全、高效、绿色和智能化水平，转向质量、



效益、集约型发展；再次，煤炭革命是解决煤炭行业重大问题的根本路径，当前煤炭面临可经济开发利用的煤炭资源并不富余，地质条件复杂、采深逐年增加等多重压力，对煤炭的持续需求与当前不够清洁的利用方式相矛盾等挑战，必须通过革命性技术的突破来解决。最后，煤炭革命是供给侧和消费侧结构性改革的现实需要，社会环境要求煤炭生产必须达到近零生态损害甚至无害化，煤炭利用必须实现近零排放的高效清洁化。

理念革命是煤炭革命的首要问题，煤炭革命要树立高端发展理念，使煤炭行业成为高度信息化、智能化、现代化、知识化、专业化的高新技术产业；煤炭革命要有国际化发展理念，充分利用国际和国内两个市场，两种资源，不断提升我国在国际煤炭工业发展方向、科技创新方向、定价等方面的话语权；煤炭革命要践行近零生态损害的绿色开采理念，使煤炭开采地表近零均匀沉降，地下水资源得到科学保护和利用，矿区环境得到有效修复和保护；煤炭革命要坚持高标准的科学产能理念和高效低碳利用理念；煤炭革命还应创立扩展、多元转型发展理念，煤炭与太阳能、风能、核能等其他能源耦合利用，拓展发展煤基高端燃料、高新材料、碳氢元素的材料功能。

煤炭革命是一个长期的过程，再经过 30 余年的努力，煤炭行业将成为煤基多元协同与深部原位开发利用一体化和深地空间利用的智慧能源系统，实现“中国梦”的煤炭篇章，也就是：2020 年前，建成超低生态损害与超低排放的机械化、信息化煤炭开发利用体系，进入井下少人、接近天然气排放水平的煤炭 3.0 阶段，煤矿井下空间得到初步利用；2020~2035 年，建成近零生态损害与近零排放的智能化、多元煤炭开发利用体系，进入井下无人、接近清洁能源排放水平的煤炭 4.0 阶段，煤矿井下空间得到有效利用；2035~2050 年，建成煤基多元、开放、协同、绿色开发利用的清洁能源基地，进入井下无人、地上无煤、纯清洁能源的煤炭 5.0 阶段，煤矿井下空间资源与城镇化发展协同开发利用。

“不论出身，只论排放”，煤炭也能成为清洁能源，这是煤炭革命的终极目标，也是煤炭革命的本质要求。清洁能源应该“不论出身”，是否是清洁能源，关键是看排放。目前 70% 的燃煤发电实现了超低排放，达到了天然气的排放水平，10% 左右的燃煤工业锅炉已可实现超低排放。因此，在合理利用的情况下，通过煤炭的技术革命，煤炭完全可以成为清洁能源。

围绕煤炭革命的战略目标，本书阐明了煤炭革命的科学基础、四大理论和六大理念；提出了煤炭革命的五大战略，即煤炭绿色安全开发战略、清洁低碳利用战略、多元协同发展战略、“一带一路”走出去的国际化战略及新型人才战略。创新性提出煤炭革命的阶段性战略目标，即煤炭 3.0 阶段、4.0 阶段、5.0 阶段的战略蓝图，并从煤炭革命的四大领域，即近零生态损害的科学开采、近零排放的清洁低碳利用、矿井建设(设计)与地下空间一体化利用、流态化开采，分别提出了全产业链煤炭技术革命路线图，勾勒出了不同历史阶段的颠覆性理论和技术构想，为我国煤炭革命提出了方向性指南。其中首次提出了煤炭流态化开采理论体系，系统提出了深部原位流态化开采的三大关键技术体系，并提出了流态化开采的发展路线图；首次提出了煤炭地下空间利用理论，全面科学测算了煤炭地下空间可用量，提出了煤炭地下空间利用技术体系。

煤炭革命需要有自我革命的勇气，煤炭革命也不是一蹴而就的，需要建立煤炭革命的倒逼机制和人才支撑体系。本书在总结借鉴能源倒逼机制经验的基础上，提出了以科学产能倒逼煤炭科学开采革命、以超低排放和低碳循环发展倒逼煤炭清洁利用革命、以多元开放协同清洁能源倒逼煤基多元清洁能源基地革命，构建了煤炭革命的全产业链倒逼机制，提出了实现煤炭革命的新型人才战略和实施体系，同时提出了煤炭革命的技术清单和煤炭革命的重点研发技术指南。

煤炭革命不是革煤炭的命，而是革煤炭落后产能的命，革煤炭污染排放的命，本书科学系统地回答了在能源革命的背景下如何实现煤

炭革命,煤炭革命的目的和战略蓝图,煤炭革命应该走什么样的道路,实现煤炭革命需要什么理念和机制,技术革命如何支撑煤炭革命等问题,通过煤炭的自身革命使煤炭成为我国可靠的、持续稳定的清洁绿色能源。

本书以项目研究报告为基础,第1章揭示了世界能源革命的本质意义在于劳动工具变革,以及新型替代能源实现主导性和普适化的一般特性;分析了历次能源革命、技术革命、工业革命和经济发展之间的相互作用和时空关系;揭示了能源兴替跃迁与竞争替代的基本规律;研究分析了新时期我国能源革命的方向和重心,以及能源革命中煤炭自身革命的重要性、必要性、紧迫性、现实性和战略意义;阐明了新时期煤炭革命的主要任务。第2章论述了煤炭革命的科学基础,提出了煤炭开发利用一体化、矿井建设与地下空间利用一体化、煤基多元清洁能源协同开发、煤炭洁净低碳开发利用的能值转化四大煤炭革命理论,以及高端发展、国际化发展、近零生态损害的绿色开采、高标准的科学产能、高效低碳利用、转型发展理念六大煤炭革命新理念,论述了煤炭革命的战略目标,提出了安全绿色、清洁低碳、多元协同是煤炭革命的战略方向。第3章结合我国煤炭开发利用的现状、资源空间分布规律,以及能源结构随时间的变化,创造性地提出煤炭革命3.0阶段、4.0阶段和5.0阶段三个发展阶段,并给出每个阶段的战略目标,形成了我国未来30年煤炭革命的技术路线及战略蓝图。第4章从煤炭技术革命近零生态损害的智能化无人开采、近零污染物排放的清洁低碳利用、矿井建设(设计)与地下空间一体化利用三大领域的变革性理论和技术体系,系统分析了未来亟须突破的重大理论及技术问题,凝练形成了三阶段三层次的技术路线图,即升级与换代技术(2020年前)、拓展与变革技术(2020~2035年)、引领与探索技术(2035~2050年)。第5章创新提出了煤炭革命的颠覆性理论与技术,论述了煤炭资源深部原位流态化开采的理论体系,提出了深部原位流态化开采采动岩体力学理论等四大深部原位流态化开采新理论,以及深部原位流态化开采地质保障技术等十大深部原位流

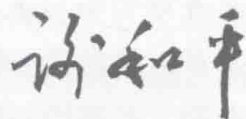


态化开采颠覆性技术,并进一步论述了煤炭资源深部原位流态化开采的战略路线。第6章提出了我国煤炭革命国际化的战略目标,从煤炭贸易与物流、技术装备与工程服务、资源开发与转化、资本运营四个方面设计了煤炭革命国际化的战略路径,并提出相应的保障措施。第7章明确了新型高端人才在煤炭革命过程中的决定性作用,提出了煤炭革命的新型人才战略构想,描述了新型人才应当掌握地下空间立体实时定位等关键共性技术、基于区块链的机机交互技术等前沿引领技术、深部地下空间立体社区规划技术等现代工程技术;同时应当成为具备人工智能装备思维训练能力等颠覆性技术创新的复合型多领域人才。第8章提出构建煤炭革命的全产业链倒逼机制,形成了“以科学产能倒逼煤炭科学开采革命”、“以超低排放和低碳循环发展倒逼煤炭清洁利用革命”、“以多元开放协同清洁能源倒逼煤基多元清洁能源基地革命”的三大具体举措。

各章节编写人员具体如下:前言:谢和平、王金华、刘见中、鞠杨。第1章:葛世荣、鞠杨、刘虹、张宏、吴刚;第2章:谢和平、王金华、葛世荣、王家臣、周宏伟;第3章:谢和平、王国法、任怀伟、陈佩佩、姜鹏飞、吴立新;第4章:谢和平、刘见中、吴立新、陈佩佩、鞠杨、任世华、任怀伟、赵国瑞、杨建威;第5章:鞠杨、谢和平、刘见中、周宏伟;第6章:李全生、李瑞峰、朱吉茂、王雷、张凯、曹志国、方杰、苏国萍、汪秋磊、张帅;第7章:杨仁树、姜耀东、王家臣、李杨;第8章:吴立新、刘见中、任世华、秦容军、廖海燕、樊金璐。全书由谢和平、刘见中、鞠杨、高明忠、周宏伟、王家臣、李全生、任怀伟、张茹、任世华、刘虹、张凯、秦容军统稿,谢和平审定。

本项目研究过程得到了中国工程院咨询研究项目“我国煤炭能源革命的战略研究”(编号:2015-NY-5)、“煤炭绿色开发利用与煤基多元协同清洁能源技术革命”(编号:2016-XZ-036)和中国科学院学部咨询评议项目“城市地下空间的开发利用”(编号:B-DX-2017-02)的资助,在项目研究报告的基础上精炼形成了本书稿。本项目研究和书稿出版得到了中国工程院、中国煤炭科工集团、深圳大学、四川大学、中国矿业大

学(北京)、中国矿业大学、华北科技学院、国家能源投资集团等单位的大力支持;在资料收集和现场考察过程中,得到了中国煤炭工业协会、中国煤炭学会、中国煤炭地质总局等单位支持。钱鸣高院士、谢克昌院士、王成善院士、洪伯潜院士、周世宁院士、宋振骥院士、张铁岗院士、彭苏萍院士、王安院士、袁亮院士、刘炯天院士、李晓红院士、张玉卓院士、蔡美峰院士、凌文院士、康红普院士、顾大钊院士、武强院士、金智新院士、王国法院士、董树文教授、申宝宏研究员、潘一山教授、刘建功教授等专家在项目研究过程中给予了无私指导,特别是中国煤炭工业协会王显政会长、梁嘉琨副会长、田会副会长、姜智敏副会长、刘峰副会长等对本项目研究给予了关心和指导,在此一并表示衷心的感谢。



2018年1月

# 目 录

## 前言

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 新时代的煤炭革命 .....           | 1  |
| 1.1 煤炭革命的必要性 .....             | 1  |
| 1.1.1 国内外能源发展规律和态势 .....       | 1  |
| 1.1.2 我国能源革命的方向和重心 .....       | 23 |
| 1.1.3 煤炭革命的战略意义 .....          | 24 |
| 1.2 煤炭革命的紧迫性 .....             | 25 |
| 1.2.1 煤炭发展面临的重大问题与挑战亟待解决 ..... | 25 |
| 1.2.2 供给侧改革倒逼煤炭生产革命 .....      | 29 |
| 1.2.3 消费侧改革倒逼煤炭利用革命 .....      | 30 |
| 1.3 煤炭革命的现实性 .....             | 30 |
| 1.3.1 煤炭绿色开发和超低排放已具备技术基础 ..... | 30 |
| 1.3.2 煤炭革命技术经济可行 .....         | 31 |
| 第 2 章 煤炭革命的新理论、目标和战略 .....     | 32 |
| 2.1 煤炭革命的科学基础 .....            | 32 |
| 2.1.1 动能的定义 .....              | 33 |
| 2.1.2 功的定义 .....               | 33 |
| 2.1.3 能量的定义 .....              | 34 |
| 2.1.4 能量守恒定律 .....             | 34 |
| 2.2 煤炭革命的新理论 .....             | 35 |
| 2.2.1 煤炭开发利用一体化理论 .....        | 36 |
| 2.2.2 矿井建设与地下空间利用一体化理论 .....   | 36 |
| 2.2.3 煤基多元清洁能源协同开发理论 .....     | 37 |
| 2.2.4 煤炭洁净低碳开发利用的能值理论 .....    | 37 |
| 2.3 煤炭革命的理念 .....              | 38 |

|       |                                |    |
|-------|--------------------------------|----|
| 2.3.1 | 高端发展理念                         | 38 |
| 2.3.2 | 国际化发展理念                        | 39 |
| 2.3.3 | 近零生态损害的绿色开采理念                  | 39 |
| 2.3.4 | 高标准科学产能理念                      | 40 |
| 2.3.5 | 高效低碳利用理念                       | 40 |
| 2.3.6 | 扩展、转型发展理念                      | 40 |
| 2.4   | 煤炭革命的目标                        | 41 |
| 2.4.1 | 煤炭成为清洁能源                       | 41 |
| 2.4.2 | 煤矿区成为煤基多元协同能源基地                | 41 |
| 2.4.3 | 煤炭行业成为社会尊重、人才向往的高新技术行业         | 42 |
| 2.5   | 煤炭革命的战略                        | 42 |
| 2.5.1 | 安全绿色开发战略                       | 42 |
| 2.5.2 | 清洁低碳利用战略                       | 42 |
| 2.5.3 | 多元协同发展战略                       | 43 |
| 第3章   | 煤炭革命的战略蓝图                      | 44 |
| 3.1   | 总体战略蓝图                         | 44 |
| 3.1.1 | 总体目标与特征                        | 44 |
| 3.1.2 | 全产业链煤炭技术革命路线图                  | 47 |
| 3.2   | 煤炭智能化开采和超低排放洁净利用——煤炭 3.0 阶段    | 49 |
| 3.2.1 | 战略定位与目标                        | 49 |
| 3.2.2 | 突破思路                           | 51 |
| 3.2.3 | 实施路径                           | 51 |
| 3.3   | 煤炭无人化开采和污染物近零排放洁净利用——煤炭 4.0 阶段 | 53 |
| 3.3.1 | 战略定位与目标                        | 53 |
| 3.3.2 | 突破思路                           | 54 |
| 3.3.3 | 实施路径                           | 55 |
| 3.4   | 煤基多元协同绿色清洁能源系统——煤炭 5.0 阶段      | 57 |
| 3.4.1 | 战略定位与目标                        | 57 |



|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 3.4.2 突破思路 .....                     | 58         |
| 3.4.3 实施路径 .....                     | 59         |
| <b>第4章 煤炭革命的变革性理论和技术 .....</b>       | <b>62</b>  |
| 4.1 近零生态损害的智能化无人开采变革性理论与技术 .....     | 62         |
| 4.1.1 近零生态损害的智能化无人开采变革性理论 .....      | 63         |
| 4.1.2 近零生态损害的智能化无人开采变革性技术 .....      | 66         |
| 4.1.3 近零生态损害的发展路线图 .....             | 119        |
| 4.2 近零污染物排放的清洁低碳利用变革性理论与技术 .....     | 121        |
| 4.2.1 近零污染物排放的清洁低碳利用变革性理论 .....      | 122        |
| 4.2.2 近零污染物排放的清洁低碳利用变革性技术 .....      | 124        |
| 4.2.3 近零污染物排放的清洁低碳利用发展路线图 .....      | 129        |
| 4.3 矿井建设(设计)与地下空间一体化利用变革性理论与技术 ..... | 131        |
| 4.3.1 煤矿地下空间估算 .....                 | 132        |
| 4.3.2 矿井建设(设计)与地下空间一体化利用变革性理论 .....  | 139        |
| 4.3.3 矿井建设(设计)与地下空间一体化利用变革性技术 .....  | 143        |
| 4.3.4 矿井建设(设计)与地下空间一体化利用探索构想 .....   | 145        |
| 4.3.5 矿井建设(设计)与地下空间一体化利用的发展路线图 ..... | 147        |
| <b>第5章 煤炭革命颠覆性理论与技术 .....</b>        | <b>150</b> |
| 5.1 深部原位流态化开采的颠覆性理念与构想 .....         | 150        |
| 5.1.1 深部原位流态化开采构想形成过程 .....          | 153        |
| 5.1.2 深部原位流态化开采的定义 .....             | 155        |
| 5.2 深部原位流态化开采的颠覆性理论体系 .....          | 156        |
| 5.2.1 深部原位流态化开采采动岩体力学理论 .....        | 156        |
| 5.2.2 深部原位流态化开采的“三场”可视化理论 .....      | 160        |
| 5.2.3 深部原位流态化开采的原位转化多物理场耦合理论 .....   | 161        |
| 5.2.4 深部原位流态化开采的原位开采、转化与输运理论 .....   | 163        |
| 5.3 深部原位流态化开采的关键技术体系 .....           | 166        |
| 5.3.1 深部原位流态化开采的智能化技术体系 .....        | 166        |
| 5.3.2 深部原位流态化开采的无人化技术体系 .....        | 170        |

|                                             |            |
|---------------------------------------------|------------|
| 5.3.3 深部原位流态化开采的流态化技术体系 .....               | 175        |
| 5.4 煤炭深部原位流态化开采的战略路线 .....                  | 184        |
| <b>第 6 章 煤炭革命国际化战略 .....</b>                | <b>186</b> |
| 6.1 煤炭革命国际化战略环境分析 .....                     | 186        |
| 6.1.1 国际煤炭发展环境 .....                        | 186        |
| 6.1.2 “一带一路”国家煤炭市场环境及需求预测 .....             | 190        |
| 6.1.3 煤炭在“一带一路”倡议中的地位 .....                 | 203        |
| 6.1.4 “一带一路”倡议对我国煤炭行业的影响 .....              | 208        |
| 6.2 我国煤炭产业市场竞争力分析 .....                     | 210        |
| 6.2.1 煤炭产品市场竞争能力分析 .....                    | 210        |
| 6.2.2 煤矿技术装备竞争能力分析 .....                    | 224        |
| 6.2.3 煤矿工程总承包服务市场竞争力分析 .....                | 231        |
| 6.2.4 资源开发与转化市场竞争能力分析 .....                 | 235        |
| 6.3 煤炭革命的国际化战略 .....                        | 238        |
| 6.3.1 战略目标 .....                            | 238        |
| 6.3.2 发展路径 .....                            | 238        |
| 6.3.3 保障措施 .....                            | 243        |
| <b>第 7 章 实施煤炭革命的新型人才战略 .....</b>            | <b>248</b> |
| 7.1 煤炭革命的人才战略构想 .....                       | 248        |
| 7.2 实施煤炭革命的新型人才体系 .....                     | 250        |
| 7.2.1 未来煤炭工业信息化专业技术人才 .....                 | 250        |
| 7.2.2 未来煤炭流态化开采能量传输与提取专业技术人才 .....          | 251        |
| 7.2.3 未来煤炭流态化开采智能装备操控专业技术人才 .....           | 252        |
| 7.2.4 未来深部地下空间立体社区规划建设专业技术人才 .....          | 255        |
| 7.2.5 未来煤炭流态化开采基于大数据与多维度的决策专业<br>技术人才 ..... | 255        |
| 7.3 煤炭革命的人才国际化发展 .....                      | 256        |
| 7.3.1 发现和引进海外“高精尖缺”人才 .....                 | 256        |
| 7.3.2 深化本土人才国际化发展 .....                     | 257        |

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 第 8 章 构建煤炭革命的全产业链倒逼机制 .....             | 258 |
| 8.1 能源倒逼机制的经验借鉴 .....                   | 258 |
| 8.1.1 环境倒逼 .....                        | 258 |
| 8.1.2 技术倒逼 .....                        | 262 |
| 8.1.3 国外煤炭先进采煤用煤国家案例 .....              | 265 |
| 8.2 以科学产能倒逼煤炭科学开采革命 .....               | 271 |
| 8.2.1 科学产能的标准 .....                     | 271 |
| 8.2.2 近零生态损害的标准 .....                   | 272 |
| 8.3 以超低排放和低碳循环发展倒逼煤炭清洁利用革命 .....        | 272 |
| 8.3.1 接近或优于天然气利用的超低排放标准 .....           | 272 |
| 8.3.2 高效利用的标准 .....                     | 273 |
| 8.4 以多元开放协同清洁能源倒逼煤基多元清洁能源<br>基地革命 ..... | 276 |
| 附件一：煤炭革命的技术清单 .....                     | 278 |
| 附件二：煤炭革命的重点研发技术指南 .....                 | 281 |
| 参考文献 .....                              | 290 |

# 第 1 章 新时代的煤炭革命

能源革命是指推动人类文明进步的根本性能源变革。能源革命的起因主要源于能源系统不足以支撑社会经济进一步发展,也可能是资源约束和生存环境恶化等诸多问题倒逼所致。本章以人类文明发展史上发生的五次能源革命为大视野,揭示了世界能源革命的本质意义在于劳动工具变革,以及新型替代能源实现主导性和普适化的一般特性;详细分析了历次能源革命、技术革命、工业革命、经济发展之间的互相作用和时空关系;从理论上演绎了能源兴替跃迁与竞争替代的基本规律,并得出能源革命发端早于经济巅峰,能源革命长波与经济发展长波之间在时间轴上存在一个提前相位差,相差约 45 年的分析结果。同时,本章在研究分析了我国能源结构调整和能源发展未来趋势的基础上,进一步强调了新时期我国能源革命的方向和重心,以及在能源革命中煤炭自身革命的重要性、必要性、紧迫性、现实性和战略意义。阐明了新时期煤炭革命的主要任务,是革煤炭粗放型生产开发的命、革煤炭落后产能的命、革煤炭污染排放的命的观点。

## 1.1 煤炭革命的必要性

### 1.1.1 国内外能源发展规律和态势

#### 1. 世界能源结构演变及煤炭角色

##### 1) 世界能源结构演变过程

能源是自然界中能为人类提供某种形式能量的物质资源。能源是人类活动的物质基础,与阳光、水、空气、食物并称人类赖以生存的五大基本要素之一。在某种意义上,人类社会的发展离不开优质能源的出现和先进能源技术的使用。人类文明史是一部人与自然的关系史,也是一



部能源利用方式不断更新、能源技术不断革新的历史。

能源革命是指推动人类文明进步的根本性能源变革，具体表现为资源形态、技术手段、管理体制、人类认知等方面出现一系列显著的变化。纵观人类文明发展史，共经历了四次能源革命，正在进行第五次能源革命，如图 1-1 所示。

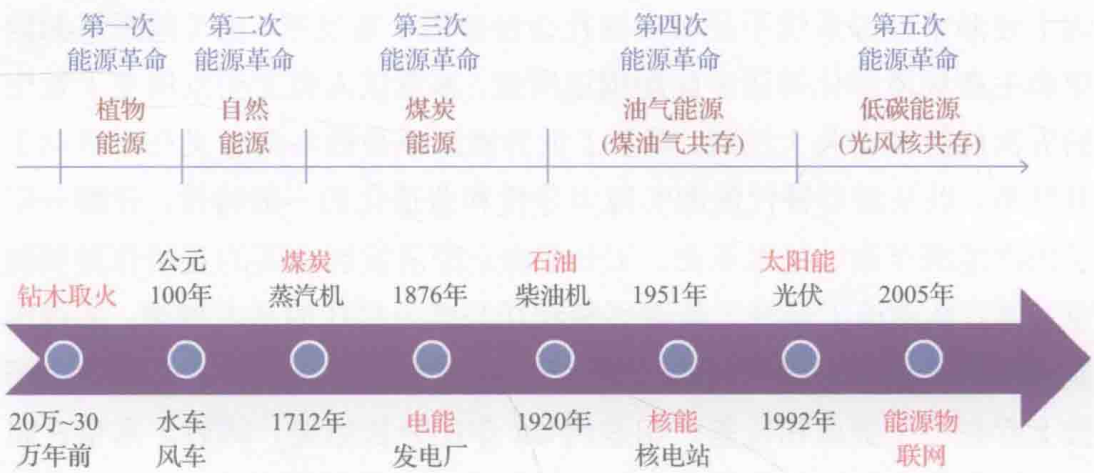


图 1-1 人类能源革命历程示意图

第一次能源革命，大约在 20 万~30 万年前，人类发现火并学会利用火，进入薪柴能源时代。以人工火代替自然火的利用为标志，木材、秸秆等薪柴能源成为人类社会生产和生活的主要能源，此时是人类自主利用燃料(能源)的开始。

第二次能源革命，到公元 100 年左右，人类学会利用畜力、风力、水力等自然动力，进入自然能源时代。从广义能源的意义上看，食物是一次能源，人体能(人力)是二次能源，同样畜力也是二次能源。在农业社会，太阳能被用于照明和取暖，风能被用于驱动风车和帆船，水能被转换为水轮泵、水磨和提水灌溉的动力。在这个时期，自然能源产生的动力很小，植物能源主要来源于木材。由于生产发展、人口增加，人类长期砍伐森林、破坏植被，同时引起木材资源的匮乏，导致农业社会的能源危机。

第三次能源革命，始于 18 世纪的英国，以蒸汽机的发明和煤炭的大规模使用为主要标志，人类进入煤炭能源时代。19 世纪初期，英国