



中国社会科学院创新工程学术出版资助项目

钢铁产业循环经济发展与 技术创新

GANGTIE CHANYE XUNHUAN
JINGJIFAZHAN YU JISHU CHUANGXIN

彭绪庶 著



经济管理出版社
ECONOMY & MANAGEMENT PUBLISHING HOUSE



中国社会科学院创新工程学术出版资助项目

钢铁产业循环经济发展与 技术创新

GANGTIE CHANYE XUNHUAN
JINGJIFAZHAN YU JISHU CHUANGXIN

彭绪庶 著



经济管理出版社
ECONOMY & MANAGEMENT PUBLISHING HOUSE

图书在版编目 (CIP) 数据

钢铁产业循环经济发展与技术创新/彭绪庶著. —北京: 经济管理出版社, 2015.12
ISBN 978-7-5096-4096-8

I. ①钢… II. ①彭… III. ①钢铁工业—自然资源—资源利用—研究—中国 IV. ①F426.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 285277 号

组稿编辑: 张永美

责任编辑: 胡茜 王格格

责任印制: 司东翔

责任校对: 王森

出版发行: 经济管理出版社

(北京市海淀区北蜂窝 8 号中雅大厦 A 座 11 层 100038)

网 址: www.E-mp.com.cn

电 话: (010) 51915602

印 刷: 北京九州迅驰传媒文化有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 720mm×1000mm/16

印 张: 16.5

字 数: 241 千字

版 次: 2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5096-4096-8

定 价: 58.00 元

·版权所有 翻印必究·

凡购本社图书, 如有印装错误, 由本社读者服务部负责调换。

联系地址: 北京阜外月坛北小街 2 号

电话: (010) 68022974 邮编: 100836

序 言



钢铁产业是为经济社会发展和人民生活提供最基本的结构材料和部分功能材料的重要产业，也是工业化的三大支柱产业之一。根据钢铁产业界通常的划分，钢铁生产包括长流程生产工艺和短流程生产工艺两种。短流程生产工艺主要以废钢为原料，由于不涉及铁矿石冶炼，物耗、能耗、水耗和污染排放水平都相对较低。但由于废钢原料有限，因此短流程钢铁占比较低。全球范围内短流程炼钢占比不足30%，我国短流程炼钢占比仅为10%左右。采用长流程生产工艺的钢铁生产包括炼焦、炼铁、炼钢和轧钢四大组成部分，从最基本的铁矿石选冶开始，除铁矿石外，钢铁生产所涉及的资源主要包括铁矿石和煤炭，此外还需要多种其他金属矿和非金属矿作为添加剂和辅助材料，并需要大量水资源和能源。在传统的全流程钢铁生产过程中，资源和能源消耗强度很大，同时会产生大量烟尘粉尘、二氧化硫、氮氧化物、低热值煤气、污水、冶金渣等多种固液气废弃物。因此，传统的钢铁产业也常常被称为高资源消耗、高能源消耗、高污染排放的“三高”产业。工业化发展和人民生活离不开钢铁材料的支撑，钢铁生产又大量消耗资源能源并排放污染物，因此，钢铁产业便成为工业化过程中经济增长与资源安全和环境保护之间的矛盾焦点之一。

改革开放以后，我国逐步进入工业化和城市化快速发展时期，对钢材的

需求量持续高速增长。我国的粗钢产量已经从 1978 年的 3000 多万吨增加到 2014 年的 8.2 亿吨左右,增长了近 30 倍,消耗的能源约占全国能源消耗总量的 15% 左右,是典型的能源消耗大户。即使是利用较为先进的技术,在传统的非循环经济模式下,生产 1 吨钢也会消耗 20 多吨各种资源(含矿山开采物耗),产生 2200~2500 立方米废气,1.1 千克烟尘粉尘,1.6 千克二氧化硫,0.5 千克氮氧化物,10 多吨污水,480 千克左右冶金渣等多种固液气废弃物。2010 年前后,京津冀地区钢铁产能达 3 亿多吨,其中河北省约占 90%,仅唐山市高峰时钢铁产能就达到 1.5 亿吨以上,几乎接近美国和日本目前粗钢产量的总和。密集布局的钢铁企业对京津冀大气环境产生了严重影响,消耗了本已短缺的大量水资源,是雾霾加剧的重要原因之一。如何改变钢铁产业高资源消耗、高能耗、高污染问题,是新型工业化建设和生态文明建设的重要课题。

近 30 年来,国内外钢铁业界一直在加大力度研究与开发钢铁冶炼清洁生产和资源循环利用技术。特别是 20 世纪 90 年代以来,循环经济作为一种经济发展模式逐步从理论萌芽走向大规模实践,为钢铁产业解决“三高”问题带来了希望。

彭绪庶博士是我的硕士和博士学位研究生。2003 年以来他一直与我合作,共同研究循环经济的理论与实践问题。我们到过作为国家循环经济试点企业的宝钢、济钢、唐钢、日照钢铁等国内多家钢铁企业进行深入调查研究,为河北津西钢铁园区等一些钢铁企业和钢铁产业园区进行过循环经济实施方案规划,在钢铁产业循环经济发展方面积累了许多实践经验。2005 年,彭绪庶在中国社会科学院研究生院取得博士学位。2008 年他又进入中国科学院研究生院博士后流动站工作,专门以“钢铁产业循环经济与技术创新”为研究课题进行了三年专题研究。《钢铁产业循环经济发展与技术创新》一书即是他在多年对钢铁产业循环经济实践研究的基础上,通过理论梳理和总结而形成的较为系统的研究成果。

正如本书分析所指出的那样,钢铁产业作为典型的化学冶金流程型产业,

天然具有发展循环经济的优势。但是，在没有循环经济理论指导的时期，我国的钢铁产业从企业布局到企业工艺流程设计和技术路线选择，都没有考虑资源循环利用。例如，20世纪中后期，我国在山西、北京、天津等地分别布局了一个钢铁产业长流程生产体系。山西利用煤炭资源和铁矿资源优势炼铁，将1100多摄氏度的高温铁水铸成铁锭运到北京的首钢，在那里用冲天炉重新熔化成铁水炼钢，然后再将超过1400摄氏度的钢水铸成钢锭，运往天津的轧钢厂，经过再次加热到1100摄氏度左右后轧制成钢材，运往上海、沈阳等地进行深加工，制成各种机械和钢铁产品。跨越几个省市的企业布局，使钢铁经过两次铸锭、两次高温加工，浪费了大量能源。企业之间的物质资源无法循环利用，余热余压浪费，水资源浪费，烟尘粉尘排放污染环境，焦炉煤气“点天灯”，高炉煤气、转炉煤气直接向大气排放，高炉渣和转炉渣需要长距离运输到填埋场填埋。在这样的生产模式下，吨钢综合能耗超过2.3吨标准煤，吨钢耗新水超过30吨，生产每吨钢材要填埋近500千克固体废弃物，排放超过2500立方米的废气。

2000年前后，我国引入了循环经济理念，并将其作为从源头预防环境污染的手段进行研究和试验。2005年以后，我国开始将钢铁产业作为发展循环经济的七大重点产业之一进行试点，开启了钢铁产业循环经济发展新篇章。经过10年的发展，我国钢铁产业已经成为循环经济发展较为充分的产业。不仅新建钢铁企业都是按照循环经济原理进行工艺设计和技术路线选择，而且多数以焦（炭）、（炼）铁、（炼）钢联产的钢铁循环经济产业园区模式进行布局建设，绝大多数老钢铁企业也都按照循环经济原理进行了循环化改造，几乎全部钢铁企业都实现了水资源分级循环利用，余热余压回收利用，高炉煤气、转炉煤气、焦炉煤气全部回收利用，高炉渣、转炉渣、废弃耐火材料等固体废弃物全部回收利用，部分钢铁企业还实现了烟尘粉尘回收提取金属元素后的综合利用。钢铁联合企业从单纯生产钢铁转变为钢铁、建材、发电，甚至是精细化工等产业的循环经济联合体。重点企业钢铁综合能耗也从过去超过2吨标准煤降低到0.6吨标准煤左右。一些企业与城市组成了产城一体

化循环经济体系，钢铁企业向城市供热，协助城市处理有毒有害废弃物，利用城市污水处理后用于钢铁生产，实现了钢铁生产不耗新水，固体废弃物基本做到了零排放。随着脱硫脱硝技术的强制推广，未来钢铁企业将会成为无味无烟产业。

钢铁产业循环经济的发展，使得企业经济效益的50%以上来自废弃物的综合循环利用。钢铁生产成本在资源能源成本和工资成本不断翻倍的情况下因循环经济发展反而不断降低。未来熔融炼钢循环经济体系的发展，有可能使钢铁企业变为一个集煤化工产业与钢铁产业为一体的循环经济联合体，甚至使粗钢成为煤气化工产业的副产品。总之，钢铁产业循环经济模式的发展与演变，展示了循环经济技术范式的新前景。

彭绪庶博士把钢铁产业循环经济与技术创新结合起来写成此书，从钢铁产业资源循环利用的角度，展示了技术创新的重要性。实际上，循环经济模式本身就是可持续发展理念下技术创新的结果。技术创新一方面沿着人类思想和知识的发展方向纵深发展，不断创造高新技术和新产品；另一方面沿着传统的资源可持续利用与生态环境保护方向，构建出新的循环经济技术体系。技术创新是循环经济既循环又经济的基本保障。

中国经济发展已经进入工业化和城市化的后期阶段，用当前流行的话说就是进入了经济发展的“新常态”。经济发展模式需要进行整体转型，生态文明建设将成为经济社会发展的新内涵，循环经济将成为新时期新经济模式的标志。实际上，作为人类高级文明形态的生态文明，其核心就是通过技术创新和制度创新实现经济社会的循环化转型和进行生态建设。希望彭绪庶博士的这本书能够对读者深入理解循环经济和技术的真谛有所帮助。

中国社会科学院数量经济与技术经济研究所研究员

中国循环经济与环境预测评估中心主任

齐建国

2015年9月3日于北京

目 录



第一章 绪论	001
第一节 中国不能承受之“重”	001
第二节 重化工产业发展到“天花板”了吗	003
第三节 重化工产业面向循环经济的转型与创新	007
第四节 研究选题背景与现状述评	011
一、选题背景	011
二、研究现状简述	012
第五节 本书研究框架	014
第六节 本书特色和拟实现的创新点	016
第二章 循环经济的概念、基本理论和实践	019
第一节 循环经济的由来与基本概念	019
一、资源环境问题与循环经济的产生	019
二、循环经济诞生的理论背景	021
三、循环经济的概念分析	025
第二节 循环经济的若干理论问题	029

一、循环经济视角下的资源、环境和废弃物	029
二、清洁生产和全生命周期理论	034
三、物质代谢理论和物质流分析	040
四、循环经济的经济学理论基础和创新	045
第三节 循环经济在我国的发展和实践	051
一、循环经济的国家战略地位的确立	051
二、发展循环经济的主要工作	054
三、发展循环经济的主要进展和成效	056
本章小结	058
第三章 钢铁产业特性与循环经济	061
第一节 钢铁产业的技术经济特性	061
一、钢铁产业概述	061
二、钢铁生产流程	062
三、钢铁产业技术经济特性	064
第二节 钢铁产业发展循环经济的背景和必要性	067
一、“三高”产业发展与循环经济	067
二、钢铁产业发展循环经济的必要性与有利条件	070
本章小结	073
第四章 钢铁产业循环经济发展模式	075
第一节 模式、范式与技术经济范式	075
第二节 钢铁企业发展循环经济的基本模式	077
一、资源综合开发利用和污染减排	079
二、节能节水和污染减排	080
三、构建循环型钢铁产业体系	081
第三节 钢铁产业循环经济发展模式	082

一、关于界定模式的标准	082
二、钢铁产业的生产组织模式	084
三、钢铁产业的生产布局模式	087
本章小结	092

第五章 基于循环经济的钢铁产业关键共性技术创新 095

第一节 技术创新概述	095
一、创新与技术创新的一般概念	095
二、技术创新的类型	097
第二节 循环经济与技术创新的一般理论分析	099
一、循环经济与技术创新的关系	099
二、循环经济的技术经济范式革命	102
三、环境库兹涅茨曲线与循环经济技术创新隧道	105
四、循环经济对产业技术创新研究的新挑战	107
第三节 钢铁产业发展循环经济的技术支撑体系	110
一、构筑技术支撑体系的必要性	110
二、技术支撑体系的类型和主要内容	110
第四节 高炉长流程钢铁发展循环经济的关键共性技术创新	112
一、冶炼设备共性技术创新	112
二、冶炼设备大型化技术创新	114
三、冶炼流程技术创新	116
第五节 非高炉工艺发展循环经济的关键共性技术创新	118
一、非高炉工艺技术创新与循环经济	118
二、直接还原工艺技术创新	119
三、熔融还原工艺技术创新	120
第六节 管理技术创新与钢铁产业循环经济发展	123
本章小结	127

第六章 能源消耗减量化和能量梯级利用 129

第一节 能源与钢铁产业发展	129
一、能源的稀缺性	129
二、钢铁产业中的能源类型	132
三、钢铁产业能量流与能源“3R”	133
四、钢铁产业节能的重要性	135
第二节 技术创新与一次能源消耗减量化	136
一、技术创新与工序一次能源消耗减量化	136
二、能源替代技术创新与能源消耗减量化	141
三、能源管理技术创新与能源消耗减量化	144
第三节 技术创新与二次能源回收利用	145
一、二次能源的来源、类型和规模	145
二、技术创新与二次能源回收和利用方式	148
本章小结	154

第七章 固体废弃物综合利用和铁素回收利用 157

第一节 固体废弃物类型	157
一、固体废弃物的分类和来源	157
二、固体废弃物的特点	158
第二节 技术创新和固体废弃物综合利用	161
一、固废利用的基本思路	161
二、技术创新与固废减量化	161
三、技术创新与固废资源化	163
第三节 铁素资源回收利用	169
一、铁素的循环利用	170
二、铁素资源回收利用方式	171

第四节 社会废弃物处理和循环利用	173
一、社会废钢回收和循环利用	173
二、社会非钢废弃物处理和利用	176
本章小结	177
第八章 水资源消耗减量化和废水综合利用	179
第一节 水资源消耗概况和废水特点	179
一、水资源消耗概况	179
二、钢铁产业废水来源与特点	181
第二节 技术创新与水资源消耗减量化	183
一、采用节水型高效设备和工艺技术节水	183
二、采用分质供水和密闭水循环冷却技术节水	185
三、采用串级用水技术节水	187
四、管理技术创新与节水	189
第三节 技术创新与废水综合利用	190
一、采用分质回收处理技术促进废水直接回用	191
二、污水回收集中处理和综合利用	192
三、协同处理和利用城市废水	193
第四节 集成水处理技术和水循环利用技术	194
本章小结	196
第九章 基于循环经济的钢铁产业技术创新模式和发展趋势 ...	199
第一节 钢铁产业技术创新模式和特点	199
一、钢铁产业的技术创新目标导向	199
二、钢铁产业的技术创新模式	201
三、钢铁产业的技术创新特点	203
第二节 钢铁产业技术创新发展趋势和演化规律	205

一、国际钢铁产业技术创新发展动态	205
二、钢铁产业技术创新的发展重点和趋势	208
三、冶金制造流程演化发展规律	212
四、新一代可循环钢铁生产制造流程	213
第三节 熔融还原技术的发展前景分析	215
一、熔融还原技术与钢铁产业技术体系变革	215
二、三种主要熔融还原技术的比较	217
三、完善和推广熔融还原技术的障碍	218
四、从历史看熔融还原技术的发展前景	220
本章小结	223
第十章 中国钢铁产业技术创新模式和战略选择	225
第一节 我国钢铁产业发展及其地位演变	225
一、钢铁产业发展史上的奇迹	225
二、钢铁产业地位演变和可持续发展的重要性	227
第二节 我国钢铁产业技术创新模式分析	228
一、钢铁冶炼技术体系的演变	228
二、对钢铁产业技术进步的简要评价和反思	231
三、我国钢铁产业的技术创新模式	233
第三节 技术创新与钢铁产业发展面临的挑战和出路	235
一、可持续发展缺乏节能减排降耗的空间和潜力	235
二、提升技术水平的潜力在缩小、难度在加大	239
三、加强钢铁产业技术创新的出路	240
第四节 面向新技术革命的钢铁产业技术创新战略选择	242
参考文献	245



第一章 绪 论

第一节 中国不能承受之“重”

改革开放以来，我国 GDP 年均增长超过 9%，创造了世界经济史的奇迹，并迅速成长为世界第二大经济体。不同的是，先行发达国家的工业化道路历时上百年，资源能源约束相对较小，而我国要在较短时间完成工业化，提高城镇化水平，是一种典型的压缩型工业化模式，加之人口规模大，导致资源能源消耗、污染排放相对集中。由于产业技术水平差距和产业结构的差异，无论是从能源强度还是从全要素能源效率的角度来看，我国都与发达国家存在一定差距。因此，尽管我国经济规模总量快速增长，但由于资源和能源利用效率不高，在工业化和城镇化推动下，污染排放强度高的重化工产品的消耗增速仅略低于经济总量增速，但仍然保持较快增长，由此带来了巨大的资源和环境约束，尤其是土地、水资源等均已接近资源承载力红线。在矿产资源方面，我国多数矿产资源储量不足，尤其是近年来石油、铁矿石等重要战略性资源对外依存度均已超过 50%，资源约束严重威胁着我国经济安全。至

于生态环境破坏和污染治理, 尽管末端治理的污染治理投入巨大, 管理也越来越严格, 但仍不可避免地进入了环境污染的高峰期, 局部地区甚至超过了生态和环境承载能力极限。在经济高速发展的同时, 我们也付出了巨大的资源、能源和环境代价。

一个大国经济体在由传统农业社会向现代工业社会转变的过程中, 必然体现为工业优先发展和占主导地位。在 20 世纪 90 年代我国开始的新一轮经济增长中, 在体制改革、基础设施建设、消费升级和城镇化等多重因素驱动下, 重化工业主导的工业化快速发展。如图 1-1 所示, 不仅重工业年增速远超过工业增速和国内生产总值增速, 在 2012 年前, 重工业增速也始终高于轻工业增速。与 2000 年相比, 2012 年工业增加值大约增长了 5.05 倍, 同期轻工业年增加值大约增长了 5.18 倍, 而同期重工业年增加值大约增长了 7.62 倍。2012 年, 重工业比重大约为 72%, 比 2000 年提高了约 12 个百分点。重工业成为引领工业增长甚至是引领经济快速增长的主要力量, 重工业主导的工业化特征极其明显。

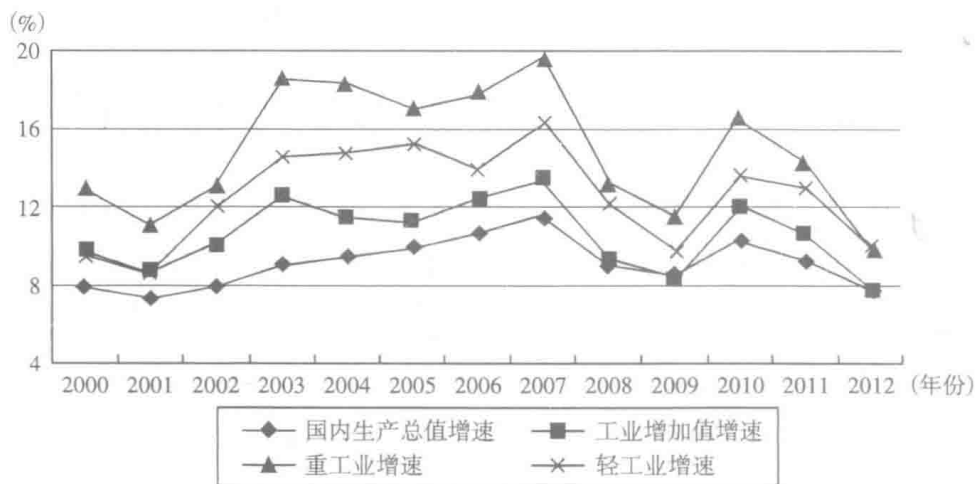


图 1-1 2000~2012 年轻重工业与工业和国内生产总值增速的比较

注: 为了使我国工业行业分类和国际统一标准接轨, 自 2013 年下半年起, 国家统计局不再使用“重工业”、“轻工业”的统计分类, 故本书此处最新数据只截止到 2012 年。

资料来源: 笔者根据历年《国民经济和社会发展统计公报》相关数据整理。

在重工业中, 增长最快的则是以原材料和能源为典型代表的重化工业, 主要包括钢铁和有色金属等冶金工业, 煤炭和石油、电力等能源工业, 化学

工业,金属矿物制品如水泥和玻璃等建材工业等。例如,2014年,粗钢、十种有色金属、原煤、焦炭、平板玻璃和烧碱等重化工产品的产量大约分别是2000年产量的6.4倍、5.6倍、2.8倍、3.9倍、4.3倍和4.6倍。这些产品代表的都是典型的资源密集型产业,污染排放水平相对较高。显然,中国面临的资源和环境约束的根源主要来自重化工业发展。以钢铁产业为例,据统计分析,中国钢铁产业单位增加值能耗是全部工业平均值的3倍以上^①,能耗占全国工业能耗的比重高达15%左右^②,二氧化硫排放占全国工业排放总量的10%左右^③。

按照全面建成小康社会的目标任务,如果维持现有资源消耗水平和污染排放水平不变,按照GDP年均7%的增长速度,到2020年,年均资源需求总量和污染排放量将在现有基础上增长50%以上。即便是考虑按照正常路径的技术进步和加强污染治理,年资源需求总量和污染排放量只同步增长30%以上,相当一部分资源和相当一部分地区环境都将超过资源承载力和环境承载力。从国内各地区环境状况来看,绝大部分重化工产业发展占有较大比重的地区都是总体环境质量相对较低的地区。华北地区大面积的雾霾就是最典型的例子。

因此,中国经济社会发展无法承受重化工产业按传统方式发展,要缓解未来发展面临的资源和环境约束,必须解决好重化工产业发展问题。

第二节 重化工产业发展到“天花板”了吗

近年来,我国经济增速放缓,钢铁、煤炭、电子等部分重化工产业出现

① 张群等.论中国钢铁产业发展和循环经济[J].冶金管理,2007(8).

李世俊.钢铁行业节能减排现状、目标和工作思路——在中国钢铁产业协会第三次会员代表大会上的报告[J].冶金管理,2007(2).

② 赵昌武.国内外钢铁行业的未来发展形势分析[J].冶金经济与管理,2004(5).

③ 兰兴华编译.印度——崛起中的金属和矿物大国[J].中国金属通报,2007(34).

了较为严重的产能过剩现象。在地方政府和行业主管部门的强力推动下,通过淘汰落后产能等措施,煤炭生产和消费总量都出现了小幅下降。2014年,全国粗钢产量为8.2亿吨,同比增长0.9%,20年来产量增幅最小。国内粗钢表观消费量7.4亿吨,同比下降4%,钢铁行业固定资产投资增幅同比下降3.8%。国内外均有相关报道认为,中国对煤炭、钢铁等的生产和需求已达到峰值并开始进入峰值期^①。如果钢铁、煤炭等重化工产业发展真的进入了峰值期,那么对中国经济社会发展资源环境约束的担心显然可以稍微松一口气。

但以钢铁产业为例,似乎并不乐观。钢铁需求受很多不确定性因素的影响,从国内学术界和产业界的多次预测可以看出,准确预测中国钢铁需求并不是一件容易事。例如,20世纪末即有研究预测,2010年前后,中国钢需求将达到高峰。2001年,中国钢铁产业协会通过大量调研,分析估计我国2010年左右的粗钢生产峰值将超过3亿吨^②。事实上,仅过了4年时间,中国粗钢产量即突破3亿吨。国家发改委、日本钢铁联盟、ARCELOR和Mckinsey分别预测2010年中国粗钢表观消费量为3.2亿吨、3.6亿吨、3.8亿吨和3.72亿吨。2003年,中国工程院张寿荣院士预计,中国钢产量进入稳定期可能需要60亿吨的累计产量,2004~2005年将进入高峰期,并将持续到2020年以后。从目前中国粗钢的生产和表观消费量来看,这些预测无一例外地都低估了中国的钢需求高峰。因此,后来的一些研究大大提高了对中国钢需求高峰的估

① 商务部网站.全球钢铁供需进入“峰值期”[EB/OL].2012-07-11,http://www.mofcom.gov.cn/aarticle/hyxx/fuwu/201207/20120708224698.html.

中国日报中文网.中国或已达煤炭峰值 再生能源投资激增[EB/OL].2015-03-03,http://caijing.chinadaily.com.cn/2015-03/03/content_19700634_5.htm.

② 2006年,中国钢铁产业协会的预测是:a.依据《“十一五”国民经济和社会发展规划纲要》关于GDP增长7.5%的考虑,预测2010年粗钢消费4.7亿吨(钢材4.4亿吨)。b.根据各省区市人大通过的地方“十一五”发展规划,汇总得到的GDP总量,预测2010年钢消费为5.6亿吨。c.根据国家宏观调控要求,“十一五”前三年和后两年GDP分别按9%和7.5%的增长率预测,2010年钢消费4.9亿吨。

2007年,中国钢铁产业协会组织冶金工业规划研究院、冶金工业经济发展研究中心和冶金工业信息标准研究院三家单位分别进行了研究,结果是:a.冶金工业规划研究院预测2010年粗钢消费量最大值为5.6亿吨,最小值为4.96亿吨,最可能值为5.49亿吨;b.冶金工业经济发展研究中心预测2010年粗钢消费量最大值为51450万吨,最小值为49930万吨,中间值为50690万吨;c.冶金工业信息标准研究院预测2010年粗钢消费量最大值为55737万吨,最小值为53121万吨,最可能值为54674万吨。据此结果,中国钢铁产业协会推荐2010年中国粗钢需求预测值最小为5.1亿吨,最大为5.5亿吨。