

高Cr铁素体耐热钢 相变过程及强化

严泽生 刘永长 宁保群 著



科学出版社

www.sciencep.com

高 Cr 铁素体耐热钢相 变过程及强化

严泽生 刘永长 宁保群 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了铁素体耐热钢的发展概况及研究现状,从材料的开发、性能、组织结构、强化机理和生产应用等方面对目前世界超高压发电厂采用的典型钢种作了全面阐述。以其中的代表钢种 T91 为例,重点阐述了加热和冷却过程中各工艺因素对其相变过程的影响,在此基础上从合金化和生产工艺等方面着手,探讨采用新的高温强化方法来提高铁素体耐热钢的使用温度,并从成分设计、热处理工艺、组织演化规律及机理等方面予以论证。

本书可供材料科学、冶金工业和动力工程专业的科研人员、工程技术人员及高等学院相关专业的师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

高 Cr 铁素体耐热钢相变过程及强化/严泽生、刘永长、宁保群著.

—北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-023097-3

I. 高… II. ①严…②刘…③宁… III. 铁素体钢:耐热钢-相变-研究 IV. TG142.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 151973 号

责任编辑:吴凡洁 / 责任校对:钟 洋

责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

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>

铭浩彩色印装有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 2 月第 一 版 开本:A5(890×1240)

2009 年 2 月第一次印刷 印张:4 1/8

印数:1—2 500 字数:121 000

定价:32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

前 言

据报道,2020 年我国发电装机容量将达 $9.5 \times 10^9 \text{ kW}$,其中火力发电容量仍将占很大比例。近年来,为解决日益突出的能源短缺及环境污染问题,世界各国火力发电机组多采用逐步提高蒸汽工作温度的方法来提高热效率。因此,采用先进技术和工艺提高耐热钢的蒸汽使用温度,以期提高锅炉管热交换效率的研究具有相当重要的意义。

本书对超高临界压发电厂锅炉管用高 Cr 铁素体耐热钢作了详实、系统的叙述。书中以其代表钢种——综合性能优异的 T91 钢为例,深入细致地研究了其不同实验条件下的相变过程,并在此基础上研发出了新型铁素体耐热钢来进一步提高使用温度。开展的理论研究工作主要包括以下内容:通过高精度线膨胀仪记录体积效应,获得 T91 钢相变过程中的动力学信息;结合现代材料分析方法,研究加热过程中奥氏体状态、冷却过程中的冷却速度、不同温度等温停留和不同温度施加应力等因素对 T91 钢相变的影响,澄清了 T91 钢相变过程及组织演化规律。为了达到提高电厂热效率的目的,进一步提高其使用温度和许用应力,是铁素体耐热钢发展的必然趋势。所以,在以上研究的基础上,还需进一步探讨奥氏体未再结晶区变形对铁素体耐热钢组织和性能的影响,通过成分设计与控轧控冷工艺相结合,探索强化铁素体耐热钢的新途径,力争开发出 650°C 蒸汽温度下使用的新型钢材,为国产化生产建立系统深入的理论基础,并提出切实可行的发展方向,以此推动我国冶金制造产业和电力事业的发展。

全书共分 8 章,第 1~3 章由天津钢管集团股份有限责任公司严泽生教授级高工负责撰写,第 4~6 章由天津理工大学宁保群博士负责撰写,第 7~8 章由天津大学刘永长教授撰写。本书收录了课题组在铁素体耐热钢研究的主要成果,前期得到了天津市自然科学基金重点项目(No. 033608811)和高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金项目

(No. 200335) 的资助,在国家基金钢铁联合基金重点项目(No. 50834011)的资助下完成了全书的进一步整理和通稿工作。在本书的撰写过程中,天津大学材料复合与功能化教育部工程中心的余黎明副教授、董治中副教授,天津钢管集团股份有限公司的付继成教授级高工、史庆志博士都提供了大力协助,在此向他们的辛勤劳动表示诚挚的谢意!

基于超(超)临界压火力发电站发展的高 Cr 铁素体耐热钢系尚处于研究和开发阶段,相关成分设计、组织优化和形变热处理强化工艺还不完善,再加上作者水平有限,书中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

2008 年 11 月

目 录

前言

第 1 章 超临界压火力发电站的发展	1
1.1 火力发电简介	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 发展前景	2
1.2 超临界压火力发电站的发展	2
1.2.1 国外超(超)临界机组的发展	3
1.2.2 我国超(超)临界机组的发展	3
第 2 章 锅炉管用耐热钢的性能和发展方向	5
2.1 电站锅炉关键部件的用钢要求	6
2.2 锅炉用钢的基本性能	7
2.3 锅炉用钢的发展方向	8
2.4 锅炉管用铁素体耐热钢的研究现状	9
2.4.1 研究概况	9
2.4.2 高 Cr 铁素体耐热钢的发展简介	11
第 3 章 高 Cr 铁素体耐热钢的代表钢种——T91 钢	19
3.1 合金设计	19
3.2 组织特征	20
3.2.1 T91 铁素体耐热钢组织形貌	20
3.2.2 T91 铁素体耐热钢强化方式	21
3.3 性能特点	24
3.4 铁素体耐热钢在我国的应用情况	26
3.4.1 应用现状	26
3.4.2 发展前景	27
第 4 章 奥氏体化过程的研究	30
4.1 线膨胀曲线测定组织转变量的基本原理	30

4.1.1	热膨胀法	30
4.1.2	杠杆定律	31
4.2	奥氏体化过程分析	33
4.2.1	奥氏体化试验	33
4.2.2	线应变量变化分析	34
4.2.3	奥氏体体积分数的确定	35
4.2.4	奥氏体化速率的变化	37
4.3	正火后室温组织分析	40
4.4	加热过程中碳化物溶解过程	43
4.5	连续加热奥氏体化转变图	47
第 5 章	连续冷却过程中固态相变的研究	49
5.1	临界冷却速度的确定	50
5.1.1	线应变量变化分析	50
5.1.2	转变产物体积分数确定	50
5.1.3	不同冷却速度下的组织演变	54
5.1.4	马氏体相变临界冷却速度的确定	56
5.2	淬火速度对马氏体相变的影响	59
5.2.1	马氏体相变开始温度的确定	59
5.2.2	淬火速度对马氏体转变开始温度的影响	61
5.2.3	淬火速度对马氏体组织的影响	63
5.3	连续冷却转变图	65
第 6 章	奥氏体稳定化过程及内在机制	67
6.1	奥氏体稳定化试验	67
6.2	稳定化过程分析	68
6.2.1	正常连续冷却相变过程	69
6.2.2	M_s 点以上保温	69
6.2.3	M_s 点以下保温	72
6.3	奥氏体稳定化机理	74
6.3.1	M_s 点以上保温	74
6.3.2	M_s 点以下保温	77
6.4	稳定化程度	82

第 7 章 外加微小应力下马氏体相变过程分析	84
7.1 外加微小应力下相变过程分析	84
7.1.1 试验参数设定	84
7.1.2 线应变变量变化的分析	86
7.1.3 马氏体相变开始点的确定	86
7.1.4 不同温度下 M_s 点与应力的关系	90
7.2 外加微小应力下相变机制的研究	93
7.2.1 应变诱发马氏体相变	93
7.2.2 应力诱发马氏体相变	94
7.3 外加微小应力下试样典型组织	96
第 8 章 650℃ 蒸汽温度使用下的铁素体锅炉用钢的研发	99
8.1 铁素体耐热钢的进一步发展方向	99
8.1.1 铁素体耐热钢前沿科学问题	99
8.1.2 形变热处理工艺的应用	100
8.2 强化机理说明	103
8.3 强化工艺探索	105
8.3.1 试验过程	105
8.3.2 形变热处理后组织特征	106
8.4 性能测试	112
参考文献	114

第 1 章 超临界压火力发电站的发展

1.1 火力发电简介

1.1.1 概述

火力发电厂简称火电厂,是利用煤、石油、天然气作为燃料生产电能的工厂。火电厂主要组成部分如下:

- (1) 锅炉及附属设备,确保燃料的化学能转化为热能。
- (2) 汽轮机及附属设备,确保热能变为机械能。
- (3) 发电机及励磁机,确保机械能变为电能。
- (4) 主变压器,把电能提升为高压电输送给输电线路。

火电厂种类很多。按装机容量的大小,电厂分为小容量发电厂(100MW 以下)、中容量发电厂(100~250MW)、大中容量发电厂(250~1000MW)、大容量发电厂(1000MW 以上);按燃料的不同,可分为燃煤、燃油和燃气等几类火电厂;按蒸汽压力和温度可分为低压发电厂(3.92MPa,450℃)、高压发电厂(9.9MPa,540℃)、超高压发电厂(13.83MPa,540℃)、亚临界压力发电厂(16.77MPa,540℃)、超临界压力发电厂(22.11MPa,550℃);按照原动机的不同,可分为凝汽式汽轮机发电厂、燃气轮机发电厂、内燃机发电厂、蒸汽-燃气轮机发电厂等;按输出能源的不同可分为凝汽式发电厂(只发电)、热电厂(发电兼供热),前者安装凝汽式机组,后者安装供热机组(也称热化机组)。

火电厂的种类虽然很多,但从能量转换的观点分析,其基本过程则都是相同的,即燃料在锅炉中燃烧将水加热成蒸汽,将燃料的化学能转变成热能,蒸汽压力推动汽轮机旋转,热能转换成机械能,然后汽轮机带动发电机旋转,将机械能转变成电能。

1.1.2 发展前景

“能源、环境、发展”是 21 世纪人类所面临的三大主题。世界能源短缺问题已经在大多数国家甚至全球范围内出现^[1]。能源供应短缺或价格上涨必将成为阻碍国家经济持续发展的重大问题,除予以足够的重视外,必须采取有效措施着手解决。

火力发电多以煤为燃料,煤属于不可再生资源,而且造成的环境污染比较大,燃烧后排放大量的有害气体,包括烟尘、二氧化碳、二氧化硫;机组运转时还可产生大量热量和水蒸气,影响附近地区的生态环境。所以火力发电行业面临的主要问题是节能降耗,减少污染^[2,3]。表 1.1 给出了蒸汽参数与火电厂效率、供电煤耗关系。

表 1.1 蒸汽参数与火电厂效率、供电煤耗关系^[3]

机组类型	蒸汽压力/MPa	蒸汽温度/℃	电厂效率/%	供电煤耗/(kW·h)
中压机组	3.5	435	27	460
高压机组	9.0	510	33	390
超高压机组	13.0	535/535	35	360
亚临界机组	17.0	540/540	38	324
超临界机组	25.5	567/567	41	300
高温超临界机组	25.0	600/600	44	278
超(超)临界机组	30.0	600/600/600	48	256
高温超(超)临界机组	30.0	700	57	215
超 700℃ 机组		超 700	60	205

从表 1.1 中的数据可以看出,随着蒸汽温度和压力的提高,电厂的效率大幅度提高,供电煤耗大幅度下降,其中高效率、高参数的超临界和超(超)临界火电机组对于提高火力发电厂效率作用是十分明显的。

1.2 超临界压火力发电站的发展

当汽轮机进口蒸汽参数超过水临界状态点的参数(压力为

22.129MPa、温度为374.12℃)时,统称为超临界机组,用SC(supercritical)表示。一般超临界机组的蒸汽参数:压力 p 为24~26MPa,温度 T 为540℃/540℃、540℃/566℃、566℃/566℃,相应的机组热效率为41%~42%。超(超)临界参数实际上是在超临界参数的基础上进一步提高蒸汽压力和温度,国际上通常把主蒸汽压力在24.1~31MPa,主蒸汽温度/再热蒸汽温度在580~600℃/580~610℃的机组定义为高效超临界(high efficiency supercritical)机组,即通常所说的超(超)临界机组,以USC(ultra supercritical)表示。超(超)临界机组具有能耗低、环保性能好、技术含量高的特点,机组热效率能够达到45%左右,实现了电能生产的“高效、洁净、经济、安全”的要求^[4]。

1.2.1 国外超(超)临界机组的发展

目前,全世界已投入运行的超临界及以上参数的发电机组有600多台,其中属于超(超)临界参数的机组有60余台。美国已运行的超临界机组总数有170多台,目前正在进行新一代(760℃)的用于超(超)临界参数机组的锅炉材料研究计划,以开发蒸汽温度和压力更高的机组;日本发展的超临界机组首先引进美国和欧洲的技术,并进行二次开发创新,日本现已跃居世界发展超临界技术的先进国家行列。日本450MW以上的火力发电机组全部采用超临界或超(超)临界机组,总数有60余台,其容量占总装机容量的61%。而日本各制造公司正着手对参数为34.5MPa/620℃/650℃、31MPa/593℃/593℃/593℃和34.4MPa/649℃/593℃/593℃的超(超)临界机组进行全面的研究,力求其相对热效率提高10%以上;俄罗斯300MW以上容量机组全部采用超临界参数,共有超临界机组280余台。在欧洲大约有60台超临界机组,大部分在德国、意大利、荷兰和丹麦。欧洲COST522计划开发应用铁素体钢的蒸汽参数为29.4MPa/620/650℃的超(超)临界机组。“Thermie700℃计划”旨在开发蒸汽参数达37.5MPa/700/700℃的超(超)临界机组,其效率可达52%~55%。

1.2.2 我国超(超)临界机组的发展

从20世纪80年代末至今,我国从国外进口超临界机组共20台,总

容量 11400MW。2020 年我国装机容量将达到 $9.5 \times 10^9 \text{ kW}$, 其中火电装机仍然占 70%, 即今后 12 年将投产 $4.0 \times 10^9 \text{ kW}$ 左右的火电机组。我国火电建设同样是发展高效率、高参数的超临界和超(超)临界火电机组^[4]。

我国发展超(超)临界机组的意义在于:

(1) 拉动我国国民经济发展的需要。发展超(超)临界机组有利于进一步提高我国电站设备的设计和制造水平, 有利于我国电站设备制造企业持续深入的发展。

(2) 提高火电机组水平, 实现我国电力工业技术跨越式发展的需要。发展超(超)临界机组是提高我国火电机组技术水平最有效又现实的措施。新一代大容量超(超)临界机组具备优良的经济性能、启动调峰运行性能和良好的环保性能。

(3) 保护环境, 节约一次能源的需要。

(4) 缓解电力供应紧张局面, 满足工业基础和居民生活用电的需要。

第 2 章 锅炉管用耐热钢的性能和发展方向

耐热钢的发展与能源、动力机械的进步有着密切的关系。在火力发电、原子核能、宇航、航空、石油和化工等新技术开发领域中,耐热钢性能的优劣是其成功与否的关键性环节,因此耐热钢的重要性日益提高。特别是近年来为解决日益突出的能源短缺及环境污染问题,高效率的超(超)临界压发电在国际上成为热门话题。世界各国火力发电机组参数正由亚临界参数(16.77MPa、540℃)向超临界参数(25.0MPa、540~566℃;24.0~30.0MPa、580~610℃)及其以上发展,这样热效率可提高6%~7%。改善热效率主要是解决热动力问题,图 2.1 显示了通过提高蒸汽参数,即提高蒸汽压力和温度来提高电厂效率的情况,在 535℃ 的温度区间,压力提高到 30MPa 后热效率提高约 1.9%,而温度提高到 650℃ 热效率可提高 5.7%,压力和温度的同时增长可使热效率提高大于 8%。因此,电厂主要是通过提高蒸汽温度来提高热效率。蒸汽温度的提高对

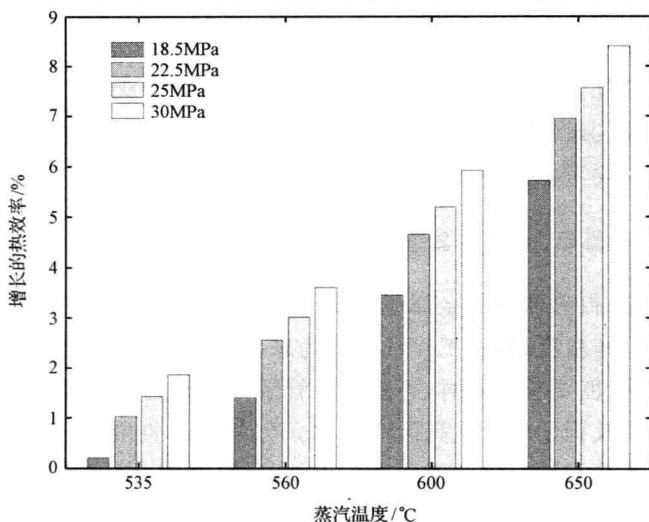


图 2.1 电厂效率和蒸汽参数的关系^[8]

发电机组锅炉管用钢的使用性能提出了更高的要求,因此采用各种各样的先进技术和工艺手段,进一步提高耐热钢的蒸汽使用温度,以期提高锅炉管热交换效率的研究势在必行,目前各国都在积极开展新型耐热钢材的研究与开发^[1~12]。

2.1 电站锅炉关键部件的用钢要求

超(超)临界电厂锅炉的关键部件主要指水冷壁管、过热器管、再热器管及联箱与管道等,这些部件运行在恶劣的工况条件下,有很高的用钢要求^[3,12]。

1. 水冷壁管

水冷壁管用钢一般应具有一定的室温和高温强度、良好的抗疲劳性和抗腐蚀性,并要有好的工艺性能,尤其是要具有优良的焊接性能^[3]。

通常超(超)临界锅炉都采用膜式水冷壁。膜式水冷壁组件尺寸及结构的特点使其焊后不可能在炉内进行热处理,故所选用钢材的焊接性能至关重要。要在焊前不预热、焊后不热处理的条件下,满足焊后热影响区硬度不大于 360HV、焊缝硬度不大于 400HV 的有关规定,以保证使用的安全性。另外,水冷壁管内介质是汽液两相,管外壁又是炉膛燃烧时煤粉颗粒运动速度最快的区域,积垢导致的管壁温度升高和燃烧颗粒冲刷都是选用钢材要考虑的问题^[3,13]。

2. 过热器管、再热器管

过热器、再热器管的金属壁温比蒸汽温度高出 30℃ 左右,在高参数锅炉中是工作温度最高、工作环境最为恶劣的部件,所用钢材在满足持久强度、蠕变强度要求的同时,还要满足管子外壁抗烟气腐蚀及抗煤粉颗粒腐蚀的性能及管子内壁抗高温高压水蒸气氧化的性能,并具有良好的冷热加工工艺性能和焊接性能。由此可见,过热器管、再热器管用钢的开发是发展超(超)临界锅炉的技术关键之一。随着锅炉蒸汽温度的升高,其温度将继续被提高,这就需要耐热性更好的钢材^[3,14]。

3. 联箱与管道

由于联箱(末级过热器、末级再热器出口联箱)与管道(主蒸汽管道、导汽和再热蒸汽管道)布置在炉外,没有烟气加热及腐蚀问题,管壁温度与蒸汽温度相近。这就要求钢材具有足够高的持久强度、蠕变强度、抗疲劳和抗蒸汽氧化性能,还要具有良好的加工工艺和焊接性能。由于铁素体耐热钢的热膨胀系数小、热导率高,在较高的启动、制动速率下,不会造成联箱、管道厚壁部件严重的热疲劳损坏,所以铁素体耐热钢是联箱、管道的首选钢材。超(超)临界锅炉锅炉蒸汽温度的提高要求使用耐热性好的钢材,这样既可以提高联箱和管道运行的安全性,又可以减少因管壁过厚引起热应力的增加以及给加工过程带来的困难^[3]。

2.2 锅炉用钢的基本性能

具有高蒸汽参数的超(超)临界发电机组对耐热钢提出了更高的要求,耐热钢在高温下表现出不同于常温的复杂行为。由于耐热钢工作环境的特点,在耐热钢的应用中应特别重视其可靠性和安全性。如上所述,电站锅炉管中的耐热钢在高温、高压和蒸汽腐蚀中长期工作,管壁温度比蒸汽温度高几十度,在这样的环境下长期运行,钢材的组织 and 性能将会发生变化。这些变化可能使金属高温性能明显恶化,从而影响设备运行的安全性。这一切要求超高临界压发电厂锅炉管用耐热钢应具有如下优良的性能匹配^[13~22]:

- (1) 常温力学性能。高的抗拉强度和屈服强度,良好的冲击韧性。
- (2) 高温性能。优异的高温持久性能、抗蠕变性能,良好的高温组织稳定性。
- (3) 化学性能。良好的高温抗氧化性能、抗蒸汽腐蚀性能。
- (4) 工艺性能。优良的冷热加工性能、焊接性能及弯曲性能。
- (5) 物理性能。低热膨胀系数和良好导热性。
- (6) 良好的经济性能。

2.3 锅炉用钢的发展方向

提高蒸汽参数需要强度更高、性能更可靠的耐热钢,为了进一步提高电厂发电机组蒸汽参数和电厂效率,世界各国开展了认证和开发适合在高蒸汽参数下使用的耐热钢的工作。美国、欧洲各国和日本在超(超)临界电站用耐热钢的研发认证上处于绝对领先地位。美国电力研究所(Electrical Power Research Institute EPRI)和欧洲科技合作组织(European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research)项目与欧洲蠕变研究委员会(European Creep Collaborative Committee)及日本电力发展公司(Electrical Power Developing Company)等组织牵头研发认证。它们一方面建立超(超)临界发电机组的耐热钢体系,另一方面完善现有的耐热钢体系并研制开发更先进的耐热钢以弥补现有的不足。材料研发认证工作的重点主要集中于锅炉的热交换器(如高温过热器与再热器)、厚截面高温承压部件(如高温过热器与再热器的进、出口集箱和管道及其附件)及汽轮机转子等。研发的材料主要为 9%~12%Cr 系铁素体钢和奥氏体钢两大类^[11,23]。奥氏体耐热钢具有较好的高温强度、良好的耐腐蚀性能等优点,但其存在价格高、导热性差、热膨胀系数大等缺点,导致生产成本高、温度变化时热应力大、抗热疲劳性差、异种钢接头易过早失效,并在某些环境下易产生应力腐蚀及晶间腐蚀等问题。所以在能保证机组安全运行的条件下,世界各国目前都趋于尽量少用或避免使用奥氏体钢,而采用铁素体耐热钢加工锅炉管、锅炉厚截面部件及汽轮机转子。

美国 EPRI 于 1974 年组织美国橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory)和美国燃烧工程公司(American Combustion Engineering Company)开发出了著名的 T/P91 钢,如今该钢已在世界各国得到公认和广泛应用。1986 年由欧洲各国和日本参加的 RP1403 项目(改进燃煤电厂)研究,研发了电站锅炉厚截面部件用钢,在 T91 钢的基础上开发出了更好的 T92 和 T122 钢。在铁素体钢和奥氏体钢两条路中,前者经历了 Mo 系、Cr-Mo 系、Cr-Mo-V 系、Cr-W-V 系的历程,后者则基本是 Cr-Ni 系、Cr-Ni-Ti 系^[11,23]。

从目前世界各国高蒸汽参数发电机组的发展来看,电站锅炉用耐热钢发展的具体研究开发方向和趋势如下^[11,23~27]:

(1) 重点发展高 Cr(即 9%~12%Cr)多元复合强化耐热钢,主要采用加 W、减 Mo 和以 W 代替 Mo 的合金添加原则。

(2) 将 T91 作为最有前途的用于高温的商业化材料,并部分替代奥氏体不锈钢。

(3) 发展蠕变强度高的铁素体钢制作大型厚壁的非热交换件,以替代奥氏体不锈钢,只有在考虑抗腐蚀和可加工性时才考虑用奥氏体不锈钢制作厚壁件。

(4) 对铁素体钢以提高材料的蠕变断裂强度为主,对奥氏体钢以降低成本、提高抗蒸汽氧化和热腐蚀能力为主,如基于 TP304H 开发的 Super304H。

(5) 改进型的 9%~12%Cr 铁素体钢和奥氏体钢的异种钢焊接问题依然是今后的研究重点。

(6) 发展 20%Cr 和 25%Cr 以上的高 Cr、Ni 合金来制造超临界参数电厂的薄壁热交换管子。

2.4 锅炉管用铁素体耐热钢的研究现状

目前国内外锅炉高温用钢主要是铁素体耐热钢和奥氏体耐热钢两类。数十年的运行经验表明:与奥氏体耐热钢相比,铁素体耐热钢因其优异的综合性能,更加符合锅炉管用钢的综合性能要求,所以是锅炉管用钢的首选钢种^[28~36]。

2.4.1 研究概况

电力设备技术向大功率、高参数方向发展与铁素体耐热钢的发展紧密相关。只有获得具有足够蠕变强度并能承受高压和高温的材料,才能达到理论上的效率增长,所以长期以来国内外科人员不断地进行着铁素体系耐热钢的研制与开发。表 2.1 列出了电厂管道用铁素体耐热钢的概况,从中可以看出,铁素体耐热钢的发展可以分为两条主线,一是纵向的,通过逐渐提高主要耐热合金元素 Cr 的成分含量,即从 2.25Cr 到 12Cr;二是横向的,通过添加 V、Nb、Mo、W 和 Co 等合金元素。表中将它们划分为几个系列:CMn 钢、Mo 钢、低合金 CrMo 钢和 9%~12%Cr 钢。由图 2.2 可以看出,从简单的 CMn 钢到 9%~12%Cr 铁素体耐热