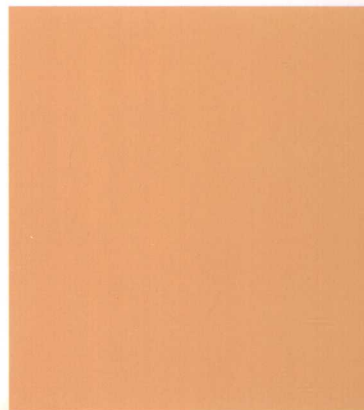


电站耐热材料的选择性 强化设计与实践

DIANZHAN NAIRE CAILIAO DE XUANZEXING
QIANGHUA SHEJI YU SHIJIAN

刘正东 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

电站耐热材料的选择性 强化设计与实践

刘正东 著



北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2017

内 容 简 介

本书总结了电站耐热材料一百余年来的发展脉络,系统介绍了作者根据多年的摸索和工程实践总结出的“选择性强化”设计新观点,针对 600℃-630℃-650℃-700℃-750℃ 不同温度段,开展马氏体耐热钢、奥氏体耐热钢、固溶强化型耐热合金、析出强化型耐热合金的理论探索、实验室研究和工业试制实践情况。

本书可供冶金、机械、电力行业从事电站及其材料技术的工程技术人员参考,也可供大中专院校材料、机械专业的本科生和研究生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

电站耐热材料的选择性强化设计与实践/刘正东著. —
北京:冶金工业出版社,2017.1

ISBN 978-7-5024-7383-9

I. ①电… II. ①刘… III. ①火电厂—耐火材料—研究
IV. ①TQ175.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 310935 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 卢 敏 美术编辑 吕欣童 版式设计 彭子赫

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7383-9

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2017 年 1 月第 1 版,2017 年 1 月第 1 次印刷

169mm×239mm;22.25 印张;434 千字;344 页

65.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

600℃蒸汽参数超超临界燃煤电站是21世纪初期世界最先进商用燃煤电站。通过技术引进,我国2003年开始建设第一台百万千瓦600℃超超临界燃煤发电机组,当时几乎所有高端耐热钢管全部依靠进口,成为我国火电机组建设的瓶颈性制约因素,威胁国家能源安全。在此背景下,2005年11月国家科技部和中国钢铁工业协会在京组建了以钢铁研究总院、宝钢股份公司、攀钢集团公司、哈尔滨锅炉厂、东方锅炉厂、西安热工研究院等为核心单位的中国超超临界火电机组用钢研发战略联盟。2003~2010年,国家科技部持续对我国600℃蒸汽参数超超临界火电机组用高端锅炉钢管研发予以资助。期间,宝钢股份公司与钢铁研究总院签订了超超临界电站用锅炉管产品联合研发和技术攻关协议。截至2010年12月,我国已成功研发了12Cr1MoV、T22、T23、T24、T91、P91、T92、P92、T122、TP347H、TP347HFG、S30432和S31042锅炉钢管,完成了市场准入评审,实现了上述品种的国产化和自主化,并向国内外市场大批量供货。截至2015年底,我国已经建成和在建600℃超超临界燃煤发电机组超过200GW,占世界同类电站的90%以上(但仅占我国同期火电装机的14%左右)。特别是2014年12月17日哈电集团建设的再热温度623℃六十万千瓦级高效超超临界燃煤电站在浙江长兴投运,2015年9月25日上海电气集团建设的623℃两次再热百万千瓦超超临界燃煤电站在江苏泰州投运,以及2016年7月7日哈电集团建设的623℃两次再热百万千瓦超超临界燃煤电站在山东莱芜投运,标志着我国在超超临界燃煤发电技术领域后来居上,已经处于世界领先水平。

尽管我国超超临界燃煤发电技术已经处于世界领先水平，我国在燃煤发电技术创新最前沿没有丝毫停滞。2010年7月23日，国家能源局组织成立了“国家700℃超超临界燃煤发电技术创新联盟”，该联盟由17家中央企业和院所组成，在国家能源局的统一领导下，制订长期计划，分工合作，有序开展700℃超超临界燃煤发电示范工程研制活动。目前，我国630℃蒸汽参数百万千瓦超超临界电站已完成论证，基本具备开工建设条件，将于近期开始建设，正在开展650℃蒸汽参数百万千瓦超超临界电站建设可行性研究。700℃蒸汽参数百万千瓦超超临界燃煤发电技术自2010年起已纳入国家研发计划，各项研究正在有序开展。我国第一个700℃蒸汽参数工程试验台架已于2015年12月30日成功投运。2007年以来，钢铁研究总院联合宝钢股份公司、宝钢特钢公司、抚顺特殊钢公司、太原钢铁公司、内蒙古北方重工业集团公司、上海锅炉厂、哈尔滨锅炉厂、东方锅炉厂、上海汽轮机厂、神华国华电力公司等企业成功自主研制了630~700℃超超临界燃煤电站整套锅炉管用新型耐热材料（包括G115、S31035、C-HRA-3、C-HRA-1等），并成功完成工业化产品研制，具备了向市场供货的条件。目前，钢铁研究总院正在联合上述单位研发630~700℃超超临界燃煤电站汽轮机高温转子、叶片和紧固件等用耐热材料。

耐热材料技术是支撑超超临界燃煤电站的最重要基础和关键所在。矿物质在相当长的历史时期内都将是人类电力供应的主要来源，因此对燃煤能量的高效、可控、环保利用在相当长的时间内仍将是人类科技探索的主要领域之一。耐热材料技术是燃煤能量高效、可控、环保利用的关键中之关键，因此世界主要工业国家均把电站耐热材料技术的研发列为国家战略性科技计划，我国亦然。在国家科技部、国家能源局、中国钢铁工业协会等的支持和领导下，我国用15年的时间完成了超超临界燃煤电站用关键耐热材料技术从仿制跟踪到自主创新的技术飞跃，目前正处于走向超越领先的关键阶段。在过去15年间，我国

不仅在超超临界燃煤电站用关键耐热材料产品研制方面取得了巨大进展,同时也在超超临界燃煤电站用关键耐热材料的设计理论方面有所创新,发展了“多元素复合强化”设计理论,提出了“选择性强化设计”新观点,并付诸工业实践,历经检验。

本书是2007~2016年间我国600℃-630℃-700℃蒸汽参数超超临界燃煤电站示范工程用新型耐热材料自主化研制和创新过程的阶段性总结,侧重于新型耐热材料的选择性强化设计及新型耐热材料产品的实验室研究和工业规模实践。本书共分为7章。第1章介绍了电站耐热材料的百年发展史,第2章介绍了钢铁研究总院刘荣藻教授创立的电站耐热钢的多元素复合强化设计,第3章介绍了600~650℃铁素体耐热钢的选择性强化设计与实践进展情况,第4章介绍了600~680℃奥氏体耐热钢的选择性强化设计与实践进展情况,第5章介绍了650~700℃固溶强化型耐热合金的选择性强化设计与实践进展情况,第6章介绍了650~750℃时效强化型耐热合金的选择性强化设计与实践进展情况,第7章对600~700℃超超临界燃煤示范电站选材问题进行了简单讨论。由于作者的知识和技术水平有限,书中错误难免,恳请读者批评指正。

作者非常感谢国家科技部2003~2016年间通过2003AA331060、2006AA03Z513、2007BAE51B02、2008DFB50030、2010CB630804、2012DFG51670、2012AA03A501等科技项目对我国超超临界燃煤发电机组用耐热材料技术研究的大力支持!感谢国家能源局通过国家能源应用技术研究及其工程示范项目对我国超超临界燃煤发电机组用耐热材料技术工程化的支持!感谢宝钢集团公司的长期合作和经费支持!

刘正东

2016年7月于北京

目 录

1 燃煤电站耐热材料的百年发展史	1
1.1 燃煤电站蒸汽参数	1
1.2 世界各国超超临界燃煤发电技术发展概况	2
1.3 燃煤发电技术发展对耐热材料的基本要求	3
1.4 铁素体型耐热钢的发展	6
1.5 奥氏体型耐热钢的发展	8
1.6 耐热合金的发展	9
参考文献	10
2 电站耐热钢的多元素复合强化设计	11
2.1 问题的提出	11
2.2 G102 钢的多元素复合强化设计	11
2.2.1 钨钼复合固溶强化	12
2.2.2 钒钛复合时效强化	13
2.2.3 铬和硅的作用	14
2.2.4 硼的作用	15
2.3 G102 钢的热处理、组织与性能	17
2.3.1 G102 钢奥氏体分解后的金相组织	17
2.3.2 G102 钢正火温度和时间的影响	18
2.3.3 G102 钢正火后冷却速度的影响	19
2.3.4 G102 钢回火温度的影响	20
2.4 多元素复合强化设计对后续铁素体型耐热钢研发的指导意义	21
参考文献	21
3 600~650℃铁素体耐热钢的选择性强化设计与实践	23
3.1 9%~12%Cr 马氏体耐热钢强韧化机制解构	23
3.1.1 合金元素在 9%~12%Cr 耐热钢中的作用	23

3.1.2	9%~12%Cr 耐热钢中主要沉淀析出相及其作用	27
3.1.3	影响 9%~12%Cr 耐热钢持久强度退化的主要因素	31
3.2	无 δ 铁素体 9%~12%Cr 马氏体耐热钢设计	35
3.2.1	T/P92 钢中 δ 铁素体控制	37
3.2.2	T/P122 钢中 δ 铁素体控制	40
3.3	T/P92 马氏体耐热钢的组织稳定性研究	46
3.4	650℃ 马氏体原型钢的选择性强化设计与实践	59
3.4.1	9%~12%Cr 马氏体耐热钢技术研发历程	59
3.4.2	9%~12%Cr 马氏体耐热钢设计许用应力下调问题	71
3.4.3	650℃ 马氏体原型钢的选择性强化设计	72
	参考文献	109
4	600~680℃ 奥氏体耐热钢的选择性强化设计与实践	113
4.1	奥氏体耐热钢强韧化解构	113
4.1.1	奥氏体耐热钢的发展历程	113
4.1.2	奥氏体耐热钢的成分设计	114
4.2	无晶间腐蚀 18-8 型奥氏体耐热钢的选择性强化设计	118
4.3	25-20 型奥氏体耐热钢的高韧性设计	130
4.3.1	S31042 奥氏体耐热钢使用中存在的问题	130
4.3.2	25-20 型奥氏体耐热钢化学成分优化设计	132
4.3.3	25-20 型奥氏体耐热钢固溶处理工艺优化设计	145
4.4	新型奥氏体耐热钢 S31035 (Sanicro25) 研发	158
4.4.1	新型奥氏体耐热钢 S31035	158
4.4.2	新型奥氏体耐热钢 S31035 的强韧化设计机理	159
4.4.3	新型奥氏体耐热钢 S31035 的组织性能演变	161
4.4.4	新型奥氏体耐热钢 S31035 的工业试制	179
	参考文献	180
5	650~700℃ 固溶强化型耐热合金的选择性强化设计与实践	182
5.1	固溶强化型 Inconel 617 合金及其研究进展	182
5.1.1	Inconel 617 合金技术条件演变	182
5.1.2	Inconel 617 合金研究现状	184
5.2	用于 700℃ 超超临界锅炉大口径管 C-HRA-3 耐热合金的选择性 强化设计	193
5.2.1	C-HRA-3 合金及其窄范围化学成分与精确控制	194

5.2.2 C-HRA-3 合金管冶炼及制造工艺	199
5.2.3 C-HRA-3 合金管最佳热处理工艺	201
5.2.4 C-HRA-3 耐热合金锅炉管的性能	202
5.3 我国 700℃ 超超临界锅炉 C-HRA-3 大口径管制造工程实践	203
5.3.1 C-HRA-3 合金实验室研究	203
5.3.2 C-HRA-3 合金大口径厚壁管工业试制过程	209
5.3.3 铸态 C-HRA-3 合金热变形试验研究	210
5.3.4 锻态 C-HRA-3 合金热变形试验研究	223
5.3.5 C-HRA-3 合金热处理工艺与组织性能关系研究	231
5.3.6 C-HRA-3 合金大口径厚壁管工业热处理制度研究	241
5.3.7 研制的 C-HRA-3 合金大口径厚壁管全面性能评价	244
5.4 国外 700℃ 超超临界汽轮机转子用耐热合金研究进展	254
5.5 用于 700℃ 超超临界汽轮机高温转子 C700R1 合金选择性强化 设计	260
5.5.1 700℃ 超超临界汽轮机高温转子用 C700R-1 耐热合金选择性 强化设计	262
5.5.2 700℃ 超超临界汽轮机高温转子用 C700R-1 耐热合金精细相 分析	268
参考文献	271
6 650~750℃ 时效强化型耐热合金的选择性强化设计与实践	274
6.1 时效强化型 Inconel 740 合金研究进展	274
6.1.1 Inconel 740 耐热合金的研发	274
6.1.2 Inconel 740 合金的组织稳定性研究及成分改进	276
6.1.3 高温应力对 Inconel 740 合金中析出相的影响	280
6.1.4 晶粒尺寸和晶界 η 相对 Inconel 740 持久寿命的影响	282
6.1.5 Inconel 740 合金的抗蒸汽氧化及煤灰腐蚀研究	282
6.1.6 Inconel 740 合金的焊接性能研究	285
6.2 用于 700℃ 超超临界锅炉小口径管的 C-HRA-1 合金选择性强化 设计	286
6.3 我国 700℃ 超超临界锅炉 C-HRA-1 小口径管制造工程实践	292
6.3.1 C-HRA-1 耐热合金实验室研究	292
6.3.2 C-HRA-1 耐热合金锅炉管工业实践	301
6.3.3 C-HRA-1 耐热合金热加工工艺研究	303
6.3.4 C-HRA-1 耐热合金最佳固溶热处理制度选择	306

6.3.5 C-HRA-1 耐热合金小口径管性能评价	309
6.4 关于 Haynes 282 合金的研究	315
6.4.1 Haynes 282 合金国内外研究现状	315
6.4.2 固溶处理对 Haynes 282 耐热合金组织与硬度影响研究	319
6.4.3 长期时效对 Haynes 282 耐热合金组织和力学性能影响研究	325
参考文献	330
7 600~700℃超超临界燃煤示范电站选材问题	332
7.1 600~700℃超超临界燃煤电站锅炉选材问题	332
7.1.1 超超临界燃煤电站锅炉选材基本准则	332
7.1.2 600℃超超临界燃煤电站锅炉管用耐热钢	332
7.1.3 630℃超超临界燃煤电站锅炉管用耐热钢	333
7.1.4 700℃超超临界燃煤电站锅炉管用耐热材料	334
7.2 600~700℃超超临界燃煤电站汽轮机选材问题	338
7.3 关于 630~700℃超超临界燃煤电站建设可行性问题	340
参考文献	342
后记	343

1 燃煤电站耐热材料的百年发展史

1.1 燃煤电站蒸汽参数

燃煤火发电机组的技术水平可按照其蒸汽参数来划分, 根据参数的高低可依次分为: 低压 ($<2.5\text{MPa}$)、中压 ($3\sim4\text{MPa}/370^{\circ}\text{C}$)、次高压 ($7\sim8\text{MPa}/480^{\circ}\text{C}$)、高压 (10.8MPa)、超高压 (15.7MPa)、亚临界 ($17.5\sim19\text{MPa}/538^{\circ}\text{C}$)、超临界 (Super-Critical, SC) 和超超临界机组 (Ultra-Super-Critical, USC), 蒸汽参数越高机组热效率也越高, 见表 1-1。

表 1-1 蒸汽参数与火电厂效率、供电煤耗关系^[1]

序号	机组类型	蒸汽压力/MPa	蒸汽温度/ $^{\circ}\text{C}$	电厂效率/%	供电煤耗/ $\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$
1	中压机组	3.5	435	27	460
2	高压机组	9.0	510	33	390
3	超高压机组	13.0	535/535	35	360
4	亚临界机组	17.0	540/540	38	324
5	超临界机组	25.5	567/567	41	300
6	高温超临界机组	25.0	600/600	44	278
7	超超临界机组	30.0	600/600/600	48	256
8	高温超超临界机组	35.0	700	57	215
9	超 700 $^{\circ}\text{C}$ 机组	35.0	超 700	60	205

在工程热力学中水的临界点参数是: 22.115MPa 和 374.15°C , 在此参数之上, 水和汽之间没有明显的物理界面, 称为超临界状态。在此参数以上运行的机组称为超临界机组。对于超超临界, 物理上并没有明确对应的点。对超超临界机组, 各国也没有统一的定义。我国国内普遍认为当水蒸气压力 $\geq 27\text{MPa}$ 或温度 $\geq 580^{\circ}\text{C}$ 时则可称为超超临界机组。一般而言, 亚临界机组热效率 $<39\%$, 超临界机组热效率 $<42\%$, 超超临界机组热效率根据具体的蒸汽参数和其他影响因素不同在 40% 以上, 我国建设的第一台超超临界机组 (玉环电厂: $26.25\text{MPa}/600^{\circ}\text{C}/600^{\circ}\text{C}$) 的设计热效率为 45.01% 。

1.2 世界各国超超临界燃煤发电技术发展概况

燃煤火电机组的发展已历百年，发达国家超临界机组运用已有 60 年历史，20 世纪 50 年代，苏联、美国、西德、日本相继研制超（超）临界火电机组。由于当时耐热钢性能达不到设计要求，这些机组后来不得不退回到超临界参数运行，经历了痛苦的超超临界-超临界-超超临界过程。70 年代，世界能源危机的发生促使工业发达国家重新对超超临界火电机组发生了兴趣，开始对超超临界火电机组用耐热钢重新进行系统研究。70 年代末，包括 T91 在内的一系列新型耐热钢开发成功，火电机组才由超临界成熟地进入低参数超超临界阶段。90 年代初期，日本和欧洲开始批量建设超超临界火电机组，进一步开发更高参数的超超临界火电机组。

1950~2025 年中国火电机组蒸汽参数发展历史和预测情况绘制于图 1-1。我国从 1992 年开始从国外引进超临界燃煤发电技术，进入 21 世纪以来，开始引进和建设 600℃ 超超临界火电机组。2006 年 11 月，我国第一台 600℃ 超超临界火电机组在浙江玉环成功并网发电，从此中国进入超超临界火电机组建设的快车道。截至 2013 年底，我国已经建成 600℃ 超超临界火电机组 144 台，装机容量达到 122.24GW，占同期世界同类电站的 80% 以上，但仅占我国同期火电装机容量的 14%。600℃ 超超临界燃煤发电技术是迄今最先进的商业燃煤火电技术，实际上我国已经步入燃煤发电技术先进国家行列。

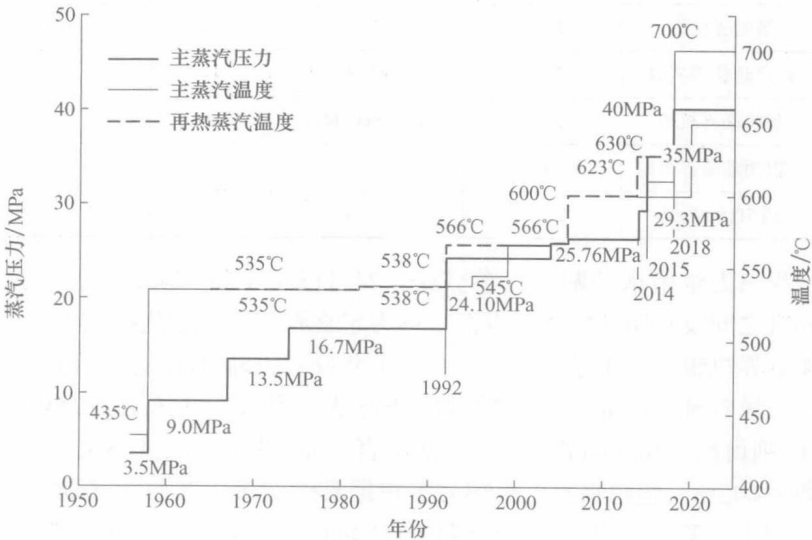


图 1-1 中国火电机组蒸汽参数发展历史和预测情况

近年,我国在大批量建设 600℃ 超超临界火电机组的同时,也开展了超 600℃ 蒸汽参数超超临界火电机组建设的探索和实践。在充分挖掘现有耐热钢潜力的基础上,哈尔滨锅炉厂在华能集团浙江长兴电厂建设了蒸汽压力 29.3MPa、蒸汽温度 600℃、再热温度 623℃ 的 660MW 高效超超临界火电机组。该机组已于 2014 年 12 月 17 日投入商业运行。该机组热效率达到 46%,供电煤耗 278g/(kW·h),比常规超超临界火电机组的热效率高近 2%,发电煤耗减少 9g/(kW·h),每年可节约电煤 3 万吨,减排 CO₂ 约 10 万吨。再热温度 620℃ 等级的高效超超临界火电机组在中国已经进入批量建设阶段。2015 年 4 月神华集团高资电厂计划新建的高效超超火电机组的设计蒸汽压力为 35MPa、蒸汽温度为 610/630/630℃,该参数再次刷新了商用超超临界火电机组运行温度上限。

700℃ 超超临界燃煤发电技术是欧、美、日、韩、中正在研发的新一代高效清洁燃煤发电技术,耐热合金及其部件研制是该技术的瓶颈问题,是世界性技术难题。700℃ 超超临界电站较 600℃ 机组热效率提高 10% (达到 46% 以上),进一步降低约 40g/(kW·h) 煤耗,进一步降低 10% 以上的 CO₂、SO₂ 等污染物排放,具有巨大的经济和社会效益。

1.3 燃煤发电技术发展对耐热材料的基本要求

发展高效率超临界、超超临界火电机组的关键技术之一就是解决锅炉受热面管、联箱、汽水分离器及蒸汽管道用耐热材料问题。超超临界火电机组锅炉管长期在高温高压腐蚀环境下工作,典型工况时锅炉管内为流动的 600~700℃ 和 25.4~35MPa 高温高压水蒸气,锅炉管外为多种高温煤灰环境(向火面),一般设计要求锅炉管的使用寿命为 30 年。要求电站锅炉材料具有高热强性、抗高温流动超临界蒸汽腐蚀、抗高温烟气氧化腐蚀、良好焊接性和冷热成型工艺性。对电站锅炉材料性能的基本要求如下:

- (1) 满足部件工作温度的需要;
- (2) 工作温度下具有高的持久强度、蠕变强度或抗松弛性能;
- (3) 组织稳定,无常温脆性和长期时效脆性;
- (4) 抗蒸汽氧化、烟气腐蚀及应力腐蚀;
- (5) 易于冷、热加工;
- (6) 异种材料焊接工艺能保证其应有的性能及焊接现场工艺适应性;
- (7) 相对低的材料价格和制造成本。

超超临界火电机组锅炉耐热材料可分为三大类:铁素体型钢(包括珠光体、贝氏体和马氏体及双相钢)、奥氏体型钢和耐热合金。一般而言,奥氏体型钢比铁素体型钢具有更高的热强性,但奥氏体型钢的线膨胀系数大、导热性能差、抗

应力腐蚀能力低、工艺性差,热疲劳和低周疲劳(特别是厚壁件)性能也比不上铁素体型钢,且材料成本相对较高。而当蒸汽温度进一步提升到 650~700℃ 时,锅炉过热器、再热器和集箱等部件将不得不选用昂贵的耐热合金。

电站锅炉用钢的发展已历经百年,其发展过程起伏跌宕、波澜壮阔。由于电站锅炉用钢属于国家的战略性技术,与国民经济发展和国防建设密切相关,美、日、欧等工业发达国家均制订了长期发展规划,并由国家出面组织实施。衡量电站用锅炉材料技术先进性最直接的指标是持久强度。典型锅炉耐热材料的化学成分列于表 1-2。

表 1-2 典型锅炉耐热材料化学成分 (质量分数,%)

耐热材料	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	Nb	V	Ti	N	B	Cu	Fe
G102	0.08~ 0.15	0.45~ 0.75	0.45~ 0.65	1.6~ 2.1	—	0.5~ 0.65	0.3~ 0.55	—	0.18~ 0.28	0.08~ 0.18	—	< 0.008	—	余
T23/P23 (HCM2S)	0.04~ 0.10	≤ 0.50	0.10~ 0.60	1.9~ 2.6	—	0.05~ 0.30	1.45~ 1.75	0.08~ 0.20	0.20~ 0.30	—	≤ 0.030	0.0005~ 0.006	—	余
T24/P24	0.05~ 0.10	0.15~ 0.45	0.30~ 0.70	2.2~ 2.6	—	0.90~ 1.10	—	—	0.20~ 0.30	0.05~ 0.10	≤ 0.012	0.0015~ 0.007	—	余
T91/P91 (HCM9S)	0.08~ 0.12	0.20~ 0.50	0.30~ 0.60	8.0~ 9.5	≤ 0.40	0.85~ 1.50	—	0.06~ 0.10	0.18~ 0.25	—	0.03~ 0.07	—	—	余
T92/P92 (NF616)	0.07~ 0.13	≤ 0.50	0.30~ 0.60	8.5~ 9.0	≤ 0.40	0.30~ 0.60	1.50~ 2.00	0.04~ 0.09	0.15~ 0.25	—	0.03~ 0.07	0.001~ 0.006	—	余
X20CrMoV121	0.2	0.5	1.0	12.0	0.5	1.0	—	—	0.3	—	—	—	—	余
Ti22/P122 (HCM12A)	0.07~ 0.14	≤ 0.50	≤ 0.70	10.0~ 12.5	≤ 0.50	0.25~ 0.60	1.50~ 2.50	0.04~ 0.10	0.15~ 0.30	—	0.04~ 0.10	0.0005~ 0.005	0.30~ 1.70	余
E911	0.09~ 0.13	0.10~ 0.50	0.30~ 0.60	8.5~ 9.5	0.10~ 0.40	0.90~ 1.10	0.90~ 1.10	0.06~ 0.10	0.18~ 0.25	—	0.05~ 0.09	—	—	余
TP347H	0.04~ 0.10	≤ 1.00	≤ 2.0	17.0~ 20.0	9.0~ 13.0	—	—	0.32~ 1.00	—	—	—	—	—	余
TP347HFG	0.04~ 0.10	≤ 1.00	≤ 2.0	17.0~ 20.0	9.0~ 13.0	—	—	0.32~ 1.00	—	—	—	—	—	余
S30432	0.07~ 0.13	≤ 0.30	≤ 1.00	17.0~ 20.0	7.5~ 10.50	—	—	0.30~ 0.60	—	—	0.05~ 0.12	0.001~ 0.010	2.50~ 3.50	余
NF709	0.15	0.5	1.0	20	25	1.5	—	0.2	—	0.1	—	—	—	余
S31042	0.04~ 0.10	≤ 0.75	≤ 2.0	24~ 26	17~ 23	—	—	0.2~ 0.6	—	—	0.15~ 0.35	—	—	余
NF707	0.08	0.5	1.0	22	35	1.5	—	0.2	—	0.1	—	—	—	余

续表 1-2

耐热材料	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	Nb	V	Ti	N	B	Cu	Fe
NF12	0.08	0.2	0.5	11	—	0.2	2.6	0.07	0.2	—	0.05	0.004	2.5Co	余
SAVE12	0.10	0.3	0.2	11	—	—	3.0	0.07	0.2	—	0.04	0.07Ta 0.04Nd	3.0Co	余
SAVE25	0.10	0.1	1.0	23	18	—	1.5	0.45	—	—	0.2	—	3.0	余
HR6W	0.08	0.4	1.2	23	43	—	6.0	0.08	0.18	—	—	0.003	—	余
CR30A	0.06	0.3	0.2	30	50	2.0	—	—	—	0.2	—	—	0.03Zr	余
Inconel617	0.06	0.4	0.4	22	54	8.5	—	—	—	—	—	1.2Al	12.5Co	—
Inconel740	0.06	0.5	0.3	25	余	0.6	—	2.0	—	1.7	—	0.9Al	20Co	0.7

火电机组锅炉关键承压部件主要包括水冷壁、过热器、再热器、联箱和蒸汽管道等，这些承压部件运行在较为恶劣的工况条件下，是设计选材关注的重要部位。水冷壁用钢一般应具有一定的室温和高温强度，良好的抗疲劳、抗烟气腐蚀、耐磨损性能，并要有好的工艺性能，尤其是焊接性能。通常超超临界机组锅炉都采用膜式水冷壁。由于膜式水冷壁组件尺寸及结构的特点，其焊后不可能在炉内进行热处理，故所选用的钢材的焊接性至关重要。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 360HV₁₀、焊缝硬度不大于 400HV₁₀的有关规定（TRD201），以保证使用的安全性。另外，水冷壁管内介质是液-气两相流，管外壁又在炉膛燃烧时煤粉颗粒运动速度最快的区域，积垢导致的管壁温升高和燃烧颗粒冲刷都是选用钢材要考虑的问题。随着超超临界机组锅炉蒸汽压力、温度的升高，水冷壁温也会提高，例如在 31MPa/620℃的蒸汽参数下，出口端的汽水温度达 475℃，投运初期中墙温度为 497℃，而垢层增厚后中墙温度可升至 513℃，热负荷最高区域管子壁温可达 520℃，管子的瞬间最高温可达 540℃。

过热器、再热器在高参数锅炉中所处的环境条件最恶劣，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飞灰冲蚀性能、管子内壁抗流动蒸汽氧化性能，并具有良好的冷热加工工艺性能和焊接性能。过热器、再热器管的金属壁温一般可比蒸汽温度高出达 30~50℃（我国规定为 50℃）。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。这就要求钢材应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线膨胀系数小、热导率高，在较高的启停速率下，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。随着超超临界机组锅炉蒸汽温度和压力参数的提高，要求选用持久强度高的钢种，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工艺带来的困难。表 1-3 和表 1-4 分别列出了典型锅炉钢管的服役状态金相组织、常温力学性能和设计许用应力。

表 1-3 典型锅炉钢管的金相组织和常温力学性能 (MPa)

标准	ASME SA-213M								ASME CC2328	ASME CC2115-1	新日铁
钢号	T23	T24	T91	T92	T122	TP304H	TP347H	TP347 HFG	S30432	S31042	NF709
组织	贝氏体	贝氏体	马氏体	马氏体	马氏体	奥氏体	奥氏体	奥氏体	奥氏体	奥氏体	奥氏体
$R_{p0.2}$	400	450	415	440	400	205	205	205	205	295	313
R_m	510	580	585	620	620	515	515	550	550	655	637
A/%	20	20	20	20	20	35	35	35	35	30	30

注：未标明范围者的所有数值均为标准规定的最小值。

表 1-4 典型锅炉钢管的许用应力 (MPa)

钢号	T24	T91	T92	TP304H	TP347H	TP347 HFG	T23	T122	S30432	S31042	NF709
技术标准	ASME SA-213M						CC2199	CC2180	2328	2115-1	新日铁
规定 温度 (℃) 许用 应力	510	115.1	107	132.3	99	91.3	122.6	133.6	85.1	116.1	
	538	111.0	99	126.1	97	99	90.2	127.5	84	114.4	127.9
	566	77.2	89	118.5	82	96	89.6	77.1	115.7	82.7	121.6
	593	46.2	71	93.7	68	93	88.2	57.9	88.9	81.3	110.9
	621	38.6	48	70.3	55	73.5	86.8	37.9	64.1	80.6	93.7
	649		30	47.5	42	54	66.8	9.6	42.7	78.5	69.6
	677						50.3			59.9	52.4
	704				26	30	37.2			44.8	39.3
	732						27.5			32.4	29.6

1.4 铁素体型耐热钢的发展

铁素体型耐热钢的发展历史如图 1-2 所示^[2]。铁素体耐热钢 600℃×10⁵h 持久强度从 60MPa 提升到 180MPa 的过程中主要经历了 4 个阶段，如表 1-5 所示。

以 9%~12%Cr 耐热钢发展为例, 在 20 世纪 60~70 年代, 主要是向 9%~12%Cr 钢中添加了 Mo、V 和 Nb 元素; 在 70~80 年代, 优化了钢中 C、Nb 和 V 元素的含量; 在 80~90 年代用 W 元素取代了钢中部分 Mo 元素; 1995 年以来在最新研发的铁素体型耐热钢中加入了更多的 W 和 Co 元素。

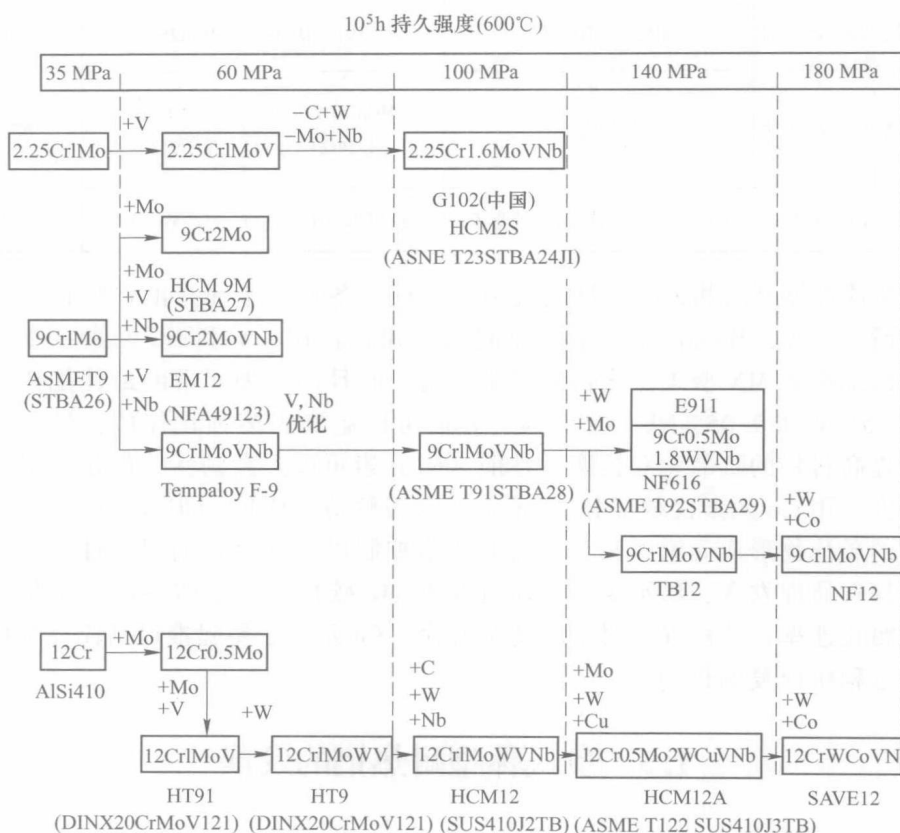


图 1-2 铁素体型耐热钢的发展^[6]

在过去的 50 多年中, 高温高压条件下铁素体耐热钢的使用温度上限从 560℃ 逐步提高到 620℃ 左右。最近十余年, 针对 650℃ 蒸汽条件, 国内外已开发了若干新型铁素体耐热钢, 如 9Cr-3W-3Co (MarBN)^[3]、SAVE12AD^[4] 和 G115^[5] 等, 以及不采用碳化物强化的 18Ni-9Co-5Mo 马氏体时效钢, 但是现阶段还不能确认这些新钢种可成功应用于 650℃ 蒸汽参数电站锅炉的建设, 这些新研发耐热钢的性能稳定性以及现场应用相关问题尚需进一步考核, 而这些工作才刚刚起步。