


超超临界锅炉用P92钢的 组织性能及应用

赵勇桃 著

 冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

要 容 内

超超临界锅炉用 P92 钢的 组织性能及应用

赵勇桃 著

北京
冶金工业出版社
2015

内 容 提 要

本书共分7章,以目前应用较广的超超临界锅炉用P92钢为研究对象,系统介绍了P92钢的动力学图、焊接成型工艺、焊接接头组织及性能、高温力学性能、高温抗氧化性能、高温耐腐蚀性能,并结合P92钢的实际生产工艺,对其不同热处理状态下的组织及性能特点进行了研究。

本书可供从事锅炉生产及工作的相关技术人员阅读,也可供材料科学与工程相关研究领域的科研人员、技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

超超临界锅炉用P92钢的组织性能及应用/赵勇桃著. —北京:冶金工业出版社, 2015. 3

ISBN 978-7-5024-6905-4

I. ①超… II. ①赵… III. ①超临界压力锅炉—耐热钢—研究
IV. ①TK229. 2

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第077556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 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 李 臻 于昕蕾 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6905-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2015年3月第1版,2015年3月第1次印刷

169mm×239mm; 11.25印张; 219千字; 168页

39.00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)

序

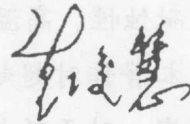
“以煤炭为主体，电力为中心”是我国未来能源发展的一个战略目标。为了提高电厂发电效率，超超临界 P92 钢常常被应用在较高运行参数机组的再热器、过热蒸汽及主蒸汽管道中。对超超临界材料的研究，不仅仅是集中在要提高蒸汽温度和压力参数，还要在材料的其他性能如高温耐蚀性、高温抗氧化性、热加工工艺性等方面提出更高、更新的要求。本著作对超超临界锅炉用 P92 钢的焊接性、高温性能等进行了系统研究，对于延长 P92 钢的实际使用寿命，从而进一步提升发电机组的发电效率奠定了理论基础。

赵勇桃副教授长期以来一直从事金属材料领域的教学与科研工作，致力于对金属材料组织性能控制及热加工工艺的研究。她结合自身近年来的科学研究及实践，撰写了多篇关于 P92 钢的焊接、高温组织与力学性能、高温抗氧化性等方面的学术论文，在国内外专业刊物上发表，并在此基础上，经过系统总结、逐步修改与完善，编写了本书。全书层次分明，语句流畅，条理清楚，行文衔接紧密。该著作以超超临界 P92 钢为研究对象，采用热模拟法，通过对不同冷却速度下的组织、临界点进行分析，得出其焊接 CCT 图；借助焊接 CCT 图，制订合适的焊接工艺对 P92 钢实施焊接，并研究了 P92 钢焊接接头的组织及性能；借助高温拉伸试验，通过对不同拉伸温度下的组织观察及性能测定，确定了 P92 钢的高温断裂机制及高温力学性能指标；通过 P92 钢的高温抗氧化、热腐蚀试验，得出不同工艺条件对 P92 钢的抗氧化性及热腐蚀性的影响规律，并提出了提高抗氧化性、热腐蚀性的有效途径；通过考查不同热处理条件下 P92 钢的组织结构和性能，一方面，确定了不同热处理条件对 P92 钢组织性能的影响规律；另一方面，分

析了高温长期工作时材料内部的显微组织变化规律。在本书中，赵勇桃副教授结合 P92 钢的实际服役环境，有针对性地展开系统研究，提出了一些新的观点及方法，丰富和完善了超超临界锅炉用 P92 钢的基本理论，这不仅可以为 P92 钢的生产加工提供数据支持，而且可以为实际工作中 P92 钢使用寿命的延长提供基础信息和理论依据。

相信本书的出版对从事锅炉生产及工作的技术人员及材料科学与工程相关研究领域的工作者具有一定的指导意义及参考价值。

内蒙古工业大学教授，博士生导师



2015 年 1 月于呼和浩特

前 言

我国一次能源结构具有以煤为主的显著特征，由此决定了我国电力结构以燃煤发电为主的特点。从今后发展来看，在以煤为主的一次能源结构不发生大的变化的前提下，电力结构中火电机组仍将在相当长的时期内占据主导地位。提高发电效率、减少污染、节约资源是我国火电机组的发展方向。

超超临界火电机组具有煤耗低、污染排放物少的节能减排效益，是提高火电机组技术水平，实现火电机组技术优化升级有效而现实的措施，也是火力发电机组发展的必然趋势。超超临界 P92 钢属于含 9% Cr 的铁素体钢，铁素体不锈钢具有的特点是成本低廉、性能优良。P92 钢相对于其他铁素体合金钢具有更强的高温强度和抗蠕变性能。是设计与制造蒸汽轮机的首选结构材料。

超超临界 P92 钢在使用过程中，随着环境条件的变化，性能会出现恶化，如焊接时焊接接头韧性低，630℃ 温度以上抗氧化性下降，在 650℃ 温度下长时间服役强化作用降低等。因此，系统地研究 P92 钢在不同工艺条件下的组织、性能及其变化规律，不仅可以优化 P92 钢的生产成型工艺，提高 P92 钢的使用性能，进而延长机组的使用寿命；而且可以为进一步提高发电机组的发电效率，创造更大的社会效益提供数据支持。

目前，国内外对 P92 钢的相关研究多集中在蠕变、疲劳性能等方面，对 P92 钢的动力学图、高温力学性能变化机理、高温抗氧化性等缺乏系统的研究。本书针对这些难点展开研究，其研究成果是在“内蒙古自治区高等学校科学研究项目 (NJZY13137)”的资助下完成的，此研究成果为实际生产中 P92 钢的研发奠定了坚实的基础。

本书是在作者多年研究 P92 钢的生产工艺、焊接成型、高温性能等所取得成果的基础上，吸收了世界上其他科学家的成果撰写而成的。本书共 7 章，全书由内蒙古科技大学刘宗昌教授主审，在书稿整理过程中，内蒙古科技大学的研究生张韶慧、丁叶、梁子潇、刘野参加了编辑、整理和校对工作，在此表示衷心的感谢！

在撰写本书过程中，参考了许多相关著作和论文，在此谨向这些著作和论文的作者表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限，书中难免有不足及疏漏之处，敬请同行和读者批评指正。

作 者

2015 年 1 月于内蒙古科技大学

目 录

1 热电锅炉用钢的概况	1
1.1 热电锅炉用钢的研究概况	1
1.2 热电锅炉用钢的发展	2
1.2.1 国外发展历程	2
1.2.2 国内发展历程	4
1.3 超临界锅炉用耐热钢的特点	5
1.3.1 耐热钢的性能要求	5
1.3.2 耐热钢的合金化	6
1.3.3 热电锅炉用耐热钢的研制开发	7
1.4 超超临界 P92 钢的概述	8
1.4.1 P92 钢的化学成分	9
1.4.2 P92 钢的生产工艺流程	11
1.4.3 P92 钢的常用热处理方法	13
1.4.4 P92 钢的强化方式	15
1.4.5 P92 钢的特性及其应用	15
1.5 钢的高温性能指标	16
1.5.1 高温力学性能	16
1.5.2 高温抗氧化性能	23
1.5.3 高温热腐蚀性能	31
1.6 P92 钢发展面临的问题及应用前景	36
参考文献	37
2 P92 钢的动力学图	41
2.1 动力学图的测定方法及影响因素	41
2.1.1 膨胀法	41
2.1.2 磁性法	44
2.1.3 热分析法	45
2.1.4 金相法	45

2.1.5	热模拟法	46
2.1.6	动力学图的影响因素	46
2.2	P92 钢的临界点	47
2.2.1	试验方案	47
2.2.2	相变临界点的确定	48
2.3	P92 钢的 CCT 图	48
2.4	P92 钢的焊接 CCT 图	50
2.4.1	焊接热影响区 CCT 图与热处理用 CCT 图的区别	50
2.4.2	焊接 CCT 曲线的测定方案	52
2.4.3	不同冷却速度对 P92 钢组织及硬度的影响	53
2.4.4	P92 钢的焊接 CCT 曲线及分析	58
	参考文献	60
3	P92 钢的焊接	61
3.1	锅炉用钢的焊接性	61
3.1.1	锅炉用钢焊接时对焊接接头的要求	61
3.1.2	P92 钢的化学成分对焊接性的影响	62
3.1.3	P92 钢焊接接头存在的问题及防范措施	63
3.2	P92 钢的焊接试验方案	63
3.2.1	焊接方法	63
3.2.2	焊接工艺	64
3.2.3	P92 钢焊接接头拉伸试验	65
3.3	P92 钢焊接接头的组织及性能	65
3.3.1	P92 钢焊接接头的组织	65
3.3.2	P92 钢焊接接头的硬度	65
3.3.3	P92 钢焊接接头的常温拉伸性能	67
3.3.4	P92 钢焊接接头的拉伸断口形貌	67
3.4	焊后热处理对 P92 钢焊接接头组织及性能的影响	68
3.4.1	焊后热处理工艺	68
3.4.2	焊后热处理对焊接接头组织的影响	68
3.4.3	焊后热处理对焊接接头硬度的影响	70
3.4.4	焊后热处理对拉伸性能的影响	70
3.4.5	焊后热处理对焊接接头的拉伸断口形貌的影响	71
	参考文献	72

4 P92 钢的力学性能	74
4.1 P92 钢的性能	74
4.1.1 P92 钢的性能特点	74
4.1.2 合金元素对 P92 钢性能的影响	75
4.1.3 高温力学性能的研究方法	78
4.1.4 影响高温力学性能的因素	79
4.2 P92 钢的高温力学性能	81
4.2.1 试验方案	81
4.2.2 P92 钢的高温应力 - 应变曲线	81
4.2.3 P92 钢的高温强度	83
4.2.4 P92 钢的高温塑韧性	84
4.3 P92 钢近断口处组织	85
4.3.1 P92 钢在不同拉伸温度下的近断口处组织	85
4.3.2 P92 钢在不同拉伸温度下的析出物	87
4.4 P92 钢在不同拉伸温度的晶粒度	90
4.5 P92 钢在不同拉伸温度下近断口处的硬度	91
4.6 P92 钢的高温断口形貌	92
参考文献	96
5 P92 钢的抗氧化性能	98
5.1 钢的抗氧化性	98
5.1.1 钢的高温氧化膜的构成及变化	100
5.1.2 影响抗氧化性的因素	101
5.1.3 钢的抗氧化性研究方法	102
5.1.4 氧化产物分析技术	102
5.2 P92 钢的抗氧化性研究方案	103
5.2.1 抗氧化试样的制备	103
5.2.2 试验前准备	103
5.2.3 抗氧化试验方案	103
5.3 P92 钢焊接接头高温抗氧化动力学曲线	104
5.4 P92 钢焊接接头高温氧化形貌	105
5.4.1 宏观形貌	105
5.4.2 微观形貌	106
5.5 P92 钢焊接接头的氧化产物	107
5.6 温度对 P92 钢焊接接头氧化过程的影响	109
5.6.1 不同温度下焊接接头氧化动力学曲线	109

5.6.2 不同温度下焊接接头氧化产物截面形貌与成分分析	111
5.7 稀土 Ni - Al 复合涂层对 P92 钢抗氧化性的改善	112
5.7.1 稀土 Ni - Al 复合涂层的制备方案	113
5.7.2 稀土 Ni - Al 复合涂层的表征	115
5.7.3 不同稀土含量 Ni - Al 复合涂层 P92 钢的抗氧化性	122
5.7.4 稀土复合涂层对 P92 钢抗氧化性能的改善	132
参考文献	134
6 P92 钢的耐腐蚀性	135
6.1 金属的耐蚀性	135
6.1.1 金属的腐蚀原理	135
6.1.2 金属腐蚀的分类	137
6.1.3 合金元素对 P92 钢耐腐蚀性的影响	137
6.1.4 金属的热腐蚀	139
6.2 P92 钢的热腐蚀试验方案	140
6.2.1 热腐蚀试样的制备	140
6.2.2 热腐蚀试验	140
6.3 P92 钢的高温热腐蚀动力学曲线	140
6.4 P92 钢的热腐蚀形貌	141
6.4.1 宏观形貌	141
6.4.2 微观形貌	142
6.5 P92 钢热腐蚀层中元素的扩散	143
6.6 P92 钢热腐蚀产物物相分析	144
6.7 腐蚀时间对 P92 钢热腐蚀性的影响	145
6.7.1 腐蚀时间对腐蚀层厚度的影响	145
6.7.2 腐蚀时间对腐蚀产物的影响	145
6.8 腐蚀剂和温度对 P92 钢热腐蚀性的影响	146
6.8.1 腐蚀剂和温度对腐蚀层厚度的影响	146
6.8.2 腐蚀剂和温度对腐蚀层截面形貌及元素扩散的影响	147
6.8.3 腐蚀剂和温度对腐蚀层物相的影响	148
参考文献	151
7 P92 钢的热处理	152
7.1 P92 钢的热处理特点	152
7.1.1 热处理依据	152

7.1.2	P92 钢的淬火	152
7.1.3	P92 钢的回火	153
7.1.4	P92 钢时效处理	154
7.1.5	P92 钢的退火	154
7.2	P92 钢的相变	154
7.2.1	加热转变	154
7.2.2	珠光体转变	155
7.2.3	马氏体转变	155
7.2.4	回火转变	156
7.2.5	脱溶过程	156
7.3	P92 钢淬火组织	156
7.3.1	光学显微组织	156
7.3.2	扫描电镜组织	158
7.3.3	透射电镜组织	158
7.4	P92 钢回火组织	159
7.4.1	低温回火组织	159
7.4.2	中温回火组织	160
7.4.3	高温回火组织	160
7.5	P92 钢的退火组织	161
7.6	P92 钢不同热处理状态下的硬度	162
7.7	P92 钢在淬火及 650℃ 时效不同时间的组织及硬度	162
7.7.1	光学显微组织	162
7.7.2	扫描电镜组织	164
7.7.3	透射电镜组织	165
7.7.4	淬火及时效不同时间的第二相分析	166
7.7.5	时效不同时间的硬度分析	166
	参考文献	168

1 热电锅炉用钢的概况

1.1 热电锅炉用钢的研究概况

在跨入 21 世纪之际，一方面，由于人口增长和经济发展，能源需求不断增加；另一方面，人类活动造成的环境污染日益严重，影响了人类的生存和发展，人类面临着实现经济和社会可持续发展的重大挑战。节约一次能源，加强环境保护，减少有害气体的排放，降低地球的温室效应，已越来越受到国内外的高度重视^[1,2]。为此，要保证整个国民经济和社会的可持续发展，必须解决好发展与节约资源、减少环境污染的矛盾。

电力工业是国民经济可持续发展的先行工业。自 1949 年新中国成立以来的半个多世纪里，我国的电力工业从小到大，至 2002 年我国的电力装机容量和发电量都跃居世界第二位，但人均能源水平落后，仅相当于世界平均值的 70% 左右。提高蒸汽参数与发展大容量机组相结合是提高常规火电厂效率，降低单位容量造价和节能环保最有效的途径。国际能源界普遍认为提高蒸汽参数的超临界燃煤火力发电将是今后世界能源工业的主要发展方向之一。超临界与超超临界机组具有明显的高效、节能和减排的优势，被全世界工业化国家广泛采用^[3]。其可用率、可靠性、运行灵活性和机组的寿命等方面已经可以和亚临界机组相媲美。多年来，电力行业不断通过提高蒸汽温度和压力来进一步提高热效率，这势必导致用传统材料制造的主蒸汽管线、集箱等主要部件管道壁厚的增加。但管道壁厚的增加不仅给焊接、弯管制作及热处理等带来困难，而且限制了运行期间生产操作的灵活性，如对开车、停车过程中最大温度梯度的限定要求更加严格。但是如果不增加管道的壁厚，就要求所选用的管材有更高的蠕变强度、抗氧化性和加工工艺性能等。因此，在过去的 20 多年中，欧洲、美国和日本等先后开展了旨在提高电厂热效率的研究计划，开发了多种新型耐热材料，以满足电厂提高运行温度和压力的需要。在耐热钢的研制与应用方面，美、欧、日一直处于领先地位。近期锅炉、汽轮机组管子用耐热钢的发展与研究表明，世界各国均将主攻方向集中在亚临界、超临界锅炉用的多组元合金化的不锈钢上面。

1.2 热电锅炉用钢的发展

1.2.1 国外发展历程

就目前世界各国的发展情况看, 锅炉和管道用钢的发展可以分为两个方向^[4]: 一是铁素体耐热钢的发展; 另一个是奥氏体耐热钢的发展。所谓珠光体、贝氏体、马氏体耐热钢, 按国际惯例, 统称为铁素体耐热钢。

1.2.1.1 铁素体耐热钢

铁素体耐热钢的发展可以分为两条主线, 一是逐渐提高主要耐热合金元素 Cr 的成分, 从 2.25% Cr 提高到 12% Cr; 二是通过添加 V、Nb、Mo、W、Co 等元素, 使钢的 600℃、10⁵h 蠕变断裂强度由 35MPa 逐步提高到 60MPa、100MPa、140MPa、180MPa。

(1) 低合金耐热钢的开发。20 世纪 50 年代, 电站锅炉钢管大多采用含 Cr 不高于 3%, 含 Mo 不高于 1% 的铁素体耐热钢。当时, 在壁温超过 580℃ 时, 一般都需要使用奥氏体耐热钢 TP304H、TP347H (不高于 700℃), 然而由于其价格昂贵、热导率低、线膨胀系数大及存在应力腐蚀裂纹倾向等缺点, 不可能被大量采用。故世界各国从 20 世纪 60 年代初开始, 进行了长达 30 多年的试验研究, 来开发适用温度为 580 ~ 650℃ 范围内的锅炉用耐热钢。

(2) EM12 钢的开发。20 世纪 50 年代末, 比利时 Liege 冶金研究中心研究了“超级 9Cr”钢, 其化学成分为 9Cr-2Mo, 并添加了 Nb、V 等合金元素, 材料牌号为 EM12, 即法国瓦鲁瑞克公司生产出的 EM12 过热器管。1964 年, 法国电力公司批准 EM12 钢管可用于制造 620℃ 的过热器和再热器, 代替过去使用的不锈钢管。但是, 由于该钢种是二元结构, 冲击韧性差, 后来未得到广泛应用。

(3) 钢 102 的开发。20 世纪 60 年代初, 中国按前苏联的耐热钢系列研究出了钢 102 (12Cr2MoWVTiB), 是一种低合金贝氏体型耐热钢, 主要采用钨钼复合固溶强化, 钒钛复合弥散强化和微量硼的硬化, 推荐使用温度为 620℃。长期使用经验证明, 在低于 600℃ 的工况下该钢具有优良的综合力学性能、抗氧化性能及组织稳定性, 因此其使用温度以低于 600℃ 为宜。主要用于壁温不高于 600℃ 的过热器、再热器管。

(4) T23 (HCM2S)、T24 钢的开发。HCM2S 是在 T22 (2.25Cr-1Mo) 钢的基础上, 吸收了钢 102 的优点而改进得到的。在 600℃ 时的强度比 T22 高 93%, 与钢 102 相当。但由于 C 含量降低, 加工性能和焊接性能优于钢 102, 在一些情况下可以焊前不预热; 当壁厚不大于 8mm 时, 焊后可不进行热处理。该钢已获得 ASME 锅炉压力容器规范 CASE2199 认可, 被命名为 SA213-T23。T24 (7CrMoVTiB10-10) 钢是在 T22 钢基础上进行改进的, 与 T22 钢的化学成分相

比,增加了V、Ti、B含量,减少了C含量,因此降低了焊接热影响区的硬度,提高了蠕变断裂强度。在一些情况下,T24也可以焊前不预热,当壁厚不大于8mm时,焊后可不进行热处理。T23、T24钢是超临界、超超临界锅炉水冷壁的最佳选择材料,并可应用于壁温不高于600℃的过热器、再热器管。

(5) F11、F12钢的开发。20世纪60年代末,德国研究开发12Cr钢、F12(X20CrMoV121)钢和F11(X20CrMoWV121)钢。该钢于1979年正式纳入DIN17175标准,主要用于壁温达到610℃的过热器、壁温达650℃的再热器以及壁温为540~560℃的联箱和蒸汽管道,但其含碳量高,焊接性差。

(6) 典型的新型铁素体耐热钢T91/P91钢的开发。美国能源部委托橡树岭国家实验室(ORNL)与燃烧工程公司(CE)联合研究用于快速中子增殖反应堆计划的钢材,开始改进原有的9Cr1Mo钢,以研究开发一种新的9Cr-1Mo钢,要求这种新钢种综合早期9Cr和12Cr钢的性能,并具有良好的焊接性。到1980年,测试了超过一百种成分的试验样品,最后确定为改良型9Cr-1Mo钢,即T91/P91钢。经试验,该钢在593℃、 10^5 h条件下的持久强度达到100MPa,韧性也较好。从技术和经济角度分析,这种钢与EM12相比,Mo含量减少一半,Nb、V含量也低。1982年,橡树岭国家实验室进行了对比试验,发现这种改进的9Cr-1Mo钢优于EM12和F12。1983年,美国ASME认可了这种钢,称为T91/P91,即SA213-T91/SA335-P91。1987年法国瓦鲁瑞克公司针对T91与F12和EM12的评估技术报告,认为T91/P91有明显优点,强调要从EM12转为使用T91/P91。20世纪80年代末,德国也从F12转向T91、P91。T91钢可用于壁温不高于600℃的过热器、再热器管;P91钢可用于壁温不高于600℃的联箱和蒸汽管道。

(7) T92/P92、T122/P122钢的开发。20世纪90年代初,日本在大量推广T91/P91钢的应用的基础上,发现当使用温度超过600℃时,T91/P91已不能满足长期安全运行的要求。在调峰任务重的机组,管材的疲劳失效也是个大问题。于是日本继续在开发新的大机组锅炉用钢方面做了大量的试验研究工作,目前已生产得到ASME标准认可的有SA213-T92(NF616)/SA335-P92(NF616)、SA213-T122(HCM12A)/SA335-P122(HCM12A),NF616(T92/P92)钢是在T91/P91钢的基础上再加1.5%~2.0%的W,降低了Mo含量,增强了固溶强化效果。在600℃下的许用应力比T91高34%,达到TP347的水平,是可以替代奥氏体钢的候选材料之一。NF616在600℃、 10^5 h下的持久强度可达130MPa。T122/P122(HCM12A)是改进的12Cr钢,添加了2%W、0.07%Nb和1%Cu,固溶强化和析出强化的效果都有很大增加,600℃和650℃的许用应力分别比X20CrMoV121提高113%和168%,具有更高的热强性和耐蚀性,比已广泛使用的F12钢的焊接性和高温强度有进一步改善,尤其是由于含C量的减少,焊接冷

裂敏感性有了改善。

1.2.1.2 奥氏体钢

主要包括以下品种：

(1) 新型细晶奥氏体耐热钢 Super304H 的开发。Super304H 是 TP304H 的改进型，添加了 3% Cu 和 0.4% Nb，从而获得了极高的蠕变断裂强度，在 600 ~ 650℃ 下的许用应力比 TP304H 高 30%，这一高强度是因为在奥氏体基体中同时产生了 (Nb、Cr)N、Nb(N、C)、 $M_{23}C_6$ 和细的富铜相沉淀强化。运行 2.5 年后的性能试验表明，该钢的组织 and 力学性能稳定，而且价格便宜，是超超临界锅炉过热器、再热器的首选材料。

(2) TP347HFG 的开发。TP347HFG 钢是通过特定的热加工和热处理工艺得到的细晶奥氏体耐热钢。虽然 TP347H 钢经高温下正常化固溶处理，其许用应力在 18Cr - 8Ni 钢中最高，然而高的固溶温度使这种钢产生粗晶粒结构，导致蒸汽侧抗蒸汽氧化能力降低。现已开发出一种既可以采用较低的固溶处理温度，使钢具有较细的晶粒，又具有较高蠕变强度的 TP347HFG 钢管。它不但有极好的抗蒸汽氧化性能，而且比 TP347H 粗晶钢的许用应力高 20% 以上。TP347HFG 钢的应用对降低蒸汽侧氧化是一个有前途的对策，已被广泛应用于超超临界机组锅炉过热器、再热器管。

(3) HR3C (TP310NbN) 钢的开发。HR3C 是日本住友金属命名的钢牌号，在日本 JIS 标准中的材料牌号为 SUS310JITB，在 ASME 标准中的材料牌号为 TP310NbN。HR3C 钢是 TP310 耐热钢的改良钢种，通过添加元素铌 (Nb) 和氮 (N)，它的蠕变断裂强度提高到 181MPa。正是由于该钢种的综合性能较 TP300 系列奥氏体钢种的 TP304H、TP321H、TP347H 和 TP316H 中的任何一种都更为优良，所以在 TP347H 耐热钢乃至新型奥氏体耐热钢 Super304H 和 TP347HFG 钢不能满足向火侧抗烟气腐蚀和内壁抗蒸汽氧化的工况下，应选用 HR3C 耐热钢。

除前述的新型钢管外，国际上正流行的锅炉钢管材料还有珠光体 - 铁素体型的 T2、T9、T21、T22 (10CrMo、12Cr2Mo)、T91 (10Cr9Mo1VNb)、T92 (NF616) 和 18Cr - 2Mo 等，奥氏体型的 TP304、TP321、P347、TP347H (1Cr19Ni11Nb) 等。

1.2.2 国内发展历程

截至目前，我国火力发电站用材料经过仿制前苏联 (东欧)、自我创新以及消化引进技术并国产化的三个阶段总共约 40 余年的发展，国内常用的高压锅炉钢管^[5]有 14 种：20G、20MnG、25MnG、15MoG、20MoG、12CrMoG、15CrMoG、12Cr2MoG、12Cr1MoVG、12Cr2MoWVTiB、12Cr3MoVSiTiB、10Cr9Mo1VNb、1Cr19Ni9 和 1Cr19Ni1VNb 等。这类钢的共同特点是含碳量较低，多在 0.025% 以下。

1.3 超临界锅炉用耐热钢的特点

近几十年来,随着机组发电效率要求的不断提高,以及其他高温高压技术的发展,对火电厂的蒸汽涡轮、蒸汽锅炉等机械零部件的要求越来越高。为适应零部件高温高压的要求,故而出现了超临界或超超临界用钢,通常把电站锅炉主蒸汽压力在 28MPa 以上或主蒸汽、再热蒸汽温度在 580℃ 以上的机组定义为超超临界机组 (Ultra Super-critical Unit, USC)。建设超超临界机组较亚临界机组 (主蒸汽压力在 22MPa 以下或主蒸汽、再热蒸汽温度在 560℃ 以下) 的单机供电煤耗约低 20% 以上,电厂净效率至少要高 1.6% 以上^[6]。因此,国际上用于超超临界电站锅炉材料的开发趋于成熟,近 10 年来,超超临界机组已经成为我国大容量火力发电厂建设的主要选型,目前国内已经投运的约为 1000MW,在建的容量也超过 1050MW。

锅炉在工作过程中,要承受各种载荷,如拉伸、弯曲、扭转、疲劳和冲击等,多以复合形式出现。此外,它们还与高温蒸汽、空气或燃气接触,表面发生高温氧化或气体腐蚀、混合盐腐蚀。在高温下工作,钢和合金将发生原子扩散过程,并引起组织转变,这是与低温工作部件的根本不同点。因此,高温下工作的零部件通常要求在高温下能承受一定应力并具有抗氧化或抗腐蚀能力。

1.3.1 耐热钢的性能要求

耐热钢在 450℃ 以上工作,并且承受静载、疲劳或冲击的作用。钢件与高温气相接触,表面要发生高温氧化或腐蚀破坏。如果在高温下给钢件加一比该温度下屈服极限还低的恒定应力,那么在温度和载荷的长时间作用下,钢将以一定的速度产生塑性变形,这一现象称为蠕变,蠕变最终也能导致钢件的断裂。根据电厂机组材料的使用环境条件,耐热钢应满足以下性能:

(1) 对具体使用环境,应该具有尽可能高的化学稳定性。这里“化学稳定性”的含义首先是针对高温介质而言的,要有尽可能高的耐蚀性。其次,钢在高温下与氧发生化学反应,560℃ 时, Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 下面形成 FeO 层。FeO 点阵结构简单,属于缺位固溶体,点阵中有空隙,铁离子易通过 FeO 层进行扩散,因此加剧铁的氧化,从而要求耐热钢在高温下要有一定的抗氧化性。

(2) 良好的力学性能。耐热钢不仅要在高温介质中耐腐蚀,还要承受各种载荷,如拉伸、扭转、疲劳和冲击等。承受或传递载荷,需要有较好的力学性能。同时,力学性能好还可减轻结构质量,节约成本。

(3) 高的热强性。钢在温度和应力的作用下,将会产生一定的蠕变变形,甚至产生断裂。因此在高温和载荷长时间作用下,要求耐热钢要有高的抵抗蠕变