

# 630℃机组新材料 G115 金属监督措施研究

姜海峰

大唐郓城发电有限公司，山东省菏泽市郓城县郓州街道 274700

## 630℃ unit new material G115 metal supervision research measures

JIANG Haifeng

Datang Yuncheng Power Generation Co., Ltd, Heze, 274700.

**摘要:** 本文介绍了 630℃超超临界二次国家电力示范项目主蒸汽、一二次再热热段集箱及大管道选材情况，分析了自主新型马氏体耐热钢 G115 成分和性能特点，介绍了目前工程化试制概况，通过对新材料首次工程应用风险的分析，提出了在标准化、监督网络建立、制造安装质量控制、运行监督、检修监督、数据库建立等方面全周期金属监督控制措施，探索建立完善的新材料金属监督体系。

**关键词:** 630℃；G115；全周期；金属监督

**ABSTRACT:** This paper introduces the material selection of main steam, primary and secondary reheating hot section container and large pipe of 630℃ ultra-supercritical second National Electric Power Demonstration Project, analyzes the composition and performance differences of independent new martensitic heat resistant steel G115, and introduces the current engineering trial production situation. Through the analysis of the risk of the first engineering application of the new material, The whole cycle metal supervision and control measures in standardization, supervision network establishment, manufacturing and installation quality control, operation supervision, overhaul supervision, database establishment and other aspects are put forward to explore the establishment of a perfect new material metal supervision system.

**KEY WORD:** 630℃; G115; The whole cycle; Metal supervision

## 1 前言

依据中电联数据，截至 2021 年底，我国全口径发电装机容量 23.8 亿千瓦，全年发电量 8.11 万亿千瓦时。其中，煤电装机容量 11.1 亿千瓦，占总发电装机容量的比重为 46.7%，其发电量占总发电量比重为 60%，煤电以不足 50% 装机承担了全国超过六成的发电任务[1]。2022 年 3 月底，国家发改委、国家能源局印发的《“十四五”现代能源体系规划》提出“继续合理新建支撑性、调节性先进煤电”。在未来较长的一段时期内，煤电在能源托底保供、助力清洁能源发展、推进实现“双碳”目标等方面，将继续发挥积极的作用，是我国能源安全稳定的压舱石和稳定器。

目前已投运最先进煤电机组为大唐东营高效超超临界二次再热项目，其主蒸汽及两级再热蒸汽温度为 600/620/620 摄氏度，压力 32 兆帕，设

计供电煤耗 258.72 克/千瓦时。大唐郓城 630℃超超临界二次再热燃煤发电项目是十三五期间唯一获批的百万千瓦级煤电国家电力示范项目，主机设计参数 35.5MPa/616℃/631℃/631℃，发电热效率达到 50.36%，实现了煤电发电热效率首次突破 50%，供电标煤耗低至 255.96g/kWh。相较目前投运的 620℃超超临界二次再热参数项目锅炉，其过热器出口压力、温度与再热器出口蒸汽温度均有了进一步的提升和变化，对机组设备带来了挑战，特别是高温承压部件。

## 2 G115 材料性能与工程化试制

目前 620℃超超临界机组主蒸汽、一二次再热热段集箱及大管道通常选用由日本研发的 P92 材料，《锅炉安全技术规程》规定其使用温度上限为 630℃，通常设计使用金属温度上限为 628℃，应用于郓城项目存在大口径管持久强度和抗腐蚀

性能不足的问题,如选用奥氏体耐热钢和镍基合金则存在性能和经济性方面的问题,马氏体耐热钢在此温度压力区间更具实用性。通过比选,郓城项目选择了由钢铁研究总院刘正东院士团队基于“全流程选择性冶金过程设计和选择性强化设计”学术观点研发的具有自主知识产权的 650 °C 新型马氏体耐热钢 G115(9Cr-2.8W-3CoCuVNbBN),其化学成分控制范围见表 1。

表 1 G115 钢化学成分控制范围 (wt.%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	W	Co
范围	0.06-0.10	0.1-0.5	0.2-0.8	$\leq 0.004$	$\leq 0.0028$	8.0-9.5	2.5-3.5	2.5-3.5
元素	Nb	V	Cu	N	B	Ce	Ni	Al
范围	0.03-0.07	0.1-0.3	0.8-1.2	0.006-0.01	0.01-0.016	0.01-0.04	$\leq 0.01$	$\leq 0.005$
元素	As	Bi	Pb	Ti	Zr	Fe		
范围	$< 0.01$	$< 0.001$	$< 0.007$	$\leq 0.01$	$\leq 0.01$	余		
严格控制其它有害元素含量和氢氧含量,使之尽可能低								

G115 钢以 9Cr3W3Co 基体辅以适合的 B-N 配比来提高热强性,在合适的 B-N 配比情况下, B 进入  $M_{23}C_6$  中形成  $M_{23}(C,B)_6$ ,有效地阻止了  $M_{23}C_6$  的快速粗化,抑制机理见图 1,显著提高了组织性能稳定性,通过加入 1.0%Cu 促进了析出强化并提升了抗蒸汽腐蚀性能。性能试验, G115 钢累计持久时间数据接近  $6.0 \times 10^5$  h,且 650 °C 单根持久寿命最长近  $4 \times 10^4$  h,在相同条件下 G115 钢的持久强度约为 P92 钢的 1.5 倍;在 650 °C 蒸汽最长 3000 h 氧化腐蚀环境下, G115 钢的抗蒸汽腐蚀性能也优于 P92 钢;经 1100 °C 正火+760 °C 回火热处理,在 650 °C 时效 8000 h 后,在显微组织透射电镜(TEM)下观察,见图 2, G115 钢的基体非常稳定,回火马氏体板条仍然保持完整[2]。

2017 年 12 月 20 日 G115 钢通过了全国锅炉压力容器标准化技术委员会市场准入技术评审,可以用于超(超)临界锅炉的集箱、蒸汽管道、受

热面管子等部件,以及类似工况的受压元件。集箱及管道的钢管允许最高壁温 650 °C,受热面管子允许最高壁温 660 °C,必要时可采用适当的抗氧化措施[4]。

图 1 B 抑制  $M_{23}C_6$  粗化的机理示意图

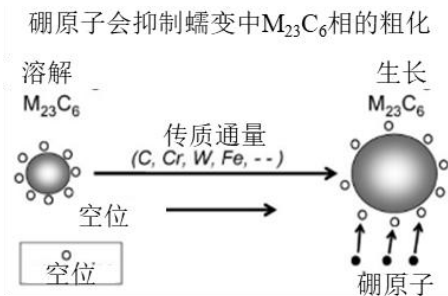
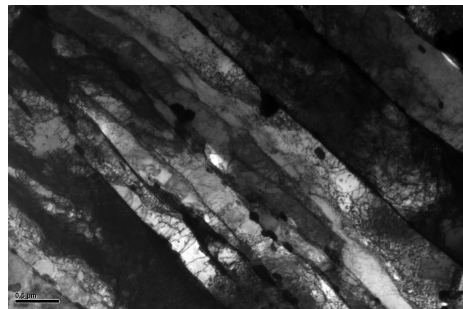


图 2 G115 钢 650 °C 时效 8000h 后微观组织



截止目前相关单位已完成了 43 个轮次大小口径管、3 个轮次三通、3 个轮次弯头、2 个轮次弯管的工业化试制,打通了全部工艺流程,可制造  $\phi 38 \times 9$  mm 到  $\phi 680 \times 140$  mm 各种尺寸规格锅炉管;国内大西洋、京群、北冶等相关焊材企业联合主机厂及科研院所开展了配套焊材开发, G115 焊条、氩弧焊丝、埋弧焊丝已经基本定型;相关主机厂、配管厂、电建公司利用埋弧焊、手工电弧焊、全自动氩弧焊等焊接工艺开展了三十余次大口径管焊接试验, G115 钢已具备了工程应用条件。

### 3 全过程金属监督

郓城项目作为 G115 首次工程应用,材料用量大,风险高,作为业主单位的全过程金属监督,对于保障新材料应用安全性至关重要。通过认真分析各环节潜在风险,根据目前 G115 材料研发情况,拟采取以下保证措施和控制措施。

#### 3.1 标准化工作

积极推动 G115 钢纳入 GB 5310《高压锅炉用无缝钢管》、DL 438《火力发电厂金属技术监督规

程》等国家、行业相关标准；编写现场硬度检测换算标准和无损检测规范，编写和完善 G115 入厂验收、焊材等团体标准。

依托特种设备行业、电力行业的技术发展，严格遵守 TSG 11-2020《锅炉安全技术规程》、DL 438《火力发电厂金属技术监督规程》、DL 612《电力行业锅炉压力容器安全监督规程》、DL647《电站锅炉压力容器检验规程》、DL 869《火力发电厂焊接技术规程》、DL 819《火力发电厂焊接热处理技术规程》、GB 5310《高压锅炉用无缝钢管》、GB 16507《水管锅炉》、GB 50764《电厂动力管道设计规范》、NB 47013《承压设备无损检测》、DL 5190《电力建设施工技术规范》、DL 5210《电力建设施工质量验收及评价规程》及 G115 相关团体标准等规程标准要求（规程标准有更新时，按照最新执行；相关标准要求不一致时，按最高标准执行）。

### 3.2 建立专家库和技术监督网

建立联合技术攻关团队，组建专家库，按照集团公司金属技术监督规范要求，落实主体责任，建立完善的金属技术监督三级网络。

### 3.3 制造安装监督

G115 钢管、钢坯、管件、焊材等供货单位及配管、安装、检测单位选择具备相关资质，有 G115 试制试验经历，优先选择完成过相关成果鉴定的单位。选择技术强、水平高、经验丰富的监造单位、落地检单位以及安装监检单位；依照 DL 438《火力发电厂金属技术监督规程》、DL647《电站锅炉压力容器检验规程》等相关标准，监造过程提高停工待检点和现场见证点范围，落地检和安装监检提高检测范围和检测比例；针对易发生缺陷，引用先进检测手段。

安装中制定 G115 专项方案，重点控制焊接过程，拟采取以下方案。

(1) 按照《承压设备用焊接工艺评定》NBT47014-2011、《焊接工艺评定规程》DL / T 868-2014 进行 G115 钢焊接工艺评定。采用不同品牌的焊接材料取得的焊接工艺评定结果不能相互替代。

(2) 焊接材料使用前必须在监理见证下进行复验，相关检验由第三方检测检验机构进行。

焊接材料复验合格后使用。

(3) 焊工必须按照《特种设备焊接操作人员考核细则》TSG Z6002-2010 考核取得相应 FeIII 类焊接资格项目，并在有效期内进行焊接操作。参与 G115 钢焊接的焊工为制造、安装公司技能水平高、责任心强正式聘用焊工，禁止使用社会焊工。焊工在正式焊接操作前应进行针对性的强化培训练习，经监理见证考核合格后，方可施焊。

(4) 在安装焊接工程中严格执行焊接过程再确认制度，保证人员、材料、焊接设备、工艺参数满足要求；采取增加加热宽度、分区控温、调整保温厚度和宽度等相关措施保证大径厚壁 G115 管道焊后热处理时各部位的温差不大于 20℃。

(5) 采用相控阵检测 (PA)、衍射时差法超声检测 (TOFD) 等多种无损检测法检测大径厚壁 G115 管道接头时，均应合格。

### 3.4 运行监督

(1) 严控主蒸汽管道、再热热段管道超温超压，通过及时燃烧调整、投减温水等手段控制蒸汽参数不超过设计值。

1) 锅炉侧压力运行限制。在任意十二个月的运转期内，汽轮机主汽阀进口处的压力不应超过额定压力 36.75MPa，在维持此平均值的前提下，压力不应超过额定压力的 105%。短期运行允许的瞬时值：每年在 38.58~40.8MPa(a) 区间运行时间累计不能超过 12 小时。

2) 锅炉侧主、一、二次再热蒸汽运行限制。长期运行允许的上限值：在任意十二个月的运转期内，汽轮机主汽温度平均值不得大于额定温度 4℃ (624℃)。温度瞬时偏差值可在大于 624℃~628℃ 之间变化，条件是任何 12 个月位于这两个值之间的总运行时间不超过 400 小时；任何 12 个月内温度在 628℃ 到 632℃ 之间运行的总时间不超过 80 小时，每次不得超过 15 分钟。长期运行允许的上限值：在任意十二个月的运转期内，汽轮机一、二次再热温度平均值不得大于额定温度 4℃ (637℃)。温度瞬时偏差值可在大于 637℃~641℃ 之间变化，条件是任何 12 个月位于这两个值之间的总运行时间不超过 400 小时；任何 12 个月内温度在 641℃ 到 645℃ 之间运行的总时间不超过 80 小时，每次不得超过 15 分钟。

任何情况下温度均不准超过 645℃。

(2) 加强管系应力在线监测, 一旦发现管系应力异常, 及时开展管道焊缝检测和支吊架状态调整。

### 3.5 检修监督

DL 438《火力发电厂金属技术监督规程》7.3 章节对 9-12%Cr 系列钢制管道、管件的检验监督提出了更高要求, G115 作为一种新型 9%Cr 钢, 其在役监督检验将提高标准进行。计划在机组第一次检修, 进行直管段全面外观检查, 有无直观可视的涨粗; 每次 A 级检修, 对监督段和正常管段 50% 的直段、焊缝进行外观、壁厚、硬度、金相组织、无损检测检验; 机组服役 2 个 A 级检修时, 在主蒸汽管道监督段、高温再热蒸汽管道割管进行相关试验; 每次检修对于管件按 50% 比例进行外观、光谱、硬度、壁厚、椭圆度和无损探伤; 每次 A 级检修, 对重点部位管件进行硬度、金相组织检验。

### 3.6 全寿命期服役性能数据库

建设全寿命服役性能数据库, 收集制造、安装相关性能数据, 服役参数数据, 定期检修检验数据, 做好数据分析。

### 3.7 安全保障措施

项目建设期新材料应用风险纳入项目建设整体风险防控中, 投产前制定 G115 新材料风险应急预案, 针对超温超压、管系应力异常、泄露等可能出现的风险点制定应对措施。在管道弯头、三通等高应力部位设置警示标志, 避免巡检等人员长时间聚集和停留。

## 4 结论

自主知识产权新型材料的示范应用, 有助于打破国外对先进材料的垄断, 推动自主完整产业链形成, 促进民族工业进步。大唐郓城 630℃ 超超临界二次再热项目作为 G115 钢首次工程应用, 掌握新型钢材的使用特性和工艺特性, 制定详尽的金属监督并执行到位是保障机组长周期安全运行的关键, 后期将根据目前制定的相关金属监督措施继续进行深化, 以期建立完整的新材料监督体系, 为后期相关新材料金属监督提供借鉴。

## 参 考 文 献

- [1] 《2021-2022 年度全国电力供需形势分析预测报告》
- [2] 刘正东, 陈正宗, 包汉生等. 新一代马氏体耐热钢 G115 研发及工程化 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2020. 09
- [3] 刘正东, 陈正宗, 河西扣等. 630~700℃ 超超临界燃煤电站耐热管及其制造技术进展 [J]. 金属学报, 2020, 56: 539
- [4] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. 锅炉压力容器材料技术评审结论 [Z]. 编号 240, 2017-12-20
- [5] 刘正东. 电站耐热材料的选择性强化设计与实践 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2017: 337

收稿日期:

作者简介:

姜海峰 (1986.08-), 男, 山东曹县, 本科, 高级工程师, 大唐郓城发电有限公司, 山东省菏泽市郓城县郓州街道, 研究方向: 电站金属监督及焊接工艺研究; 联系方式: 18553051612; 邮箱: jianghf0530@126.com