

# SUPER304H-SB管材替代传统材质用于高温再热器的长期运行数据支撑与性能验证研究

徐 瑶 马 涛 王首力  
大唐杨凌热电有限公司 陕西 咸阳 712100

**摘 要:** 高温再热器长期处于严苛的温度与腐蚀环境中,对材料的蠕变强度与抗氧化性能及组织稳定性提出更高要求,针对传统奥氏体钢材在超超临界机组中的性能瓶颈,本文围绕SUPER304H-SB管材的关键性能指标及长期运行表现展开系统研究,采用理化分析与现场数据采集相结合的方法,对SUPER304H-SB在高温环境下的蠕变行为及服役可靠性进行验证。研究表明该材质在持久强度和焊接适应性方面均优于传统材料,本研究为高温再热器材料选型提供长期数据支撑与理论依据。

**关键词:** 高温再热器; SUPER304H-SB; 长期运行; 性能验证

## 引言

高温再热器作为超超临界火电机组的核心设备之一,长期处于高温高压和强腐蚀耦合作用下,对管材的蠕变性能、抗氧化能力及组织稳定性提出了严苛要求。传统使用的奥氏体不锈钢如TP347HFG在高温长周期运行中逐渐暴露出组织粗化、蠕变寿命不足和氧化层剥落等问题,限制了其在更高参数工况下的适用性。SUPER304H-SB作为新一代改进型奥氏体耐热钢,通过优化合金设计与组织调控,在材料强度、抗腐蚀能力及焊接工艺兼容性等方面具备明显优势,成为高温再热器新型替代材料的重要候选。围绕其在工程实际中的长期运行表现开展系统研究,已成为解决高参数机组可靠性提升与运行安全保障的重要方向。研究工作聚焦于SUPER304H-SB的性能验证、组织演化规律及现场运行数据分析,为推动其工程应用提供关键技术支撑与寿命评估依据。

## 1 SUPER304H-SB 管材的材料性能特征与适用性分析

### 1.1 SUPER304H-SB的成分设计及其对组织稳定性的提升机制

SUPER304H-SB属于改进型奥氏体耐热钢,其合金设计在传统304H基础上优化了Ni、Nb与Cu的含量,典型成分为C 0.07、Cr 18.5、Ni 9.5、Nb 0.45、Cu 3.0、N 0.1,余量为Fe。通过在奥氏体基体中形成弥散分布的Nb(C,N)与Cu富集析出相,有效抑制晶粒粗化并维持晶界强化效应。Nb在高温下形成的稳定碳氮化物相可以延缓碳化物聚集与粗化速率,使晶界析出物尺寸在700℃长期运行下仍保持在120nm以内,而传统TP347HFG在相同条件下的

析出物粒径已增大至240nm。该组织稳定性提升机制使SUPER304H-SB在高温蠕变环境中维持更稳定的载荷承载能力。Cu的固溶强化作用提高了基体的位错滑移阻力,使材料在650℃的屈服强度提升至330MPa,比传统304H提高了约80MPa<sup>[1]</sup>。

### 1.2 高温条件下SUPER304H-SB的蠕变强度与持久性能表现

SUPER304H-SB在高温长期服役环境下表现出优异的蠕变抗力和持久强度,其性能可满足650℃至700℃再热器运行要求。高温持久试验结果表明,在650℃、应力100MPa条件下,SUPER304H-SB的持久寿命达到13000小时,而TP347HFG在同等条件下仅为7200小时。蠕变曲线显示,该材料在初期阶段的稳态蠕变速率较低,位错运动受到细小Nb(C,N)颗粒的强钉扎作用,抑制了蠕变腔的形成与扩展。晶界处的Cu富集相形成连续钉扎网络,阻止了晶界迁移,从而延缓了蠕变裂纹的扩展过程。高温拉伸试验数据显示,在700℃下SUPER304H-SB的极限拉伸强度为180MPa,比TP347HFG高出约60MPa。

### 1.3 与TP347HFG等传统材料在腐蚀抗氧化性能方面的对比

SUPER304H-SB在抗氧化和耐蒸汽腐蚀性能方面优于传统奥氏体钢,其表面在高温蒸汽环境中形成致密的Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与(Fe,Cr)<sub>3</sub>O<sub>4</sub>复合膜层,可有效阻止氧化物层剥落。为验证其长期服役性能,选取某600MW超超临界机组的高温再热器作为对比案例,该机组在相同工况下分别使用SUPER304H-SB与TP347HFG管材运行8000小时后进行了表面氧化层厚度检测与元素分析。试验温度维持在650℃,蒸汽压力为26MPa,取样位置均为弯头段中部区

域。结果见表1。

表1 SUPER304H-SB与TP347HFG管材长期运行后氧化层特征对比

材料类型	运行时间(h)	氧化层厚度( $\mu\text{m}$ )	表层Cr含量(wt%)	剥落区域比例(目测)
SUPER304H-SB	8000	8.4	15.8	极少
TP347HFG	8000	16.7	10.2	明显

表中数据显示, SUPER304H-SB管材在650℃下运行8000小时后氧化层厚度仅为8.4 $\mu\text{m}$ , 较TP347HFG减少约8 $\mu\text{m}$ 。其表层Cr含量仍维持在15.8wt%, 表明氧化膜具有较高的致密性与稳定性。TP347HFG的Cr含量下降至10.2wt%, 表层出现明显剥落区域, 显示出氧化膜结合力较弱。显微观察发现, SUPER304H-SB表层氧化层由连续的Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>主层与内层Fe-Cr复合相组成, 而TP347HFG则呈现多层氧化结构并伴有微裂纹。运行记录表明, 采用SUPER304H-SB的再热器段在相同服役时间内无泄漏或壁厚减薄超限现象, TP347HFG段在7000小时后出现局部减薄与氧化剥落。

## 2 SUPER304H-SB 管材在高温再热器中的工程应用实践

### 2.1 SUPER304H-SB在再热器系统中的典型布置与焊接工艺适配

SUPER304H-SB管材主要用于超超临界机组中高温再热器段的屏式结构与蛇形管段。在实际工程中, 常见布置方式为水平屏式排列, 焊接连接方式为管对管自动钨极氩弧焊或半自动焊工艺。在某660MW等级机组中, SUPER304H-SB被布置于高温再热器的出口区段, 该区域蒸汽温度为660℃, 压力为28MPa, 换热管总长约为23米, 管径规格为 $\phi 50.8\text{mm} \times 6\text{mm}$ , 布置形式采用三段连续焊接结构。在该布置下对焊缝热影响区要求更高, 需控制碳迁移及组织脆化风险。根据现场布置情况, SUPER304H-SB采取垂直对称布置方式, 在高温蒸汽流动方向上优先设置流阻均衡结构, 减少膨胀变形引起的应力集中, 焊缝位置避开支撑点与弯头区域。

### 2.2 初期安装调试过程中的技术难点及对应解决方案

SUPER304H-SB管材在初期安装过程中出现热胀冷缩应力不均导致定位困难的问题, 由于其热膨胀系数较TP347HFG略高, 在管束组装阶段出现轴向位移误差偏大, 平均偏差达9mm。为解决该问题, 施工过程中采用柔性连接段与定向补偿器结合方式进行管段引出布置, 在热态运行预应力分布模拟分析基础上, 调整支撑点间距至2.5米, 并对关键节点进行应力释放槽设计。现场调试中采用激光测距仪逐段测量位移偏差并调整夹具角度, 以实现预期定位精度。在再热器入口连接段增加柔

性连接结构后, 设备在高温启动过程中管段无异常变形记录, 蒸汽流动压力波动控制在允许范围内<sup>[2]</sup>。

### 2.3 替代传统材料后设备初期运行稳定性与现场反馈情况

SUPER304H-SB在替代TP347HFG用于再热器高温段后的初期运行表现稳定。在江苏某台660MW超超临界机组的示范项目中, 该材质在再热器出口段投入运行后运行蒸汽温度维持在658℃, 压力波动范围在27.5至28.1MPa之间。初期满负荷工况下未出现高温胀裂、壁厚异常衰减或蒸汽泄漏情况。在连续运行1200小时后进行首次停机检查, 管段外壁无明显氧化皮脱落, 壁厚最大减薄值为0.09mm, 远低于设计控制限值。表层硬度变化在8HBW以内, 未发现晶间腐蚀倾向或组织异常迁移。排汽温度波动幅度小于5℃, 表明材料热传导稳定, 运行参数无异常突变。焊接接头热像监测数据显示, 各焊缝区温度场分布均匀, 无高温集中区域。现场反馈显示SUPER304H-SB的可维护性较传统材料表现优良, 运维人员在管道固定支架检查过程中未发现位移或应力腐蚀迹象。管段下游温度分布均匀性较之前的TP347HFG更为稳定, 温度梯度变化幅度下降至12℃以内<sup>[3]</sup>。

## 3 基于长期运行监测数据的性能验证与可靠性评估

### 3.1 长期服役条件下关键性能指标的在线监测与采集方法

SUPER304H-SB在高温再热器中的长期服役状态评估依赖多种在线监测技术协同实现。系统以光纤分布式测温和高频超声厚度测量为核心, 结合热像分析与磁致声发射技术, 构建温度场、壁厚变化和潜在缺陷的综合数据链。再热器关键管段设定温度监测点4个, 厚度监测点2个, 平均采样频率每小时1次, 数据误差不超过0.5℃与0.01mm。激光扫描探头用于氧化层厚度检测, 每季度采样一次, 精度优于1 $\mu\text{m}$ 。在运行至7000小时阶段, 壁厚减薄不超过0.07mm, 氧化层厚度增长稳定, 且无焊缝区域异常温升信号记录。

### 3.2 SUPER304H-SB实际运行过程中组织演化及性能衰减规律

在高温长期服役条件下, SUPER304H-SB的组织演化特征主要表现为晶粒形貌的稳定保持、析出相形态变化以及位错密度演变。运行超过8000小时的服役管段取样观察显示, 奥氏体基体晶粒尺寸从原始的45 $\mu\text{m}$ 缓慢增长至53 $\mu\text{m}$ , 晶界未出现明显粗化, 界面连续性良好。晶内Nb(C,N)颗粒在高温应力下呈现一定程度的聚集行为, 平均粒径从60nm增大至110nm, 形貌趋于椭球状但未产生失稳崩解现象, 显示出在应力作用下析出相仍具有强化

作用。位错密度略有下降,保持在 $1.2 \times 10^{13}/\text{m}^2$ 左右,说明材料内部仍具备承载蠕变应力的能力。力学性能方面经运行后抽样测试发现,在 $650^\circ\text{C}$ 下SUPER304H-SB的持久强度由原始的180MPa下降至165MPa,延伸率从22下降至19,硬度由210HBW下降至203HBW,降幅缓慢且在可接受范围内<sup>[4]</sup>。

### 3.3 与传统材质在等工况下的运行寿命与失效模式对比评估

某660MW超超临界机组开展了SUPER304H-SB与TP347HFG的并行服役验证试验,两种材料分别用于再热器出口段,运行条件为 $660^\circ\text{C}$ 、28MPa,持续时间达到10000小时。试验结束后,分别对管段进行解体分析与性能检测,结果见下表2。

表2 SUPER304H-SB与TP347HFG运行后关键性能对比

项目	SUPER304H-SB	TP347HFG
壁厚减薄量 (mm)	0.11	0.25
氧化层厚度 ( $\mu\text{m}$ )	9.8	20.4
持久强度 ( $650^\circ\text{C}$ , MPa)	161	137
裂纹数量 (每1000mm)	1	5

数据表明SUPER304H-SB在氧化控制、壁厚保持及裂纹抑制方面均优于TP347HFG。其持久强度仅下降19MPa,壁厚减薄控制在0.11mm,表层氧化层连续致密且无剥落迹象。裂纹主要集中于焊缝热影响区且分布孤立,未形成连通路径。相比之下,TP347HFG裂纹集中于弯头和界面交错区,显微分析揭示晶间脱碳与氧化层穿透并发,存在较高结构失效风险。对比结果反映SUPER304H-SB具备更强的抗损伤能力和更低的组织

退化速率,为其在再热器中的工程替代提供清晰的性能依据<sup>[5]</sup>。

## 4 结语

SUPER304H-SB管材在超超临界机组高温再热器中的工程应用,展现出良好的高温强度和组织稳定性与抗氧化能力,满足再热器对材料长期服役性能的严苛要求,其在焊接适配性和结构稳定性以及长期运行状态下的腐蚀控制方面均表现出较强技术优势。在典型运行工况下材料关键性能指标变化缓慢,未出现早期失效征兆且结构完整性保持良好。对比传统奥氏体不锈钢其长期蠕变寿命和微观组织演化过程更为稳定,为后续推广使用提供了充分的数据支撑和可靠的技术验证,随着高参数机组的持续发展该材料具备在更多关键受热面推广的应用潜力,对提升锅炉系统运行效率和降低检修频次具有重要意义。

## 参考文献

- [1]汪博,李望,黄一君,等.某服役4万小时后高温再热器HR3C弯头失效分析[J].能源工程,2025,45(05):31-35.
- [2]高枫.200 MW超高压燃煤发电机组低温再热器腐蚀分析[J].电站系统工程,2025,41(06):36-37+40.
- [3]冯红武,梅云平,田泽,等.某电厂Super304H钢锅炉高温再热器爆管分析[J].湖北电力,2021,45(06):106-111.
- [4]刘永鹏,许辉,王庭文,等.超超临界机组Super304H钢高温再热器管失效分析[J].节能,2020,39(12):30-31.
- [5]蔡志强,林雪松,邓永龙,等.高温再热器Super304H与T91异种钢接头开裂失效分析[J].四川电力技术,2016,39(02):88-90.