

超临界机组厚壁部件启停循环下的应力应变演化规律研究

李江勇

华电伊犁煤电有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i5.16885

[摘要] 针对超临界机组厚壁部件在启停循环过程中应力应变演化规律开展研究。采用数值模拟和实验验证相结合的方法来分析温度场、应力场以及应变响应动态变化特征。依据非线性连续损伤力学理论建立起多轴应力损伤模型并探讨疲劳-蠕变交互作用对部件寿命产生的影响。最终提出优化运行策略和结构改进措施从而为超临界机组厚壁部件安全运行与寿命管理提供理论依据。

[关键词] 超临界机组; 厚壁部件; 启停循环; 应力应变; 寿命评估

中图分类号: G449.7 **文献标识码:** A

Study on the Evolution Law of Stress and Strain in Thick-Walled Components during Start-Stop Cycles of Supercritical Units

Jiangyong Li

Huadian Ili Coal Power Co., Ltd.

[Abstract] This study investigates the evolution characteristics of stress and strain in thick-walled components of supercritical units under start-stop cycling conditions. By integrating numerical simulation with experimental validation, the dynamic behaviors of temperature fields, stress distributions, and strain responses are systematically analyzed. Based on the theory of nonlinear continuum damage mechanics, a multiaxial stress damage model is developed to evaluate the influence of fatigue-creep interaction on component service life. Furthermore, optimized operational strategies and structural enhancement measures are proposed, providing a theoretical foundation for ensuring safe operation and effective life management of thick-walled components in supercritical units.

[Key words] supercritical unit; thick-walled components; start-stop cycles; stress and strain; life assessment

引言

超临界机组是利用水达到超临界压力(>22.1MPa)后不再有明显汽化界线特性来发电的火力发电技术。其蒸汽参数远远高于亚临界机组,从而使热效率显著提升且燃料消耗减少,同时能让污染物排放降低,是高效清洁发电的重要发展方向^[1]。目前,我国超临界机组已成为高效清洁能源典型代表在全球电力系统里占据重要地位。其中的厚壁部件如汽水分离器、汽缸以及转子等属于超临界机组核心承压元件。其工作特性会直接关系到机组的安全性与经济性,不过在频繁的启停循环进程当中这些部件承受着复杂温度与压力载荷,这使得应力应变状态产生剧烈变化从而引发疲劳损伤与寿命损耗问题^[2]。所以深入探究厚壁部件在启停循环情况下的应力应变演化规律,对于保障机组安全运行并延长部件使用寿命具有重要意义。

1 启停循环应力应变分析方法

1.1 数值模拟法

数值模拟是研究厚壁部件应力应变规律的重要手段。本文

采用有限元方法构建厚壁圆筒几何模型。同时考虑材料非线性与边界条件动态变化情况,在瞬态传热-应力耦合分析中对比序贯耦合法(温度场→应力场)与直接耦合法优缺点,序贯耦合法计算效率相对较高然而精度稍低,直接耦合法精度相对较高但是计算量比较大,根据研究需求本文选择序贯耦合法进行计算。

1.2 实验验证方法

为验证数值模拟结果的准确性。本文采用应变片实测和红外热成像两种实验验证方法。在应变片实测过程中,于汽水分离器筒身和引入管连接区域布置测点来捕捉应力峰值,运用红外热成像技术对部件表面温度分布进行监测,以此验证数值模型的准确性。实验结果显示数值结果和实验数据吻合情况良好,验证了数值模型的有效性。

1.3 多轴应力损伤模型

为了能够准确评估厚壁部件的寿命损耗情况,本文引入非线性连续损伤力学理论,并建立了多轴应力损伤模型。模型充分考虑了多轴应力修正因子与拉压不对称性,从而能够更准确地

描述厚壁部件在复杂应力状态下损伤演化过程^[3]。同时,本文还考虑到疲劳-蠕变交互作用对部件寿命所产生的影响,进而建立了低周疲劳与高温蠕变耦合损伤模型。

2 启停循环应力应变演化规律分析

2.1 温度场动态演化

超临界机组的厚壁部件在冷态启动过程中,其温度场会呈现出典型的非均匀动态演化特征。从启动初始($t=0$)的均匀室温(25℃)开始,随着机组负荷不断提升以及蒸汽逐渐引入,内部温度会率先快速升高。在启动后的前20分钟内,内壁温度从54℃急剧上升到204℃,升温速率较高。这主要源于蒸汽与内壁直接接触传热。外壁温度受隔热层和间接传热路径影响,升温相对滞后且速率较慢,从32℃缓慢上升到98℃。这种内壁温度明显领先于外壁的现象,导致部件内外壁之间产生了巨大温差。在启动初期(如 $t=5\text{min}$ 和 $t=10\text{min}$),温差在短时间内迅速扩大到85℃以上,并在 t 等于25min左右达到峰值温差约127℃,随后内壁温度依旧在持续上升。不过在30min之后,外壁温度上升速率相对加快,使两者之间温差增长趋势得到一定程度缓解,甚至在40min时温差略有下降至约95℃,这意味着随着启动过程不断推进,热量逐渐穿透壁厚向外传递,使内外壁温差增长速率有所减缓。然而,即便在启动末期,内外壁温差依然维持在较高的水平(接近100℃)。这种明显的温度梯度是厚壁部件冷态启动时产生巨大热应力的根本原因,特别是内壁承受热膨胀受阻产生的压缩应力(温度高时变拉伸应力),而外壁承受拉伸应力(温度低时变压缩应力),这种复杂且剧烈变化的温度场是分析厚壁部件启停循环应力应变演化规律、评估其疲劳寿命损耗需重点考虑的关键因素,理解并精确预测这种温度场的动态变化对制定合理启动策略、控制升温速率、避免过大热应力及保障机组安全可靠运行十分重要。

2.2 应力场时空分布

和冷态启动相比较而言,超临界机组厚壁部件于热态启动过程当中,温度场演化特征有着显著不同特点。启动初始状态($t=0$)时,部件的内外壁已经有比较高的初始温度,内壁达到200℃,外壁为197℃,两者温差仅仅只有3℃。随着热态启动过程不断推进,部件的内壁温度持续不断上升,从222℃逐渐增加到了378℃,外壁温度也从211℃升高到了334℃。由于初始温度比较高,所以整个升温过程的绝对升温幅度相对较小,内壁温度只是升高了178℃,外壁温度升高了137℃。虽然升温幅度不大,但内外壁之间还是存在显著的温度梯度,且这个温差会随着时间的推移而持续增大。从初始的3℃开始,温差在5分钟时迅速扩大到11℃,在10-15分钟期间维持在21℃左右,之后随着时间不断推移,温差继续增长,到40分钟时达到最大值44℃。这种温差的增长趋势说明,即便在热态启动条件下,热量从内壁向外壁的传递依然存在滞后性,使得内壁温度始终高于外壁。和冷态启动时高达127℃的峰值温差相比,热态启动的温差绝对值虽然较低,但其持续增长并维持在相对较高水平(40分钟时达到44℃),同样会对部件产生热应力。同时,在热态启动过程中,温度场的演

化会直接影响部件应力应变状态。由于内壁温度比外壁高,内壁材料趋于膨胀,而外壁相对较冷会对内壁的膨胀产生约束作用,进而在内壁产生热压应力(高温时可能转变为拉应力),在外壁产生热拉应力(高温时可能转变为压应力)。尽管热态启动的绝对温差和温升速率通常低于冷态启动,但其持续且有一定幅度的温差仍会在部件内引发循环热应力,对部件的疲劳寿命造成累积损伤。所以,准确把握热态启动过程中温度场动态演化规律,对于全面评估厚壁部件在启停循环下应力应变响应和寿命损耗很重要。

2.3 应变响应特征

超临界机组厚壁部件在启停循环过程中,其应变响应特征是评估部件损伤累积以及剩余寿命的关键指标。厚壁部件不同位置的应力场时空分布数据显示,从内壁到外壁的周向应力、径向应力和轴向应力都呈现明显梯度变化。内壁位置的周向应力高达362MPa的数值,径向应力为-12MPa大小,轴向应力为180MPa;中径所在处的周向应力下降到199 MPa的程度,径向应力为-5MPa的情况,轴向应力为149MPa;外壁处的周向应力进一步降低到50MPa的数值,径向应力为2MPa的大小,轴向应力为119MPa的数值。在这个连接区域中,应力集中现象尤为显著,周向应力高达400MPa的数值,径向应力为-20MPa的大小,轴向应力为200MPa的水平。这些应力分布特征充分表明厚壁部件在启停循环过程中承受复杂应力状态,特别是连接区域存在高应力集中可能,成为疲劳裂纹萌生关键位置。此外,本研究还发现厚壁部件在各种弹性应变、塑性应变以及残余应变工况之下的应变响应特征。在启动初期的时候,弹性应变数值为0.053%,塑性应变数值是0.11%,残余应变数值达0.064%,在稳定运行的阶段,弹性应变降低到了0.031%,塑性应变增加到了0.20%,残余应变降低到了0.051%,在停炉之后的状态,弹性应变进一步降低到0.006%,塑性应变显著增加到了0.30%。数据显示厚壁部件在启动初期主要呈现弹性变形状态,随着运行时间不断推移塑性变形开始逐渐累积起来,特别是在停炉过程当中塑性应变会出现显著增加情况,这或许是因为温度骤降使得材料内部应力重新分布,进而引发了比较大的塑性变形现象。

综合来看,厚壁部件在启停循环过程当中,应变响应会呈现出明显的阶段性与累积性特征,启动初期因为温度和应力快速变化,部件主要表现为弹性变形这种情况。但随着运行时间不断地延长,塑性变形会逐渐地进行累积,特别是在停炉过程期间,塑性应变会出现显著增加的现象。这表明部件在启停循环过程中承受着较大损伤累积,连接区域存在高应力集中现象,进一步加剧应变响应的不均匀状况,使得该区域疲劳损伤风险出现显著增加^[4]。

3 寿命评估与优化策略

3.1 寿命损耗计算

按照Miner线性累积损伤理论,冷态启动单次损耗大概是0.2%,蠕变寿命运用Larson-Miller参数法进行预测,在6℃的情况下大概是1万小时,疲劳-蠕变交互寿命借助非线性损伤模型

来预测,其结果比线性叠加法要低15%-20%,寿命损耗的计算结果给优化运行策略提供了重要依据。见表1

表1 寿命损耗计算

类型	单次损耗(%)	累积损耗(%)
冷态启动疲劳寿命	0.2	2
热态启动疲劳寿命	1.1	1
稳态运行蠕变寿命	0.05	0.5
疲劳-蠕变交互寿命	0.25	2.5

3.2 优化运行策略

为了降低厚壁部件在运行中的寿命损耗,本文特意提出冷态启动时将温升率控制在 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以内,热态启动时把温升率控制在 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以内,同时建议采用9%-12%Cr钢去替代传统低合金钢,以此提升厚壁部件的抗热疲劳性能,此外对汽水分离器引入管采用渐缩结构加以改进,从而减小厚壁部件的应力集中系数。见表2

表2 优化运行结构改进

策略/改进	参数变化	效果评估
冷态启动温升率控制	$\leq 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$	寿命提升10%
热态启动温升率控制	$\leq 3^{\circ}\text{C}/\text{min}$	寿命提升5%
材料升级	9%-12%Cr钢	抗热疲劳提升30%
结构改进(渐缩结构)	应力集中系数减小	寿命提升15%

4 结论

本研究针对超临界机组厚壁部件在启停循环工况时面临的应力应变演化规律以及寿命损耗问题,采用数值模拟和实验验证相结合的方法开展系统性探究。研究结果显示厚壁部件的温

度场、应力场和应变响应在启停循环过程中呈现显著动态变化特征,这些特征是评估部件损伤累积和剩余寿命的关键基础。基于对温度场、应力场和应变响应演化规律的理解且考虑疲劳-蠕变交互作用。本研究建议通过严格控制冷、热态启动的温升速率、将材料升级至9%-12%Cr钢、对高应力集中区域采用渐缩结构进行改进等措施来进行优化。

虽然研究是取得一定成果的,但样本数据相对单一,而且测试环境受到时间和地点影响。未来做研究可进一步考虑更复杂的多物理场耦合效应,并发展更高精度的材料本构模型和损伤演化模型,从而更全面地模拟部件在真实运行条件下的行为^[5]。展望未来,结合智能算法如机器学习和人工智能等,将开发能够依据实时监测数据和环境变化来自适应调整运行参数的智能启停控制策略,以此实现损伤最小化和运行效率之间的平衡。

[参考文献]

- [1] 骆孝武.超超临界机组马氏体耐热钢异种焊接接头蠕变行为研究[D].成都大学,2023.
- [2] 李港.超临界水环境下镍基合金材料应力腐蚀开裂建模的研究与验证[D].华北电力大学(北京),2023.
- [3] 赵纪峰.基于声学检测的超超临界机组厚壁部件损伤监测技术研究及应用.上海市,中电华创电力技术研究有限公司,2023-04-15.
- [4] 于建明,钱林峰,赵加星.浅析火电机组深度调峰对超临界锅炉的影响[J].电站系统工程,2022,38(04):59-60+64.
- [5] 马巧春.超超临界火电机组P92大比厚壁三通服役安全性综合研究与应用.浙江省,华能国际电力股份有限公司玉环电厂,2019-11-01.

作者简介:

李江勇(1976--),男,汉族,山东省郯城人,本科,高级工程师,研究方向: 锅炉。