

# Analysis of the Mechanism of Suppression of Heat Transfer Degradation in the Inner Thread Structure of Water Wall Tube of Supercritical Boiler

Roujia An

Texas College, Dezhou, Shandong, 253023, China

## Abstract

This paper provides a comprehensive analysis of the structural and flow characteristics of internal thread tubes, delving into their core mechanisms for mitigating heat transfer deterioration. The study focuses on three critical aspects: enhancing fluid turbulence and mixing, suppressing steam film formation and progression, and optimizing wall temperature distribution. It also evaluates the sensitivity of different structural parameters to suppression effectiveness. Based on this mechanistic analysis, the paper proposes selection guidelines, design optimization principles, and future research directions for internal thread tubes in supercritical boilers, providing theoretical support for the safe design and efficient operation of water wall systems in supercritical and ultra-supercritical boilers. By intensifying turbulence, inhibiting steam film formation, and optimizing temperature distribution, internal thread tubes serve as a key technical safeguard for the safe and efficient operation of supercritical boilers.

## Keywords

supercritical boiler; water wall; internal thread tube; heat transfer deterioration

## 超临界锅炉水冷壁管内螺纹结构对传热恶化的抑制机理分析

安柔嘉

德州学院, 中国·山东德州 253023

## 摘要

本文全面剖析内螺纹管的结构特征与流动特征, 深入探究其抑制传热恶化的核心机理, 涵盖强化流体扰动与混合、抑制汽膜形成与演进、优化壁面温度分布三个关键层面, 并且解析不同结构参量对抑制效果的敏感度。依据机理剖析, 提出内螺纹管在超临界锅炉里的选型建议、设计优化准则以及后续研究走向, 给超临界及超超临界锅炉水冷壁系统的安全设计与高效运行供应理论支撑。内螺纹管通过强化扰动、抑制汽膜与优化温度分布, 为超临界锅炉的安全高效运行提供关键技术保障。

## 关键词

超临界锅炉; 水冷壁; 内螺纹管; 传热恶化

## 1 引言

随着能源结构优化和环保要求提升, 超临界与超超临界发电机组由于其高效率、低排放优势成为火电行业的主流发展趋向。该类机组运行压力超出水的临界压力(22.06MPa), 工质在水冷壁管内历经从亚临界到超临界状态的改变, 在伪临界区附近容易出现传热系数急剧下降、壁面温度急剧上升的传热恶化现象。传热恶化会造成水冷壁管局部过热、氧化皮脱落甚至爆管事故, 严重限制机组运行安全性和经济性。本文基于内螺纹管的结构和流动特征, 从机理层面揭示其作用机制, 并提出工程应用优化建议, 为相

关技术研发和工程应用提供参照<sup>[1]</sup>。

## 2 水冷壁内螺纹管结构特性与流动特性分析

### 2.1 内螺纹管的结构参数定义

内螺纹管的核心结构特点体现为管内壁沿轴向延展的螺旋形凸起螺纹, 其关键结构参量包含螺纹头数、螺距、齿高、齿顶角、螺旋升角以及螺纹截面形态。螺纹头数指管内壁均匀分布的螺纹凸起数目, 常见为2—6头; 螺距为相邻两螺纹在轴向的间距, 直接对螺纹对流体的扰动频次产生影响; 齿高为螺纹凸起的径向高度, 决定流体扰动强度和流道有效截面积; 齿顶角为螺纹横截面的尖角角度, 对流体流动阻力和二次流生成产生作用; 螺旋升角为螺纹与管轴的夹角, 关联流体旋转运动的强度和方向; 螺纹截面形态主要分为矩形、梯形和三角形, 不同形态对流体流动和传热的作用

【作者简介】安柔嘉(2005—), 女, 中国山东济南人, 在读本科, 从事能源与动力工程专业研究。

存在显著不同。这些结构参量相互耦合，一同决定内螺纹管的流动特性和传热性能<sup>[2]</sup>。

## 2.2 内螺纹管内流体流动特性数值方法

内螺纹管以内流体的流动归属于复杂湍流流动情形，关联二次流状况、旋流情形以及相界面作用现象（处于近临界区域范围），数值模拟操作是揭露其流动特性的有效方式手段。当下主流的数值办法依照计算流体力学（CFD）理论体系，运用雷诺时均方程（RANS）搭配湍流模型来描绘流动进程，经常采用的湍流模型涵盖 RNG k- $\epsilon$  模型情况、SST k- $\omega$  模型情况以及雷诺应力模型（RSM）状况。针对超临界工质所具备的物性突变特点特征，需要引入真实工质物性模型体系，精准刻画密度数值、比热容数值、导热系数数值等参数随着温度条件与压力条件的变化规律情况。

## 2.3 内螺纹管与光滑管流动特性对比

光滑管以内流体的流动主要呈现轴向主流态势，速度分布展现出轴对称的对数律分布形态，壁面附近区域存在厚度较大的层流底层结构，湍流混合程度强度较弱，工质在径向方位的动量情况与热量传递效率处于低下状态。当工质靠近伪临界区域之时，密度差异所引发的浮力效应会加剧流动分层现象，壁面附近区域的低密度流体难以和核心区域的高密度流体相互混合，从而形成稳定的低传热效率区域范围。

# 3 内螺纹结构抑制传热恶化的核心机理

## 3.1 强化流体扰动与混合的机理

在超临界工况条件之下，工质处于伪临界区域的比热容会急剧增大，温度梯度呈现集中状态，传热过程对于流体混合强度表现出高度敏感性。内螺纹结构借助两种途径来强化流体扰动状况与混合情形：其一是螺纹凸起部分的物理阻挡功能作用，当流体流经螺纹结构时，在凸起部分的前后位置形成局部涡流结构与脱流区域，破碎大尺度流体团块结构，增加流体的湍流脉动强度程度；其二是螺旋形螺纹结构引导流体产生持续的旋流运动状况，旋流离心力使得核心区域的流体向壁面方位迁移运动，同时将壁面附近区域的低能量流体推送至核心区域，形成径向循环流动状态<sup>[3]</sup>。

## 3.2 抑制汽膜形成与发展的机制

在超临界压力条件之下，工质虽然不存在明显的相变现象，但在伪临界区域附近位置，密度数值、黏度数值等物性参数会发生剧烈变化情况，壁面附近区域的工质因为吸热而温度升高，密度大幅降低，形成类似于亚临界工况条件下的“汽膜”效应现象，也就是低密度流体在壁面位置聚集从而形成传热阻力层结构，导致传热系数出现下降情况。

## 3.3 优化壁面温度分布的作用

传热恶化的直接表现为壁面温度急剧升高并且分布不均匀，局部热点区域的形成会造成材料应力集中现象，加速管道的老化失效进程。内螺纹管通过强化传热效果与均匀流场状态，达成壁面温度分布状态的优化目标：一方面，强化

流体混合能够使壁面热量迅速被工质携带带走，降低壁面的平均温度数值；另一方面，螺纹结构的扰动功能作用使得管内温度场趋向均匀状态，减少了周向方位与轴向方位的温度梯度情况。因此，内螺纹管凭借自身特殊的几何构造，对传热恶化现象的出现予以有效抑制或延缓。螺纹凸起部位不断对近壁区域的流场实施扰动操作，对过热汽膜或者低导热气膜的形成过程与稳定状态进行破坏，以此来让较高的传热系数得以维持。与此同时，此类扰动促使工质在径向层面和周向层面开展充分的掺混活动，让管道截面上工质的温度状况与速度分布变得更为均衡，从根本角度对局部热点产生的热力学条件进行削弱。其造成的结果不光让壁面峰值温度得到显著降低，还让整个管壁的温度分布趋向平缓均匀态势，极大程度减少了因温度剧烈波动情况和梯度问题引发的交变热应力，进而对管道在高温高压工作状况下长久的结构完整性以及运行安全性起到有力保障作用，使设备的使用寿命得以延长。

## 3.4 不同结构参数对抑制效果的敏感性分析

内螺纹管的结构参数会直接对其流动特性情况与传热性能状况产生影响，不同参数对于传热恶化抑制效果的敏感性存在显著的差异情况。螺纹头数的增长可让流体于周向的扰动呈更均匀态势，将径向混合效果予以强化，然而头数过多会造成流道阻力出现急剧变大情形，需于传热强化和阻力损失中间找寻平衡之态；螺距的缩减能提升螺纹对流体的扰动频率，使混合强度得以提升，不过螺距过小会导致流体流动受到阻碍，同样会让阻力损失加剧；齿高的加大可增强二次流与旋流强度，将流体径向运动幅度进行扩大，只是齿高过高会使有效流道截面积变小，让流动阻力增加且可能引发流动不稳定状况。此外，螺纹齿形角连带齿顶圆角半径这类微几何特征，同样于流动和传热方面具备关键影响力。尺寸较小的齿形角，能够对流体在齿谷区域的剪切状况实施增强操作，促使再循环进程得以推进，对近壁区热边界层的破坏情形起到促进作用，然而也会让局部流动分离现象以及能损问题呈现加剧态势；对齿顶圆角半径进行适当程度的增大，有助于对流动突变情况予以缓和与处理，使局部涡流耗散程度实现降低目标，在不会对扰动产生过度削弱效果的前提下，完成阻力优化事项。管径和螺纹深宽比（也就是齿高与螺距之间的比值）同样属于重要的耦合参数范畴：深宽比出现增大状况时，会一同对旋流效应以及流动阻滞现象产生强化作用，需要把具体流速和介质物性加以结合来开展匹配工作。于实际工程设计场景当中，通常需要借助多目标优化途径，对雷诺数范围、介质相态（包含单相与两相情形）、热负荷分布状况以及系统泵功约束条件进行综合考量，运用参数敏感性分析和协同性评价手段，对各结构参数的最佳匹配区间加以明确，进而在让传热效率获得提升的同时，把流动阻力管控在合理范围之内，对传热恶化现象加以规避，并且对系统稳定运行状态进行保障。

## 4 工程应用建议与优化设计准则

### 4.1 内螺纹管在超临界锅炉中的选型建议

内螺纹管的选型要把锅炉的运行参数、工质特性以及水冷壁结构形式进行综合考量。对于超超临界锅炉这类更高参数机组而言,鉴于伪临界区工质物性变化变得更为剧烈,传热恶化风险更高,应挑选传热强化效果更为显著的内螺纹管,建议采用3—4头螺纹、较小螺距(一般为15—30mm)以及中等齿高(一般为1—3mm)的结构,以此保证具备足够的扰动强度;对于低负荷运行比例较高的机组,需要兼顾低流速工况下的流动稳定性,建议选择梯形截面螺纹或者较少螺纹头数的结构,从而降低流动阻力,避免出现流动停滞现象。在水冷壁不同区域的选型当中,炉膛高热负荷区(像燃烧器区域)应优先采用传热强化效果优良的内螺纹管,而在低热负荷区可依据经济性要求适当选用低阻力型内螺纹管或者光滑管;对于垂直上升管屏,需要考虑浮力效应所产生的影响,选择螺旋升角较大的内螺纹管来增强旋流作用;对于水平或倾斜管屏,应选择螺纹头数较多的结构,用以抑制重力造成的流动分层情况。除此之外,选型时还需考虑材料兼容性和制造工艺可行性,确保内螺纹管的结构参数与锅炉整体设计相契合。

### 4.2 内螺纹管水冷壁的设计优化准则

内螺纹管水冷壁的设计应当遵循“传热强化与流动稳定形成协同、结构参数和工况参数达成匹配、安全性与经济性实现统一”的准则。在流道设计方面,需要保证管内工质拥有足够的质量流速,通常建议超临界锅炉水冷壁内工质质量流速不低于 $1000\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,以此配合内螺纹结构的扰动作用,避免在低流速情况下出现传热恶化问题;同时,流道布置应尽量减少局部阻力发生突变,防止因流动分离而导致局部过热现象。在结构参数优化方面,应当采用多目标优化方法,以传热系数最大化为目标,把流动阻力损失作为约束条件,确定出最优的螺纹头数、螺距、齿高以及螺旋升角组合;对于高参数机组,可采用变参数内螺纹管设计,也就是在水冷壁不同区域采用不同结构参数的内螺纹管,以适应不同热负荷与流动工况的需求。强度规划情形中,要对螺纹构造给管壁应力分布带来的作用加以考量,螺纹突出部分的根部容易出现应力汇聚状况,规划之时应让螺纹截面形态得到优化,将根部圆角半径予以扩大,使管壁可以达到长期处于高温高压环境下运行的强度要求得以保障。

### 4.3 应用前景与后续研究方向

内螺纹管作为超临界锅炉抑制传热变坏的关键技术,

当超超临界机组朝着更高参数(像 $700^\circ\text{C}$ 先进超超临界技术)迈进时,其应用景象会愈发开阔。将来内螺纹管的应用不会只在传统火电锅炉范围内,还会延伸到生物质发电、垃圾焚烧发电等新能源发电领域的超临界锅炉,以及超临界 $\text{CO}_2$ 循环体系的换热装置当中。后续探究应把重点放在以下路径:其一为新型内螺纹构造的研发,例如非对称螺纹、变螺距螺纹等,进一步让传热强化效果和流动稳定性得到提升;其二是超临界极端工作状况下内螺纹管的传热特性探究,揭示出高温高压、低质量流速等复杂条件下的传热变坏机理以及内螺纹管的抑制效果;其三为内螺纹管的长期运行性能探究,剖析磨损、腐蚀、氧化皮脱落等因素对传热性能和结构安全性产生的影响;其四是数值模拟办法的改进,开发出更精确的湍流模型和物性模型,让内螺纹管流动和传热特性的预测精准度得到提高。

## 5 结语

内螺纹管借助其特别的螺旋形突出构造,从流动特性和传热机理两个层面达成了对超临界锅炉水冷壁传热变坏的有效抑制。其核心机理表现为:增强流体的二次流和旋流运动,让径向混合强度得以提升;打破壁面低密度流体层的连贯性,对类气膜效应的形成和发展起到抑制作用;使壁面温度排布得到优化,减少局部热点和温度梯度。螺纹头数、螺距、齿高、螺旋升角以及截面形态等结构参数,通过对流动扰动强度和流动阻力产生影响,对传热变化抑制效果呈现出显著的敏感性作用。在工程应用过程中,内螺纹管的选型需要结合锅炉运行参数和水冷壁区域特性,设计优化应遵循传热和流动协同、参数匹配、安全经济统一的原则。未来,随着超临界技术向更高参数、更广泛领域发展,新型内螺纹构造的研发、极端工作状况下的特性探究以及长期运行性能分析会成为重点探究方向,为超临界锅炉的安全高效运行提供更为坚实的技术支撑。内螺纹管作为抑制传热变坏的核心技术,在能源电力行业的绿色低碳发展中会持续发挥重要作用。

## 参考文献

- [1] 祝超,牛胜利,王俊.内螺纹管中超临界水的传热数值模拟[J].热能动力工程,2023,38(06):96-106.
- [2] 唐铭泽,盛伟.内螺纹管结构对有机朗肯循环管内换热的影响[J].现代制造技术与装备,2023,59(07):45-47.
- [3] 曲默丰,李娟,董乐,等.半周加热内螺纹管中超临界水传热特性的数值模拟及机理分析[J].动力工程学报,2019,39(11):893-899.