

汽轮机启动过程中的热应力分析与控制策略

杨元

申能吴忠热电有限责任公司 宁夏 吴忠 751100

摘要: 本文旨在深入探讨汽轮机启动过程中热应力的形成机制,并提出相应的控制策略。汽轮机在启动过程中,由于温度剧烈变化,各零部件间易形成较大的温差,从而产生显著的热应力。本文将从汽轮机的受热特点、热应力的形成原理、关键部位的热应力分析以及控制策略等方面进行全面阐述,以期为汽轮机的安全稳定运行提供理论支持和实践指导。

关键词: 汽轮机;启动过程;热应力;控制策略

引言

汽轮机作为电力工业中的核心设备,其启动过程中的热应力问题一直是关注的焦点。热应力的产生不仅影响汽轮机的运行效率,还可能对其结构完整性造成损害,进而影响整个电力系统的安全稳定运行。因此,对汽轮机启动过程中的热应力进行深入分析,并提出有效的控制策略,具有重要的理论和实际意义。

1 汽轮机的受热特点

1.1 汽缸的受热特点

在汽轮机启动的初始阶段,高温蒸汽作为热量的载体,首先通过对流这一高效的热传递方式,将蕴含的热能传递给汽缸的内壁。这一过程如同热浪冲击沙滩,蒸汽中的热能迅速在汽缸内壁“着陆”。随后,这些热量并不停留,而是继续以导热的方式,像热量在金属中的“慢跑者”,逐渐而稳定地向汽缸的外壁传递。然而,由于热量传递的速度差异,汽缸内外壁之间不可避免地产生了温差,内壁因直接受热而温度较高,外壁则相对较低。这种温差导致了汽缸内外壁的热膨胀程度不一,进而在材料内部诱发了热应力的产生,这对汽缸的结构强度和稳定性构成了考验。因此,在汽轮机设计和运行过程中,必须充分考虑这一受热特点,以确保汽缸的安全可靠运行。

1.2 转子的受热特点

在汽轮机启动的初始阶段,转子作为核心部件,同样经历着蒸汽的强烈对流换热作用。蒸汽携带的高温热能,如同汹涌的热浪,首先冲击并加热转子的外表面。这一过程中,热量迅速在转子外表面累积,导致其温度急剧上升。然而,与外表面的迅速升温相比,转子中心孔的温度上升却显得相对迟缓。这是因为热量从外表面向中心孔传递需要一定的时间,且受到材料热传导性能的限制。这种内外表面温度上升的不同步性,使得转子

内外表面之间形成了显著的温差。温差的存在进一步导致了转子材料内部热应力的产生,对转子的结构强度和运行稳定性构成了潜在威胁。因此,在汽轮机设计和运行过程中,必须充分考虑转子的受热特点,采取有效措施以降低热应力,确保转子的安全可靠运行。

2 汽轮机启动过程中热应力的形成原理

热应力,这一物理现象,其根源在于物体温度变化时热变形受到的限制。当物体处于一个自由状态,且其内部各点温度均匀上升或下降时,物体会因热胀冷缩而产生相应的热变形,但此时并无热应力产生,因为变形未受到任何外部约束。然而,在汽轮机这一复杂机械系统中,情况则截然不同。汽轮机启动过程中,高温蒸汽的涌入使得各零部件开始受热。由于蒸汽与零部件之间的对流换热作用,以及零部件自身导热性能的差异,导致各零部件温度分布并不均匀。特别是对于那些厚度较大或结构复杂的部件,如汽缸和转子,其内外表面温度差异尤为显著。在这种温度分布不均匀的情况下,零部件的热变形会受到其他部件的约束,或者部件内部各部分之间也会因温度差异而产生相互约束。这种约束作用阻碍了热变形的自由进行,从而在零部件内部产生了应力,即热应力。热应力的大小与温度梯度的大小、材料的热膨胀系数以及约束程度密切相关。在汽轮机启动过程中,由于各零部件温度分布的不均匀性和相互约束的存在,热应力的产生是不可避免的^[1]。因此,为了保障汽轮机的安全运行,必须采取有效措施来控制 and 降低热应力,如优化启动程序、加强热应力监测等。

3 关键部位的热应力分析

3.1 汽缸壁的热应力详解

汽缸作为汽轮机的重要组成部分,其壁厚的热应力问题不容忽视。在启动初期,高温蒸汽首先与汽缸内壁接触,导致内壁温度迅速上升,从而产生热膨胀。由

于外壁温度上升相对较慢，内外壁之间形成温差，进而在汽缸壁内产生热应力。具体来说，内壁因受热膨胀而受到外壁的约束，产生热压应力；而外壁则因内壁的膨胀而受到拉伸，产生热拉应力。随着温差的增大，这两种热应力也相应增大，对汽缸的结构强度构成威胁。因此，严格控制汽缸内外壁的温差是降低热应力的关键。根据行业标准，汽缸内外壁温差应控制在一定范围内，以确保汽缸的安全运行。

3.2 法兰螺栓的热应力剖析

法兰连接是汽轮机中常见的连接方式，而法兰螺栓的热应力问题同样值得关注。在启动过程中，由于法兰内外侧温差的存在，法兰本身会产生热应力。同时，由于法兰通常直接暴露在高温蒸汽中，其温度往往高于螺栓的温度。这种温度差异导致螺栓在法兰的约束下产生额外的热拉应力。若法兰与螺栓的温差过大，螺栓可能因承受过大的拉应力而断裂，进而引发严重的安全事故^[2]。因此，在设计和运行过程中，应充分考虑法兰与螺栓的温度差异，采取适当的措施（如使用耐高温材料、增加螺栓数量或直径等）来降低螺栓的热应力。

3.3 转子的热应力探讨

转子作为汽轮机的核心部件，其热应力问题尤为复杂。在启动过程中，转子外表面首先受到高温蒸汽的加热，温度迅速上升；而中心孔由于热传导的滞后性，温度上升相对较慢。这种内外表面的温差导致转子产生热应力。随着转子直径的增大和热容量的增加，转子热应力问题愈发突出。特别是在高压转子的调节级和中压转子的第一级附近，由于蒸汽温度和压力较高，热应力往往达到最大值。这些区域的转子材料可能因承受过大的热应力而发生屈服或蠕变，进而影响转子的运行稳定性和寿命。因此，在转子设计和制造过程中，应充分考虑其热应力分布特点，采用高强度、耐高温的材料，并优化转子的结构设计以降低热应力。

4 汽轮机启动过程中热应力的控制策略

4.1 优化启动程序

在汽轮机启动过程中，热应力的控制是确保机组安全稳定运行的关键环节。为了有效降低热应力，优化启动程序显得尤为重要。其中，采用滑参数启动方式是一种行之有效的策略。滑参数启动，顾名思义，是指在汽轮机启动过程中，通过逐步调整蒸汽的参数（如温度、压力等），使机组在较为温和的条件下逐渐升温升压，从而减缓汽轮机的加热速度。这种启动方式与传统的直接升温升压方式相比，具有显著的优势。首先，滑参数启动能够更均匀地加热汽轮机各部件，避免局部过热导

致的热应力集中。通过逐步增加蒸汽温度和流量，可以确保汽轮机各部件在受热过程中温度分布相对均匀，从而减小内外壁、法兰螺栓以及转子等关键部位的温差，进而降低热应力的产生。其次，滑参数启动有助于延长汽轮机部件的使用寿命。由于加热速度减缓，部件所承受的热冲击减小，从而减少了因热应力导致的材料疲劳和损伤。这对于提高汽轮机的可靠性和延长使用寿命具有重要意义。此外，滑参数启动还有利于机组的稳定运行。通过逐步调整蒸汽参数，可以使机组在启动过程中更加平稳地过渡到正常运行状态，避免因热应力过大而导致的机组振动、噪音等问题。在实施滑参数启动时，需要根据汽轮机的具体型号和工况制定合理的启动曲线。这条曲线应充分考虑机组各部件的热惯性、热传导性能以及蒸汽参数的变化速率等因素，以确保启动过程中热应力的有效控制。同时，还需要对启动过程进行严密监控，及时调整蒸汽参数，以确保机组在安全、稳定的条件下顺利启动。

4.2 加强温度监测与控制

在汽轮机启动的复杂过程中，温度的精确监测与控制是确保热应力得到有效管理的关键。为了实现这一目标，必须加强对汽轮机各关键部位温度的实时监测与精准控制。首先，针对汽缸这一关键部件，应密切关注其内外壁的温差。通过安装高精度的温度传感器，实时监测汽缸内外壁的温度变化，并计算温差值。一旦温差超过预设的安全范围，应立即调整启动策略，如减缓蒸汽的升温速度或增加冷却介质的流量，以确保温差得到有效控制。这种实时监测与调整的策略，能够显著降低汽缸壁因温差过大而产生的热应力，保障其结构完整性。其次，对于法兰与螺栓这一连接部位，同样需要加强温度监测^[3]。由于法兰通常直接暴露在高温蒸汽中，而螺栓则可能因热传导的滞后性而温度较低，因此两者之间存在温差。通过实时监测法兰与螺栓的温度，并计算温差值，可以及时发现并解决潜在的螺栓热应力问题。例如，当温差过大时，可以采取增加螺栓预紧力或更换耐高温螺栓等措施，以确保法兰连接的稳定性和安全性。此外，转子作为汽轮机的核心部件，其内外表面的温差也是监测的重点。通过实时监测转子外表面的温度，并结合转子的热传导特性，可以推算出转子中心孔的温度，进而计算温差值。根据温差的大小和分布情况，可以及时调整蒸汽的参数和流量，以确保转子在启动过程中受热均匀，降低热应力的产生。

4.3 采用合理的加热与冷却方式

在汽轮机的启动和停机过程中，加热与冷却方式的

合理选择对于热应力的控制至关重要。为了减小温差和热应力的产生,必须采取一系列科学合理的加热与冷却措施。在启动过程中,预热措施是不可或缺的一环。通过提前对汽轮机各部件进行预热,可以使其逐渐升温至接近工作温度,从而减小启动时的温差。预热可以通过多种方式进行,如使用辅助蒸汽系统对汽缸和转子进行加热,或者利用机组自身的余热进行循环加热。这些预热措施能够确保汽轮机在启动初期各部件受热均匀,有效降低热应力的产生。同样,在停机过程中,预冷措施也显得尤为重要。通过逐渐降低蒸汽温度和流量,使汽轮机各部件缓慢冷却至安全温度,可以避免因快速冷却而产生的过大热拉应力。预冷过程中,应密切关注各部件的温度变化,确保冷却速率在可控范围内。此外,还可以采用自然冷却或强制通风等方式,以加速部件的冷却过程,但同时必须确保冷却速率不会过快,以免对部件造成损害^[4]。除了预热和预冷措施外,合理的加热与冷却方式还包括在启动和停机过程中保持蒸汽参数的稳定。蒸汽温度和压力的变化应尽可能平稳,避免急剧的升降,以减少对汽轮机各部件的热冲击。同时,还应根据汽轮机的具体型号和工况,制定详细的加热与冷却操作规程,确保操作人员能够准确执行,从而有效降低热应力的产生。

4.4 提高材料性能

在汽轮机设计与制造过程中,材料的选择与处理对于提高其抗热应力能力至关重要。通过选用具有优异性能的材料,并辅以先进的表面处理技术,可以显著提升汽轮机的耐热性能和抗热疲劳性能。首先,在材料选择方面,应优先考虑那些具有较低热膨胀系数、高强度以及高韧性的材料。热膨胀系数较低的材料在温度变化时产生的热变形较小,从而能够降低因热变形受到约束而产生的热应力。同时,高强度和高韧性的材料能够更好地承受热应力带来的负载,避免材料因应力过大而发生屈服或断裂。例如,某些高性能合金钢和镍基合金就因其优良的热机械性能而被广泛应用于汽轮机的高温部件中。其次,表面处理技术

也是提高汽轮机抗热应力能力的重要手段之一。喷涂陶瓷涂层是一种常见的表面处理方法,它能够在零部件表面形成一层耐高温、抗氧化的保护层。这层陶瓷涂层不仅能够有效隔绝高温蒸汽与零部件基体的直接接触,降低零部件的受热速度,从而减小温差和热应力;同时,它还能够提高零部件的耐磨性和抗腐蚀性能,延长其使用寿命。除了喷涂陶瓷涂层外,还可以采用其他表面处理技术来提高汽轮机的抗热应力能力。例如,表面渗碳、渗氮等化学热处理技术可以改善材料的表面组织和性能,提高其硬度和耐磨性;而激光熔覆等先进技术则可以在零部件表面形成一层具有特殊性能的合金层,进一步增强其抗热应力和抗热疲劳的能力。通过选用具有优异性能的材料并辅以先进的表面处理技术,可以显著提升汽轮机的抗热应力能力。这不仅有助于保障汽轮机的安全稳定运行,还能够延长其使用寿命,降低维修成本,为电力行业的持续发展提供有力支持。

结语

汽轮机启动过程中的热应力问题是一个复杂而重要的研究课题。通过深入分析汽轮机的受热特点、热应力的形成原理以及关键部位的热应力分布情况,我们可以提出一系列有效的控制策略来降低热应力的产生。这些策略的实施将有助于提高汽轮机的运行效率和安全性,为电力系统的稳定运行提供有力保障。

参考文献

- [1]董洪潮,曹敏,朱雷,等.汽轮机转子冷态启动过程的温度场和热应力研究[J].化工设备与管道,2024,61(01):63-69.
- [2]王鹏.基于热应力疲劳寿命分析的汽轮机机组启动方案[J].热力透平,2017,46(03):175-179.
- [3]温文忠.燃气轮机温度匹配功能在热应力控制的汽轮机应用[J].燃气轮机技术,2022,35(02):64-67.
- [4]杨晨,柴京,张涛,等.基于LSTM网络的汽轮机转子热应力预测方法[J].计算机仿真,2023,40(02):123-127+202.