

螺旋锥齿轮减速机热效应与润滑性能的分析及优化策略

丁建森

浙江赛勒传动设备有限公司 311200

【摘要】本文深入研究螺旋锥齿轮减速机热效应与润滑性能。通过理论分析，建立热传递和润滑模型，阐述热产生机制以及润滑对齿面接触状态的影响。运用数值模拟方法，借助专业软件对不同工况下减速机内部温度场、热应力分布以及润滑油膜厚度、压力分布进行仿真分析。同时，搭建实验平台，开展热效应和润滑性能实验，验证理论与模拟结果。研究结果揭示了螺旋锥齿轮减速机热效应与润滑性能的内在关联，为优化设计、改进润滑策略提供理论依据，能够有效增强减速机的工作效能，减少能源消耗，并延长其运行寿命。

【关键词】螺旋锥齿轮减速机；热效应；润滑性能

Analysis and optimization strategy of thermal effect and lubrication performance of spiral bevel gear reducer

Ding Jianmiao

Zhejiang Saler Transmission Equipment Co., Ltd. 311200

【Abstract】 This paper studies the thermal effect and lubrication performance of spiral bevel gear reducer. Through theoretical analysis, the heat transfer and lubrication model, the heat generation mechanism and the lubrication on the tooth surface. Using the numerical simulation method, the internal temperature field, thermal stress distribution and the thickness and pressure distribution of the lubricating oil film in the reducer under different working conditions are analyzed. At the same time, the experimental platform is set up to carry out the thermal effect and lubrication performance experiments to verify the theoretical and simulation results. The results reveal the internal correlation between the thermal effect and the lubrication performance of the spiral bevel gear reducer, which provides a theoretical basis for optimizing the design and improving the lubrication strategy, and can effectively enhance the working efficiency of the reducer, reduce the energy consumption, and prolong its operating life.

【Key words】 spiral bevel gear reducer; thermal effect; lubrication performance

引言

螺旋锥齿轮减速机运行中，热效应与润滑性能至关重要。热效应源于齿轮咬合、轴承旋转摩擦及润滑油搅动产热，高温会削弱材料性能，如硬度、强度，加速磨损与疲劳，导致齿轮啮合不良、轴承游隙变化，影响传动精度与稳定性。长时间高速重载运行且散热不良时，齿面易发生胶合、点蚀，大幅缩短寿命。因此，需根据热效应与润滑性能变化，适时调整工作参数、更换润滑油，确保正常运行。此举能提升机械稳定性与作业效率，减少故障与维修成本，同时推动相关行业科技创新，促进可持续发展。通过有效管理热效应与润滑，螺旋锥齿轮减速机的性能与寿命得以优化。

一、螺旋锥齿轮减速机工作原理与结构特点

1.1 工作原理

螺旋锥齿轮减速机由多个关键组件构成，涵盖接收动力输入的轴、输出动力的轴、主动旋转的锥齿轮、被动旋转的从动锥齿轮（可能以多组形式存在以实现复杂的传动机制），以及部分型号特有的偏心锥齿轮，还有保障各组件顺畅动作的轴承等部件。动力源（例如电机）一旦启动，便会通过输入轴带动主动锥齿轮旋转，主动锥齿轮随后与从动锥齿轮

（或特定型号中的偏心锥齿轮）相啮合。在啮合时，这种接触可能是线性的或点状的，这取决于齿轮的设计与制造精度。主动锥齿轮与从动锥齿轮的齿面紧密配合，从而实现了动力的有效传递。由于两者的齿数存在差异，主动锥齿轮旋转时，会导致从动锥齿轮以较慢的速度旋转，从而达到减速效果。经过减速的动力最终通过输出轴传输给工作设备，驱动其运作。

1.2 结构组成及特点

螺旋锥齿轮减速机由以下几个主要部分组成：齿轮组件、轴系结构、支撑轴承以及润滑系统。齿轮（主动与从动）的螺旋齿形设计提升重合度与承载能力，实现平稳高效传动。轴包括输入、输出及中间传动轴，分别负责动力引入、输出及传递。轴承起到支撑轴旋转的作用，同时能够承受来自径向和轴向的力，并在此过程中产生一定的热量。润滑系统含润滑油、油泵等，对减速机性能至关重要，影响润滑与热传递效率。

二、螺旋锥齿轮减速机热效应分析

2.1 热源分析

2.1.1 齿轮啮合摩擦生热

在螺旋锥齿轮相互啮合时，其齿面不仅进行滚动还伴有滑动。这种齿面间的相对运动，加之齿面微观上的不平整，

会不可避免地引发摩擦力的产生。根据摩擦生热原理,摩擦力做功转化为热能,其生热功率可通过公式 $q = \mu F v$ 计算,其中 μ 为摩擦系数,与齿面材料、润滑状态等有关; F 为齿面法向载荷, v 取决于传递的扭矩和齿轮参数;为齿面相对滑动速度,它与齿轮的转速和螺旋角等因素相关。随着齿轮的持续啮合,这种摩擦生热不断积累,成为热效应的主要热源之一。

2.1.2 轴承摩擦生热

轴承作为螺旋锥齿轮轴的坚强后盾,在运作过程中,其内部的滚动体与内外圈滚道以及保持架之间,都会产生摩擦。这些摩擦就像是一场能量的“消耗战”,将机械能悄然转化为热能。而轴承的种类、润滑的优劣、旋转的速度以及所承载的重量,都是这场“消耗战”激烈程度的关键因素。比如在高速且重载的工作环境下,圆锥滚子轴承就像是一个肩负重任的战士,既要承受巨大的轴向和径向压力,又要面对摩擦带来的热能激增。

2.1.3 搅油损失生热

在采用油浴润滑或飞溅润滑的螺旋锥齿轮减速机中,旋转的齿轮和轴会将润滑油搅动。润滑油具有粘性,在与齿轮、轴、箱体等部件的相对运动中,会产生粘性阻力。克服这些粘性阻力需要消耗能量,这些能量最终转化为热能,即搅油损失生热。搅油损失所引发的热量产生,与润滑油的粘稠程度、齿轮与轴的旋转速率以及它们沉浸在油中的深度有着紧密的关联。如果把润滑油比作浓粥,那么粥越稠(粘度越高)、搅拌得越快(转速越快)、勺子深入粥中的程度越深(浸油深度越大),因搅拌而散失的热量也就越多。

2.2 热传递分析

2.2.1 热传导

热传导是螺旋锥齿轮减速机内热传递的重要方式之一,它主要发生在齿轮、轴、轴承等固体部件内部。当部件内部温度分布不均,即存在温差时,热量会像水流一样,从温度较高的地方流向温度较低的地方。

齿轮内部的热量传递历程相当蜿蜒复杂。由于齿轮啮合时齿面摩擦生热,齿面温度相对较高,热量首先从齿面开始向齿体内部传导。齿面的热量通过齿廓传递到齿根,再沿着齿根向轮毂方向传导,在这个过程中,齿面温度下降最快的方向是与热量流动的方向截然相反的。由于齿轮的材料通常具有一定的各向异性,其不同方向上的热导率可能存在差异,这会导致热量在不同方向上的传导速度不同。在沿齿廓方向和沿齿根方向,热导率可能略有不同,从而影响热量的传导路径和分布。

2.2.2 热对流

热对流主要发生在润滑油与齿轮、轴、箱体等组件,以及润滑油与空气间的相互作用中。在润滑油内部,齿轮和轴的搅动促使形成强制性的流动,热量便随着这股油流传递开来。而在箱体的外表面,热量则通过自然流动或受外力驱动的流动方式,传递给周围的空气。热对流的强烈程度受流体速度、温差大小以及换热面积等多重因素影响。对于强制对流,我们可以利用经验公式来估算其换热效率;而对于自然对流,则常采用努塞尔数关联式来确定其换热系数,以此来

描述热量传递的特性。

热对流在螺旋锥齿轮减速机的热传递过程中是一个复杂的物理过程,受到多种因素的综合影响。通过合理设计润滑系统和散热结构,优化润滑油的流动状态和空气的对流方式,能够有效地提高对流换热效率,降低减速机的温度,保证其正常运行。

2.2.3 热辐射

热辐射是螺旋锥齿轮减速机热量传递的重要途径,它像物体发射电磁波那样,将热量散发至周围。减速机运行时,其箱体表面成为热辐射的主要源头,一旦温度高于环境,便像炽热星球般向四周“发射”热辐射。这种能量传递无需介质,真空环境亦能进行。热辐射强度取决于箱体表面温度、辐射能力及表面积。虽不如热传导和热对流直观,但在高温下对减速机散热至关重要。通过合理设计箱体结构、优化表面处理及考虑环境因素,可有效利用热辐射提升减速机散热性能,确保其在各种工况下稳定运行。合理管理热辐射,对优化减速机热传递、保障其性能具有重要作用。

三、螺旋锥齿轮减速机润滑性能分析

3.1 润滑机理

3.1.1 流体动压润滑

在螺旋锥齿轮相互啮合时,随着齿面的相对移动,润滑油被挤压进入齿面之间形成的楔形空间内。由于润滑油具有粘性,在齿面运动的带动下,形成一定的压力分布,产生动压力,从而将两齿面分开,形成流体动压油膜。依据流体力学的基本理论,油膜压力的分布状况受到齿面相对速度、润滑油的黏度以及间隙几何形状等多种因素的影响。在理想的流体动压润滑状态下,齿面间的摩擦主要为液体内部的粘性摩擦,摩擦系数极低,可有效减少齿面磨损和能量损耗。

3.1.2 弹性流体动力润滑

考虑到螺旋锥齿轮在啮合过程中,齿面会受到较大的接触应力而发生弹性变形,实际的润滑状态更符合弹性流体动压润滑理论。在高载荷作用下,齿面接触区域的弹性变形会改变齿面间的间隙形状,进而影响油膜的形成和压力分布。此时,润滑油不仅要承受流体动压力,还要适应齿面的弹性变形,以维持有效的润滑。弹性流体动压润滑理论更准确地描述了螺旋锥齿轮在重载工况下的润滑行为,对于理解和优化润滑性能具有重要指导作用。

3.2 润滑油性能对润滑的影响

润滑油的粘稠度是衡量其润滑效果的关键。粘度过低,油膜薄,增加摩擦磨损;粘度过高,流动性差,润滑部位难以到达,且搅油损失大,油温升高。选择润滑油需考虑减速机工况,如转速、负载、温度。高速轻载时,选低粘度油减小能耗;低速重载时,用高粘度油确保油膜强度。

润滑系统设计对确保润滑油供给和分布至关重要,选定恰当润滑手段是关键。飞溅润滑适用于小型、低速、轻载减速机;压力润滑则适用于高速、重载情况。油管布局 and 直径影响润滑油流动和流量分配,应确保均匀输送,避免局部润滑不足。直径过小增加阻力,降低流量;直径过大则增加成

本和复杂性。

工作温度也影响润滑效果。温度升高,润滑油粘度降低,油膜变薄,承载性能减弱,加剧磨损和胶合风险,同时加速氧化,损害性能。低温时,粘度增加,流动性减弱,难以形成有效润滑膜,增加启动难度和磨损。因此,需选合适粘温特性的润滑油,并采取温控措施,确保润滑效果。

四、热效应与润滑性能的相互关系

4.1 热效应对润滑性能的影响

温度是影响润滑油粘度的关键因素,温度升高会减弱分子间吸引力,导致粘度下降,油膜变薄,支撑力减弱,增加齿面损伤和磨损风险。粘度变化直接影响油膜厚度与承载能力,这是评估润滑效能的关键参数。在给定工况下,粘度下降会导致油膜厚度缩减,接触应力增大,承载能力下降,润滑性能降低,齿面磨损和失效风险增加。此外,热效应还会导致螺旋锥齿轮、轴和箱体等部件热变形,恶化齿面接触状态,影响油膜形成和分布;改变轴承间隙和接触情况,影响润滑效果;以及影响润滑油流动模式和分布状态,造成润滑不均衡。因此,热效应对螺旋锥齿轮减速机润滑性能的影响不可忽视,需合理控制温度,确保润滑效果。

4.2 润滑性能对热效应的影响

良好的润滑可以显著降低齿面和轴承的摩擦系数,减少摩擦生热。当润滑油在齿面间成功构建起稳定的油膜层时,齿面间的直接接触滑动转变为油膜内部的液体滑动,这使得摩擦阻力显著减小,相应地,机械能向热能的转换量也大幅减少。此外,良好的润滑还可以使齿轮和轴承的运动更加平稳,减少冲击和振动,进一步降低摩擦生热。

润滑油在循环流动过程中,能够吸收齿轮和轴承产生的热量,并将其带到箱体表面散发出去,起到散热的作用。润滑油的散热能力与润滑油的比热容、流量以及与箱体表面的换热系数等因素有关。通过合理设计润滑系统,增加润滑油的流量和流速,可以提高润滑油的散热效果,降低减速机的温度。

五、优化策略

5.1 设计优化

5.1.1 齿轮参数优化

根据热效应和润滑性能的要求,对齿轮的模数、齿数、螺旋角等参数进行优化设计是提升螺旋锥齿轮减速机性能的关键环节。在选择齿轮模数时,要全面权衡其承载强度与发热情况。当模数增大时,齿厚相应增加,这使得齿轮能够

承受更大的载荷,同时齿面接触应力得以分散,降低了单位面积上的应力值,从而减少了摩擦生热。在一些重载工况下,适当增大模数可以有效提高齿轮的抗磨损和抗疲劳能力,减少因热效应导致的齿面损伤。但模数过大也会带来一些问题,如齿轮尺寸增大,导致减速机的整体体积和重量增加,同时搅油损失也会相应增大,进一步影响热效应。因此,在确定模数时,需要通过精确的计算和模拟分析,找到一个既能满足承载要求又能有效控制热效应的最佳值。

5.1.2 润滑系统优化

改进润滑系统结构与布局对提升螺旋锥齿轮减速机润滑和散热能力至关重要。设计时需紧密结合减速机工作特性及润滑需求,尤其大型减速机因功率大、转速高、载荷重,对润滑要求更严。为此,可部署多级过滤机制,经粗滤、精滤等净化步骤,清除油中杂质,降低磨损风险,维护油质纯净,提升润滑效能。同时,合理设计油路走向和管径,利用CFD模拟分析优化油路布局,确保润滑油均衡有效送达各润滑区,避免局部缺油或堆积。设计油路时还需考虑润滑油流动阻力,确保各工况下部件获足够油流量和压力,全面增强减速机的润滑效果和散热能力。

5.2 材料选择与工艺改进

挑选齿轮材料需考虑性能、加工特性和成本。材料应易锻造、切削,热处理可控,实现预期性能。常用国产材料如40Cr、42CrMo性能优良,价格合理,是优选。根据工作条件和性能要求,选择合适的表面处理工艺:重载、冲击载荷大的齿轮可选渗碳工艺,提高硬度和强度;尺寸精度高、工作环境有腐蚀性的齿轮可选氮化工艺。也可结合多种工艺,如渗碳后氮化,提升综合性能。这些改进能有效提高齿轮表面性能,改善润滑,提升减速机整体性能和可靠性。在保证性能的前提下,选择成本较低的材料,降低制造成本,是选材的重要原则。

结论

本文针对本研究围绕螺旋锥齿轮减速机的热效应与润滑性能展开,根据实际操作环境和条件精选合适的润滑油粘度,在润滑油的甄选与优化中扮演着举足轻重的角色。在高速且负载较轻的情境下,低粘度润滑油更为适用;而在低速重载的工况下,高粘度润滑油成为更优选择,同时需科学运用抗磨、抗氧化及减摩添加剂来优化润滑效果。此外,还应密切留意新型润滑油及添加剂的研发进展,例如纳米级添加剂等前沿技术。在螺旋锥齿轮减速机热效应与润滑性能方面仍存在一些有待深入探究的方向。

参考文献

- [1]吕晓,红廖忠.吕晓红廖忠.K II 2-1000型减速机螺旋锥齿轮计算及参数分析[J].包钢科技,2004,(05):39-41.
- [2]孙晓宇.螺旋锥齿轮弹流润滑及动力学特性研究[J].黑龙江:哈尔滨大学.2021
- [3]咸立国、姚廷强、龚岸琦.螺旋锥齿轮减速机系统振动分析[J].机械与电子,2017,35(10):3-6.
- [4]王焕心.SP3平行杆螺旋齿轮减速机[J].机械与电子,2001(06):33.