

固体膜高速齿轮胶合失效的原理分析

王 建 设

摘要：本文论述了固体膜高速齿轮胶合失效的机理。对敏感因素作了理论分析。提出了提高固体膜齿轮抗胶合失效能力的技术措施。

一、引 言

高速齿轮在现代大型工业、高速飞行和宇航领域里作为一种动力传动装置，对工业设备和现代飞行装置的发展起着促进和加速的作用。高技术的固体膜高速齿轮的设计、制造水平直接影响到使用的可靠性。美国、日本等国在该领域不惜投以巨资进行长期大规模的试验研究，取得了一定的成果。在我国限于试验能力和条件，目前这方面的工作还很不深入。如何提高高速齿轮的发展水平和使用的可靠性，十分有必要对其传动的动态性能、失效形式、胶合机理、敏感因素等在理论上作一系统分析。从而根据分析结果和数据对固体膜高速齿轮进行优化设计。采取一定的技术措施来提高其承载能力和可靠性，获得良好的传动性能。这样可以大大减小试验耗资，缩短研制周期。鉴于此，本文对固体膜高速齿轮的胶合机理作一理论探讨。

二、动态性能分析

固体膜高速齿轮轮齿表面涂有一层薄膜，与基体形成复合层齿面。齿轮的转速可达40000 rpm。固体膜的存在使得齿轮动态问题的分析变得非常复杂和特殊。对其动态特性和温度特性本文提出下面的分析框图见图1，并推导出齿轮动载荷 Q_d 和齿面温度 θ 的计算公式。

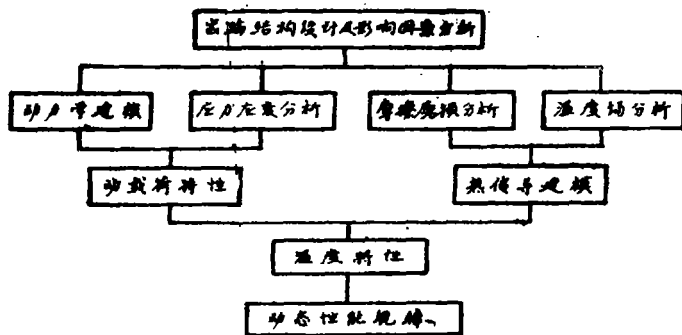


图1 分析框图

动载荷计算公式

$$Q_d = \frac{2P_d}{\pi} \left\{ \frac{4P_d R_1 R_2}{\pi^2 S (R_1 + R_2)} \left(\frac{1 - \bar{\mu}_1^2}{E_1} + \frac{1 - \bar{\mu}_2^2}{E_2} \right) + \sqrt{\left[\frac{4P_d R_1 R_2}{\pi^2 S (R_1 + R_2)} \left(\frac{1 - \bar{\mu}_1^2}{E_1} + \frac{1 - \bar{\mu}_2^2}{E_2} \right) \right]^2 + \frac{4P_d R_1 R_2}{\pi (R_1 + R_2)} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)} \right\}^{-1} \quad (1)$$

齿面温度计算公式 ($\theta_{M1} = \theta_{M2}$)

$$\theta_s = \theta_M + \frac{50\sqrt{5} \lambda_1 \lambda_2 u b^2 Q_d |v_{t1} - v_{t2}|}{9s^3 (\lambda_1 v_{t1}^2 c_1^2 \rho_1^2 + \lambda_2 v_{t2}^2 c_2^2 \rho_2^2)} \quad (2)$$

其中:

$$b = \frac{4P_d R_1 R_2}{\pi^2 S (R_1 + R_2)} \left(\frac{1 - \bar{\mu}_1^2}{E_1} + \frac{1 - \bar{\mu}_2^2}{E_2} \right) + \sqrt{\left[\frac{4P_d R_1 R_2}{\pi^2 S (R_1 + R_2)} \left(\frac{1 - \bar{\mu}_1^2}{E_1} + \frac{1 - \bar{\mu}_2^2}{E_2} \right) \right]^2 + \frac{4P_d R_1 R_2}{\pi (R_1 + R_2)} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)} \quad (3)$$

式中: R_1, R_2 为啮合点处齿廓曲率半径。

E, μ 为固体膜的杨氏模量和泊松比。

$\bar{E}, \bar{\mu}$ 为齿轮基体的杨氏模量和泊松比。

P_d 为由同一材料(基体)齿轮上作用的动载荷。

θ_M 为齿轮表面的初始温度。

λ_1, λ_2 分别为两齿面的固体膜导热系数。

u 为固体膜间的摩擦系数。

v_{t1}, v_{t2} 分别为啮合点处两齿面的切向速度。

c_1, c_2 为固体膜的比热。

ρ_1, ρ_2 为固体膜的密度。

b 为齿面接触变形的宽度尺寸的一半。

S 为固体膜厚度。

上述公式仅适用于固体膜厚度 $S \neq 0$ 的情形。

三、胶合失效机理

动载荷和齿面温度是影响固体膜高速齿轮损伤失效的两个重要因素。齿轮损伤失效的一般形式有: 轮齿断裂; 齿面疲劳; 磨损和胶合。借助CAD技术进行分析, 从动载荷特性分布规律来看, 如图2所示, 在渐开线齿廓节点两侧上靠近齿根齿顶的区域动载荷的数值大于节点附近区域。动载荷的产生是由于齿轮制造误差, 相啮轮齿刚性的变化等原因引起齿轮的振动和冲击。动载荷过大则有可能造成轮齿断裂。交变的周期应力则有可能引起齿面出



图2 动载荷沿啮合线的分布

· 轮副1; —— 轮副2; $S_f = 0.05\text{mm}$

渐开线齿轮除节点外, 在齿廓上节点两侧的区域、啮合处于滚动和滑动共存状态。齿面上啮合点处的切线速度 v_n 是啮合点位置的函数。由图3可得齿轮1和2上的齿面切线速度为

$$v_{n1} = (r_{b1} \operatorname{tg} \alpha_1 - \xi) \omega_1, \quad (4)$$

$$v_{n2} = (r_{b2} \operatorname{tg} \alpha_1 + \xi) \omega_2, \quad i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{z_2}{z_1}, \quad \alpha_1 = \alpha \quad (5)$$

齿面啮合点的相对滑动速度为 $v_s = v_{n1} - v_{n2}$ (6)

即 $v_s = (r_{b1} \operatorname{tg} \alpha_1 - \xi) \omega_1 - (r_{b2} \operatorname{tg} \alpha_1 + \xi) \omega_2$ 。轮齿上的滑动速度与该齿面间的切线速度的比值称为齿面上的滑动率 ξ 。啮合点 C 的滑动率为

$$\xi_1 = \frac{v_{n1} - v_{n2}}{v_{n1}} = \frac{\xi(1+i)}{i \left(\frac{m_1 z_1}{2} \sin \alpha_1 - \xi \right)} \quad (7)$$

$$\xi_2 = \frac{\xi(1+i)}{\left(\frac{m_1 z_2}{2} \sin \alpha_1 + \xi \right)} \quad (8)$$

ξ 在 N_1P 段内时, $\xi > 0$; ξ 在 PN_2 段内时, $\xi < 0$ 。

滑动率的变化规律见图4。由图中阴影区的分布知道, 轮齿根部的滑动率 ξ 大于齿顶的 ξ ; 小齿轮的 ξ_{1max} 大于大齿轮的 ξ_{2max} 。 $|\xi|$ 是齿面磨损程度的标志之一。齿轮在传递载荷作用下, 齿面接触相互压紧。齿面间产生接触变形和接触压力。在微小接触区齿面间相对滑动的结果引起齿面的摩擦和磨损。

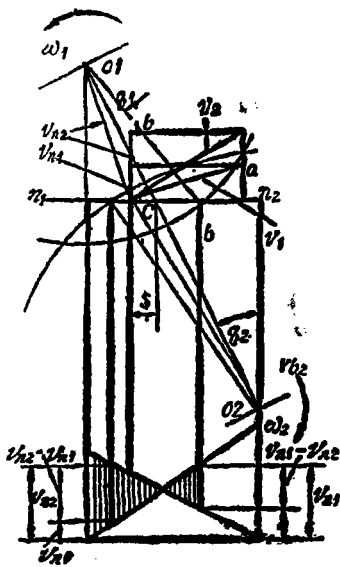


图3 齿面切线速度

在弹性范围内, 齿面摩擦损失的功转化为热量。设沿接触变形宽度 $2b$ 上的分布热源为

$$q(\xi) = u \cdot Q_d \cdot |v_{s1} - v_{s2}| \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\xi}{b} - 1 \right)^2} \quad (9)$$

热源以很高的速度通过表面上的某一定点 N 的过程, 可以看作是彼此无关的单位热源依次连续的热冲击。热冲击对 N 点产生的热量来不及向周围传递和散失, 向 N 点两侧齿面传

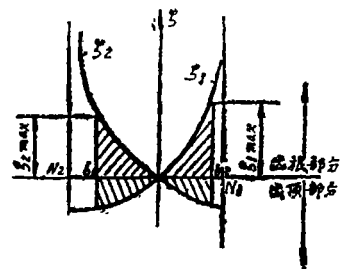


图4 滑动率的变化规律

现点蚀。根据固体膜高速齿轮的传动特点以及动力学分析结果, 动载荷的数值不是很大, 且齿轮的工作时间很短, 所以发生轮齿断裂和齿面点蚀的可能性很小。

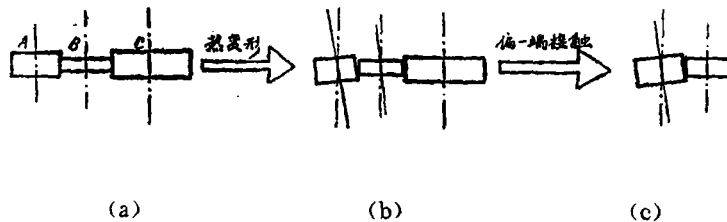
固体膜高速齿轮的突出特点是转速极高, 工作环境没有热传递和散热的条件。

1. 齿面摩擦温升机理

导的热量也很小。由于转速很高，时间极短，所以大部分热量在 N 点处形成热积累，通过 N 点传入齿体内，引起 N 点处齿面的温度升高。齿轮高速运转，热源对齿面上某一点 N 在一定时间内作用将会引起该点处齿面温度的急剧升高。

2. 偏一端接触温升机理

齿轮工作时要散发大量的热量。由于齿轮箱各部的温度不相同，会引起箱体的变形，轮轴的中心线出现歪斜，如图5所示。



A、B、C——固体膜高速齿轮

图 5

热变形使轮轴歪斜，沿齿向齿廓仅有一部分接触。偏一端接触的结果则在接触点 N 处出现偏载和载荷集中现象。因而使 N 点处齿面的摩擦磨损急剧增加。顷刻间该点齿面的温度迅速升高。齿面的局部出现温度极高的现象。

3. 胶合机理

固体膜具有下列一些特点：导热性能差，不能将齿面的摩擦热带走，易形成热积累，分解温度较低。

齿面局部温度上升到接近固体膜分解温度的临界值时，固体膜发生分解和破裂。固体膜磨损很快使基体金属直接接触。固体膜分解破坏了齿面的表面质量。表面粗糙度增加，进一步引起齿轮剧烈的振动和冲击。使动载荷增大，摩擦作用增强，齿面温度大幅度上升。

固体膜破裂后，相啮合齿面局部的金属在动载荷的作用下以及啮合点处局部过热，则导致两接触齿面金属发生熔焊和粘着。随着两齿面间的相对运动，该局部金属从齿面上剥落下来。齿面上沿滑动方向出现沟痕，引起齿面的严重粘着磨损，即发生胶合现象。

齿面局部温度升高达一定数值时，则使齿面发生破坏性胶合齿面上有明显的材料遗失现象，尤其在齿顶部较为严重。齿廓几乎完全毁坏，振动噪声增大，齿轮很快失效。

四、敏感因素分析

从动力学，热传导的分析结果可以看出，固体膜高速齿轮可能的失效形式为齿面胶合。且胶合点主要分布在齿廓节点两侧靠近齿顶齿根的区域。据高速齿轮的模拟试验结果，齿轮主要因齿面的严重胶合而过早失效。齿面温升和局部过热将是引起齿面胶合的主要根源。造成齿面温升的主要原因是齿面接触区的摩擦磨损。齿面粗糙度、轮齿刚性、动载荷、滑动率、偏一端接触、固体膜及厚度等因素以及其交互作用都会不同程度的影响着齿轮的传动性能，加剧齿面的摩擦作用，引起齿面的温度升高。

当齿轮的转速、制造精度、齿数、模数、重合度系数等一定时，影响齿面温升的敏感因素则主要是偏一端接触宽度和固体膜的厚度。

固体膜厚度 S 减小, 则动载荷减小, 齿面温升却增大; 膜厚 S 增大, 则动载荷增大, 齿面温升则减小。固体膜厚度 S 对动载荷和齿面温升的影响较大, 是一个非常敏感和重要的设计参数。

偏一端接触宽度 B_0 越小, 啮合点接触区的面积越小, 偏载和载荷集中的程度则越大, 齿面温升就越大, 齿面胶合的程度也越大。齿轮则会因极早发生胶合而失效。工作寿命减少。

五、提高固体膜高速齿轮抗胶合能力的技术措施

1. 设计时选用小模数、大齿数、大重合度系数, 避免轮齿啮合刚度的突变和大的波动。
2. 对齿廓采取齿根齿顶修形技术。齿廓误差应制成呈凸形的误差类型。相啮齿廓采取凸凹相互抵消的误差类型, 有利于减小齿轮的振动、冲击。降低动载荷。
3. 采取齿向修形技术, 改善偏一端接触状态。保证一定量的齿向接触宽度。使接触宽度极早遍及整个齿宽。
4. 适当选取固体膜的厚度。使动载荷和齿面温升均减小。

参 考 文 献

- [1] 吴序堂,《齿轮啮合原理》,机械工业出版社,1982年
- [2] 林子光等编译,《八十年代摩擦学》,航空工业出版社,1988年
- [3] 萨本佑,《高速齿轮传动设计》,机械工业出版社,1986年
- [4] 王建设,硕士学位论文,中国科学院长春光机所,1989年6月。

The Principle Analysis on Scoring Failure of the High Speed Gear with Solid Lubricant Film

Wang Jianshe

Abstract

The mechanism on scoring failure of the high speed gear with solid lubricant film is discussed in this paper, including the analysis of the sensitive factors. The paper also presents some technical skills and methods to improve the anti-scoring capability of the gear.