

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.022

# 针对齿面剥落的压力机斜齿轮啮合刚度分析

孟保战

(陕西国防工业职业技术学院 智能制造学院,陕西 西安 710300)

**摘要:**为了提高压力机齿轮啮合能力,开展面向齿面剥落的斜齿轮啮合刚度研究。构建斜齿轮副的接触线模型,综合考虑切片算法和积分过程,计算斜齿轮副运行状态下的啮合刚度。研究结果表明:增加四边形剥落的故障长度、啮合位置呈现持续增大,啮合刚度降低。轴向剥落区域差异引起啮合刚度降低,剥落区域啮入点与啮出点出现较大变化。圆形与三角形状态对应的啮合刚度呈现非线性特征下降趋势,四边形剥落条件下啮合刚度的线性下降,剥落区对应的啮合位置也存在较大差异。

**关键词:**压力机;斜齿轮;啮合刚度;齿面剥落;四边形

**中图分类号:**TH132.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)04-0123-04

## Meshing Stiffness Analysis of Helical Gear of Forging Press Facing Tooth Surface Spalling

MENG Baozhan

(Intelligent Manufacturing Institute, Shaanxi Vocational and Technical College of National Defense Industry, Xi'an 710300, China)

**Abstract:** In order to improve the meshing ability of press gear, the meshing stiffness of helical gear facing the tooth surface spalling was studied. The contact line model of helical gear pair was constructed, and the meshing stiffness of helical gear pair was calculated considering slicing algorithm and integral process. The results show that the meshing position increases continuously and the meshing stiffness decreases when the fault length of quadrilateral spalling is increased. The difference of axial spalling area results in low meshing stiffness and great changes in the entry and exit points of the spalling area. The meshing stiffness corresponding to the circular and triangular state assumes a nonlinear decline trend, and the meshing stiffness in the quadrilateral spalling condition decreases linearly, and the corresponding meshing position in the spalling area also differs significantly.

**Keywords:** press; helical gear; mesh stiffness; tooth surface spalling; quadrilateral

### 0 引言

齿轮传动早已得到了广泛应用,但如何获得更高的齿轮传动效率引起了人们的密切关注<sup>[1-2]</sup>。压力机在高频高载作用下,齿轮传动系统承受着很大的压力,经常出现齿面剥落等缺陷<sup>[3]</sup>。由于齿轮传动需要长期承受交变工况,齿轮作为动力齿轮箱中的一个关键组成结构,较易出现故障,通常表现为表层组织的剥落,对齿轮副的啮合刚度造成影响,最终形成齿轮间噪声。对特定剥落故障的齿轮啮合刚度进行分析有助于了解与评价齿轮系统动力性能<sup>[4-5]</sup>。

现阶段,关于齿面剥落方面开展研究的学者较多,大多是建立啮合刚度模型。例如,赵树滨等<sup>[6]</sup>针对啮合刚度建立了剪切能量算法,并对可

靠性进行了推导验证,在此基础上建立了啮合刚度和剥落参数之间的对应关系,发现剥落宽度对啮合刚度表现出明显的影响。刘文正等<sup>[7]</sup>基于图像处理技术提取剥落故障的边缘特征,拟合出剥落宽度函数,消除了因简化而造成的刚度和加速度响应的突变点,适用于任意形状和大小的剥落区域。曹蔚等<sup>[8]</sup>采用灰狼优化算法对B样条阶数核心参数寻优,对不同的故障冲击试验振动信号进行分解,利用方均根法对剥落故障进行识别。万志国等<sup>[9]</sup>基于能量法建立了齿面剥落时变啮合刚度解析模型,揭示了齿根裂纹与齿面剥落故障振动响应机制的不同。姜荣国等<sup>[10]</sup>研究发现较深加工刀痕在异常冲击载荷作用下造成齿面开裂,随后在循环工作载荷下萌生了疲劳裂纹,最终导致齿面硬化层脱落。邵毅敏等<sup>[11]</sup>建立了基于

**基金项目:**陕西省“十四五”教育科学规划课题项目(SGH23Y3024);陕西省职业教育教学改革研究课题项目(2024SZX372);陕西国防工业职业技术学院重点项目(Gfy23-04)

**作者简介:**孟保战(1980—),男,陕西礼泉人,高级工程师,本科,研究方向为数控车、智能制造,xuzd003@126.com。

边缘接触时变刚度的轮齿表面剥落动力学模型,提出轮齿表面剥落缺陷的时变刚度算法,研究齿面剥落齿在啮出剥落边界时的边缘接触力突变及齿轮系统动态响应特性。刘文等<sup>[12]</sup>构建了斜齿轮副动力仿真模型,探讨系统运行性能与裂纹的关系,设计一种斜齿轮接触线的高效分析方法,结果表明接触线方法能够达到准确分析的要求,可确定啮合刚度与斜齿轮参数的关系。

本文综合考虑文献[13]的研究结果,选择传动系统的斜齿轮作为测试对象,考虑斜齿轮实际啮合特征,构建了斜齿轮副的接触线模型;综合考虑切片算法和积分过程,计算出了斜齿轮副运行状态下的啮合刚度,判断出本文设计的斜齿轮啮合刚度算法满足准确性要求;进一步研究了剥落尺寸、轴向位置参数及剥落外形条件下的啮合刚度变化情况。

## 1 斜齿轮啮合刚度原理

图1为齿面剥落的数学模型<sup>[14]</sup>。其中: $h_s$ 为齿面剥落深度; $l_s$ 为齿面剥落长度; $w_s$ 为宽度; $L$ 为接触线长度分量。

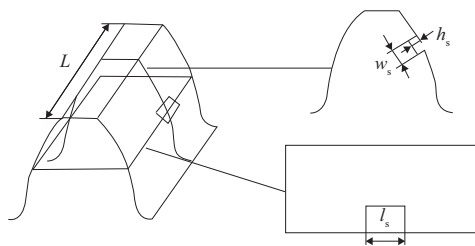


图1 齿面剥落结构

压力机斜齿轮变截面悬臂梁模型如图2所示。考虑到基圆与齿根圆会发生较明显变形,因此本实验选择直线来表示基圆与齿根圆过渡曲线。

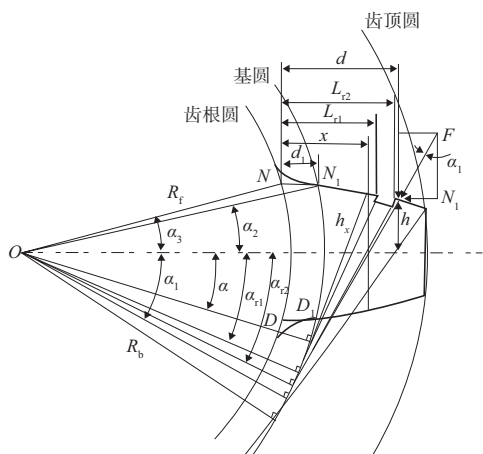


图2 斜齿轮变截面悬臂梁模型

考虑该部分引起的啮合刚度变化,建立以下的表达式<sup>[15]</sup>:

$$h_x = \begin{cases} R_b \sin \alpha_2 & 0 \leq x \leq d_1 \\ R_b [(\alpha_2 - \alpha) \cos \alpha + \sin \alpha] & d_1 \leq x \leq d \end{cases} \quad (1)$$

$$x = R_b [(-\alpha_2 + \alpha) \sin \alpha + \cos \alpha] - R_f \cos \alpha_3 \quad (2)$$

$$\alpha_2 = \frac{\pi}{2Z} + \text{inv} \alpha_n \quad (3)$$

$$\alpha_3 = \arcsin \left( \frac{R_b \sin \alpha_2}{R_f} \right) \quad (4)$$

式中: $Z$ 是轮齿个数; $R_b$ 是齿轮基圆半径; $\alpha_n$ 是法面压力角; $x$ 是齿根圆间距; $R_f$ 是齿根圆半径; $d_1$ 是基圆与齿根圆间距; $d$ 是轮齿啮合点相对齿根圆间距; $\alpha_2$ 是基圆半齿角; $\alpha_3$ 是齿根圆半齿角。

## 2 结果对比及分析

本研究以齿宽或接触线投影取代齿宽的方式计算总啮合刚度,结果统计如表1所示,依次确定啮合刚度,对比各参数下的啮合刚度均值与根据经验确定的啮合刚度均值。通过验证确定本文模型可以达到准确性控制标准。

表1 啮合刚度对比

| 方法     | 啮合刚度 $10^{10}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$ |       |       | 误差/% |
|--------|-----------------------------------------------|-------|-------|------|
|        | 最大值                                           | 最小值   | 均值    |      |
| 经验法    | —                                             | —     | 2.005 | —    |
| 有限元法   | 2.123                                         | 1.998 | 2.095 | 4.5  |
| 本文方法   | 2.079                                         | 1.976 | 2.075 | 3.5  |
| 仅考虑齿宽法 | 2.195                                         | 2.103 | 2.144 | 6.9  |
| 重合度法   | 2.239                                         | 2.125 | 2.187 | 9.1  |

从表1中各种方法与经验法的啮合刚度误差可以看到,采用本文方法计算后的压力机斜齿轮啮合刚度相较于有限元法达到了更小的误差,从4.5%降低到3.5%;相较于仅考虑齿宽和重合度法,误差明显降低。以上测试结果表明本文构建的模型更合理。

## 3 影响分析

### 3.1 剥落特征量对啮合刚度的影响

以四边形剥落为例开展分析,图3是轮齿面形成四边形剥落的情况<sup>[16]</sup>。

采用 $T_a$ 、 $W_a$ 构建平面坐标系, $T_a$ 表示斜齿轮齿面径向; $W_a$ 表示斜齿轮齿面轴向。确定剥落范围在平面坐标系中边界参数,计算式如下:

$$\begin{cases} n_s = \text{ceil}\left(\frac{N}{2} + \frac{2 \times w_a - w_s \times \cos \beta_b}{2 \times \Delta L_i}\right) \\ n_e = \text{ceil}\left(\frac{N}{2} + \frac{2 \times w_a + w_s \times \cos \beta_b}{2 \times \Delta L_i}\right) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $n_s$  为剥落的初始位置;  $\Delta L_i$  为切片的齿宽;  $N$  为切片数量;  $n_a$  为剥落到终点的坐标。

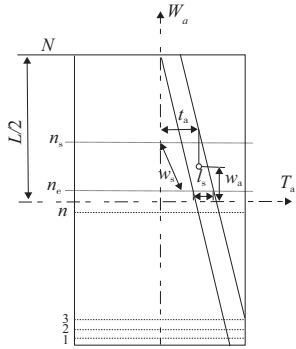


图3 四边形剥落平面示意图

按照以上剥落边界参数,得到了四边形剥落长度、宽度引起的啮合刚度变化曲线,如图4所示。分析图4可知,增加四边形剥落的故障长度后,啮合位置呈现持续增大结果,发生了啮合刚度的降低,随着长度达到某一临界值后,啮合刚度在三齿与双齿啮合范围都受到了较大影响。

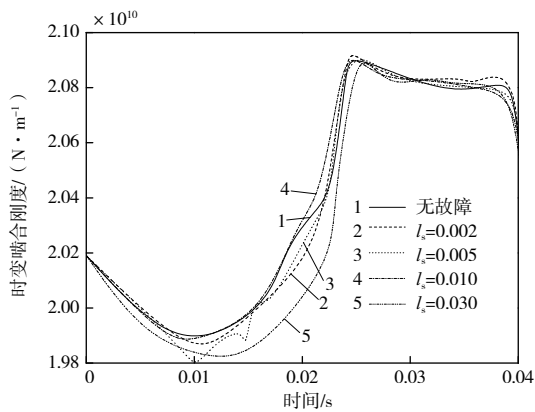


图4 不同剥落长度对啮合刚度的影响

根据剥落边界得到不同轴向与径向条件下的啮合刚度,如图5与图6所示。

分析图5可以发现,轴向的剥落区域差异引起的啮合刚度变化程度较低,随着不同位置轴向区域出现剥落,剥落区域啮入点与啮出点出现较大变化。根据图6可以发现,当径向位置出现剥落时,斜齿轮沿剥落啮合区出现明显变化,而啮合刚度出现了明显降低,与齿根越接近的区域引起的啮合刚度变化程度越大。

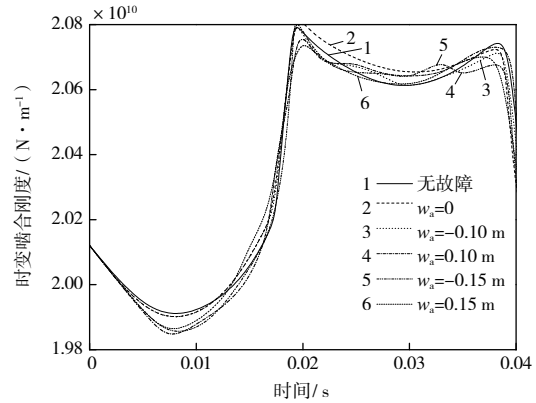


图5 不同轴向位置剥落对啮合刚度的影响

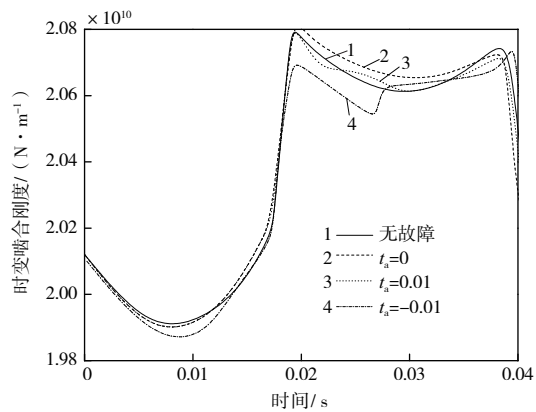


图6 不同径向位置对啮合刚度的影响

### 3.2 不同剥落形状对啮合刚度的影响

构建各剥落形状的边界参数,形成了各个剥落形状对应的啮合刚度,如图7所示。

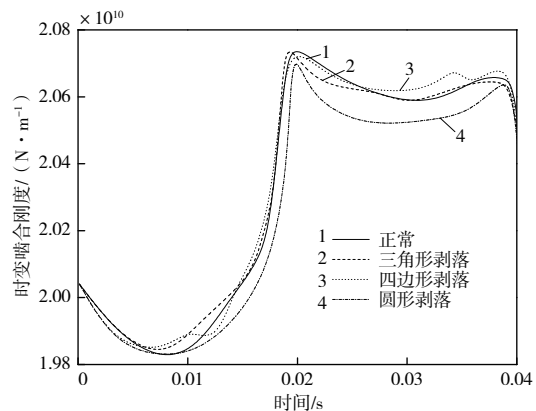


图7 不同剥落形状对啮合刚度影响

分析图7可知,啮合刚度受到剥落截面外形的直接影响。剥落截面形成三角形剥落结构时,所形成的啮合刚度曲线呈现三角形的特征;形成圆形剥落结构时,则形成了接近圆形的曲线;形成

四边形结构的剥落形状时,具有四边形特征分布区;在以上剥落外形下,圆形、三角形啮合刚度发生了非线性降低<sup>[17]</sup>,四边形结构的啮合刚度则表现为线性降低,各剥落区啮合状态存在较大差异。

该研究有助于提高齿轮啮合效率,尤其是针对压力机的高负载工况,对保障压力机的高效运行稳定性具有很好的指导意义。

## 4 结语

本文开展针对齿面剥落影响的斜齿轮啮合刚度变化分析,取得如下结论。

1)将不同条件下计算平均啮合刚度和经验计算获得的平均啮合刚度进行比较,经过验证表明本文设计的模型满足准确性要求。

2)增加四边形剥落的故障长度后,啮合位置呈现持续增大,啮合刚度降低。轴向剥落区域差异会引起啮合刚度不同程度降低。

3)圆形与三角形状态对应的啮合刚度呈现非线性特征的下降趋势,四边形剥落条件下发生了啮合刚度的线性下降,每种剥落区对应的啮合位置存在较大差异。

## 参考文献:

- [1] 徐可君,焦为,秦海勤. 基于改进势能法的直齿轮时变啮合刚度计算方法研究[J]. 机械传动, 2023, 47(2):1-7.
- [2] 彭毅,吴胜利,邢文婷,等. 轮齿表面剥落故障劣化机制动力学模型研究[J]. 机械传动, 2023, 47(10): 10-16,42.
- [3] 杜正柱,许立新,牛坤. 含齿面剥落缺陷影响的共轴对转轮系振动特性分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41(19):254-265.
- [4] 胡波,谭清杰,董建雄,等. 脂润滑小模数齿轮副时变啮合刚度计算方法[J]. 振动与冲击, 2025, 44(5): 80-87.

- [5] 罗家元,严博,高聪. 残余应力对斜齿轮时变啮合刚度的影响及其动力学分析[J]. 机械传动, 2025, 49(3):40-47.
- [6] 赵树滨,洪荣晶,陈捷,等. 势能法计算剥落故障齿轮时变啮合刚度[J]. 机械设计与制造, 2014(10): 171-173,176.
- [7] 刘文正,朱如鹏,周文广,等. 基于图像处理的齿面剥落故障的啮合刚度及动力学特性分析[J]. 机械强度, 2022, 44(3):525-530.
- [8] 曹蔚,苟臻元,韩昭,等. 基于 GWO-TV-F-EMD 方法的行星齿轮箱齿面剥落故障诊断[J]. 航空动力学报, 2021, 36(11):2418-2429.
- [9] 万志国,贺王鹏,廖楠楠,等. 齿根裂纹与齿面剥落故障的振动响应机理研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(6):131-137.
- [10] 姜荣国,王强,李若辉,等. 风电齿轮箱小齿轮齿面剥落原因分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2016, 28(2):154-159.
- [11] 邵毅敏,王新龙,刘静,等. 基于边缘接触时变刚度的轮齿表面剥落动力学模型与响应特征[J]. 振动与冲击, 2014, 33(15):8-14.
- [12] 刘文,李锐,张晋红,等. 斜齿轮时变啮合刚度算法修正及影响因素研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(2):1-10.
- [13] 冯今昭,高鹏,刘畅. Weber 能量法求裂纹齿轮轴的啮合刚度[J]. 机械设计与制造, 2021(6):101-104.
- [14] 王显彬,孙阳,王军龙. 一种改进的非线性接触齿廓修形直齿轮啮合刚度分析方法[J]. 机电工程, 2022, 39(12):1670-1677.
- [15] 路晓云,刘启连. 计入齿面摩擦的斜齿轮啮合动力学特性研究[J]. 机械设计与制造, 2025(1):56-61.
- [16] 侯晓燕,王曦,周越. 考虑圆弧修形和交错角的人字齿轮啮合行为分析[J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(4):180-192.
- [17] 吴胜利,邵毅敏,邢文婷,等. 齿轮剥落故障特征识别方法研究[J]. 机械传动, 2019, 43(8):116-119.

收稿日期:2024-07-03