

刮板输送机链轮力学特性及疲劳寿命预测^{*}

MECHANICAL PROPERTY AND FATIGUE LIFE PREDICTION OF SPROCKET IN SCRAPER CONVEYOR

张 强^{**1,2,3,4} 王海舰¹ 付云飞¹ 宫 杰¹

(1. 辽宁工程技术大学 机械工程学院, 阜新 123000)

(2. 材料腐蚀与防护四川省重点实验室)

(3. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023)

(4. 中国煤矿机械装备有限责任公司, 北京 100011)

ZHANG Qiang^{1,2,3,4} WANG HaiJian¹ FU YunFei¹ GONG Jie¹

(1. College of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

(2. Material Corrosion and Protection Key Laboratory of Sichuan Province)

(3. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

(4. China national coal mining equipment Co., Ltd. Beijing 100011, China)

摘要 为了研究不同工况下链轮力学特性和疲劳寿命,采用 Ansys Workbench 建立链传动系统的动力学模型,并进行瞬态动力学仿真;采用 nCode GlyphWorks 中的 Rainflow 模块对提取危险区域最大等效应力时间历程进行雨流计数、载荷外推和叠加;采用 nCode GlyphWorks 中的 Stress Life 模块对链轮进行疲劳寿命计算和敏感性分析。分析得到不同工况下链轮等效应力云图和最大等效应力时间历程、外推和叠加后雨流直方图、链轮损伤直方图以及不同输入参数下的链轮最小疲劳寿命曲线图和柱形图。研究表明:该型号链轮具有良好的力学性能,链轮的最小疲劳寿命约为 110 天,过载、残余应力、表面质量和平均应力修正方法均对链轮的使用寿命具有明显的影响。

关键词 链轮 不同工况 力学特性 疲劳寿命 载荷谱 疲劳敏感性

中图分类号 TD528.3 TH131.7 TB114.1

Abstract To study the mechanical properties of the sprocket under the different conditions, the dynamic model of the chain system is established and analyzed using ANSYS Workbench. To analyze the fatigue life and fatigue sensitivity of the sprocket, nCode GlyphWorks is used to handle the load and calculate the fatigue life of the sprocket. The rain-flow counting, the load extrapolation and superposition of the maximum equivalent stress time history of the dangerous area of the sprocket are executed using Rainflow module in nCode GlyphWorks. The analysis of the fatigue life and fatigue sensitivity is executed using Stress Life module in nCode GlyphWorks. The equivalent stress cloud pictures and the maximum equivalent stress time history of the sprocket, rain-flow histograms after the extrapolation and superposition, damage histogram of the sprocket, and the minimum fatigue life curves and columnar diagrams of the sprocket under the different inputted parameters are obtained. The results show that the type sprocket has a good mechanical property; the minimum fatigue life of the sprocket is about 110 days; the overload, residual stress, surface quality, and mean stress correction method have an obvious influence on the service life of the sprocket.

Key words Sprocket; Different conditions; Mechanical property; Fatigue life; Load spectrum; Fatigue sensitivity

Corresponding author: FU YunFei, E-mail: 614530808@qq.com, Tel: +86-418-3350517, Fax: +86-418-3350517

The project supported by the National 863 Project (No. 2013AA06A412), and the National Key Technology Support Program (2013BAH12F01), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (No. 20132121120011), and the Opening Project of Material Corrosion and Protection Key Laboratory of Sichuan Province (No. 2014CL18).

Manuscript received 20121220, in revised form 20140512

^{*} 20131220 收到初稿, 20140512 收到修改稿。国家 863 项目 (2013AA06A412); 国家科技支撑计划项目 (2013BAH12F01); 教育部博士点基金 (20132121120011), 材料腐蚀与防护四川省重点实验室开放基金资助 (2014CL18) 资助。

^{**}张 强, 男, 1980 年月生, 满族, 博士后, 教授, 博士生导师, 研究方向为矿山机械动态设计及监测技术, 发表论文 60 余篇。

引言

链轮是刮板输送机的核心部件。刮板输送机的使用环境恶劣、载荷复杂多变,实际运行过程中,中部槽过度弯曲、意外载荷、异物卡死、电机不同步等不利因素时有发生。链轮的设计质量直接影响刮板输送机的传动性能、生产效率和使用寿命,而且链轮的承载能力是制约刮板输送机向大功率、长距离输送发展的重要瓶颈。

目前,国内外学者对链轮尤其是大规格矿用链条所用驱动链轮的研究还不是很系统,国外仅有德国学者进行了比较系统的分析研究^[1-9]。我国学者从 70 年代开始对链轮研究,经过学者们的不断深入研究,从链轮的结构尺寸设计以及加工制造方法方面都有了很大的程度的进展。文献[10]⁹⁻⁴¹分析了影响链轮链窝精度加工精度的原因,设计了加工链窝用的可转位硬质合金成型铣刀,并设计了合理的加工路线、加工程序、测量器具;文献[11]⁹⁸⁻¹⁰⁰对 SGZ630 链轮进行有限元分析,通过采用不同的合金钢材料及不同的热处理方式,计算出链轮的应力和变形量;文献[12]⁶⁶⁻⁶⁹采用瞬态动力学分析软件 MSC. Dytran 对链轮卡链工况下的动力学特性进行了分析,得出了卡链过程中的应变、法向接触力、切向力和摩擦力的变化规律;文献[13]⁴¹⁹⁻⁴²³对链轮在平稳运行工况下的瞬态动力学特性进行了分析,分析得知链轮与圆环链产生明显滑动现象的原因和加剧链轮表面的磨损和压溃的原因,并提出了相应的改进措施;文献[14]⁵¹⁻⁵⁴基于链环受力变形后的包络面和中心线,提出两种链轮优化设计方法,给出具体实现流程,针对具体工况对链轮进行优化;文献[15]⁴⁹⁴⁻⁴⁹⁸建立基于 Adams 的刮板输送机链轮传动系统虚拟样机模型,分析在各种工况下的动力特性,得出圆环链与链轮之间接触力的变化规律、接触力最大值及其对应位置。文献[16]²¹⁻²³采用有限元分析软件对刮板输送机链轮受极限载荷时的应力和应变进行了分析探讨,同时通过加载循环载荷的方式对链轮进行极限载荷下的疲劳寿命计算。通过以上分析可知,学者们采用计算机仿真技术对链轮在动载荷作用下的机械性能进行了系统的研究,同时也对链轮的疲劳寿命进行了分析计算。然而,虽然焦宏章等学者对链轮在启动、制动、恒速和卡链工况下的接触动力学特性进行了仿真分析^{[15] 494-498},但是其基于 ADAMS 建立的链轮传动系统虚拟样机模型只是将链轮和链环视为刚性体,分析的只是链轮与链环的接触力,并不能得到链轮在不同工况下的等效力云图和最大等效力时间历程,从而无法准确的判断某型号链轮在不同工况下的力学性能是否良好。虽然朱晓春等学者对链轮的疲劳

寿命进行了分析计算^{[16] 21-23},但是其所计算的链轮疲劳寿命只是极限载荷下的疲劳寿命,并未对链轮在多种实际工况载荷共同作用下的疲劳寿命进行计算,也并未对多种因素影响下的链轮疲劳寿命敏感性进行分析探讨。

本文利用 Inventor, Ansys Workbench, Matlab 和 nCode GlyphWorks 构建联合仿真平台。首先,建立链传动系统的柔性体虚拟样机模型。然后,对链轮在不同工况下的力学性能进行分析探讨,提取不同工况下的最大等效力时间历程,并对其进行外推和叠加。最后,基于叠加后的载荷谱计算链轮的疲劳寿命,并对链轮的疲劳敏感性进行分析。本文的研究内容旨在为链轮的结构优化设计、最佳维护周期的选取、疲劳寿命目标分布带的判定和更深一步的理论研究提供相应的参考依据。

1 链传动系统动力学模型的建立

1.1 链传动系统虚拟样机模型的建立

本文以某型刮板输送机作为研究对象,由于其链传动系统是一个复杂的机构,要建立起完整的动力学模型是很困难的。仿真建模的本质是在系统之间建立一种与实际工况相似的关系^[17-18]。刮板输送机的链传动系统是一个闭合的连续体,上边链为负载链,下边链为无载链。根据满载启/制动、平稳运行及卡链工况的实际要求和为了建模的方便将链传动系统简化为如图 1 所示的系统模型,该系统主要包括链轮、圆环链、锻造环、等效载荷和等效中部槽。链传动系统的三维虚拟样机模型首先是在 Autodesk Inventor 中建立,在检查无干涉后导入到 Ansys Workbench 的瞬态分析模块(Transient Structural)中。为了保证在计算结果精确的前提下尽量较少计算时间,在 Ansys Workbench 中采用六面体域网格划分方法对链轮进行网格划分,该方法主要采用六面体单元,但是包含少量棱锥单元和四面体单元,用于那些不能扫略的体,其它部分采用自动网格划分,即四面体单元^[19-20]。不同工况下的链传动系统的有限元模型如图 2 所示,节点数为 151 791,单元数为 53 020。

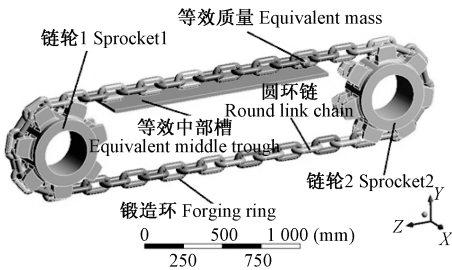


图 1 链传动系统简化模型
Fig. 1 Simplified model of chain transmission system

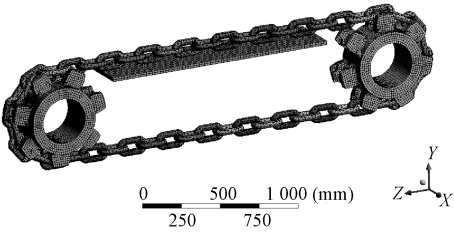


图2 链传动系统有限元模型

Fig.2 Finite element model of chain transmission system

1.2 接触模型的建立

对链轮 1 和链轮 2 施加 Revolute-Ground 关约束,该约束只允许链轮绕主轴 x 做旋转运动;对等效中部槽施加 Fixed-Ground 关约束,以模拟固定不动的

中部槽;在圆环链的圆弧面和锻造环的圆弧面之间、圆环链的圆弧面与链轮的链窝之间施加 Frictional 接触;在由链环串联而成的闭合连续体内侧的锻造环直臂平面与等效中部槽之间施加 Frictional 接触。

1.3 材料模型的建立

矿用锻造环和圆环链采用的材料为 23MnNiMoCr54,材料的密度为 $7.86 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 1 166 MPa,切线模量为 2 444 MPa^[21];矿用链轮的材料为 30CrMnTi,材料的密度为 $7.86 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$,其杨氏弹性模量为 206 GPa,剪切模量为 560 MPa,泊松比为 0.3,屈服极限为 2 300 MPa^[22]。查资料得 30CrMnTi 材料的相关疲劳参数,如表 1 所示。

表 1 30CrMnTi 的疲劳特性
Tab.1 Fatigue property of 30CrMnTi

应力 Stress σ /MPa		1 962	2 158	2 453	2 747
参数 Parameters					
特征寿命					
Characteristic life $N_\sigma \times 10^{-6}$		12.178 7	5.510 6	2.584 0	0.685 0
存活率	50	10.678 3	4.546 7	2.107 7	0.407 8
	90	5.432 5	1.692 8	0.739 8	0.032 1
	95	4.1957	1.160 1	0.495 7	0.012 2
	99	2.338 3	0.493 5	0.200 4	0.001 4

根据全寿命分析理论,30CrMnTi 材料的 S-N 寿命曲线的基本方程为

$$\Delta S = I(N_f)^{b_1} \tag{1}$$

等式两边取对数得

$$\lg(\Delta S) = \lg(I_1) + b_1 \lg(N_f) \tag{2}$$

式中, I_1 表示第一段寿命曲线的截距, b_1 表示第一段寿命曲线的斜率, N_f 表示寿命(循环次数), ΔS 表示应力值。用 Matlab 对表 1 数据进行线性拟合,得到 30CrMnTi 的 S-N 曲线表达式如下

$$\lg S = \lg 13\,778 - 0.118\,9 \lg N \tag{3}$$

从式(2)和式(3)可知,第一段寿命曲线的截距 I_1 为 13 778 MPa,斜率 b_1 为 -0.118 9,第二段为水平直线,即斜率 b_2 为 0,转折点寿命 N_{e1} 为 5.38×10^{10} 。

2 各种工况下边界条件施加及仿真

2.1 仿真参数

刮板输送机在实际运行过程中需要克服的运行阻力为煤与中部槽之间的摩擦、锻造立环与中部槽之间的摩擦、刮板链绕过机头/尾链轮时的弯曲阻力、传动装置阻力、中部槽弯曲时的附加阻力以及倾斜运输时煤和刮板链的自重分力^[23]。

运行阻力为

$$f = \mu(q_c + q_1)gl\cos\beta \pm (q_c + q_1)gl\sin\beta \tag{4}$$

式中, f 为运行阻力, N ; μ 为当量摩擦因数; q_c 为单条链承载的煤单位长度的质量, kg/m; q_1 为圆环链单位长度的质量, kg/m; l 为刮板输送机的铺设长度, m; β 为刮板输送机的铺设倾角, ($^\circ$)。根据文献[23]取 $\mu = 0.835$ 。

本文主要引用及计算数据来源于中煤集团公司重大科技项目“薄煤层自动化无人工作面成套设备与技术”实施现场数据,参见文献[24]和文献[25]。等效载荷质量为: $m = (q_c + q_1)l = 73\,286 \text{ kg}$;链环之间和链环与链轮之间的摩擦因数为 0.3。

2.2 满载启/制动及平稳运行工况的边界条件

刮板输送机一般为双端电机驱动,本文对链轮 1 和链轮 2 施加 Joint-Rotational Velocity 驱动载荷,其满载启/制动及平稳运行的速度特性如图 3 所示。为了方便研究,对不同的工况进行分段仿真,初始仿真步长为 1 ms,最小仿真步长为 0.5 ms,最大仿真步长为 10 ms。

2.3 卡链工况的边界条件

刮板输送机在运行时常常发生片帮或巨大煤块落下等情况,这些情况的发生会使链传动系统运行阻力逐渐加大并最终导致卡链制动。为了模拟卡链工况,

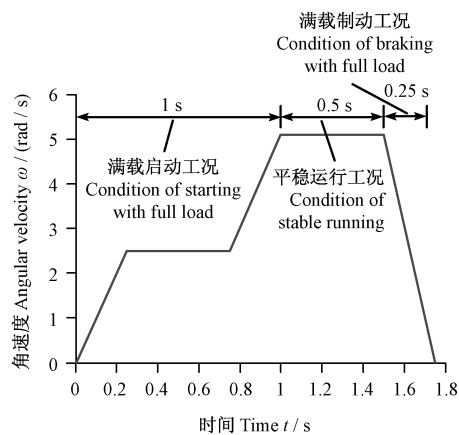


图 3 链轮速度特性曲线

Fig.3 Speed characteristic curve of sprocket

对等效载荷所在的锻造环下直臂平面上施加一较大的垂直于中部槽的力 F_k ，通过增大等效载荷所在的锻造环与中部槽之间的摩擦力来模拟卡链工况。链轮 1 和链轮 2 以 5 rad/s 的角速度运行，在 0.05 s 的时间段内逐渐施加 4 000 kN 的力，初始仿真步长为 1 ms，最小仿真步长为 0.5 ms，最大仿真步长为 10 ms。

2.4 不同工况下的链轮力学特性

通过仿真得到了满载启动工况 0.5 s 时刻、平稳运行工况 0.25 s 时刻、满载制动工况 0.125 s 时刻和

卡链工况 0.05 s 时刻的链轮等效应力分布，如图 4 所示。由图 4 可知，链轮的最大等效应力位置位于链窝边缘。因此，链轮的链窝边缘处最易发生疲劳破坏。将链轮的链窝边缘区域作为危险区域，统计出该区域的最大等效应力，采用 Matlab 对采集到的最大应力样本点进行曲线的绘制，得到了图 5 所示的不同工况下的链窝边缘处的最大等效应力时间历程。由图 5 可知，不同工况下的最大等效应力均不超过材料的屈服极限 2 300 MPa，说明该型号链轮具有良好的力学特性。满载启动工况的平均应力值最大，但是其曲线波动很小，说明该型号刮板输送机启动平稳；平稳运行工况的最大等效应力不超过 1 300 MPa，且在平稳运行中曲线有少量的波动；满载制动工况的最大等效应力不超过 1 100 MPa，且曲线波动很小，说明该型号刮板输送机制动平稳。链轮的最大等效应力在卡链工况的 0.03 s 的时间内经历了 5 次左右剧烈的波动，说明链轮在此期间经历了 5 次左右碰撞，0.03 s 以后链轮的最大等效应力随时间呈近似线性单调递增趋势，随着时间的增加，最终会导致卡链制动。由以上分析可知，卡链工况会对链轮造成较大的疲劳损伤，如果卡链情况较多会明显加剧链轮的损伤。

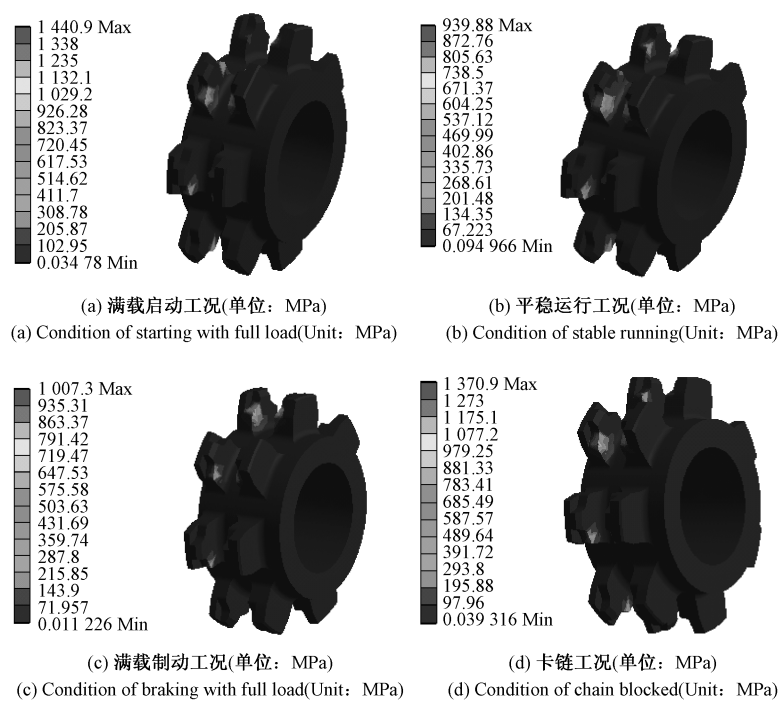


图 4 不同工况下的链轮等效应力分布

Fig.4 Equivalent stress distribution of sprocket under different conditions

3 链轮疲劳寿命预测

3.1 链轮疲劳寿命预测流程

疲劳破坏是工程机械结构及零部件中常见的、也是最严重的失效形式^[26]。链传动系统的链轮疲劳寿命预测的技术流程如图 6 所示。首先提取不同工况下

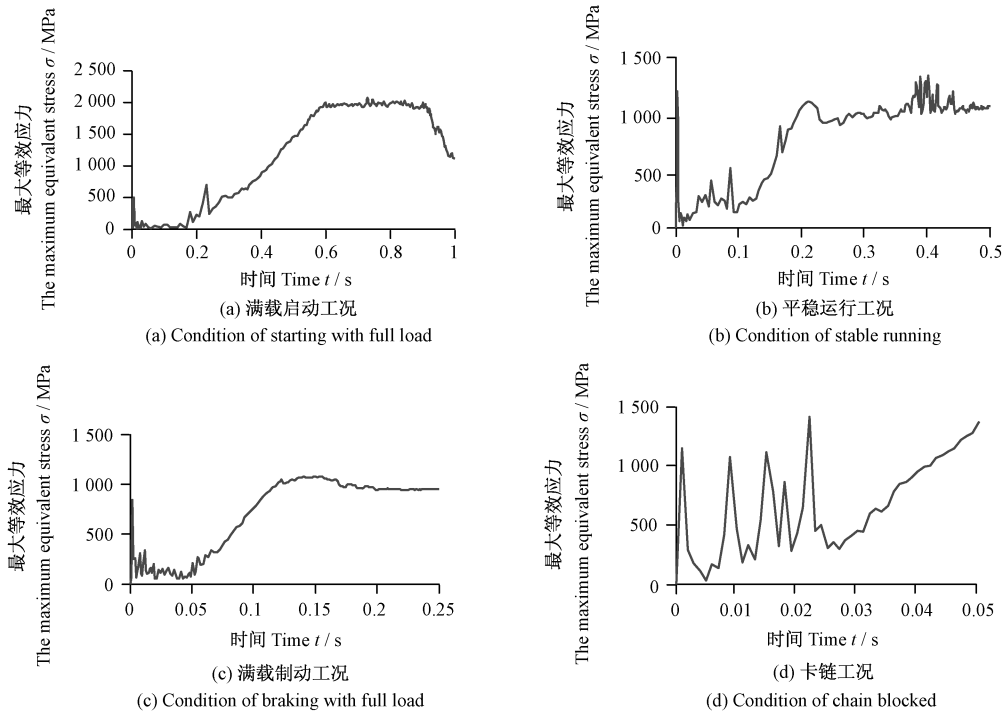


图5 不同工况下的链窝处最大等效应力时间历程

Fig. 5 Time history of maximum equivalent stress in chain nest under different conditions

链轮危险区域(链窝边缘区域)的最大等效应力时间历程;为了获得可以直接用于疲劳寿命计算的载荷谱,对不同工况下的最大等效应力时间历程进行雨流计数,并进行外推和叠加;最后根据线性累积损伤理论对链轮进行疲劳寿命计算。

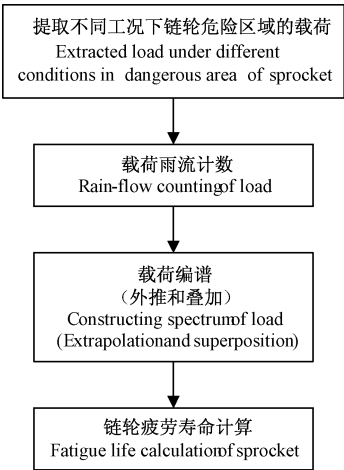


图6 链轮疲劳寿命预测流程

Fig. 6 Fatigue life prediction process of sprocket

3.2 链轮载荷谱的外推和叠加

3.2.1 载荷谱的外推

采用雨流计数法分别对4种工况下的链轮最大等效应力时间历程进行雨流计数,利用雨流计数结果可以看出载荷时间历程中每个载荷循环的次数。在实际载荷谱的采集过程中,一般只能进行短时间(距离)的

测试,而进行疲劳寿命分析过程中,需要知道全寿命载荷谱,这样就需要将短距离的载荷谱向长距离外推^[27]。刮板输送机链传动系统的实际运行工况十分复杂,且载荷具有较强的随机性,为防止载荷数据离散,提高载荷循环频次,对原载荷进行外推是非常必要的。对载荷谱进行外推,应该在保证每个迟滞回环结构不被破坏的情况下,推算该迟滞回环在全寿命周期可能出现的频次。实际测得的雨流矩阵各异,只能用非参数估计的方法来考虑。非参数估计的密度函数形式未知,也不作假设,利用训练数据直接对概率密度进行估计。采用 nCode GlyphWorks 中的 Rainflow 模块对不同工况的最大等效应力时间历程进行雨流计数和外推,满载启动工况、平稳运行工况、满载制动工况和卡链工况的外推系数分别为 5、10、20 和 100,即外推后,每一个载荷谱代表链传动系统运行 5s。不同工况下的载荷谱外推后的雨流计数直方图,如图 7 所示。外推后的雨流计数直方图不仅疲劳载荷频次增加,而且其幅值也有所增加。

3.2.2 载荷谱的叠加

本研究的目标载荷谱共有 4 个工况,即满载启/制动、平稳运行和卡链工况;每个工况所占的大体比例为 a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4 ,通过调研统计得知平稳运行工况约占 80%,满载启/制动工况分别约占 8%,卡链工况约占 4%(本文工况所占的比例不是定值,比例会因煤矿的不同而不同,具体问题具体分析);将上面得到的雨流矩阵 R 采用式(5)进行按比例叠加,可以得到直接用

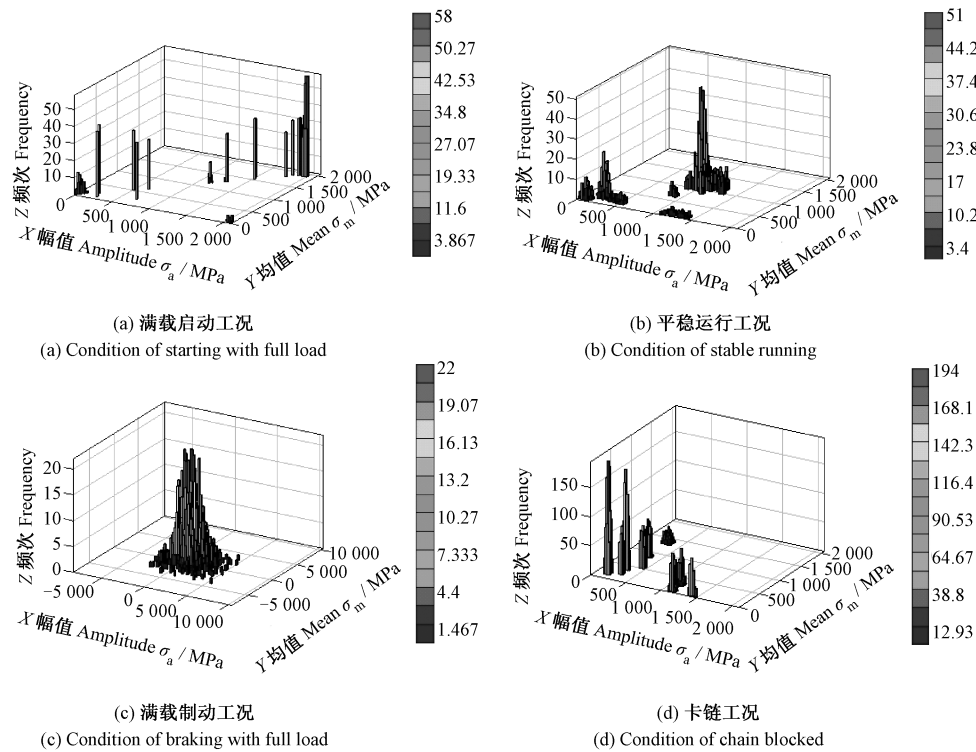


图 7 载荷谱外推后的雨流计数直方图

Fig. 7 Rain-flow counting histogram after load spectrum trapolation

于疲劳寿命计算的载荷谱,如图 8 所示。由图 8 可知,在大量程循环区域的数据非常稀疏。

$$R = \sum_{i=1}^4 a_i R_i$$

(5)

式中, R_i 为不同工况下的雨流矩阵; a_i 为叠加比例系数, $\sum_{i=1}^4 a_i = 1$ 。

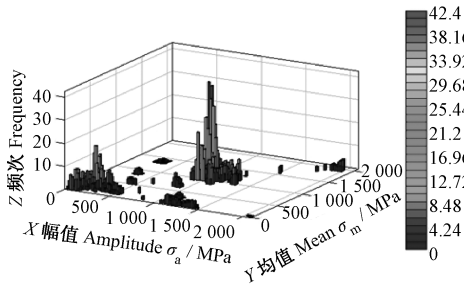


图 8 叠加后的雨流计数直方图

Fig. 8 Rain-flow counting histogram after superposition

3.3 链轮疲劳寿命计算

将图 8 所示的疲劳载荷谱输入到 nCode GlyphWorks 中的 Stress Life 模块,采用 Goodman 平均应力修正理论。由于疲劳载荷谱是由不同工况下的危险区域最大等效应力时间历程外推和叠加产生的,且选用的是较为保守的 Goodman 平均应力修正方法。因此,此方法计算的疲劳寿命较为保守。通过计算得到的链轮危险区域循环次数为 1 422 500

次,按刮板输送机每天工作 18 小时^[28-29],换算得到的链轮最小疲劳寿命约为 110 天。同时也得到了链轮的损伤直方图,如图 9 所示。通过对比图 8 和图 9 可知,几乎所有的疲劳损伤都是由某几个幅值非常大的循环产生的。该现象表明,大多数的损伤是由有限的循环所产生的。

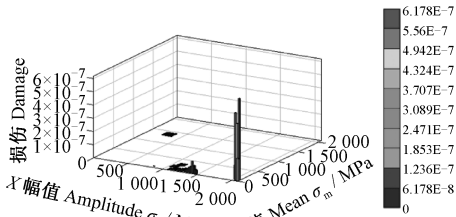


图 9 链轮的损伤直方图

Fig. 9 Damage histogram of sprocket

4 链轮疲劳寿命敏感性分析

疲劳分析本质上应具有统计特性。由于使用材料的微小统计差异、制造工艺质量差异和承受的载荷谱差异等原因,即使是同一家企业生产的链轮,运行在同一煤矿,它们的疲劳寿命也会不同。基于疲劳寿命这样的特性,应用分析软件 nCode GlyphWorks 来计算所有不同输入参数对疲劳损伤的敏感性、进行不同条件下的寿命预测。

4.1 过载敏感性分析

为了评估数据采集过程中可能的校准误差和可能的服役过载工况对疲劳寿命的敏感性,通过设置 Stress Life 模块中的 Scale Factor(载荷缩放因子)参数来模拟过载工况,得到的链轮过载敏感性曲线如图 10 所示。由图 10 可知,链轮的最小疲劳寿命随着过载量的增加近似呈指数下降趋势。当满载运行时,链轮的疲劳寿命约为 110 天;当 10% 的超载量时,链轮的最小疲劳寿命约为 36 天;当 15% 的超载量时,链轮的最小疲劳寿命约为 21 天;当 20% 的超载量时,链轮的最小疲劳寿命约为 13 天。可见,超载运行会大大降低链轮的疲劳寿命。通过以上分析可知,在刮板输送机的实际运行中,应尽量避免其超负荷运行。

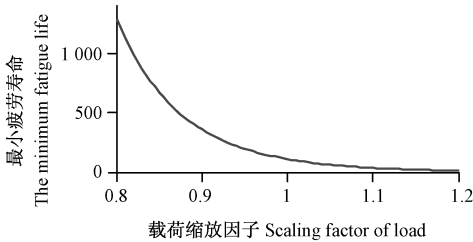


图 10 链轮的过载敏感性
Fig. 10 Overload sensitivity of sprocket

4.2 残余应力敏感性分析

在链轮的制造过程中往往会引入残余应力,残余应力会影响链轮疲劳损伤的速度,残余压应力会提高链轮的疲劳寿命,残余拉应力则会加快疲劳损伤。通过设置 Stress Life 模块中的 Offset 参数来模拟残余应力,得到的链轮残余应力敏感性曲线如图 11 所示。由图 11 可知,链轮的最小疲劳寿命随着残余拉应力的增加近似呈线性单调递减趋势。残余拉应力为 0 MPa 时,链轮的最小疲劳寿命约为 110 天;残余拉应力为 100 MPa 时,链轮的最小疲劳寿命约为 79 天;当残余拉应力为 200 MPa 时,链轮的最小疲劳寿命为 57 天;当残余拉应力为 300 MPa 时,链轮的最小疲劳寿命为 40 天。因此,在链轮的制造过程中,应提高制造工艺,尽量减少残余拉应力的产生。

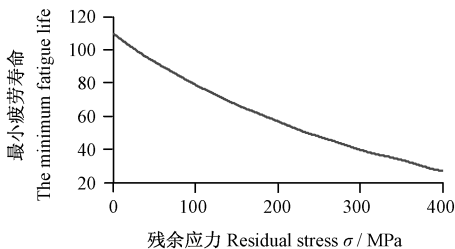


图 11 链轮的残余应力敏感性
Fig. 11 Residual stress sensitivity of sprocket

4.3 表面处理方式敏感性分析

表面处理可提高构件的疲劳强度,它在构件表面产生一个残余压应力以阻碍疲劳裂纹的扩展。表面处理只对施加载荷相对较小的高周期疲劳适用,较大载荷引起的低周期疲劳将改变残余压应力的方向,从而破坏了表面处理方式的作用。不采用表面处理、采用 Shot Peened(喷丸)、采用 Cold Rolled(冷轧)和采用 Nitrided(氮化)时的链轮最小疲劳寿命如图 12 所示。由图 12 可知,不采用表面处理时,链轮的最小疲劳寿命约为 110 天;采用喷丸的表面处理方式时,链轮的最小疲劳寿命约为 189 天;采用冷轧的表面处理方式时,链轮的最小疲劳寿命约为 623 天;采用氮化的表面处理方式时,链轮的最小疲劳寿命约为 3 331 天。通过以上分析可知,采用好的表面处理方式会显著增加链轮的使用寿命,在满足成本要求的前提下,应尽可能的提高链轮的表面质量。

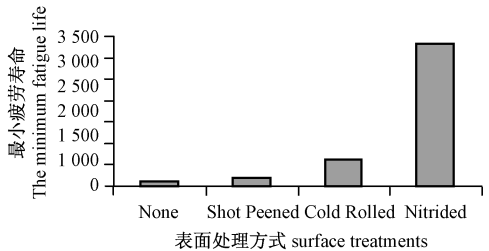


图 12 链轮的表面处理方式敏感性
Fig. 12 Surface treatments sensitivity of sprocket

4.4 平均应力修正敏感性分析

对于一个全面的疲劳分析来说,最理想是应用多条 S-N 曲线,每条曲线对应不同的平均应力水平。然而,获取众多 S-N 曲线所要进行的材料疲劳性能测验是非常费时和费成本的,常见计算中都是基于经验进行修正来考虑平均应力的影响。分析中最常见的为 Goodman 和 Gerber 修正方法。一般,Goodman 方法对于拉应力状态比较保守,Gerber 方法对于压应力状态比较保守。从实用的角度来说,可对两种修正方法都进行计算,采用较为保守的结果。采用 Goodman 平均应力修正方法、采用 Gerber 平均应力修正方法和不采用平均应力修正方法时的链轮最小疲劳寿命如图 13 所示。由图 13 可知,当采用 Goodman 平均应力修正方法时,链轮的最小疲劳寿命约为 110 天;当采用 Gerber 平均应力修正方法时,链轮的最小疲劳寿命约为 744 天;当不采用平均应力修正方法时,链轮的最小疲劳寿命约为 1 275 天。因此,采用 Goodman 平均应力修正方法所计算的链轮最小疲劳寿命最为保守。

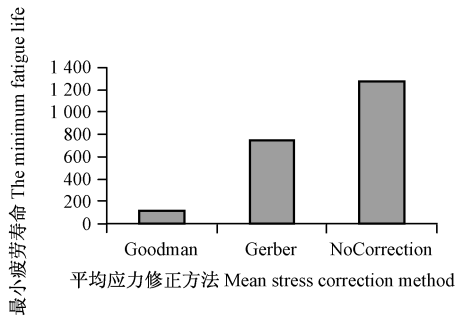


图 13 链轮的平均应力修正敏感性

Fig. 13 Mean stress effect sensitivity of sprocket

5 结论

本文采用有限元方法对链轮的力学特性进行了仿真分析,将提取的不同工况下的最大等效应力时间历程进行载荷编谱,并基于处理后的载荷谱对链轮进行疲劳寿命计算和疲劳敏感性分析。通过分析得出的结论如下:

1) 链轮的最大等效应力位于链窝边缘区域,且不同工况的最大等效应力值均不超过 30CrMnTi 的屈服极限 2 300 MPa,该型号链轮具有良好的力学性能。

2) 计算得到的链轮最小疲劳寿命约为 110 天,该值较为保守。

3) 大多数的疲劳损伤是由有限的循环所产生的。

4) 链轮最小疲劳寿命随着过载量的增加近似呈指数下降趋势;链轮最小疲劳寿命随着残余拉应力的增加近似呈线性单调递减趋势;提高链轮的表面质量会显著增加链轮的使用寿命;采用 Goodman 平均应力修正方法所计算的链轮最小疲劳寿命最为保守。

5) 根据刮板输送机链轮故障的统计结果,发现链轮的实际使用寿命与文中计算结果有较好的一致性,说明本研究具有一定的合理性和科学性。

参考文献 (References)

[1] Schaefer Wilhelm. Chain-Sprocket Interaction [J]. Glueckauf-Forschungshefte, 1975, 36(6):231-239.

[2] Mueller J., Kaminsky W.. Measurement of Tooth Thickness at Sprocket Wheels [J]. Maschinenbautechnik, 1984, 33(12):553-555.

[3] Spies Klaus, Sommer Juergen, Drescher Thomas, et al. Interaction between round-link chains and outer-engagement sprocket wheel teeth [J]. Glueckauf-Forschungshefte, 1988, 49(3):111-117.

[4] Wiechers Klaus-Peter. Bearing Capacity of the Conveyor Plates and Energy Consumption of the Sprocket Chain Conveyors [J]. Gluckauf; Die Fachzeitschrift fur Rohstoff, Bergbau und Energie, 1984, 120(6):1020-1024.

[5] Handick Guenter. Experience with Inside Toggle Connections for Sprocket Chain Conveyor [J]. Gluckauf; Die Fachzeitschrift fur Rohstoff, Bergbau und Energie, 1984, 120(21):1418-1421.

[6] Naji Mohammad R., Marshek Kurt M. ANALYSIS OF SPROCKET LOAD DISTRIBUTION [J]. Mechanism and Machine Theory, 1983, 18(5):349-356.

[7] Pedersen, S. L. Model of contact between rollers and sprockets in chain-drive systems [J]. Archive of Applied Mechanics, 2005, 74(7):489-508.

[8] Sergeev S. A., Moskalev D. V. Parametric optimization of chain-transmission sprockets [J]. Russian Engineering Research, 2009, 29(5):452-455.

[9] Herkenrath, Karl. Energy and cost reduction using self-adjusting sprockets [J]. Glueckauf-Forschungshefte, 1999, 60(3):73-75.

[10] 王振华. 重型刮板输送机链轮材质与制造工艺研究[D]. 西安:西安科技大学,2011:9-41.

WANG ZhenHua. Research on material and manufacturing technics of sprocket wheel used in heavy scraper conveyor [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology,2011:9-41(In Chinese).

[11] 吴广利,吴 坤,魏 泰. SGZ630 刮板输送机链轮的有限元分析[J]. 煤矿机械,2011,32(11):98-100.

WU GuangLi, WU Kun, WEI Tai. Finite element analysis of SGZ630 scrape trigger reducer sprocket [J]. Coal Mine Machinery, 2011,32(11):98-100(In Chinese).

[12] 焦宏章,杨兆建,王淑平. 刮板输送机链轮卡链工况下的动力学特性分析[J]. 煤炭科学技术,2012,40(6):66-69.

JIAO HongZhang, YANG ZhaoJian, WANG ShuPing. Analysis on sprocket dynamics features of scraper conveyor under performances of chain Jammed [J]. Coal Science and Technology,2012,40(6):66-69(In Chinese).

[13] 焦宏章,杨兆建,王淑平,等. 刮板输送机链轮结构优化设计[J]. 机械强度,2013,35(4):419-423.

JIAO HongZhang, YANG ZhaoJian, WANG ShuPing, et al. Structure optimization design of sprocket of scraper conveyor [J]. Journal of Mechanical Strength, 2013, 35(4):419-423(In Chinese).

[14] 焦宏章,杨兆建,王学文,等. 刮板输送机链轮瞬态动力学响应分析[J]. 太原理工大学学报,2013,44(1):51-54.

JIAO HongZhang, YANG ZhaoJian, WANG ShuPing, et al. Transient dynamic responses analysis of sprocket for scraper conveyor [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2013,44(1):51-54(In Chinese).

[15] 焦宏章,杨兆建,王淑平. 刮板输送机链轮传动系统接触动力学仿真分析[J]. 煤炭学报,2012,37(s2):494-498.

JIAO HongZhang, YANG ZhaoJian, WANG ShuPing. Contacts dynamics simulation analysis for sprocket transmission system of scraper conveyor [J]. Journal of China Coal Society,2012,37(s2):494-498(In Chinese).

[16] 朱晓春,张 鑫,张德林,等. 刮板输送机链轮的疲劳寿命计算及合理性验证分析[J]. 煤矿机械,2013,34(1):21-23.

ZHU XiaoChun, ZHANG Xin, ZHANG DeLin, et al. Fatigue life analysis and rational verification on sprockets of scraper conveyor [J]. Coal Mine Machinery,2013,34(1):21-23(In Chinese).

[17] 张 强,付云飞,胡 南. 矿用 V 型锁式接链环卡链冲击状态下的动态特性研究[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2013,36(4):401-405.

ZHANG Qiang, FU YunFei, HU Nan. Study of dynamic characteristic of mining V-lock chain ring under impact load caused

- by stuck chain [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 36(4): 401-405 (In Chinese).
- [18] 张 强, 付云飞, 聂国强. 动载荷下的 V 锁式接链环力学特性研究[J]. 机械设计, 2013, 30(11): 13-16.
ZHANG Qiang, FU YunFei, NIE GuoQiang. Study of mechanical properties of V-lock chain ring under dynamic load [J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(11): 13-16 (In Chinese).
- [19] 浦广益. ANSYS Workbench 12 基础教程与实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 34-36.
PU GuangYi. Basic course and example explanation of ANSYS Workbench 12 [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2010: 34-36 (In Chinese).
- [20] 许京荆. ANSYS 13.0 Workbench 数值模拟技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 91-111.
XU JingJing. Numerical simulation technology of ANSYS 13.0 Workbench [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2012: 91-111 (In Chinese).
- [21] 薛 河, 刘 莲, 杨芝苗. 低温及应变率对矿用圆环链冲击性能的影响[J]. 西安科技大学学报, 2011, 31(3): 343-346.
XUE He, LIU Lian, YANG ZhiMiao. Effect of low temperature and strain rate on impact property of mining chain [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011, 31(3): 343-346 (In Chinese).
- [22] 李惟慷. 矿用圆环链传动接触动力学及损伤机理的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2012: 46-48.
LI WeiKang. Study on contact dynamics and damage mechanism of mining round link chains transmission [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2012: 46-48 (In Chinese).
- [23] 徐广明, 杨伟红. 刮板输送机运行阻力计算分析[J]. 煤矿机械, 2009, 30(1): 3-5.
XU GuangMing, YANG WeiHong. Analysis of scraper conveyor running resistance [J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30(1): 3-5 (In Chinese).
- [24] 宋秋爽. 薄煤层刨煤机成套装备关键技术研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(11): 33-38.
SONG QiuShuang. Research on key technology of thin seam plough complete equipment [J]. Engineering Sciences, 2011, 13(11): 33-38 (In Chinese).
- [25] 张 强, 宋秋爽, 袁 智, 等. 基于熵权的刨煤机适创性灰色关联多级模拟综合评价[J]. 科技导报, 2012, 30(8): 55-60.
ZHANG Qiang, SONG QiuShuang, YUAN Zhi, et al. Plow plane multi-level fuzzy evaluation based on gray level correlation decision model and entropy value law [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(8): 55-60 (In Chinese).
- [26] 张春芝, 孟国营. 输送机刮板链立环疲劳寿命预测方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(7): 62-65.
ZHANG ChunZhi, MENG GuoYing. Study on prediction method of fatigue life for vertical ring of chains applied to scraper conveyor [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(7): 62-65 (In Chinese).
- [27] 王国军, 胡仁喜, 陈 欣, 等. nSoft 疲劳分析理论与应用实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 55-61.
WANG GuoJun, HU RenXi, CHEN Xin, et al. Fatigue analysis theory and application example course of nSoft [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 55-61 (In Chinese).
- [28] 康晓敏, 李贵轩. 随机动载作用下刨煤机刨链疲劳寿命预测[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 503-508.
KANG XiaoMin, LI GuiXuan. Prediction of fatigue life of coal plow chain under stochastic dynamic load [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 503-508 (In Chinese).
- [29] 赵丽娟, 马联伟, 刘旭南, 等. 难刨煤层刨刀可靠性与疲劳寿命研究[J]. 机械设计, 2013, 30(4): 85-88.
ZHAO LiJuan, MA LianWei, LIU XuNan, et al. Plow bit reliability and fatigue life analysis in hard cutting seam [J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(4): 85-88 (In Chinese).