

装甲车辆侧减速器齿轮接触疲劳寿命预测研究

唐东红 崔玉莲 张炳喜 赵永东

装甲兵工程学院,北京,100072

摘要:通过对根据典型路面实车试验获得的载荷数据进行雨流计数处理,编制了装甲车辆侧减速器齿轮所承受的扭矩谱和应力谱;充分考虑残余应力对齿轮接触疲劳极限的影响,通过强度和硬度之间的转换关系以及疲劳强度与残余应力的作用关系,得到了齿面沿深度方向的静强度以及接触疲劳强度分布;结合疲劳寿命分析技术,进行了齿轮疲劳寿命预测,其预测结果与实际规律相符合。

关键词:侧减速器;齿轮;接触疲劳;寿命预测

中图分类号:TJ811

文章编号:1004—132X(2011)22—2762—04

Research on Gear's Contacting Fatigue Life Prediction of Side Reducer in Armored Vehicle

Tang Donghong Cui Yulian Zhang Bingxi Zhao Yongdong

Armored Force Engineering Institute, Beijing, 100072

Abstract: By dealing with the load data from vehicle test on typical terrain, this paper obtains the torque and stress spectrum bearing by the side reducer gear in armored vehicle. Considering the influence of the residual stress on the contacting fatigue limit, the distribution of strength and contacting fatigue limits in different depths were obtained by means of the distribution of residual stress and hardness as well as the relationship between strength and hardness. The gear's fatigue life was predicted by combining the fatigue life prediction technique. The prediction result is accorded with the actual rule.

Key words: side reducer; gear; contact fatigue; life span prediction

0 引言

在国内装甲车辆设计领域,应用疲劳理论进行可靠性设计分析与发达国家相比起步较晚。目前装甲车辆机械零部件的强度设计仍然主要采用静强度设计,即按最大载荷并考虑安全系数的方法。这种设计方法不能反映出载荷随机变化的规律和载荷幅值的大小及出现次数,因而也就不知道载荷幅值大小及出现的次数对零部件的损伤程度。因此,如何准确研究装甲车辆关键零部件在运行中的使用寿命是装甲机械零部件强度寿命预测领域中的前沿课题。

侧减速器是坦克底盘传动系统的重要组成部分,位于行星转向机和主动轮之间,其主要功能是以固定的传动比增大行星转向机传给主动轮的扭矩,降低主动轮的转速。其主被动齿轮在换挡、转向过程中反复承受高周疲劳载荷的作用,致使轮齿表层产生疲劳裂纹,进而发展成表层金属小块脱落,形成点蚀。再加上该型齿轮齿面硬度较高,局部凸起不易磨平,早期点蚀的小麻坑可能扩大,

形成扩展性点蚀,并沿节线全长扩展,扩展性点蚀将使齿形破坏,导致侧减速器传动平稳性降低,噪声加大,甚至迅速失效^[1]。由于实际中接触疲劳失效是侧减速器齿轮的主要失效形式,因此其接触疲劳寿命问题一直是设计人员和广大用户关注的问题之一。

本文通过车辆的实车道路试验,从变载荷结构上测量得到连续变化的“载荷—时间历程”,经雨流法统计计数处理后得到了侧减速器主动齿轮的扭矩谱;通过测定齿轮表层不同深度处的硬度和残余应力,基于硬度与抗拉强度的转换关系以及疲劳强度与残余应力的作用关系,得到了齿面沿深度方向的接触疲劳极限分布,从而构造出零件的 $P-S-N$ 曲线(其中, P 为存活率, S 为应力, N 为寿命);并结合合适的累积损伤理论进行了侧减速器齿轮的接触疲劳寿命预测研究。

1 载荷谱的确定

由于坦克的行驶工况千变万化,其行驶道路和挡位工况等非常复杂,实际工况的精确划分是

十分困难的,因此根据某型坦克在设计和使用中积累的经验,确定了典型道路、挡位工况和各工况的寿命里程分配比例,具体如表 1 所示。

表 1 行驶工况经验划分表 %

	各级路面占总里程的比例	各级路面下挡位按里程的分配比例		
		二挡	三挡	四挡
沙石路	30	15	50	35
水泥路	35	15	35	50
土路	35	60	40	

在侧减速度器单工况载荷雨流计数统计、载荷分布形式参数估计和多工况载荷合成的基础上,根据出现一次最大值载荷的概率为 10^{-6} 的原则对载荷进行扩展,并依据相关文献^[2-3]获得输入轴全寿命里程的二维疲劳设计谱,如图 1 所示。

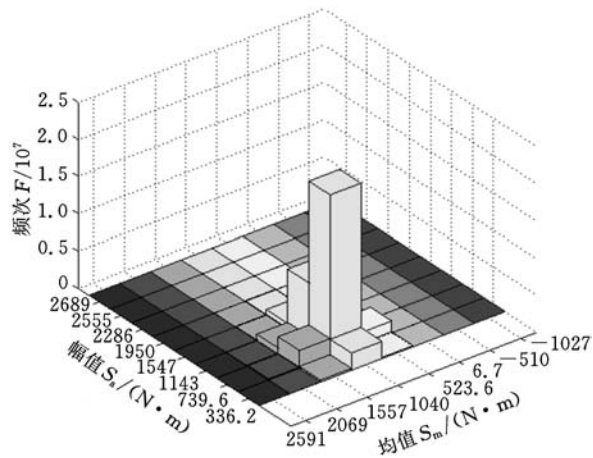


图 1 寿命里程的设计谱图

根据疲劳累积损伤理论,常将全寿命里程二维设计谱简化为程序载荷谱,作为疲劳试验和疲劳设计的依据,八级程序载荷谱是典型的程序载荷谱。二维载荷谱描述的是载荷幅值、均值与频次的关系,而目前国内常用的程序载荷谱则仅保留了幅值和频次的关系,故本文采用 Goodman 等效方法,将寿命里程二维设计谱等效简化成均值为零的一维载荷谱。八级程序载荷谱的幅值分级采用不等间隔法分为八级,图 2 为侧减速度器输入轴寿命里程的八级载荷谱图。

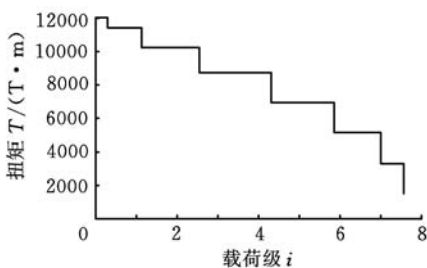


图 2 寿命里程的八级载荷谱图

2 齿轮接触应力谱的确定

装甲车辆底盘侧减速度器主动齿轮为渐开线圆柱齿轮,根据赫兹公式,其齿面最大接触应力可表示为^[4]

$$\sigma_H = Z_H Z_E Z_\epsilon Z_\beta \sqrt{\frac{K_A K_V K_{H\beta} K_{H\alpha} F_t \mu \pm 1}{d_1 b \mu}} \quad (1)$$

式中, K_A 为使用系数,用以表示冲击情况的影响; K_V 为动载系数,用以表示齿轮啮合误差和运转速度等内部因素引起的附加载荷的影响; $K_{H\beta}$ 为接触应力计算时的齿向载荷分布系数,表示轮齿工作时沿齿宽方向载荷分布不均匀的情况; $K_{H\alpha}$ 为接触应力计算时的齿间载荷分配系数,表示同时啮合的各对轮齿间载荷分配不均匀的情况; F_t 为端面内分度圆切向力; d_1 为小齿轮分度圆直径; b 为工作齿宽; μ 为传动比; Z_H 为节点区域系数; Z_E 为弹性系数; Z_β 为螺旋角系数; Z_ϵ 为重合度系数,用于考虑重合度和接触线长度增加对齿面接触应力的影响。

某装甲车辆侧减速度器主被动齿轮材料为 20Cr₂Ni₄A 合金钢,经渗碳、淬火、低温回火等热处理工序,表层硬度不低于 HRC57,芯部硬度为 HRC34~45,制造精度为 6 级,主动齿轮齿数为 25,被动齿轮齿数为 40,模数为 8mm,载荷为中等冲击。由于齿面所受的应力很难通过直接测试得到,故通过测量侧减速度器主动齿轮所在轴承受的扭矩,进行换算得到分度圆上的圆周力,并辅以各种修正系数获得齿面所受的载荷。根据侧减速度器的工作环境和主动齿轮的基本参数,可得主动齿轮齿面接触应力修正系数,如表 2 所示。

表 2 主动齿轮齿面接触应力修正系数

K_A	Z_ϵ	Z_β	Z_H	Z_E	K_V	$K_{H\beta}$	$K_{H\alpha}$
1.50	0.881	1	2.5	190	1.2	1.336	1.05

根据该型装甲车辆底盘典型工况下侧减速度器输入轴的扭矩谱,可以得到主动齿轮在不同扭矩等级下的端面内分度圆切向力 F_t 以及相应的齿面接触应力 σ_H ,计算结果如表 3 所示,其中 $F_t = \frac{2000T_1}{d_1}$ 。

表 3 主动齿轮齿面接触应力谱

载荷级	切向力(10^{-4} N)	接触应力(MPa)	累积频次
1	12.0208	1886.87	1
2	11.4224	1839.31	1.990
3	10.2168	1739.53	13.467
4	8.7120	1606.33	365.380
5	6.9168	1431.29	20 379
6	5.1128	1230.56	718 640
7	3.3088	989.94	10 232 000
8	1.5048	667.60	37 572 000

3 疲劳寿命预测

3.1 疲劳累积损伤理论

当材料承受高于疲劳极限的交变应力时,每个循环都使材料产生一定的损伤,每个循环所造成的平均损伤为 $1/N$ 。这种损伤是可以累积的, n 次恒幅载荷所造成的损伤等于其循环比 n/N 。按照雨流计数法将每种工况下载荷谱分成 l 个应力等级,第 i 级应力循环产生的损伤度为 $D_i = n_i/N_i$,其中, n_i 为第 i 级应力等级下的循环次数,由载荷谱给出; N_i 为第 i 级应力等级下的疲劳寿命,由 $S-N$ 曲线确定。则每种工况下扩展载荷谱引起的疲劳损伤度为

$$D = \sum_{i=1}^l D_i = \sum_{i=1}^l n_i/N_i \quad (2)$$

按照 Miner 线性损伤累积理论,当损伤累积达到临界损伤值(一般取为 1) 时发生破坏,即破坏准则为

$$D = \sum_{i=1}^l n_i/N_i = 1 \quad (3)$$

式(3)是多级循环加载条件下的线性累积损伤理论的计算公式,利用该公式,结合 $S-N$ 曲线就可以实现疲劳寿命的估算。

3.2 齿轮 $P-S-N$ 曲线的确定

经表面强化处理后的齿轮,其齿面硬度大大提高,但同时表层还存在不同的残余应力。充分考虑残余应力的性质及分布对疲劳极限的影响,基于侧减速器齿轮齿面的硬度和残余应力的测定,根据抗拉强度和硬度之间以及疲劳强度与抗拉强度、残余应力之间的对应关系来获取齿轮的接触疲劳极限,从而建立齿轮的 $P-S-N$ 曲线。

图 3 给出了齿面不同深度下的硬度测量结果。从图中看到,啮合区域的表面硬度最大为 HRC59.9,然后随着深度的增加,硬度逐渐下降。

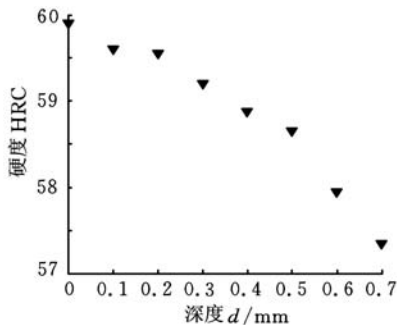


图 3 不同深度下的硬度测量结果

根据硬度与抗拉强度之间的转换关系,把齿面不同深度下的硬度转换为抗拉强度。图 4 反映了齿面在不同深度下的换算抗拉强度。从图 4 中可以看到,表面的抗拉强度为 2400~2450MPa。

而该齿轮单齿抗拉试验结果也初步说明了该结果基本符合理论分析,因此可以按照齿轮的硬度来确定其强度。

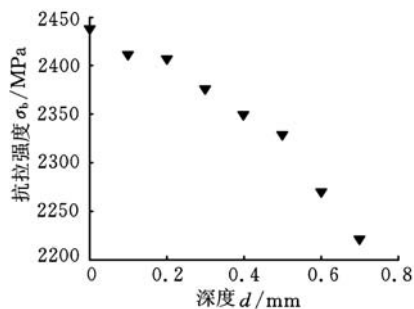


图 4 不同深度下的换算抗拉强度

齿面不同深度下的残余应力测量结果如图 5 所示。从图中可以看出,经表面强化后,齿面不同深度处形成不同的残余压应力,在深度约为 0.1~0.2mm 处残余压应力达到最大值约 700~800MPa,之后随着深度的增加残余压应力急剧减小。

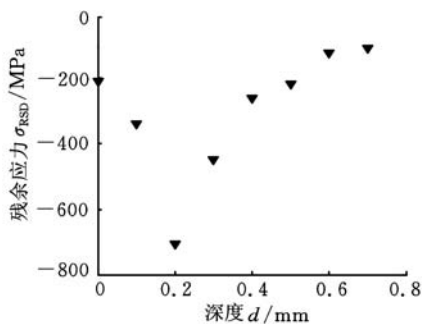


图 5 不同深度下的残余应力测量结果

研究表明,残余拉应力加速使表面产生裂纹并使其扩展而降低疲劳强度,残余压应力则能部分地抵消工作载荷施加的拉应力,延缓疲劳裂纹的扩展,提高零件的疲劳强度。把残余应力作为平均应力^[2,5],根据材料抗拉强度和疲劳强度的对应关系^[6],同时考虑零件残余压应力和硬度时,齿轮齿面沿深度方向的疲劳极限分布为^[7]

$$\sigma_{-1d} = f(-\beta\sigma_{RSD} + \sigma_b) \quad (4)$$

式中, σ_{-1d} 为深度为 d 时的疲劳极限; σ_b 为抗拉强度; σ_{RSD} 为深度为 d 时的残余应力,残余拉应力取正,残余压应力取负; f 为疲劳比,即疲劳极限与抗拉强度的比值,一般为 0.3~0.6; β 为残余应力影响系数,这里取 1。

依据式(4)可估算出不同深度下的疲劳极限分布,如图 6 所示。

从图 6 可以看出,从表面开始至 0.2mm 的深度,疲劳极限有一上升到下降的过程,存在一极大值,疲劳极限的最大值不在零件表面,而在次表面深度约为 0.2mm 处。在这一区域疲劳极限的增大主要是由于残余压应力的作用。随着深度的增加,残余压应力和硬度都开始下降,因此疲劳极限

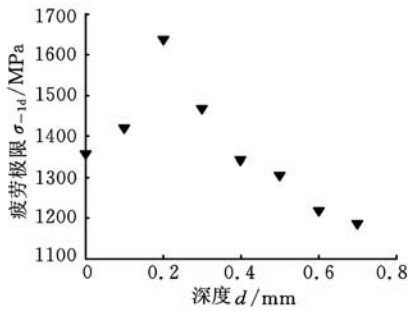


图6 不同深度下的疲劳极限分布

也开始下降。

由此采用两点法可作出在双对数坐标中的 $P-S-N$ 曲线^[2], 其拟合公式为 $\lg N = a + m \lg S$ 。根据零件的强度极限和疲劳极限, 得到主动齿轮的 $P-S-N$ 曲线, 其参数如表4所示。

表4 齿面接触疲劳寿命曲线参数表

	存活率 $P(\%)$	$S-N$ 曲线斜率 m	a
齿面接触疲劳	50	-16.9775	60.2327
	90	-14.4129	51.3445
	99	-12.5782	45.0112

3.3 疲劳寿命预测结果

由于装甲车辆在正常行驶条件下, 关键零部件的疲劳失效大多为高周疲劳破坏, 因此选择用名义应力法求解疲劳寿命。结合侧传动载荷谱的测试结果和线性疲劳损伤理论, 假设零件在一个载荷谱块下产生的总损伤为 D , 则零件完成的循环次数为 $\lambda = 1/D$, 若每个载荷谱块的当量行驶里程数为 L (单位: km), 则零件的疲劳寿命为 $\lambda L = L/D$ (km)。主要输入的参数为: 表面加工系数 $\beta = 0.85$, 尺寸系数 $\epsilon = 0.875$, 应力集中系数 $k = 1.2$, 据此可得到该装甲车辆侧传动主动轮在不同可靠度下的疲劳损伤量和疲劳寿命预测结果, 如表5所示。

表5 主动轮疲劳寿命预测结果

	存活率 $P(\%)$	累积损伤 D	循环次数 λ	行驶里程 (km)
接触疲劳	50	0.1120	8.9286	89 286
	90	0.2134	4.6857	46 857
	99	1.1127	0.8987	8 987

从分析主动齿轮的疲劳寿命和可靠度的关系可以看出, 随着可靠度要求的提高, 典型部件的疲

劳寿命是降低的, 这与实际规律相符合。

4 结论

(1) 建立了实测载荷谱下齿轮疲劳寿命预测的流程。通过对典型路面实车试验获得的载荷数据进行处理, 并通过相应的修正关系, 利用雨流计数法编制了齿轮的接触应力谱。

(2) 通过分析残余应力对齿轮接触疲劳强度的影响, 基于疲劳强度与残余应力的作用关系, 得到了齿轮表层沿深度方向的疲劳极限分布, 为齿轮疲劳寿命预测提供了较为准确的数据来源。

(3) 提出了通过测定齿轮硬度求 $P-S-N$ 曲线的方法。通过测定齿轮硬度, 将实测到的硬度换算为抗拉强度, 进一步换算为其疲劳强度极限, 从而近似获得该零件的 $P-S-N$ 曲线。

(4) 利用 Miner 线性损伤累积理论, 得到了不同可靠度下的疲劳寿命, 预测结果与实际规律相符合。

参考文献:

- [1] 孙凤文, 李东峰, 付显随. 履带式装甲底盘侧减压器齿轮接触疲劳可靠性分析[J]. 南京理工大学学报, 2007, 31(3): 296-299.
- [2] 赵少汴, 王忠保. 抗疲劳设计—方法与数据[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [3] 陈东升, 项昌乐, 陈欣. 军用车辆传动系零件载荷谱的建立[J]. 机械强度, 2002, 24(2): 310-314.
- [4] 刘惟信. 机械可靠性设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [5] 张定铨. 残余应力对金属疲劳强度的影响[J]. 理化检验·物理分册, 2002, 38(6): 231-235.
- [6] Wang Shengping. Relationship between the Fatigue Limit and the Mechanical Strength of Metals[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 100(1): 42-46.
- [7] 卢曦, 郑松林, 冯金芝. 齿轮疲劳强度与裂纹萌生区域的预测研究[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(1): 80-84.

(编辑 卢湘帆)

作者简介: 唐东红, 女, 1974年生。装甲兵工程学院机械工程系讲师、博士。主要研究方向为可靠性分析与设计、数控加工变形分析及控制。发表论文20余篇。崔玉莲, 女, 1970年生。装甲兵工程学院机械工程系副教授, 博士。张炳喜, 男, 1963年生。装甲兵工程学院机械工程系副教授。赵永东, 男, 1964年生。装甲兵工程学院机械工程系副教授。