

电梯曳引钢带疲劳状态的弱磁监测

刘松源¹ 夏桂锁^{1,2} 张 帅² 杨竟艺² 廖浩东² 殷金泉³

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

(2. 河北梦卡森科技发展有限公司 研发部, 廊坊 065001)

(3. 江西省检验检测认证总院 特种设备检验检测研究院 赣州检测分院, 赣州 341000)

摘要:【目的】电梯复合曳引钢带长期承受外部应力,易产生磨损、变形、断丝等缺陷,严重时会引发钢带断裂事故。为有效预防此类安全事故发生,开展了曳引钢带疲劳破坏的相关监测试验。【方法】在疲劳实验机上搭建试验平台,进行曳引钢带拉伸疲劳试验,模拟其在反复服役过程中的疲劳破坏进程;同时采用高精度弱磁传感器采集钢带表面的磁感应强度信号,重点分析信号峰峰值的变化规律。【结果】试验结果表明,磁感应强度峰峰值曲线的变化可无失真地反映曳引钢带在应力作用下的疲劳破坏全过程;曳引钢带内部钢丝的疲劳破坏进程并非平稳发展,而是呈现出明显的阶段性特征;疲劳周期内磁感应强度峰峰值的变化趋势能够对曳引钢带的疲劳破坏进行有效预警。

关键词: 曳引钢带; 磁感应强度; 拉伸疲劳; 在线监测; 弱磁检测

中图分类号: TG115.27 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.05.005

0 引言

电梯曳引钢带由若干根平行布置的钢丝绳芯外敷高分子材料融合而成,在电梯实际工作过程中,主要由钢丝绳芯承载载荷。和传统的电梯钢丝绳相比,电梯曳引钢带在原有优势的基础上,还具有高曳引力、坚固耐用、能有效减少电梯运行时的振动和噪声、减小电梯曳引轮尺寸等优点^[1]。由于钢丝绳芯被包覆在高分子材料内部,仅凭肉眼无法判断钢丝绳内部的断裂、疲劳损伤等缺陷。随着曳引钢带在电梯中的推广使用,开展曳引钢带无损检测方法的相关研究显得尤为迫切与必要。

曳引钢带的检测技术主要有磁通量检测法、寿命值设定法和电阻测量法,研究者大多停留在缺陷检测阶段,对疲劳监测和寿命预测的研究并不深入。张东来等^[2]采用漏磁检测法对钢带内部钢丝绳断丝、断股进行测量,虽然此方法具有很强的探伤能力,但是此方法励磁结构较笨重,对损伤密集分布不容易区分。LEI等^[3]对电阻测量法展开了研究,研制了一套通过监测钢带内部钢丝绳芯电阻和环境温度的变化来确定曳引钢带强度失效的试验系统,应用该方法对曳引钢带进行疲劳估计和寿命预测。胡晓等^[4]对曳引钢

带绳芯电阻变化率与钢带强度的关系展开研究,设计了一种将寿命值检测法与电阻测量法相结合的综合检测手段。郭必奔等^[5]提出了一种径向磁化电磁传感器,基于电磁耦合和高导磁材料的聚磁特性,建立了径向磁化电磁传感器的等效模型,实现了对曳引钢带缺陷的精准检测。

在技术应用方面,山西慧达澳星科技有限公司研制了一种电梯曳引钢带无损检测装置,针对现有技术检测精度低、易漏检、抗干扰能力差的问题做了一些改善。洛阳威尔若普检测技术有限公司开发的W-GDAJ电梯曳引钢带安全检测装置,能够对曳引钢带内部的绳芯断裂、磨损进行识别,还能解决拖带断芯的监测问题^[6]。

曳引钢带内部钢丝绳芯是一种铁磁性材料,在地磁场环境下,其应力集中区会产生可被检测的弱磁信号,并且随着应力的变化,磁信号也会有所变化,两者具有相关性。MAZUREK等^[7]提出了一种钢丝绳被动磁诊断的方法,该方法通过光泵磁力计分别测出地磁场的水平分量和垂直分量,再利用矢量合成求出地磁场。邱朋闯等^[8]通过磁通门传感器采集地磁场信号,从比较缺陷处和母材磁导率变化的角度,建立了一种在地磁场激励下测量工件表面微弱磁场变化的无损

收稿日期: 2024-08-26 修回日期: 2024-09-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51765049); 航空智能制造专项基金项目(2019ZE056001); 江西省市场监督管理局项目(GSIK202227)

作者简介: 刘松源,男,1999年生,江西宜春人,硕士研究生; 主要研究方向为弱磁检测技术; E-mail:694212952@qq.com。

夏桂锁(通信作者),男,1978年生,黑龙江哈尔滨人,教授,硕士研究生导师; 主要研究方向为弱磁检测技术、精密测量技术、光学相干层析成像技术; E-mail:xiaguisuo@163.com。

引用格式: 刘松源,夏桂锁,张帅,等. 电梯曳引钢带疲劳状态的弱磁监测[J]. 机械强度,2026,48(5):40-48.

LIU Songyuan, XIA Guisuo, ZHANG Shuai, et al. Weak magnetic monitoring of fatigue condition of elevator steel belt for drive[J].

Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(5):40-48.



免费获取

检测方法。这些工作都为曳引钢带疲劳状态弱磁监测做了理论上的准备。

在电梯运行过程中,曳引钢带受牵引力作用,在微观上表现为磁畴会发生不可逆的定向排列和重组,在宏观上表现为在应力集中区域表面可检测到对应的弱磁信号^[9]。与原本未受力状态的弱磁信号进行对比,由此判断是否产生断丝或者疲劳损伤等缺陷。

本文针对曳引钢带疲劳破坏监测过程的复杂性问题,提出一种地磁场环境下曳引钢带拉伸疲劳试验的弱磁监测方法,构建适用于电梯曳引钢带的柔性带状试件疲劳试验系统。对应力集中和疲劳断裂的演变过程进行实时在线监测,同时对疲劳周次中的磁感应强度变化峰-峰值进行分析,能够准确判断曳引钢带内部钢丝在疲劳加载过程中产生的集中性疲劳断裂。最后,结合曳引钢带在疲劳拉伸试验不同阶段的弱磁信号变化,达到有效反映曳引钢带疲劳破坏过程的目的。

1 力磁耦合理论

1.1 曳引钢带的力磁关系

根据铁磁学的能量平衡理论,当铁磁构件处于平衡状态时,总自由能最小^[10]。当铁磁构件受到外部载荷作用时,在铁磁材料内部的应力集中区会聚集相当程度的应力能。为了使铁磁材料内总的自由能趋于最小,在地磁场和应力的联合作用下,铁磁材料内部磁畴的取向发生偏转,同时磁畴壁发生位移,从而将应力能转化为磁弹性能^[11]。钢丝绳受到外力作用之后,材料内部的磁特性将受到力磁耦合效应的影响,微观上表现为磁畴发生旋转,磁畴壁发生移动^[12],宏观上表现为在钢丝绳表面出现微磁信号^[13-14]。考虑能量最小化原理和应力磁化效应^[15],通过监测构件表面的微磁信号的改变,对其内部的应力集中和疲劳损伤过程进行判断和分析。

综上所述,弱磁监测技术是一种基于力-磁耦合效应的无损检测方法,通过测量表面磁场信号的变化来评估铁磁性材料的内应力状态^[16-17],由此将构件不可见的疲劳损伤转化为可测量的磁信号^[18]。

1.2 曳引钢带的力磁方程

由于地磁场很微弱,所以可以将弱磁检测中的力学问题看作静态或者准静态过程,并且假定材料是各向同性的。同时假定铁磁构件处于静磁场下,介质表面的传导电流也可以忽略,因此地磁场(视作静磁场)环境下的麦克斯韦方程组可以简化为

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad (1)$$

式中, $\mathbf{B}$ 为磁感应强度矢量; $\mathbf{H}$ 为磁场强度矢量。

环境中的空气介质满足的电磁本构关系为

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (2)$$

式中, μ_0 为真空磁导率。

处于磁场环境下,铁磁构件的电磁本构关系表达式为

$$\mathbf{B} = \mu_0 [\mathbf{H} + \mathbf{M}_0(\mathbf{H}, R)] \quad (3)$$

式中, $\mathbf{M}_0(\mathbf{H}, R)$ 为铁磁构件在恒定磁场中受力磁耦合作用下产生的磁化强度改变量; R 为应力。

在实际工程应用中,钢丝绳材料通常受到循环载荷的作用。在地磁场环境下,曳引钢带内部的钢丝绳芯受到周期性外力载荷作用,内部钢丝发生相应的形变并产生应力。根据铁磁学基本理论的能量守恒定律^[19],由应力引起的磁能增量为

$$\Delta E_u = \frac{1}{2} (\mathbf{B}_R - \mathbf{B}_T) \mathbf{H} \quad (4)$$

式中, ΔE_u 为磁能变化量; $\mathbf{B}_R$ 为应力 R 作用下的磁感应强度; $\mathbf{B}_T$ 为无应力作用下的磁感应强度。

当钢丝绳受到应力为 R 的载荷作用时,其内部产生的应变能 E_R 可表示为

$$E_R = -\frac{3}{2} R \lambda_R \cos^2 \theta \quad (5)$$

式中, λ_R 为应力 R 作用下的磁滞伸缩系数; θ 为外加应力与磁化矢量方向之间的夹角。

根据能量守恒定律得

$$\Delta E_u = \frac{1}{2} (\mathbf{B}_R - \mathbf{B}_T) \mathbf{H} = \frac{3}{2} R \lambda_R \cos^2 \theta \quad (6)$$

其中, $\mathbf{B}_R = \mu_0 \mu_T \mathbf{H}$; $\mathbf{B}_T = \mu_0 \mu_T \mathbf{H}$ 。代入式(6)得到

$$\mu_R - \mu_T = \frac{3 R \lambda_R \cos^2 \theta}{\mu_0 H^2} \quad (7)$$

式中, μ_R 为应力 R 引起的材料相对磁导率; μ_T 为材料的初始磁导率。另外,钢丝绳在应力作用下的弹性阶段满足以下关系式:

$$\lambda_R = \lambda_m \frac{\mathbf{B}_T \mathbf{B}_R}{B_m^2} \quad (8)$$

式中, λ_m 为饱和磁致伸缩系数; B_m 为饱和磁感应强度。两者均与材料本身属性有关。根据能量守恒原理和最小化原则,式(5)中的 $\cos^2 \theta$ 取1,然后对上述式子整理简化,得

$$\mu_R = \frac{\mu_T B_m^2}{B_m^2 - 3 R \lambda_m \mu_T} \quad (9)$$

通过式(9)可以建立弹性阶段钢丝绳的应力-相对磁导率状态方程。当钢丝绳受到外力载荷作用时,其相对磁导率 μ_R 会随着应力 R 的改变而改变,从而通过分析 μ_R ,可以对曳引钢带内部钢丝绳芯的疲劳损伤过程进行研究。进一步地,相对磁导率随应力的变化趋势与磁化强度随应力的变化趋势相同^[20],结合铁磁构件在地磁场环境下电磁本构关系式(3),磁感应强度 $\mathbf{B}$ 也会随着应力 R 的改变而发生改变。而在一次疲劳过程中,磁感应强度的变化是外加应力变化和内部应力

变化共同造成的。疲劳试验中,外加应力变化是固定的,故可以通过一次疲劳过程中的磁感应强度峰-峰值变化反映钢丝绳内部应力的变化。只有当钢丝绳内部应力发生了巨变时,磁感应强度峰-峰值才会发生剧烈变化。

本文基于弱磁监测方法,实时得到钢丝绳表面的磁感应强度变化,并且利用一次疲劳过程中的磁感应强度峰-峰值作为特征量,判断钢丝绳疲劳损伤的程度,为提前预警钢丝绳芯层彻底断裂提供依据^[21]。

2 试验准备

2.1 试验试件

此次试验采用型号为AAA717AM2的曳引钢带,规格为30 mm×3 mm。内部结构为10芯的钢丝绳,具体由6股外股钢丝围绕中心内股钢丝互捻而成,以形成单一螺旋形式的直股。其中,外股钢丝和内股钢丝都分别由7根钢丝再次按单一螺旋形式互捻而成,每根钢丝直径为0.2 mm。外敷高分子材料为聚氨酯,其抗拉强度为43 kN。曳引钢带内部结构如图1所示。

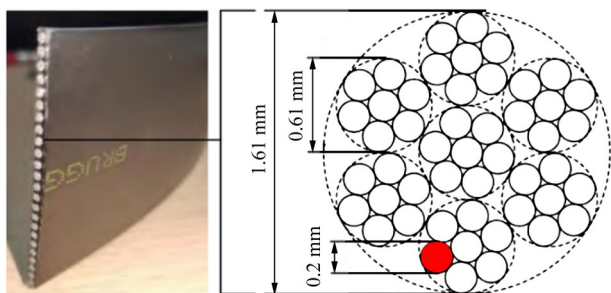


图1 曳引钢带内部结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the internal structure of steel belts for drive

在进行拉伸疲劳试验前,按照GB/T 6398—2017的规定,需要在曳引钢带中间位置处加工1个深度为0.9 mm、宽度为10 mm的标准U形缺口。

2.2 试验设备

本文监测设备使用高精度磁通门传感器,它以钴基非晶态合金作为磁芯,该磁芯材料具有磁损耗小、矫顽力小与磁导率高等优势。磁通门传感器实物如图2所示,其尺寸大小为 $\Phi 15$ mm×30 mm,传感器的量程为-750 000~750 000 nT,分辨率达到1 nT,检测敏感面为图2中底面所对应的面,其检测范围为敏感面向外辐射45°区域,完全满足弱磁监测中磁信号采集的需求。同时为保证弱磁传感器能够有效地采集到曳引钢带缺口处在疲劳试验中的弱磁信号,将弱磁传感器布置在曳引钢带缺口下方,与曳引钢带表面平行。弱磁传感器通过绝缘胶布缠绕在曳引钢带上,从而减少监测过程中由于往复振荡对信号采集造成的不确

定性干扰。



图2 磁通门传感器实物图

Fig. 2 Physical picture of the fluxgate sensor

曳引钢带拉伸疲劳试验采用的设备为Instron8801高频疲劳试验机,该试验机最高载荷可达100 kN。采用特殊设计的夹具夹持电梯钢带^[22]。在本试验中,载荷波形设置为正弦波,疲劳载荷频率为0.5 Hz。在进行曳引钢带疲劳试验时,借助分辨率达1 nT的高精度弱磁传感器对曳引钢带进行弱磁信号监测,以准确采集曳引钢带在拉伸疲劳过程中磁感应强度值的变化过程。最后,通过上位机软件将磁信号曲线实时呈现,由此来判断曳引钢带的疲劳承载状态是否正常。拉伸疲劳试验现场如图3所示。

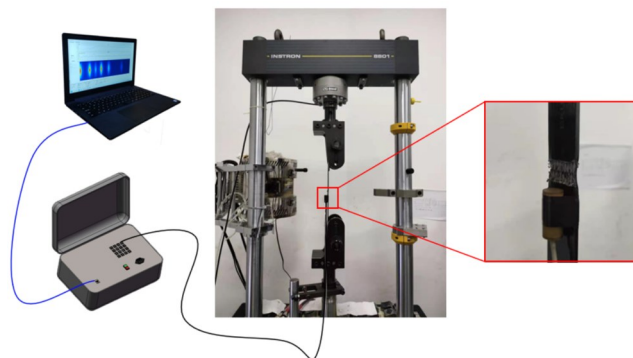


图3 疲劳试验现场

Fig. 3 Field of the fatigue test

3 试验结果与分析

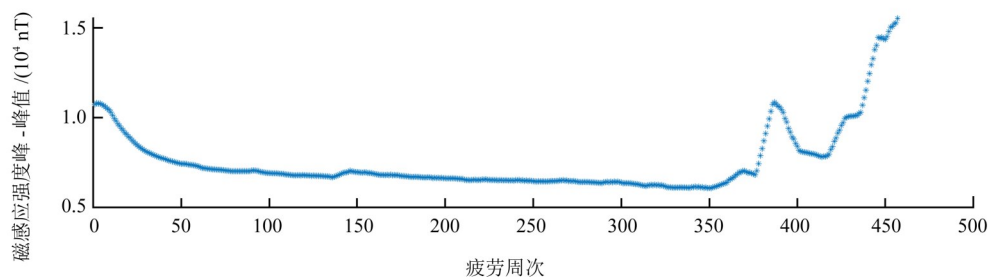
目前,国内外对电梯用曳引钢带疲劳试验尚无专门研究,没有对应的标准可采用。大多数金属材料的疲劳极限是其抗拉强度的40%~50%,部分复合材料可达70%~80%。由前文可知,曳引钢带抗拉强度为43 kN,故此次疲劳试验确定取静态拉伸强度的70%作为疲劳极限初始值。然后参考升降法的原理,根据上根试件的试验结果,来决定下根试件应力载荷变化量,每级应力载荷变化量取2 kN。

为了对曳引钢带的疲劳过程及在拉伸载荷往复作用下弱磁信号监测情况有较全面的了解,此次疲劳试验以加载的最大载荷作为变量,对曳引钢带进行4组拉伸疲劳试验,分别为30、28、26、24 kN。其中,对1次疲劳周次中磁感应强度峰-峰值变化做重点研究。

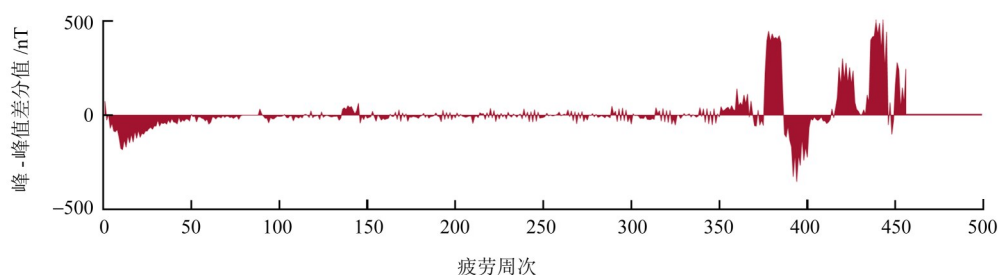
图4所示为当疲劳载荷为30 kN时,监测得到的

曳引钢带磁感应强度峰-峰值信号图和磁感应强度峰-峰值差分图。由图 4(a)可知,随着疲劳循环周次的

增加,磁感应强度峰-峰值整体呈先下降后上升的趋势,在经历 456 次疲劳循环后,曳引钢带彻底断裂。



(a) 疲劳载荷为 30 kN 时,磁感应强度峰-峰值



(b) 疲劳载荷为 30 kN 时,磁感应强度峰-峰值差分值

图 4 疲劳载荷为 30 kN 时,曳引钢带在线监测数据

Fig. 4 Online monitoring data of steel belts for drive when the fatigue load is 30 kN

由图 4(b)可知,整个疲劳过程可分为 3 个阶段。第 1 阶段为钢带内部损伤萌生与聚氨酯层破坏阶段,对应试验中疲劳周次为 0~40。该阶段处于整个疲劳前期,峰-峰值差分值为 100~200 nT,证明该阶段疲劳周次中的磁感应强度峰-峰值出现了部分变化。该阶段处于整个疲劳前期,故峰-峰值的波动应为聚氨酯层破坏造成的,同时钢丝绳内部应力快速积累。第 2 阶段为钢带内部损伤稳定拓展阶段,对应试验中疲劳周次为 40~370。该阶段的峰-峰值差分值基本在 10 nT 左右波动,证明该阶段疲劳周次中的磁感应强度峰-峰值没有出现急剧变化。第 3 阶段为损伤快速失稳拓展阶段,对应试验中疲劳周次为 370~457。在这个阶段中峰-峰值出现急剧变化,峰-峰值差分值出现尖峰,数值上大于 400 nT。在此阶段,钢带内部的钢丝绳出现集中断丝,试验现场可以听到清脆的开裂声。

随着疲劳循环周次的增加,曳引钢带内部钢丝在往复载荷作用下出现应力集中,并且伴随着疲劳破坏,逐渐累积,出现大股断丝应力释放,并且磁感应强度峰-峰值激增。之后由于部分钢丝绳已断裂,其余未断裂的钢丝绳内部应力随着疲劳周次增加骤增,表现为磁感应强度峰-峰值出现阶段性的下降,当这部分钢丝绳应力达到一定程度后也发生断裂,从而导致钢带断裂。

从监测得到的实时数据可以看出,疲劳过程中的磁感应强度峰-峰值曲线呈明显的阶段性,且每个阶段特征明显。尤其在集中断丝阶段,磁感应强度峰-峰值会出现剧烈波动,利用这种明显的特征能够有效反映

钢带所处疲劳阶段。

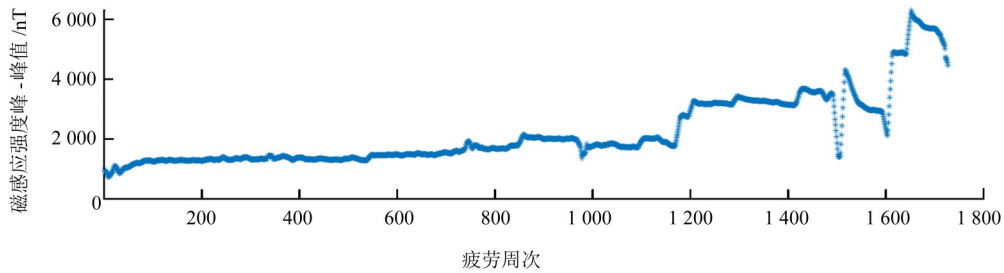
如图 5 所示,当疲劳载荷为 28 kN 时,监测得到的曳引钢带磁感应强度峰-峰值信号同样也可以分为 3 个阶段。试验中,疲劳周次为 0~43 对应第 1 阶段,即钢带内部损伤萌生与聚氨酯层破坏阶段;疲劳周次为 43~1 494 对应第 2 阶段,即钢带内部损伤稳定拓展阶段;疲劳周次为 1 494~1 727 对应第 3 阶段,即损伤快速失稳拓展阶段。

对比图 4(b)和图 5(b)可知,当疲劳载荷降低后,第 1 阶段同样处于整个疲劳前期,峰-峰值往往出现 100~200 nT 的波动值。但不同于图 4,图 5 中磁感应强度峰-峰值在第 2 阶段也出现了一部分波动的情况,如疲劳周次在 740、976 和 1 175 时,峰-峰值差分值都达到了 100 nT。其主要原因为疲劳载荷下降,疲劳周次延长,致使在损伤拓展阶段钢带内的某根钢丝绳内部出现了小规模断丝。由于该断丝规模远不如第 3 阶段出现的集中断丝,所以仅引起峰-峰值的小波动,并且第 2 阶段整体的峰-峰值波动值还是较小。同时对比图 4、图 5 第 3 阶段的峰-峰值差分值也可看出,随着疲劳载荷的减小,发生集中断丝时的峰-峰值差分值也出现了明显的下降。在疲劳载荷为 30 kN 时,出现集中断丝时的峰-峰值差分值超过了 400 nT;而在疲劳载荷为 28 kN 时,出现集中断丝时的峰-峰值差分值仅有 300 nT。

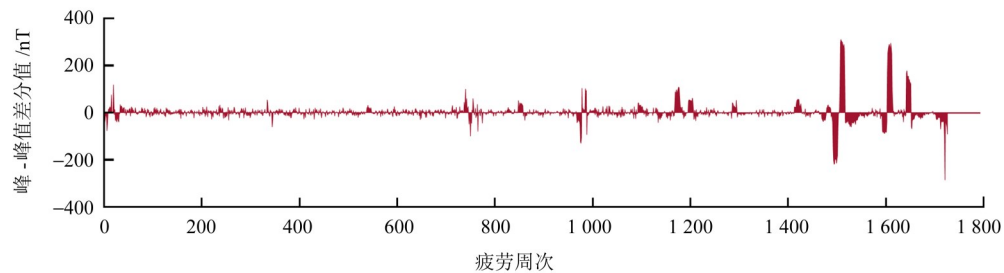
虽然当疲劳载荷降为 28 kN 时,磁感应强度峰-峰值特征与疲劳载荷为 30 kN 略有不同,如在第 2 阶段

磁感应强度峰-峰值会出现细微的波动,但不同阶段的特征依旧明显,依然可以根据磁感应强度峰-峰值的变化反映钢带所处的疲劳阶段。

由图6可知,当疲劳载荷继续降低到26 kN时,拉伸疲劳循环次数进一步增加,共累计循环1 896次后曳引钢带疲劳断裂。



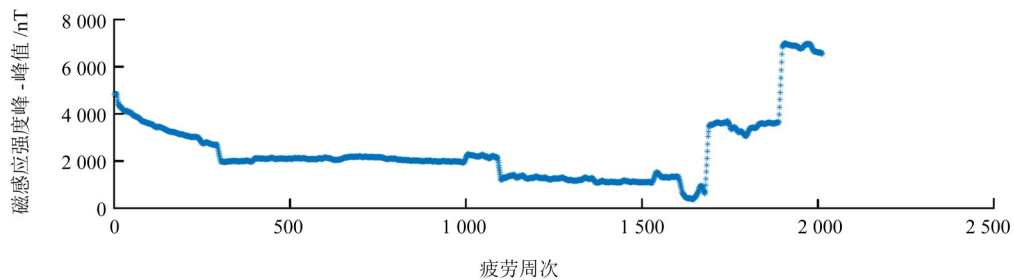
(a) 疲劳载荷为28 kN时,磁感应强度峰-峰值



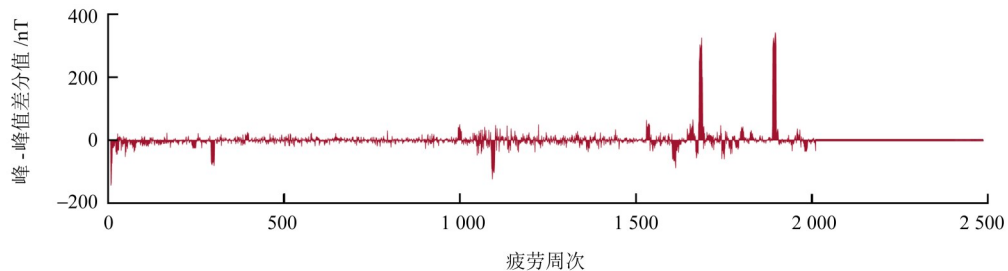
(b) 疲劳载荷为28 kN时,磁感应强度峰-峰值差分值

图5 疲劳载荷为28 kN时,曳引钢带在线监测数据

Fig. 5 Online monitoring data of steel belts for drive when the fatigue load is 28 kN



(a) 疲劳载荷为26 kN时,磁感应强度峰-峰值



(b) 疲劳载荷为26 kN时,磁感应强度峰-峰值差分值

图6 疲劳载荷为26 kN时,曳引钢带在线监测数据

Fig. 6 Online monitoring data of steel belts for drive when the fatigue load is 26 kN

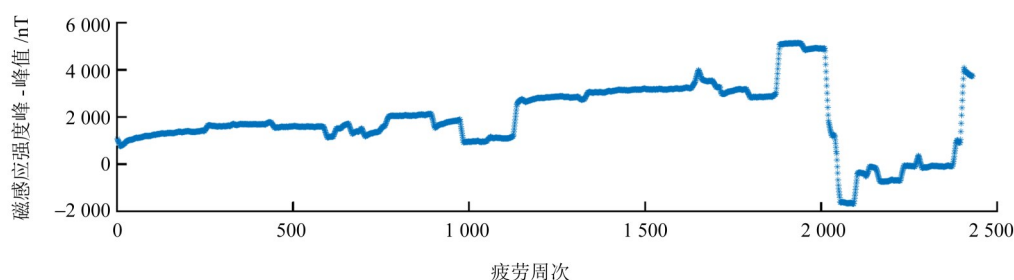
由图6(a)可知,其阶段性特征依旧明显。第1阶段为钢带内部损伤萌生与聚氨酯层破坏阶段,对应的疲劳周次为0~40;第2阶段为钢带内部损伤稳定拓展阶段,对应的疲劳周次为40~1 670;第3阶段为损伤快速失稳拓展阶段,对应的疲劳周次为1 670~1 896。对比图5和图6可知,随着疲劳载荷的进一步减小,疲劳周次增加,第1阶段同样处于整个疲劳前期,并且出现

100~200 nT的峰-峰值差分值。在第2阶段同样存在小规模断丝现象,分别位于疲劳循环周次为295和1 091时,这2处的差分值分别为78 nT和123 nT,但第2阶段整体的峰-峰值差分值还是较小。第3阶段的最大差分值也达到了300 nT以上,与疲劳载荷为28 kN时相仿,但仍远小于疲劳载荷为30 kN时的差分值。

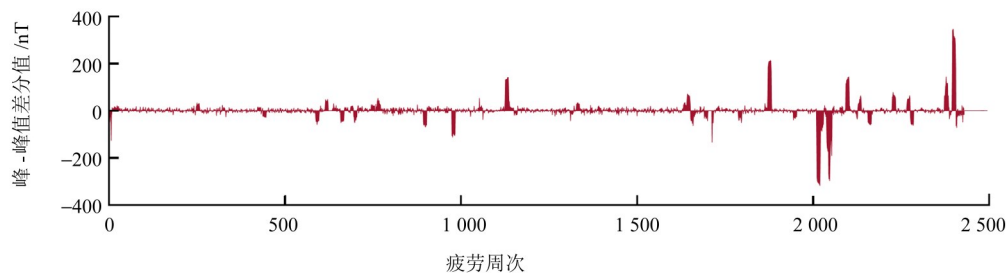
进一步降低载荷,当疲劳载荷为24 kN时,曳引钢

带共经历了 2 430 次拉伸疲劳循环周次,在疲劳周次达到 2 404 后彻底断裂,监测得到的曳引钢带磁感应强度峰-峰值如图 7 所示。由图 7 可知,疲劳载荷为 24 kN 的曳引钢带疲劳试验同样可以分为 3 个阶段:第 1 阶段,循环周次从 0~30,磁感应强度存在一定波动,差分值达到 126.2 nT;第 2 阶段,循环周次为 30~1 877,由于疲劳载荷降为 24 kN,疲劳周次进一步增大,在第 2 阶段出现了多处小规模断丝,其次数远远大于疲劳载荷为

26 kN 和 28 kN 时;第 3 阶段循环周次为 1 877~2 404,磁感应强度差分值最大依然可达 300 nT 以上,但不同于疲劳载荷为 26 kN 和 28 kN 时,其中掺杂着许多小波动。其原因应为疲劳载荷较小,疲劳周次过长,导致在发生第 1 次集中断丝后,钢带剩余钢丝的有效承载能力不能承受拉伸疲劳试验的往复载荷,缺口位置的钢丝绳继续出现小规模断丝,当积累到一定程度后,发生第 2 次集中断丝,再到钢丝绳彻底断裂。



(a) 疲劳载荷为 24 kN 时,磁感应强度峰-峰值



(b) 疲劳载荷为 24 kN 时,磁感应强度峰-峰值差分值

图 7 疲劳载荷为 24 kN 时,曳引钢带在线监测数据

Fig. 7 Online monitoring data of steel belts for drive when the fatigue load is 24 kN

从 4 组不同疲劳载荷下的疲劳试验结果来看,按照磁感应强度峰-峰值的波动大小可以将整个疲劳过程分为 3 个阶段。第 1 阶段,随着疲劳周次的增加,在缺陷位置曳引钢带外部的聚氨酯层逐渐遭到破坏,同时疲劳载荷作用于钢丝绳,导致钢带内部钢丝绳应力开始快速累积,此阶段以曳引钢带外部的聚氨酯层被彻底破坏作为结束。由于在试件表面预制了一个深度为 0.9 mm 的缺陷,此缺陷已经破坏一侧的聚氨酯层,致使仅需几十个疲劳周次聚氨酯层就会被彻底破坏,故第 1 阶段的特征为经历的疲劳周次较少且磁感应强度峰-峰值会出现一定波动。在第 2 阶段,曳引钢带外部的聚氨酯层被彻底破坏,钢带内部损伤开始稳定拓展。在此阶段往往伴随着钢带内部的应力缓慢积累,磁感应强度峰-峰值整体不存在大幅度波动。但这种情况会随着疲劳周次的增加有所改变,钢带内部的某根钢丝绳可能由于内部应力积累过大,出现小规模的断丝,而且疲劳周次越大,这种情况越明显。但这种小规模的断丝并不会导致整个钢带的断裂。在

第 3 阶段,随着钢带内部的损伤积累到一定程度,其内部损伤开始快速失稳、拓展,具体表现为钢带内部出现集中断丝,并且磁感应强度峰-峰值出现剧烈波动。

对比图 4~图 7 可知,在曳引钢带内部钢丝绳芯疲劳断裂的瞬间,短时间内伴随着大量集中性应力的释放,此时会明显造成一次疲劳周次中的磁感应强度峰-峰值波动。从实时监测的磁感应强度峰-峰值差分值的角度来看,在曳引钢带内部集中断丝产生的瞬间,伴随着磁感应强度峰-峰值剧烈波动及差分值大于 300 nT 的现象。同时,随着施加疲劳载荷的降低,曳引钢带完全断裂所需循环周次明显增加,钢丝绳芯疲劳断裂瞬间磁感应强度峰-峰值波动同样明显。由表 1 可知,聚氨酯层破坏和钢带内部的损坏都会造成疲劳过程中磁感应强度峰-峰值的变化。发生小规模断丝时,峰-峰值的差分值普遍为 100~200 nT;而集中断丝时,峰-峰值差分值往往在 300 nT 以上。由此可以看出,断丝的数量一定程度上和磁感应强度峰-峰值的差分值呈正相关。同时,由图 8 可知,当疲劳载荷为

30 kN时,疲劳过程中未发生小规模断丝。因此,在发生集中断丝时,其断丝的数量和破坏程度远大于其余发生过小规模断丝的疲劳试验,这一点由图9可以明显看出。疲劳载荷30 kN下的集中断丝造成的抽丝现象和缩颈远大于其余3组试验,而对应的发生集中断丝时磁感应强度峰-峰值的差分值也远高于发生过小规模断丝的疲劳试验。这进一步证明了,断丝数量一定程度上和磁感应强度峰-峰值的差分值呈正相关。

表1 疲劳试验监测过程中磁感应强度峰-峰值变化

Tab. 1 Peak-to-peak value variation of magnetic induction intensity during the fatigue test monitoring process

疲劳载荷/ kN	损伤类型	变化前峰- 峰值/nT	变化后峰- 峰值/nT	差分值/nT
30	聚氨酯层破坏	9 947	10 130	183
	小规模断丝	—	—	—
	集中断丝	12 940	13 439.6	499.4
28	聚氨酯层破坏	929.4	1 047.5	118.1
	小规模断丝	2 171	2 299.5	128.5
	集中断丝	2 348	2 648.6	300.6
26	聚氨酯层破坏	1 552.4	1 696	143.6
	小规模断丝	1 941	1 817.4	123.6
	集中断丝	5 844	6 186.4	342.4
24	聚氨酯层破坏	918.1	791.9	126.2
	小规模断丝	2 163	2 304.9	141.9
	集中断丝	1 387	1 734	347

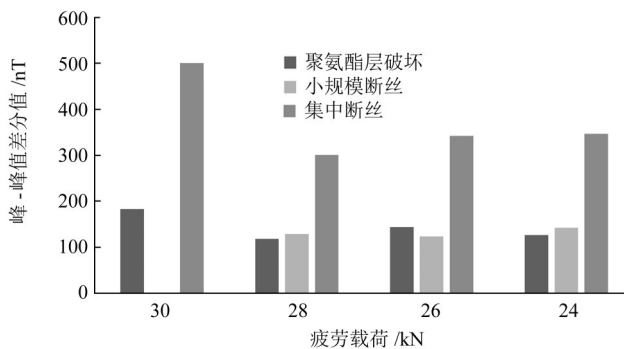


图8 不同损伤造成的磁感应强度峰-峰值波动值

Fig. 8 Peak-to-peak fluctuate values of magnetic induction intensity caused by different damages

此外,通过对磁感应强度峰-峰值及其差分值分析可以看出,在曳引钢带两端施加不同的疲劳载荷,曳引钢带缺口处磁感应强度峰-峰值的变化具有阶段性。磁感应强度峰-峰值出现迅速突变现象,意味着曳引钢带内部的钢丝正在出现集中断丝。而集中断丝的出现,意味着疲劳过程进入了第3阶段,曳引钢带钢丝绳芯层即将完全断裂。因此,通过监测弱磁信号的磁感应强度峰-峰值的突变情况,能够有效反应曳引钢带拉伸疲劳过程中产生的钢丝绳芯断裂现象。

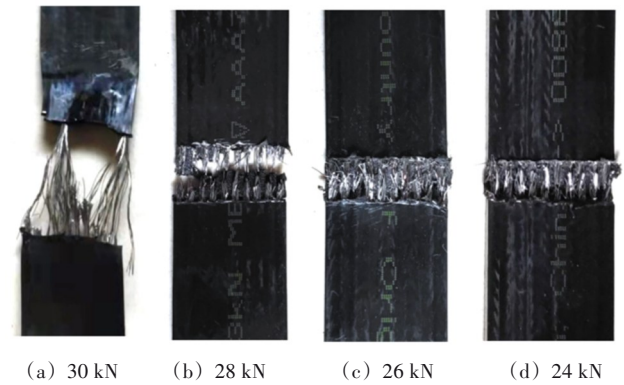


图9 施加30、28、26、24 kN载荷拉伸疲劳后实物图

Fig. 9 Physical pictures after tensile fatigue with 30, 28, 26, 24 kN loads

4 结论

对曳引钢带疲劳破坏进行相关监测试验,初步得到以下主要结论:

1) 基于磁感应强度的在线监测方法不仅能够反映曳引钢带随着疲劳周次增加而产生的应力集中情况,对前期的疲劳破坏累积过程进行定性分析,还能够监测曳引钢带集中性的疲劳断裂行为的发生。

2) 通过对比分析不同疲劳载荷下的磁感应强度峰-峰值及其差分值的变化趋势,可以将电梯用曳引钢带的疲劳拉伸过程分为3个阶段:第1阶段为钢带内部损伤萌生与聚氨酯层破坏阶段;第2阶段为钢带内部损伤稳定拓展阶段;第3阶段为钢带内部损伤快速失稳拓展阶段。

3) 通过分析疲劳过程中磁感应强度峰-峰值及其差分值的变化趋势,能够有效预警曳引钢带拉伸疲劳过程中产生的钢丝绳芯断裂现象;同时磁感应强度峰-峰值的波动值可以反映断丝数量和严重程度。磁感应强度峰-峰值出现一定程度的波动,磁感应强度差分值出现100~200 nT的尖峰,表明钢丝绳芯层开始出现小规模断丝;磁感应强度峰-峰值出现剧烈波动,磁感应强度差分值出现大于300 nT的尖峰,表明钢丝绳芯层开始出现集中断丝。

本文所述试验方法实现了对电梯用曳引钢带的疲劳拉伸过程中的实时弱磁信号疲劳监测,能够反映曳引钢带由疲劳所导致的断丝缺陷,并在一定程度上反映断丝的数量,为曳引钢带在役监测提供了一种新的思路。但是,目前对弱磁信号强度与断丝数量之间的准确定量识别仍比较欠缺,同时对曳引钢带拉伸疲劳过程中的更细微的弱磁信号特征也有待进一步研究。

参考文献(References)

- [1] GAO W, ZHANG D L, ZHANG E C, et al. Study of magnetostrictive guided wave detection of defects in steel strip for elevator traction [C]//2019 4th International Conference on Measurement, Information and Control, ICMIC 2019, August 23-25, 2019, Harbin, China. IEEE, 2019: 9068594.
- [2] 张东来, 晏小兰, 高伟, 等. 一种电梯钢带电磁无损检测方法及其装置: CN109374725A [P]. 2019-02-22.
- ZHANG Donglai, YAN Xiaolan, GAO wei, et al. An elevator steel belt electromagnetic nondestructive testing method and device: CN109374725A [P]. 2019-02-22. (In Chinese)
- [3] LEI H M, MAO Y M. Fatigue testing and evaluation for coated steel belts based on electrical method [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2013, 49(10): 602-609.
- [4] 胡晓, 梁国安, 季一锦. 电梯复合曳引钢带无损检测方法的研究 [J]. 起重运输机械, 2015(8): 103-105.
- HU Xiao, LIANG Guo'an, JI Yijin. Study on non-destructive method of combined traction steel band for lift [J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2015(8): 103-105. (In Chinese)
- [5] 郭必奔, 邵鹏, 郑波, 等. 面向曳引钢带缺陷检测的径向磁化电磁传感器仿真研究 [J]. 传感技术学报, 2021, 34(8): 1021-1026.
- GUO Biben, SHAO Peng, ZHENG Bo, et al. Simulation research on radial magnetization electromagnetic sensor for defect detection of traction steel strip [J]. Journal of Sensing Technology, 2021, 34(8): 1021-1026. (In Chinese)
- [6] SHAO P, ZHENG B, CHEN C, et al. Research progress on detection technology of composite electrical traction steel strip for elevator [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2033(1): 012088.
- [7] MAZUREK P, ROSKOSZ M, KWASŃIEWSKI J. Novel diagnostic of steel wire rope with passive magnetic methods [J]. IEEE Magnetics Letters, 2022, 13: 1-5.
- [8] 邱朋闯, 于润桥, 桂长城, 等. 车轴钢渗碳层深度弱磁检测技术研究 [J]. 汽车工艺与材料, 2024(1): 55-60.
- QIU Pengchuang, YU Runqiao, GUI Changcheng, et al. Research on weak magnetic inspection of axle steel carburizing layer depth [J]. Automobile Technology & Material, 2024(1): 55-60. (In Chinese)
- [9] TONG K, ZHOU J T, ZHAO R Q, et al. Experimental study on rebar stress measurement based on force-magnetic coupling under excited magnetic field [J]. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2022, 189: 110620.
- [10] 孟庆领, 杨家炳, 潘鹏超, 等. 腐蚀-疲劳荷载耦合作用下桥梁拉索高强钢丝自漏磁信号变化规律 [J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(1): 202-217.
- MENG Qingling, YANG Jiabing, PAN Pengchao, et al. Variation laws of self-magnetic flux leakage signals of high-strength steel wires in bridge cables under coupling effect of corrosion-fatigue loads [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(1): 202-217. (In Chinese)
- [11] 张慧, 高立新. 金属磁记忆检测技术在机械设备早期故障诊断中的应用概述 [J]. 机械设计与制造, 2012(10): 65-67.
- ZHANG Hui, GAO Lixin. Application of metal magnetic memory testing in early fault diagnosis of mechanical equipment [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(10): 65-67. (In Chinese)
- [12] BULTE D P, LANGMAN R A. Origins of the magnetomechanical effect [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 251(2): 229-243.
- [13] COUGHLIN C R, CLAPHAM L, ATHERTON D L. Effects of stress on MFL responses from elongated corrosion pits in pipeline steel [J]. NDT & E International, 2000, 33(3): 181-188.
- [14] 高富民, 吴晶, 樊建春, 等. 铁磁材料摩擦磁化效应的演化机理研究 [J]. 摩擦学报, 2023, 43(4): 377-384.
- GAO Fumin, WU Jing, FAN Jianchun, et al. Evolution mechanism of tribo-magnetization effect for ferromagnetic materials [J]. Tribology, 2023, 43(4): 377-384. (In Chinese)
- [15] 严毅琪, 孙鹏宇, 程强强, 等. 基于粒子滤波的烧结钕铁硼材料疲劳破坏预测方法研究 [J]. 固体力学学报, 2022, 43(2): 220-233.
- YAN Yiqi, SUN Pengyu, CHENG Qiangqiang, et al. Prediction method for fatigue failure of sintered NdFeB based on particle filtering [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2022, 43(2): 220-233. (In Chinese)
- [16] BAO S, JIN P F, ZHAO Z Y, et al. A review of the metal magnetic memory method [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39(1): 11.
- [17] SHI P P, SU S Q, CHEN Z M. Overview of researches on the nondestructive testing method of metal magnetic memory: status and challenges [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39(2): 43.
- [18] 刘昌奎, 陈星, 张兵, 等. 构件低周疲劳损伤的金属磁记忆检测试验研究 [J]. 航空材料学报, 2010, 30(1): 72-77.
- LIU Changkui, CHEN Xing, ZHANG Bing, et al. Test research on low-cycle fatigue damage of parts by metal magnetic memory methods [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(1): 72-77. (In Chinese)
- [19] 章鹏, 刘琳, 陈伟民. 磁性应力监测中力磁耦合特征及关键影响因素分析 [J]. 物理学报, 2013, 62(17): 177501.
- ZHANG Peng, LIU Lin, CHEN Weimin. Analysis of characteristics and key influencing factors in magnetomechanical behavior for cable stress monitoring [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(17): 177501. (In Chinese)
- [20] 唐玉莲, 陈世利, 黄新敬, 等. 压力对管道缺陷磁记忆信号的影响分析 [J]. 机械强度, 2018, 40(2): 306-311.
- TANG Yulian, CHEN Shili, HUANG Xinjing, et al. Effects analysis of pressure on the magnetic memory signals of pipeline defects [J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(2): 306-311. (In Chinese)
- [21] LIU S Q, XIA G S, WEN Z H, et al. Fatigue monitoring of coated steel belts by means of magnetic inspection [J]. Insight: Non-Destructive Testing & Condition Monitoring, 2023, 65(3):

153-160.

[22] 南昌航空大学. 一种柔性带状试样疲劳实验夹具: CN202123164390.0[P]. 2022-06-10.

Nanchang Hangkong University. A kind of flexible strip specimen fatigue test fixture: CN202123164390.0 [P]. 2022-06-10. (In Chinese)

Weak magnetic monitoring of fatigue condition of elevator steel belt for drive

LIU Songyuan¹ XIA Guisuo^{1,2} ZHANG Shuai² YANG Jingyi² LIAO Haodong² YIN Jinquan³

- (1. Key Laboratory of Nondestructive Testing Technology of the Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)
- (2. R&D Department, Hebei Meng Kasen Technology Development Co., Ltd., Langfang 065001, China)
- (3. Ganzhou Testing Branch, Institute of Special Equipment Inspection and Testing, Jiangxi General Institute of Inspection and Certification, Ganzhou 341000, China)

Abstract: [Objective] Elevator composite traction steel belts are prone to wear, deformation, broken wires and other defects when exposed to external stress for a long time. In severe cases, it may cause steel belt breakage accidents. To effectively prevent such safety accidents, relevant monitoring test on the fatigue failure of traction steel belts were carried out. [Methods] An test platform was set up on the fatigue testing machine to conduct tensile fatigue tests on the traction steel belt, simulating its fatigue failure process during repeated service. At the same time, high-precision weak magnetic sensors were used to collect the magnetic induction intensity signals on the surface of the steel strip, with a focus on analyzing the variation law of the peak-to-peak values of the signals. [Results] The test results show that, the variation of the peak-to-peak curve of magnetic induction intensity can reflect the entire fatigue failure process of the traction steel belt under stress without distortion, the fatigue failure process of the steel wires inside the traction steel belt does not develop steadily but shows distinct phased characteristics, and the peak-to-peak variation trend of magnetic induction intensity within the fatigue cycle can effectively warn of the fatigue failure of the traction steel belt.

Key words: Steel belt for drive; Magnetic induction intensity; Tensile fatigue; Online monitoring; Weak magnetic testing
Corresponding author: XIA Guisuo, E-mail: xiaguisuo@163.com

Fund: National Natural Science Foundation of China (51765049); Special Fund for Aviation Intelligent Manufacturing (2019ZE056001); Jiangxi Province Market Supervision Administration Project (GSIK202227)

Received: 2024-08-26 Revised: 2024-09-30 (编辑:刘欢欢)