

基于 ANSYS 有限元模拟的钢丝绳 单丝拉伸力-磁耦合研究

苏三庆, 马小平, 王 威, 易术春, 路秀琪, 任广超, 牛晓波

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 主要利用 ANSYS 有限元模拟软件, 对受轴向拉力且有预制缺陷的 50 Mn 钢丝绳单丝分别进行静力场计算和受环境磁场及自身剩磁场共同作用下的三维静磁场磁标量计算, 并对两种物理场进行直接力-磁耦合分析, 得到随着外荷载不断增加, 试件缺陷处法向漏磁信号 $B(x)$ 及其梯度值 K 的分布情况. 结果表明, 随着应力集中程度的不断增加, 试件缺陷处的法向漏磁信号 $B(x)$ 出现过零点, 其梯度值 K 出现极大值. 最后, 将试验结果与模拟结果进行对比, 证明了模拟的可靠性. 进一步证明了有缺陷钢丝绳的早期损伤与金属磁记忆信号之间的内在联系规律, 该数值模拟方法可为钢丝绳拉伸磁记忆有限元分析提供参考.

关键词: 钢丝绳单丝; 有限单元法; 金属磁记忆; 力-磁耦合; 应力集中

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)03-0309-08

Research on magneto-mechanical coupling on tensile monofilament steel wire ropebased on ANSYS finite element simulation

SU Sanqing, MA Xiaoping, WANG Wei, YI Shuchun, LU Xiuqi, REN Guangchao, NIU Xiaobo

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The 50 Mn monofilament steel wire rope with defects was axial tension, which respectively were calculated in the static loading field and in the environmental magnetic field as well as the residual magnetic field itself 3D static magnetic field, then the magnetic scalar calculation was finished by ANSYS finite element simulation software. Then the two physical field on magneto-mechanical coupling was analyzed directly, and along with the load increasing, getting the distribution of the normal magnetic flux leakage signals $B(x)$ and its the value of the gradient K at the specimen defect. As the result, with the increasing of the stress concentration level, the normal magnetic flux leakage signals have signal zero crossing and its the value of the gradient K have a maximum value. Finally, comparing with the test results and simulation results, it proves the reliability of the simulation. The relationship between the defective early damage of the steel wire rope and the metal magnetic memory signals were found by further research, which shows that the numerical simulation method can provide the reference on magnetic memory finite element coupling analyzed for steel wire rope tension loading.

Key words: monofilament wire rope; finite element method; metal magnetic memory; magneto-mechanical coupling; stress concentration

钢丝绳作为工程中的主要承载构件, 在石油钻井、矿井、建筑、港口和旅游及工程机械等领域应用广泛, 然而由于钢丝绳使用环境比较恶劣, 在使用过程中会出现各种缺陷, 如断丝、磨损^[1]、缩颈等, 有时会骤断造成重大事故. 为了防止重大事故发生, 很多国家都制定了关于钢丝绳使用的相关行业安全规程和检测标准, 开发了多种检测手段, 来保证钢丝绳的使用安全.

作为一种新型的无损检测方法, 金属磁记忆

检测技术^[2-4]能有效的对铁磁构件的早期损伤(尤其是隐性不连续变化)进行诊断. 该方法的检测依据是铁磁构件在运行时, 受工作载荷和地磁场共同作用, 在应力和变形集中区域内会发生磁致伸缩性质的磁畴组织定向和不可逆的重新取向, 从而造成应力集中区域漏磁场改变. 即磁场的切向分量 $H_p(x)$ 具有最大值, 而法向分量 $H_p(y)$ 改变符号出现过零点现象并且其梯度值 K 出现极大值. 这种磁状态的不可逆变化在工作载荷消除后继续保留,

收稿日期: 2016-09-01

修改稿日期: 2017-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478383; 51578449); 陕西省自然科学基金资助项目(2015JM5192)

作者简介: 苏三庆 (1961—), 男, 教授, 博导, 主要从事结构健康监测及混凝土结构等方面的研究. E-mail: sussq@xauat.com

从而通过漏磁场法向分量 $H_p(y)$ 及其梯度 K 的测定,便可准确判断工件的应力集中部位及缺陷所处位置。

由于应力集中往往在缺陷产生之前出现,所以金属磁记忆检测的突出优点是具有预报作用,可在构件失效之前采取措施,避免事故的发生使损失率降至最低。因此对钢丝绳的缺陷可以通过磁记忆检测技术进行提前检测,对有缺陷部位可以及时采取措施进行处理,其应用的价值较大。而相比其他无损检测方法,如 X 射线衍射法、超声测速法、激光干涉法等,金属磁记忆检测法不仅操作简单,成本低,而且磁记忆检测利用的是检测对象在运行过程中的天然磁化现象,其检测的信息更为全面。且检测后不需要退磁操作,是一种绿色无损检测技术^[5]。

本文利用铁磁材料的力-磁耦合模型,通过 ANSYS 有限元模拟反映带预制缺口钢丝绳单丝在轴向拉力作用下的磁记忆信号的变化规律,并与试验结果做对比,证明了该数值模拟方法可用于钢丝绳拉伸磁记忆有限元分析。

1 力-磁耦合的数值模拟

1.1 力磁耦合模型

试件的机械应力以及材料组织本身的不均匀性导致材料磁导率分布的不均匀性,进而在外界地球磁场的作用下引起漏磁场,漏磁场的大小取决于磁导率的不均匀程度。

采用文献[6]的铁磁材料力磁效应的函数关系式:

$$\mu = \mu_0 + \frac{3\lambda_m \mu_0^2 \sigma}{B_m^2 + 2\lambda_m \mu_0 \sigma} \quad (1)$$

式中, μ 、 B_m 和 λ_m 分别为材料初始未受外力条件下的相对磁导率、饱和磁感应强度和饱和磁致伸缩系数,且与材料本身属性有关,本文模拟的是经多次冷拔和热处理的 50 Mn 钢丝绳,查《常用钢材磁特性曲线速查手册》可知钢丝绳的 $\mu_0 = 1\,000$, $B_m = 1.9\text{ T}$, $\lambda_m = 5 \times 10^{-6}$,矫顽力为 520 A/m。 μ 为应力值为 σ 时构件的磁导率。

1.2 力磁效应的有限元模拟

铁磁构件在环境磁场中,主要受大地磁场和自身剩磁场共同作用,在试件表面缺陷处会有由于大地磁场及试件剩磁场产生的漏磁场,而构件在加工及使用过程中,由于工作载荷和地磁场及自身剩磁场的共同作用,磁畴结构和分布发生改

变,出现残余磁场和自磁化的增长,形成磁畴的固定节点,以漏磁场的形式出现在铁磁材料的表面^[7]。因此,应用 ANSYS 有限元分析软件,结合 APDL 程序化设计语言,采用直接耦合的方式,通过公式(1)的力-磁耦合模型计算出应力对磁导率的影响,然后通过命令流对铁磁构件的材料属性(即磁导率)进行重新赋值,对铁磁构件力-磁效应进行数值模拟研究。

本文的研究对象为带有预制缺口的 50 Mn 钢丝绳单丝,由于钢丝绳在加工制作过程中经过多次冷拔及热处理,所以并没有明显屈服阶段,从加载到最终破坏其应力应变曲线大致成两阶段线性变化,最终以脆性断裂破坏。试件应力-应变本构关系由材性试验得到,见图 1。主要技术参数如表 1。

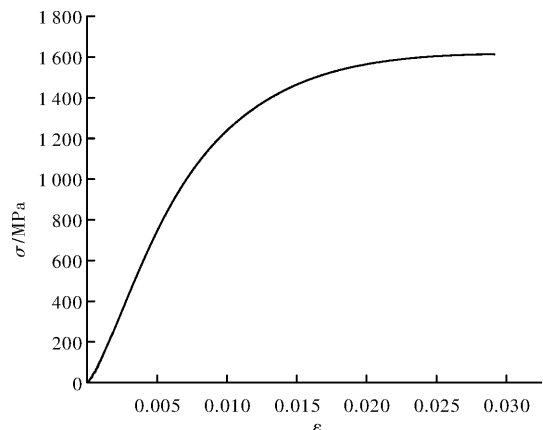


图 1 试件本构关系

Fig. 1 The constitutive relation of specimen

表 1 带缺陷试件主要技术参数

Tab. 1 Parameter of specimen with deflection

参数	弹性模量/MPa	泊松比	最终破坏力/kN
50 Mn	1.65×10^5	0.3	9.70

模拟试件尺寸与试验试件完全一致,而为节省计算时间,有限元模型采取 1/2 结构进行计算,其试件整体尺寸及检测路径如图 2,有限元模型尺寸如图 3。试件法向信号提取方向为 X 方向,信号提取路径及检测线方向沿 Z 轴正向,沿提取路径分别为缺陷一和缺陷二。

模拟的过程可分为两个阶段,首先是静力学分析^[8],分别求解 3 kN、5 kN、7 kN、9 kN 载荷下的单元等效应力,再通过公式(1)力-磁耦合模型求出对应的磁导率。其次是静磁场分析,先算出仅在地磁场及自身剩磁场作用下构件的磁感应强度,然后将磁导率导入到与力场分析中划分单元相同

的构件中,分别计算对应荷载和地磁场及自身剩磁场共同作用下的磁感应强度,得到模型在地磁场环境中受力后表面漏磁场分布情况。

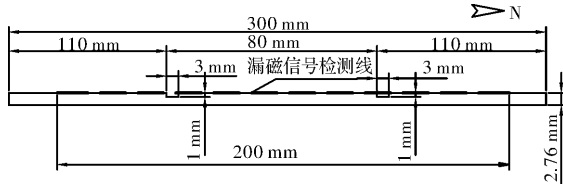


图2 试件整体尺寸及检测线位置

Fig. 2 The dimension and location of measurement lines of specimen

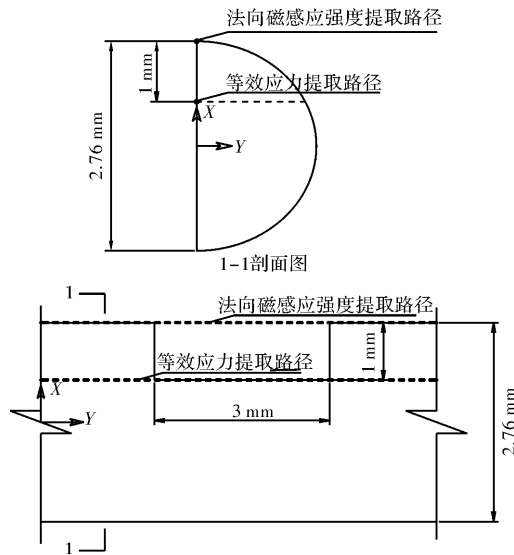


图3 有限元模型整体尺寸

Fig. 3 The overall size of finite element model

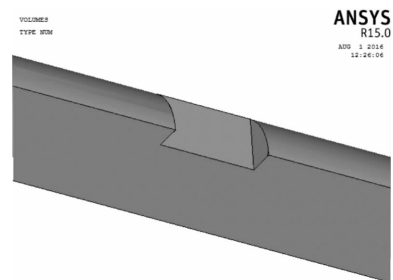
1.3 模型的建立及网格的划分

对所要分析的钢丝绳单丝试样模型采用三维实体建模.为模拟铁磁体周围的空气,在试样周围区域建立空气模型.在考虑到钢丝绳沿 $x-y$ 平面对称,所以只取 1/2 的部分进行建模分析.如图 4 所示,为 1/2 钢丝绳单丝模型及其周围的空气模型.

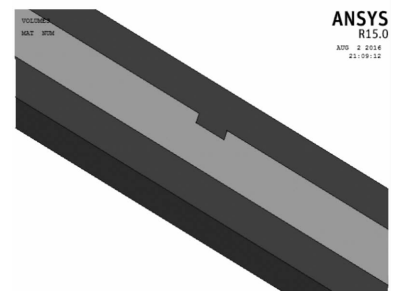
静磁场采用三维磁标量法进行分析,因此采用 solid96 单元,该单元为三维八节点六面体单元,节点自由度为磁标势 $MAG^{[9]}$.而静力场分析中为保证与静磁场中的单元契合,采用三维八节点六面体实体单元 solid185,其每个节点有三个自由度,且铁磁体单元边长设定为 0.2 mm,保证力场与磁场在耦合时单元一一对应.

在网格划分时,网格划分越密计算结果越精确,但同时计算机资源要求较高,且计算时间也会相应增加.因此既要保证求解结果精度,又要尽量节省计算机资源,采用自由划分网格的方式,

为保证结果的精度,对应力集中区域的网格进行细化.与试件直接接触的空气内层模型因为要提取磁感应强度,所以对此处的网格进行细化,而对较远的外层空气层单元则可以为节省计算机资源而划分的相对粗一些.单元划分如图 5 所示.



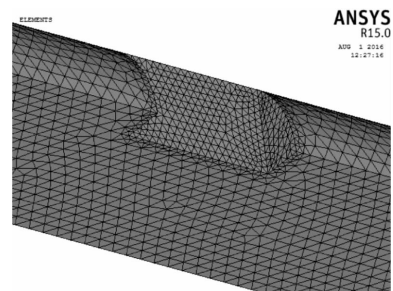
(a) 钢丝绳单丝1/2模型



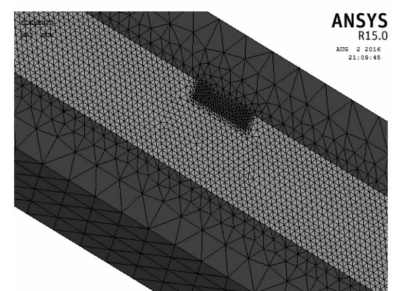
(b) 周围空气磁场及钢丝绳单丝1/2模型

图4 有限元 ANSYS 建模

Fig. 4 ANSYS finite element modeling



(a) 试件网格划分



(b) 试件及周围空气层网格划分

图5 模型网格分布

Fig. 5 Grid distribution of model

1.4 施加荷载及求解

静力场分析过程,在模型对称面施加对称面约束,在模型一个端面施加固定端约束,在另一

端分别施加 3 kN、5 kN、7 kN、9 kN 的面荷载, 分别求解不同载荷下的应力分布情况, 采用 *vwriteln^[10] 命令流提取所有单元的等效应力 SEQV 到 TXT 文件中, 然后将应力解导入到用式(1)力-磁耦合关系编写好的 EXCEL 文件中, 求解每个单元所对应的磁导率。

静磁场分析有两部分: 首先在外围空气层沿 Z 方向施加矫顽力以此模拟大地磁场, 地磁场大小为 39.8 A/m。分析过程为三维静态磁标量法, 故磁通量平行边界条件自动满足, 只需在试件两端面施加垂直边界条件。由于试件经多次冷拔和热处理, 所以内部剩磁方向无法确定, 在试件内沿 Z 方向施加矫顽力对磁感应强度影响最大^[11], 所以沿试件长度方向施加 520 A/m 的矫顽力, 以此来模拟剩磁场作用。在第二次静磁学分析中, 分别将不同荷载所对应的磁导率通过 *DO 循环导入到每个单元中, 再用 Emodif 命令对每个单元的磁属性重新赋值, 最后计算并提取表面漏磁信号。力-磁耦合模拟流程如图 6 所示。

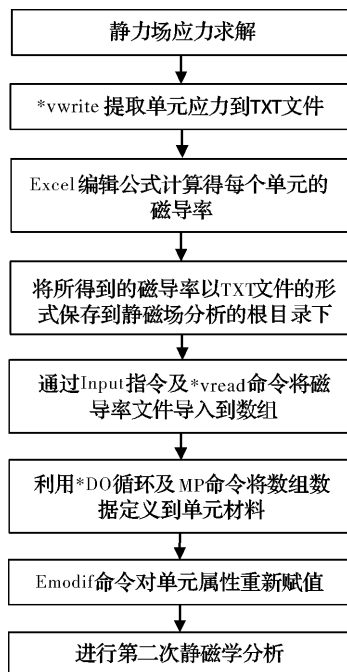


图 6 力-磁耦合模拟流程

Fig. 6 Simulate process magneto-mechanical coupling

2 模拟结果及分析

2.1 应力分布结果

本模拟过程根据试验中相同截面大小的钢丝绳单丝的荷载分级确定加载拉力为 3 kN、5 kN、7 kN、9 kN, 在模拟过程施加的是面荷载, 所以将荷载转化成应力表示分别为 5.02×10^8 MPa、 8.36×10^8 MPa、 11.71×10^8 MPa、 15.05×10^8 MPa。因

为钢丝绳经多次冷拔及热处理, 所以并没有明显屈服阶段, 从加载到最终破坏其应力应变曲线大致成线性变化。试件缺陷处不同载荷下应力云图, 如图 7 所示。

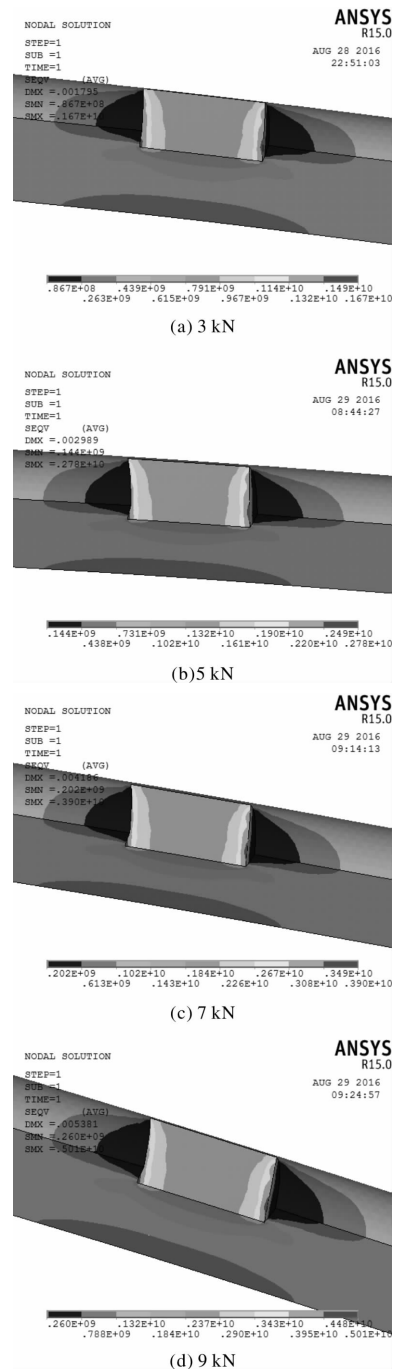


图 7 试样缺陷处不同载荷下应力云图

Fig. 7 Stress contour plot of specimen with deflection in different loading

从图中可以看出, 随着外荷载的不断增大, 试件在缺陷处应力集中越明显。在缺陷凹槽内截面突变的位置, 应力集中程度最大, 应力也出现了最大值。而在缺陷凹槽内两侧立面与试件外表面相交的位置应力出现最小值, 并且缺陷凹槽所对应

的试件背面应力相对其他位置也较小,这是因为试件在 Z 方向受到拉力作用, X 方向受到约束从而产生相对的压力作用的结果.试件缺陷处的应力随外荷载增加而基本成线性增长,应力集中程度也随荷载的增加而越明显.

为了更加直观地将静磁场中的应力与之后静磁场分析中的漏磁场相对比,现提取在3 kN、5 kN、7 kN、9 kN荷载下,当 $x=0.828$ mm, $y=0$ mm时沿 Z 方向的路径上的应力,提取路径长度为200 mm,得到如图8所示的应力曲线.

图8表明,试件在不同荷载下相同路径上的应力分布规律基本相同,在缺陷凹槽内应力较远离缺陷的位置,数值变化较大,应力集中最明显,应力出现最大值.试件在荷载为3 kN时,应力集中处的应力值最小,当荷载为9 kN时,应力集中处的应力值最大.

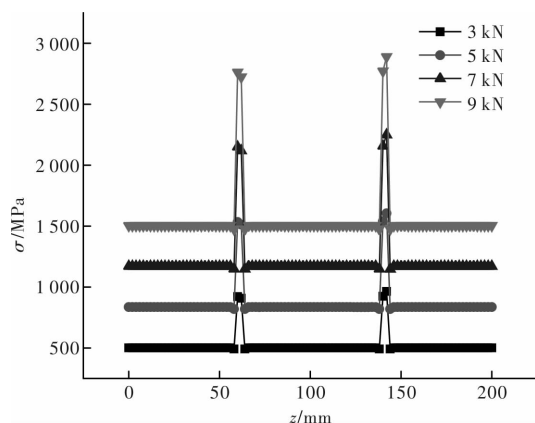


图8 指定路径上的应力值

Fig. 8 Stress value in specified path

如图9为钢丝绳单丝试件整体应力云图,荷载在3 kN、5 kN、7 kN、9 kN的加载过程中,试件发生向 X 轴负方向不同程度的弯曲,这是由于在缺陷处截面发生突变,沿 X 方向的试件直径变小,

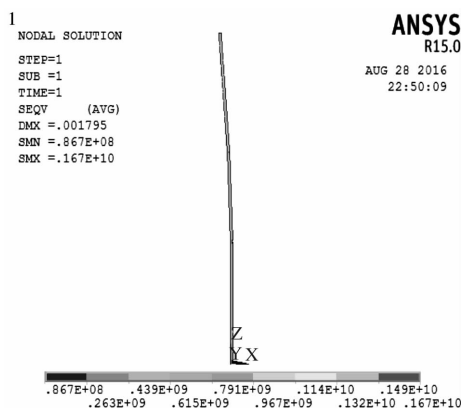


图9 3 kN荷载下整体试件应力云图

Fig. 9 Stress contour plot of the overall specimen in 3 kN

所以在轴向拉力作用下,会产生附加弯矩,导致试件实际受力为偏心受拉,因而导致试件产生弯曲变形.试件弯曲变形实际上并不大,所以在实际试验中基本看不到明显变化.此处只以试件在3 kN荷载下的情况为例,其他荷载级规律一致.

2.2 漏磁信号分布规律

将通过ANSYS静力学分析所得到的单元等效应力,利用式(1)力-磁耦合关系得出试件在不同荷载下各个单元所对应的磁导率,再通过静磁场分析得到磁导率的改变所导致的试件表面漏磁信号的变化规律.本次静磁场模拟过程,提取试件表面 $x=1.38$ mm, $y=0$ mm处的法向磁感应强度值,提取路径见图3.为与实验结果进行对比,提离值假设为0 mm,确保提取路径与试验漏磁信号采集路径保持一致.如图10所示,(a)到(j)是荷载分别为0 kN、3 kN、5 kN、7 kN、9 kN的情况下试件缺陷处及其周围空气场磁感应强度云图,可以看出在缺陷处漏磁现象明显,磁感应强度变化非常剧烈,而在远离缺陷的位置,磁感应线沿平行于 Z 轴的方向且平稳,整齐,无明显的变化.

模拟结果如图11,图12所示,提取路径上不同荷载下的法向磁感应强度并作法向磁感应强度沿提取路径方向的梯度值.结果表明,沿提取路径方向试件在缺陷处的法向磁感应强度会出现过零点,并且随着荷载的增加,波峰-波谷的差值也随之增加,这也说明了随着应力集中程度地不断增加,其所对应的漏磁信号也会有明显增加.从图中可以看到,波峰和波谷的绝对值并不是绝对相等的,第一个缺陷处,进入缺口时的漏磁场强度相比离开缺陷时的较大一些,而在第二个缺陷处,却正好相反,其原因可能是因为试件表面磁感应线从一端发出到进入另一端的过程中,在空间中是成椭圆形分布的,所以在第一个缺口处,靠近试件端面即沿提取路径方向是进入缺陷的位置磁感应线密度要比离开缺陷时稍大,因此检测到的漏磁信号在波谷的绝对值要比波峰稍大.而对于第二个缺陷,由于磁感应线是沿试件中间对称分布的,在靠近另一端面即沿提取路径离开缺陷的位置处的磁感应线密度要比进入缺陷时稍大,所以漏磁信号在波峰的绝对值要比波谷稍大,与缺陷一处的现象刚好相反.而在缺陷处的法向磁感应强度梯度值出现最大值,并且随着荷载的增大,梯度值变化越明显.

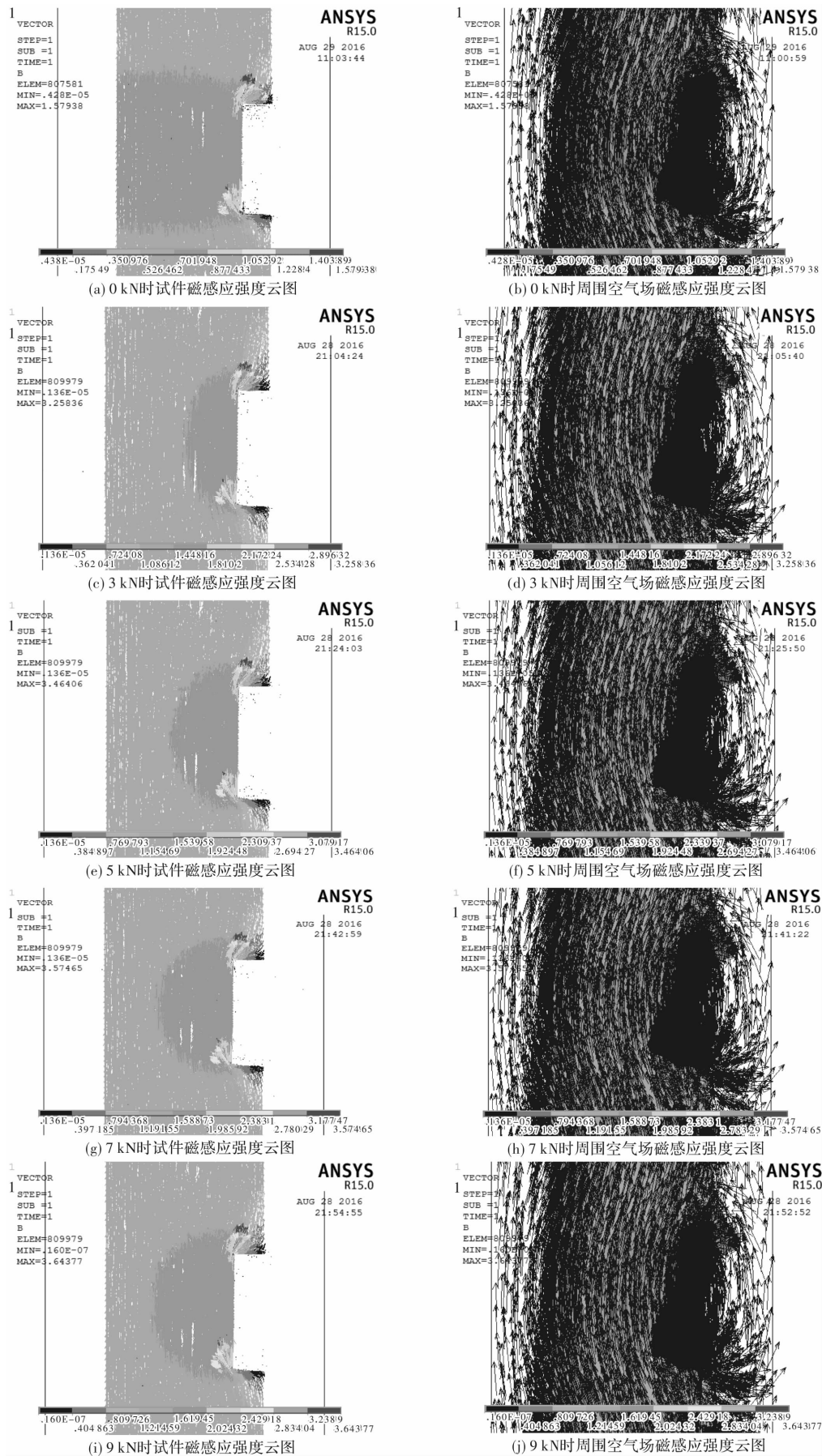


图10 试件及其周围空气场在不同载荷下的磁感应强度云图

Fig. 10 Magnetic flux density contours plot of specimen and the surrounding air in different loading

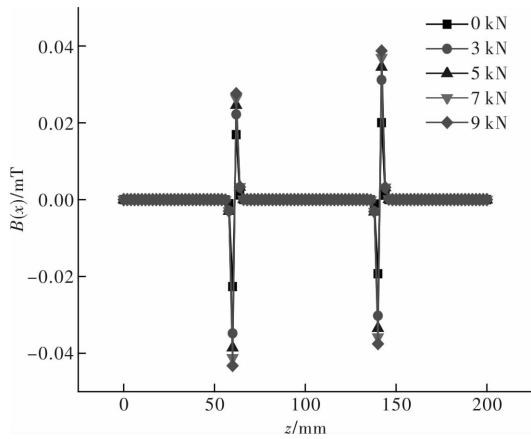


图 11 不同载荷下的法向漏磁信号

Fig. 11 Normal component of MFL signal in different loading

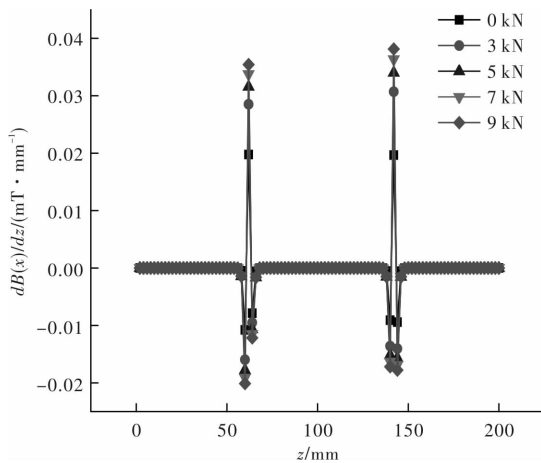


图 12 不同载荷下的法向漏磁信号梯度值

Fig. 12 Normal component of MFL signal gradient values in different loading

3 50 Mn 钢丝绳单丝拉伸试验

本实验分别对不同直径,不同缺陷宽度,不同缺陷深度及无损的 50 Mn 钢丝绳单丝试件做了对比试验,考虑到为与实际情况相符,并且退火处理可能会导致试件内部组织结构的变化造成试件磁导率的改变,因此未对试件进行高温退火处理.为与模拟对照,此处只取与模拟试件尺寸相同的试件进行对比(尺寸如图 1),并在试件缺陷一面沿钢丝绳长度方向每 1 cm 标记一个信号采集点,在缺陷两个边缘处以及距离缺陷中间点各 5 mm 多标记四个信号采集点,以更准确反映缺陷周围信号变化情况,此处信号采集路径与模拟过程中的漏磁信号提取路径相同.对试件两边施加轴向拉力,分别采集在 0 kN、2 kN、3 kN、4 kN、5 kN、6 kN、7 kN、8 kN、9 kN 及最终拉断破坏时的磁记忆信号,并做记录.

3.1 试验仪器及方法

利用万能材料试验机对试件加载,通过做材料性试验可得该钢丝绳单丝最终拉断力在 9 kN 左右,并且试件拉伸过程并没有明显屈服平台,最终发生脆性断裂,因此为了观察不同应力状态下磁记忆信号的变化规律,采用分级加载的方式,确定载荷 0 kN、2 kN、3 kN、4 kN、5 kN、6 kN、7 kN、8 kN、9 kN.

磁记忆信号测量设备采用厦门爱德森 EMS-2003 智能磁记忆/涡流检测仪,分辨率 1 A/m,量程 $\pm 1\,000$ A/m,探头使用 EPEMS/B2 磁记忆双通道测距笔式探头,设置为双踪内时钟模式,显示模式为时机显示.探头内置的通道(CH-1)设置为减环境磁场值(-CH-1), (CH-2)数据为试件表面的真实磁记忆信号值.在每次加载完毕后,对设备进行归一化,将连接的探头与大地磁场进行校准,开始采集数据并记录,保持探头垂直且紧靠试件表面,提离值为 0 mm,每个测点读取三次磁记忆信号数值.

3.2 试验结果对比分析

如图 13、14 为沿指定路径提取的法向漏磁信号及其梯度值的分布规律.缺陷位置分别在 60 mm 和 140 mm 处,试验中所提取的漏磁信号为磁场强度值 H ,单位为 A/m,而有限元模拟的结果提取的是磁感应强度值 B ,单位为 T,这两者之间只有一个绝对磁导率的比例关系,如式(2)所示^[12].

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2)$$

而绝对磁导率只与材料本身有关,故可看作一常量,所以可以将试验测得的漏磁信号与模拟结果进行横向对比分析.

从图中可以看出,在缺陷位置处法向漏磁信号出现与图 11、图 12 相似的波峰-波谷现象以及其梯度出现最大值,零载时规律并不明显但随载荷增加,这种变化越明显.这说明模拟结果与实验结果有较好的契合.但也可以看到在缺陷以外的其他位置,法向漏磁信号并不像模拟结果那样稳定不变,数据的跳跃性也较大,造成这种情况的原因可能是以下几点:(1)该钢丝绳单丝试件是从原有整绳上拆卸下来的,其本身就在及使用及拆装过程中留有残余应力,试件表面也会留有微小的损伤,金属磁记忆检测可以捕捉微小裂缝处产生漏磁信号,而模拟过程中假设试件沿长度都是均匀,一致的,所以造成缺陷以外其他位置信号的不规则变化.(2)在检测过程中,大地磁场也不一定像模

拟过程中那样沿试件长度方向平行穿过,必然会产生一定的夹角,这也是造成两种结果出现差异的原因。(3)剩磁场对试件漏磁信号的影响非常大,而试件在加工和使用过程中,其剩磁场会产生变化,其方向和大小会与模拟中的设置参数有差异,所以也造成了结果的差异。(4)外界环境磁场也会对检测结果产生一定影响。因此只通过法向漏磁信号过零点来判断试件损伤程度存在一定误差,还需借助其梯度值 K 来加以判断,保证结果的可靠性。

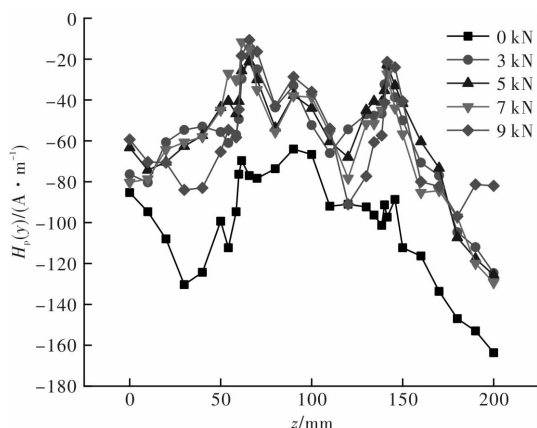


图 13 试验中不同载荷下法向漏磁信号

Fig. 13 Normal component of MFL signal in different loading of experiment

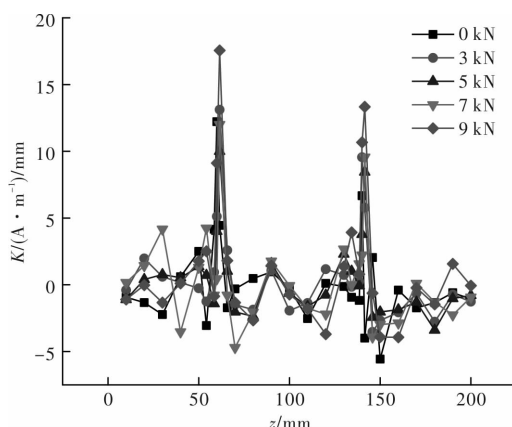


图 14 试验中不同载荷下的法向漏磁信号梯度值

Fig. 14 Normal component of MFL signal gradient values in different loading of experiment

总体上,忽略端部夹持及仪器分辨率等因素对磁记忆信号的影响,模拟结果与试验结果的变化趋势相符合,法向磁记忆信号在缺陷处都出现波峰-波谷现象,并且其梯度值出现最大值,缺陷处漏磁信号及幅值分布范围相差不大,说明模拟结果具有一定的可靠性,本文有限元模型可为钢丝绳的拉伸磁记忆有限元分析提供参考。

4 结论

(1)本文采用 ANSYS 有限元分析软件分别对 50 Mn 钢丝绳单丝进行静力学分析,并通过力-磁耦合模型进行静磁学分析,得到试件缺陷处磁感应强度的分布规律及应力变化对漏磁场信号的影响,即随荷载增加,磁感应线出现与应力集中类似的分布规律,证明了有缺陷钢丝绳的早期损伤与金属磁记忆信号之间的内在联系规律,说明该数值模拟方法可为钢丝绳拉伸磁记忆有限元分析提供一定的参考。

(2)有限元模拟结果表明试件在破坏前,随着应力集中程度的不断增加,试件内部隐性损伤不断积累,造成磁记忆信号的变化,法向磁记忆信号出现过零点并且其梯度值出现最大值,与试验结果有较好的契合,可根据这些变化来实现对钢丝绳损伤的早期发现。

(3)由于试件加工过程中受微小损伤,大地磁场和自身剩磁场方向的不确定性,以及环境磁场的影响,导致试验结果法向漏磁场信号相比模拟结果在缺陷以外的地方出现无规律的变化,因此只通过法向漏磁信号判断钢丝绳缺陷存在一定误差,应结合法向漏磁信号的梯度值 K 进行综合考虑。

参考文献 References

- [1] 陶德馨,艾丽丝佳.基于弱磁探伤的钢丝绳无损检测技术[J].中国工程机械学报,2009,7(1):96-99.
TAO Dexin, AI Lisijia. Nondestructive testing technology for wire ropes based on weak magnetic flaw detection[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2009,7(1):96-99.
- [2] DOUBOV A A. A study of mental properties using the method of magnetic memory [J]. Mental Science and Heat Treatment, 1997,39 (9-10):401-402.
- [3] DOUBOV A A. Screening of weld quality using the magnetic metal memory effect [J]. Welding in the World, 1998,41:196-198.
- [4] DUBOV A A. Development of a metal magnetic memory method[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2012, 47(11/12):837-839.
- [5] 邢海燕,徐敏强,李建伟,等.磁记忆检测技术及工程应用[M].北京:中国石化出版社,2011.
XIN Haiyan, XU Mingqiang, LI Weijian, et al. Magnetic memory testing technology and engineering application[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2011.

(下转第 331 页)