

文章编号:1007-9629(2023)07-0771-12

## 反复拉伸加载下钢筋力磁耦合效应

童 凯<sup>1,2</sup>, 周建庭<sup>1,2,\*</sup>, 赵瑞强<sup>3</sup>, 吴礼舟<sup>1,2</sup>, 张森华<sup>1,2</sup>

(1. 重庆交通大学 山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 3. 重庆交通大学 材料科学与工程学院, 重庆 400074)

**摘要:**为探究钢筋的力磁耦合特性,开展反复拉伸试验,研究了钢筋应力 $\sigma$ 、应变 $\epsilon$ 与漏磁强度法向分量 $B_z$ 之间的关联,引入了“应力变化参量” $\sigma_N$ 与“漏磁强度变化参量” $B_N$ 。结果表明:钢筋反复拉伸过程中 $\epsilon$ 值与 $B_z$ 值均具有可逆性,且应变幅的增大使得 $B_z$ 变化速率减小; $\sigma$ 与 $B_z$ 的波动周期相同,波动方向相反;不同反复拉伸阶段下应力幅与漏磁强度变化率的比例关系一致,且相对偏差率小于9.40%; $\sigma_N$ 与 $B_N$ 呈线性关系,拟合直线斜率接近1.000,表明应力幅变化率与漏磁强度变化率相对等;仿真分析与试验结果吻合。

**关键词:**钢筋;反复拉伸;应力;应变;漏磁强度;力磁耦合

中图分类号:TU511.3

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.07.010

## Force-Magnetic Coupling Effect of Steel Bars under Repeated Tensile Loading

TONG Kai<sup>1,2</sup>, ZHOU Jianting<sup>1,2,\*</sup>, ZHAO Ruiqiang<sup>3</sup>, WU Lizhou<sup>1,2</sup>, ZHANG Senhua<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Repeated tensile experiments were carried out to explore the force-magnetic coupling properties of steel bars. The correlation between stress  $\sigma$ , strain  $\epsilon$ , and normal component magnetic leakage intensity  $B_z$  was investigated. The “stress variation parameter”  $\sigma_N$  and the “magnetic leakage intensity variation parameter”  $B_N$  were introduced. The results indicate that both  $\epsilon$  values and  $B_z$  values are reversible during steel bar repeated tensile processes. The increase in strain amplitude reduces the change rate of  $B_z$ . The fluctuation periods of  $\sigma$  and  $B_z$  are the same, and the fluctuation directions are opposite. The proportional relationship between the stress amplitude and the variation of magnetic leakage intensity at different repeated tensile stages is consistent. The relative deviation rate is less than 9.40%.  $\sigma_N$  is linearly related to  $B_N$  with a slope approximating 1.000. It demonstrates the equivalent relationship between the variation rate of the stress amplitude and the variation rate of the magnetic leakage intensity. The simulation analysis coincides with the experimental results.

**Key words:** steel bar; repeated tensile; stress; strain; magnetic leakage intensity; force-magnetic coupling

由于桥梁工程具有反复承载的受力特征,钢筋作为其中的受力构件,其应力状态与结构的安全性能密不可分<sup>[1]</sup>,因此对于钢筋应力的评估具有重要意义。常用的钢筋应力检测方法为表贴应变计法,即用获取应变的方法来推算应力,但该方法存在构件损

伤、温度受限等劣势<sup>[2]</sup>。在无损检测方面,X射线法对构件表面的光洁度要求高,且无法测量内部应力<sup>[3]</sup>;超声波法则需要配备换能器与耦合剂,操作复杂<sup>[4]</sup>。因此,当前亟需一种高效便捷的检测手段来满足实际工程所需。

收稿日期:2022-08-17; 修订日期:2022-10-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U20A20314,52278291);重庆市杰出青年科学基金资助项目(cstc2020jcyj-jqX0006)

第一作者:童 凯(1996—),男,浙江金华人,重庆交通大学博士生。E-mail: kaitong@mails.cqjtu.edu.cn

通讯作者:周建庭(1972—),男,浙江金华人,重庆交通大学教授,博士生导师,博士。E-mail: jtzhou@cqjtu.edu.cn

自发漏磁检测方法是根据铁磁材料的磁学特性,依靠地磁场激励,通过解析材料表面磁场变化来推测外部损伤与内部应力的无损检测手段<sup>[5]</sup>.此方法主要应用于管道探伤<sup>[6]</sup>、钢轨探伤<sup>[7]</sup>及裂纹识别<sup>[8]</sup>等方面,在钢筋应力检测方面尚处于起步阶段.钢筋静态拉伸是常用的探究方式,研究者发现钢筋在弹塑性阶段的漏磁强度变化规律存在差异<sup>[9]</sup>——在弹性阶段,应力增大诱发磁化增强,钢筋的漏磁强度与应力水平呈同步发展<sup>[10]</sup>;在塑性阶段,钢筋的漏磁强度曲线的斜率参量能够表征塑性形变与残余应力的耦合效应<sup>[11]</sup>,且梯度参量能够推测应力集中部位与集中程度<sup>[12]</sup>.在力磁效应探究中存在内外影响因素,譬如钢材内部晶粒尺寸的差异也会引起力磁效应的变化<sup>[13]</sup>;相比离线检测,在线检测能够更好地揭示力磁效应<sup>[14]</sup>.

然而,当前关于反复荷载下钢筋力磁效应的研究存在空缺,应力波动情况下的力磁效应尚不明确.为模拟桥梁的受力特征,本文开展钢筋反复拉伸试验,通过施加不同强度的反复拉伸荷载,检测钢筋表面漏磁强度,分析应力与漏磁强度之间的变化关系,以明确力磁耦合过程的量化特征,为自发漏磁检测原理运用于桥梁结构的工作应力检测提供指导和借鉴意义.

## 1 试验

### 1.1 原材料及试验装置

试验采用钢筋混凝土桥梁中常用的HRB400钢筋,长度为800 mm,直径为20 mm,共计8根,均源自同一生产批次.HRB400钢筋的化学组成(质量分数)如表1所示.通过拉伸破坏测试得到钢筋屈服强度约为436.0 MPa,抗拉强度约为630.0 MPa.

钢筋拉伸装置为WAM-1000微机电液伺服万能试验机,最大拉伸荷载为1 000 kN.磁场检测装置为三轴磁场扫描设备,包括控制系统、三轴机械位移系统和HMR2300磁强计,可同时自动化检测空间3个维度的磁感应强度,量程为 $\pm 2 \times 10^{-4}$  T,精度为 $6.9 \times 10^{-9}$  T.控制电脑实时记录拉伸应力、钢筋形变与磁感应强度数据.试验材料、装置及过程见图1.

### 1.2 拉伸加载与磁场检测

将钢筋两端夹持在试验机上,拉伸速率为2 mm/min,先预加载至70 kN,以模拟桥梁结构的自重荷载,而后开展反复拉伸加载试验.表2为1<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>钢筋试件反复拉伸阶段的荷载幅值 $T_i$ 和应力幅值 $\sigma_i$ .作为对比,针对7<sup>#</sup>和8<sup>#</sup>钢筋试件开展单向拉伸破坏加载.5<sup>#</sup>和6<sup>#</sup>钢筋试件反复拉伸加载过程中应力变化示意图见图2.图2(a)显示5<sup>#</sup>和6<sup>#</sup>钢筋试件完整拉伸过程中荷载 $T$ 与应力 $\sigma$ 的变化曲线,每个阶段进行10次完整拉伸周期.图2

(b)为5<sup>#</sup>和6<sup>#</sup>钢筋试件在各阶段的最大拉伸应力.

在钢筋试件拉伸加载前,先采用无磁性的橡胶棒代替钢筋,夹持在试验机两端,利用三轴磁场强度扫描设备检测各测点处的背景磁感应强度 $B_0$ ;再进行钢筋试件的反复拉伸加载试验,当钢筋试件拉伸至预定荷载时,持荷并进行自动化在线检测磁感应强度.需要说明的是,磁强计扫描路径沿钢筋试件长度方向( $Y$ 方向),扫描速率为10 mm/s,用于采集钢筋试件表面各测点的磁感应强度.钢筋试件表面共12个测点(1<sup>#</sup>~12<sup>#</sup>),各相邻测点间距为20 mm;磁强计的检测提高高度是指扫描路径下磁强计表面与被测钢筋试件表面的垂直距离(见图1(b)),试验共设置3种检测提高高度值,分别为0、20、40 mm<sup>[15]</sup>.

## 2 结果与分析

试验过程中保持试验装置位置固定,将在线检测得到的磁感应强度统一扣除 $B_0$ .对比钢筋试件表面3种漏磁强度分量的变化特征后,发现垂直于钢筋试件方向( $Z$ 方向)的漏磁强度(法向分量 $B_z$ )具有显著特征规律,因此本文针对钢筋试件的 $B_z$ 展开分析.

### 2.1 漏磁强度法向分量的分布规律

对同组的2根钢筋进行相同拉伸加载,比对后发现两者的 $B_z$ 变化规律具有相似性,因此每组选取1根钢筋进行分析.图3为在不同拉伸应力下1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>钢筋试件表面的 $B_z$ 曲线.对比图3(a)、(b)、(c)发现:在相同提高高度下,1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>钢筋试件表面的 $B_z$ 曲线变化规律相一致;随着测点序号的增大,扫描位置逐渐下移,3个钢筋试件的 $B_z$ 曲线呈单调递减;而随着拉伸应力的增大, $B_z$ 曲线围绕钢筋试件中点(测点6<sup>#</sup>)产生逆时针转动, $B_z$ 曲线分布范围逐渐减小.这与Shi等<sup>[16]</sup>的前期研究结果相吻合,表明钢筋应力状态与 $B_z$ 之间存在必然联系.

对比图3(c)、(f)、(i)发现:随着提高高度的增大,5<sup>#</sup>钢筋试件的 $B_z$ 曲线分布范围减小.为量化分析提高高度的影响,选取5<sup>#</sup>钢筋试件应力 $\sigma$ 为0、127.3、254.6、382.0 MPa对应的 $B_z$ 曲线,将测点1<sup>#</sup>与12<sup>#</sup>处的 $B_z$ 值作差,得到3种提高高度下 $B_z$ 曲线分布范围 $B_{Z(1-12)}$ ,并计算提高高度20、40 mm情况下 $B_{Z(1-12)}$ 百分比 $P$ ,汇总至表3.由表3可知:在提高高度不变的情况下,随着应力的增大, $B_{Z(1-12)}$ 逐渐减小,而 $B_{Z(1-12)}$ 百分比基本不变;当提高高度为20 mm时, $B_{Z(1-12)}$ 均值约占提高高度0 mm情况下 $B_{Z(1-12)}$ 均值的87.5%;当提高高度为40 mm时, $B_{Z(1-12)}$ 均值约占提高高度0 mm情况下 $B_{Z(1-12)}$ 均值的65.8%.这表明提高高度与应力状态对于 $B_z$ 的影响是相互独立的,且减小提高高度

能够更好地突出不同应力条件下  $B_z$  曲线的差异.因此,在实际检测过程中建议磁强计紧贴被测构件表面,以保证提高高度为 0 mm,从而增强检测的精度与灵敏度.

表 1 HRB400 钢筋的化学组成  
Table1 Chemical composition of HRB400 steel bar specimen

| $w/\%$       |              |             |              |              |
|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| C            | Si           | Mn          | S            | P            |
| $\leq 0.250$ | $\leq 0.800$ | 1.000–1.600 | $\leq 0.045$ | $\leq 0.045$ |

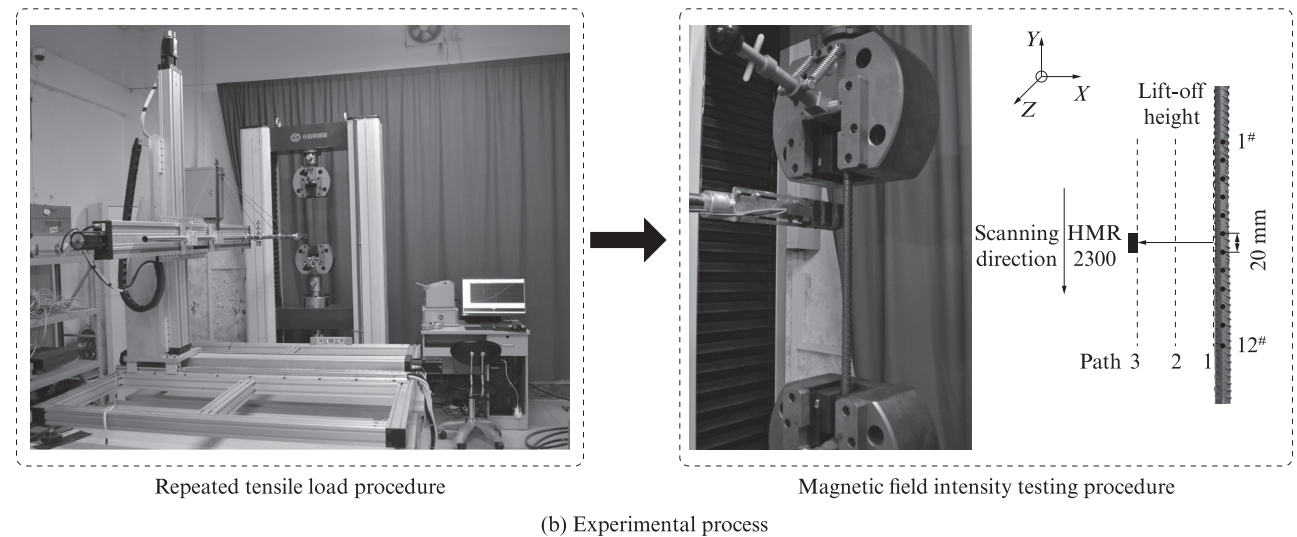
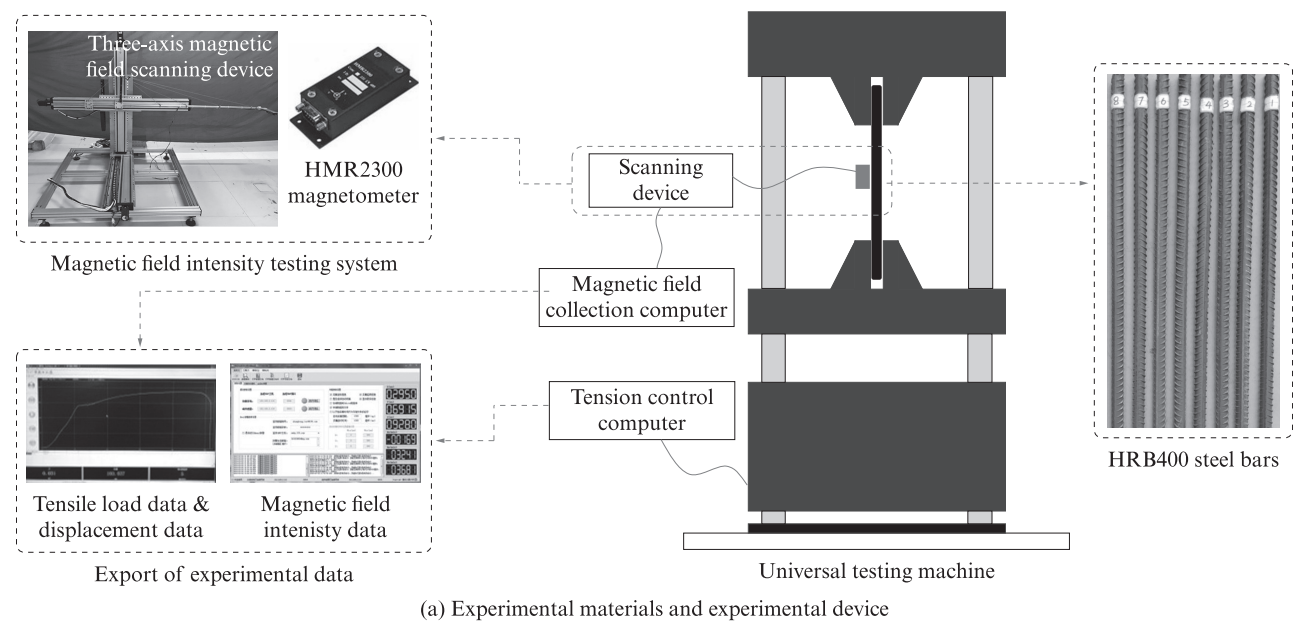


图 1 试验材料、试验装置及试验过程  
Fig. 1 Experimental materials, experimental device and experimental process

表 2 钢筋试件反复拉伸阶段的荷载幅值和应力幅值  
Table2 Load amplitudes and stress amplitudes of steel bar specimens in repeated tensile stages

| Specimen No.                   | Stage 1         |                       | Stage 2         |                       | Stage 3         |                       | Stage 4         |                       |
|--------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|
|                                | $T_1/\text{kN}$ | $\sigma_1/\text{MPa}$ | $T_2/\text{kN}$ | $\sigma_2/\text{MPa}$ | $T_3/\text{kN}$ | $\sigma_3/\text{MPa}$ | $T_4/\text{kN}$ | $\sigma_4/\text{MPa}$ |
| 1 <sup>#</sup> /2 <sup>#</sup> | 60              | 192                   | 100             | 320                   |                 |                       |                 |                       |
| 3 <sup>#</sup> /4 <sup>#</sup> | 40              | 128                   | 60              | 192                   | 100             | 320                   |                 |                       |
| 5 <sup>#</sup> /6 <sup>#</sup> | 20              | 64                    | 40              | 128                   | 60              | 192                   | 100             | 320                   |

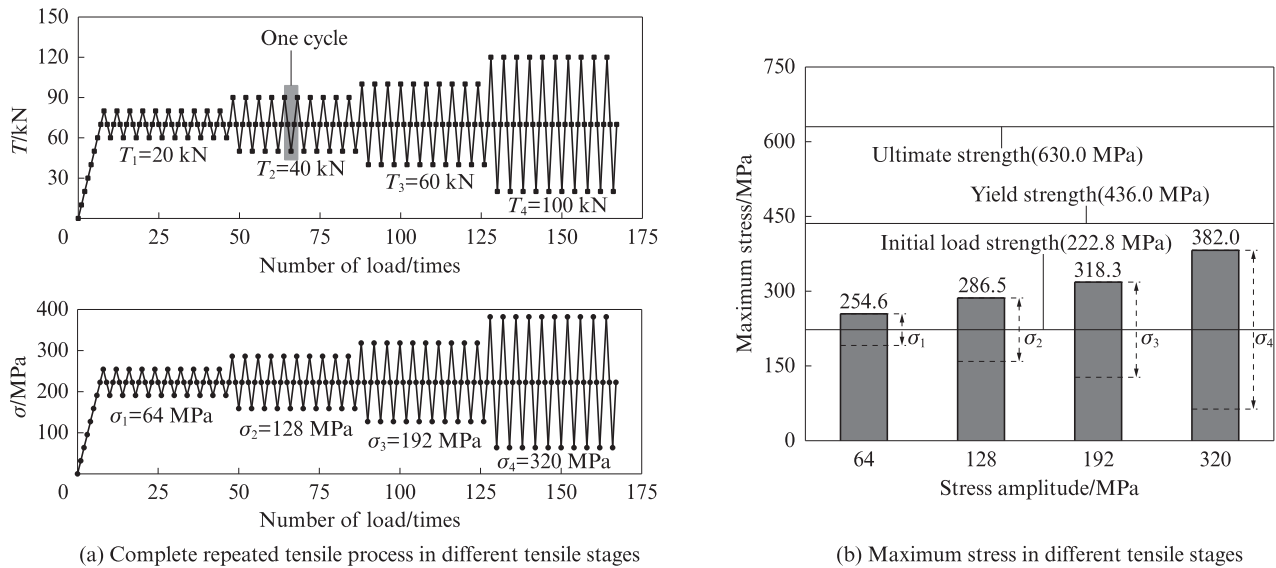


图2 5#和6#钢筋试件反复拉伸加载过程应力变化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of stress change during repeated tensile loading of 5# and 6# steel bar specimens

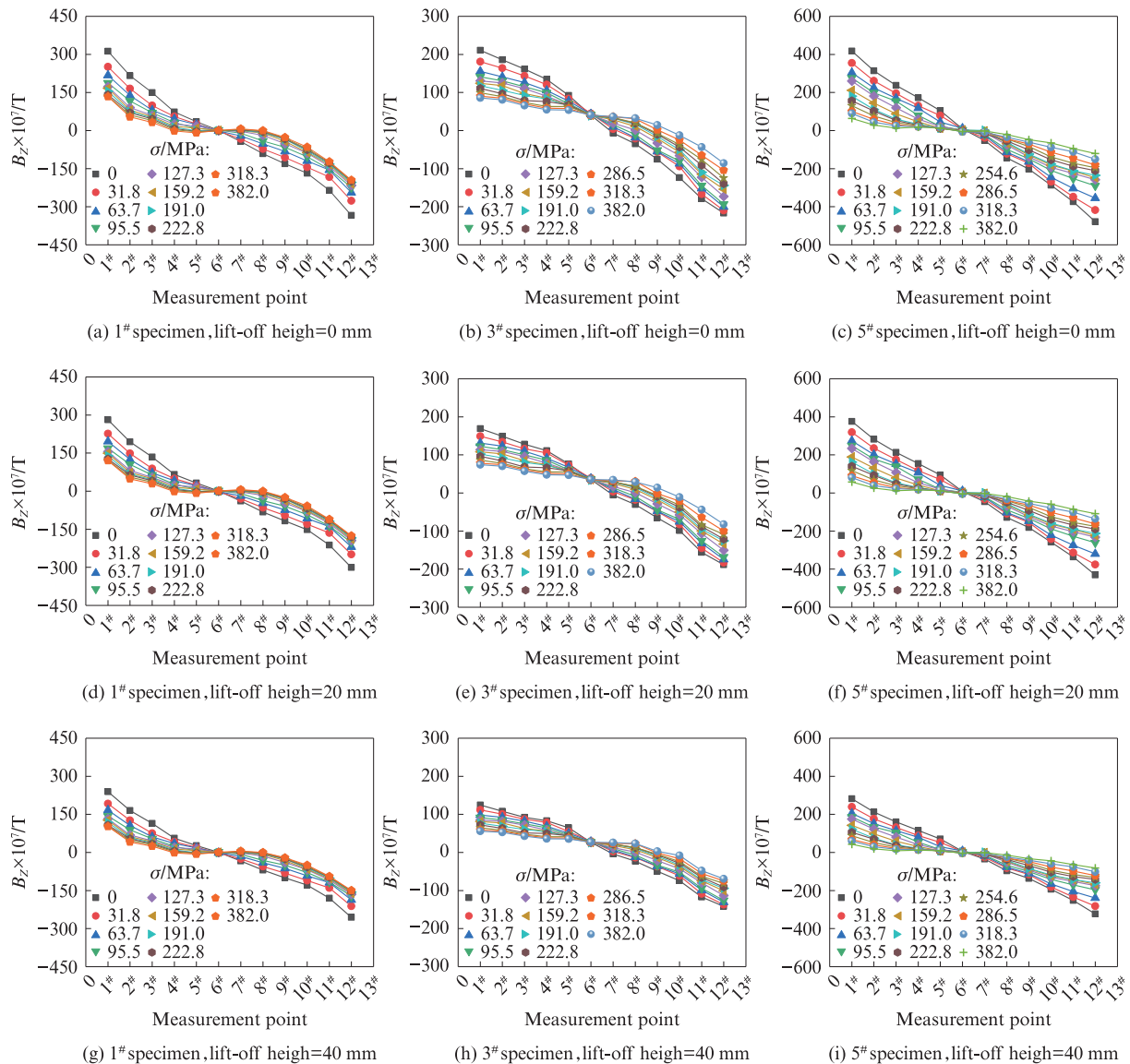
图3 1#、3#和5#钢筋试件的  $B_z$  变化曲线Fig. 3  $B_z$  variation curves of 1#, 3# and 5# steel bar specimens

表3 不同提高高度下 $B_z$ 值的分布范围  
Table3 Distribution range of  $B_z$  values in different lift-off heights

| Lift-off height/mm | $\sigma=0$ MPa                |          | $\sigma=127.3$ MPa            |          | $\sigma=254.6$ MPa            |          | $\sigma=382.0$ MPa            |          |
|--------------------|-------------------------------|----------|-------------------------------|----------|-------------------------------|----------|-------------------------------|----------|
|                    | $B_{z(1-12)} \times 10^7 / T$ | $P / \%$ | $B_{z(1-12)} \times 10^7 / T$ | $P / \%$ | $B_{z(1-12)} \times 10^7 / T$ | $P / \%$ | $B_{z(1-12)} \times 10^7 / T$ | $P / \%$ |
| 0                  | 896.9                         |          | 527.8                         |          | 305.9                         |          | 169.4                         |          |
| 20                 | 807.2                         | 89.9     | 466.0                         | 88.3     | 263.4                         | 86.1     | 144.9                         | 85.5     |
| 40                 | 605.4                         | 67.5     | 339.5                         | 64.3     | 210.0                         | 68.6     | 106.5                         | 62.9     |

在实际桥梁结构中,钢筋与混凝土是紧密连接的,且由于混凝土为非磁性材料,因此在结构受力过程中所表现出的漏磁特性来自于钢筋材料.Gong等<sup>[17]</sup>在钢筋混凝土梁四点弯曲加载过程中,运用磁强计检测试验梁纯弯段混凝土表面的漏磁强度,得到 $Y$ - $B_z$ 曲线,见图4.其中 $Y$ 表示钢筋长度方向纯弯

段扫描路径长度.由图4可见: $B_z$ - $Y$ 曲线呈线性单调递减,且随着加载荷载的增大,曲线呈现逆时针方向旋转;提高高度的增大使得 $Y$ - $B_z$ 曲线分布范围减小.因此,钢筋混凝土梁表面的 $B_z$ 变化规律与钢筋表面的 $B_z$ 变化规律具有一致性,证明了力磁耦合效应研究的工程实际意义.

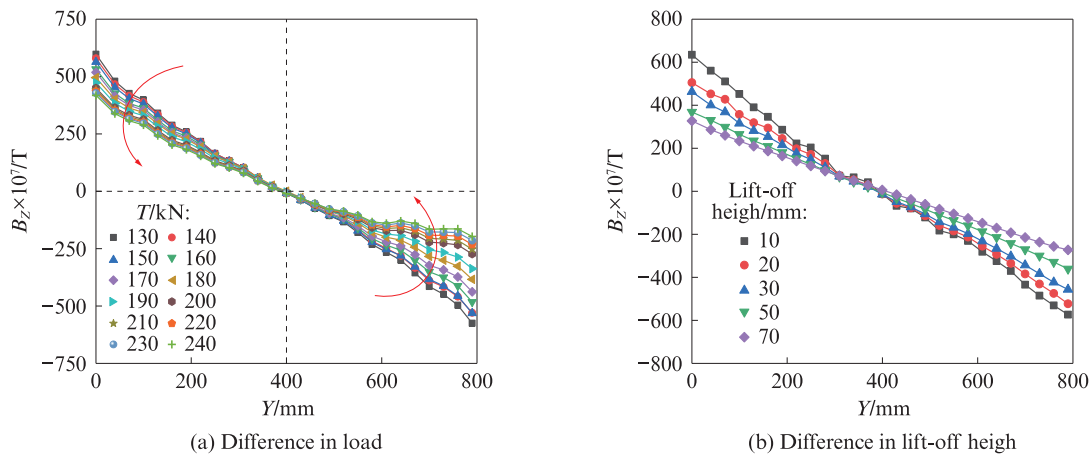


图4 钢筋混凝土梁四点弯曲加载过程中的 $B_z$ 变化曲线

Fig. 4  $B_z$  variation curves during four-point bending loading of reinforced concrete beams<sup>[17]</sup>

## 2.2 应变与漏磁强度的相关性分析

选取7<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>钢筋试件来绘制HRB400钢筋应力-应变( $\sigma$ - $\epsilon$ )曲线.由图5(a)可见,7<sup>#</sup>钢筋试件在单向拉伸破坏过程中存在明显的弹塑性阶段,且弹性阶段的最大应变值约为2.00%.由图5(b)可见:5<sup>#</sup>钢筋试件在反复拉伸加载过程中的最大应力值为382.0 MPa,小于钢筋屈服强度(436.0 MPa),最大应变值为1.16%,故为弹性变形;4个反复拉伸阶段的曲线变化规律——拉伸加载过程,曲线单调上升;拉伸卸载过程,曲线单调下降,应变呈现良好的可逆性.观察第1阶段的 $\sigma$ - $\epsilon$ 曲线放大图后发现,10次周期的曲线变化区间、斜率均保持一致.因此,根据反复拉伸加载过程中 $\epsilon$ 的可逆性与稳定性,进一步分析 $\epsilon$ 与 $B_z$ 之间的关系.

选取5<sup>#</sup>钢筋试件测点2<sup>#</sup>的 $B_z$ 数据,绘制反复拉伸过程中的 $B_z$ - $\epsilon$ 曲线,见图6(a).由图6(a)可见:5<sup>#</sup>钢筋试件的 $B_z$ - $\epsilon$ 曲线同样具有可逆性,且随着反复拉伸阶段的递增, $B_z$ - $\epsilon$ 曲线可逆范围增大;第1阶段

的 $B_z$ - $\epsilon$ 曲线放大图显示,10个周期的曲线波动区间相一致.这是因为钢筋试件在卸载过程中, $\sigma$ 的减小促使钢筋回弹收缩, $\epsilon$ 减小(图5(b)),引起 $B_z$ 值增大, $B_z$ - $\epsilon$ 曲线上升, $B_z$ 与 $\epsilon$ 呈良好对应关系.针对 $B_z$ - $\epsilon$ 曲线的可逆性,计算5<sup>#</sup>钢筋试件4个阶段中 $B_z$ - $\epsilon$ 曲线的线性斜率绝对值 $K(10^{-7}T)$ ,其表达式为:

$$K = \left| \frac{\Delta B_z}{\Delta \epsilon} \right| \quad (1)$$

式中: $\Delta B_z$ 表示单次周期内漏磁强度上下极值点差值; $\Delta \epsilon$ 表示单次周期内钢筋的应变变化量.

$K$ 值反映了 $B_z$ 与 $\epsilon$ 之间的关联程度, $K$ 值越大, $B_z$ - $\epsilon$ 曲线升降坡度越大,两者的关联度越高.选取5<sup>#</sup>钢筋试件4个阶段的第2、4、6、8、10次周期中的 $K$ 值,绘制柱状图,见图6(b).由图6(b)可见:在同一阶段的不同周期,各 $\Delta \epsilon$ 一致, $K$ 值相接近;而随着阶段数的增大, $\Delta \epsilon$ 增大, $K$ 值减小,表现为 $B_z$ - $\epsilon$ 曲线升降坡度减小.据此表明,在钢筋反复拉伸加载过程中,钢筋的 $\Delta B_z$ 与

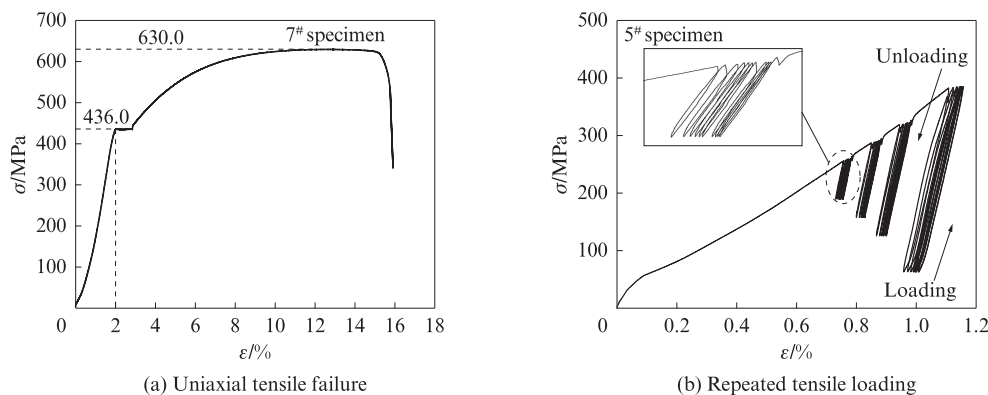


图5 HRB400钢筋应力-应变( $\sigma$ - $\epsilon$ )曲线  
Fig. 5 Stress-strain( $\sigma$ - $\epsilon$ ) curves of HRB400 steel bars

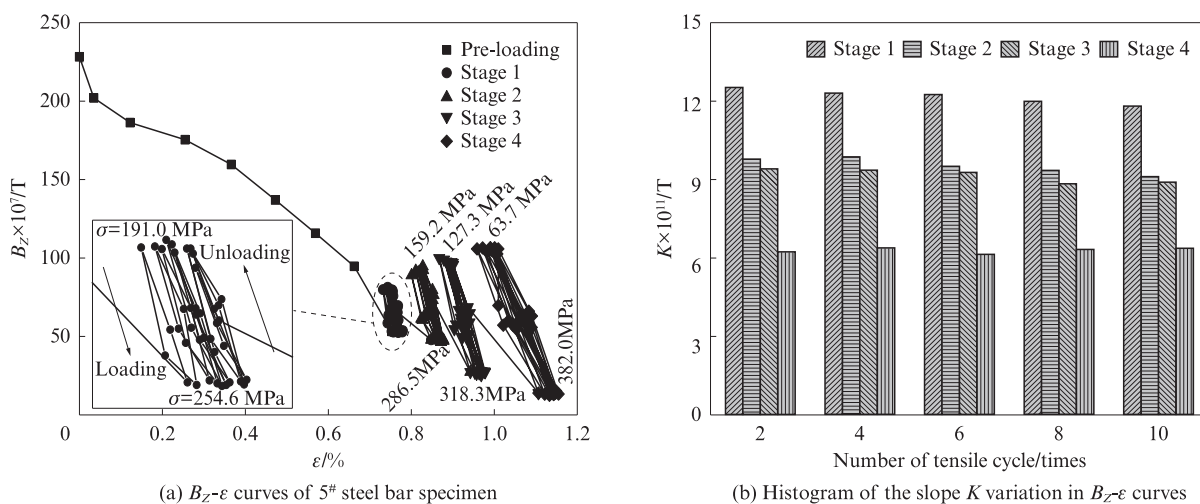


图6 5#钢筋试件反复拉伸加载过程中 $B_z$ - $\epsilon$ 、 $K$ 变化关系  
Fig. 6 Relationship between  $B_z$  and  $\epsilon$ ,  $K$  during repeated tensile loading of 5# steel bar specimen

$\Delta\epsilon$ 呈正相关,而 $K$ 与 $\Delta\epsilon$ 呈负相关, $\Delta\epsilon$ 的增大促使 $B_z$ 变化速率减小.

### 2.3 应力与漏磁强度的相关性分析

选取1#、3#和5#钢筋试件在第2阶段反复拉伸10次周期的 $B_z$ 数据,绘制其 $\sigma$ 变化曲线与 $B_z$ 变化曲线对比图,见图7.由图7可见:在反复拉伸过程中,钢筋试件的 $\sigma$ 曲线呈精准周期性变化,相应的 $B_z$ 曲线产生周期性波动,而两者的波动方向相反—— $\sigma$ 减小促使 $B_z$ 值增大, $\sigma$ 增大引起 $B_z$ 值减小,两者严格对应.这表明钢筋试件 $B_z$ 曲线的起伏能够准确指示出钢筋轴向应力的增减.为进一步分析力磁耦合效应的量化特征,后续将针对同一试件在不同反复拉伸阶段的漏磁强度变化展开分析.

#### 2.3.1 应力与漏磁强度的变化量对比

反复拉伸阶段单次周期内钢筋试件的 $\Delta B_z$ 计算式为:

$$\Delta B_z = \left| B_{Z(222.8 - \sigma_{i/2})} - B_{Z(222.8 + \sigma_{i/2})} \right| \quad (2)$$

式中: $B_{Z(222.8 - \sigma_{i/2})}$ 为钢筋试件10次周期内 $B_z$ 曲线的上

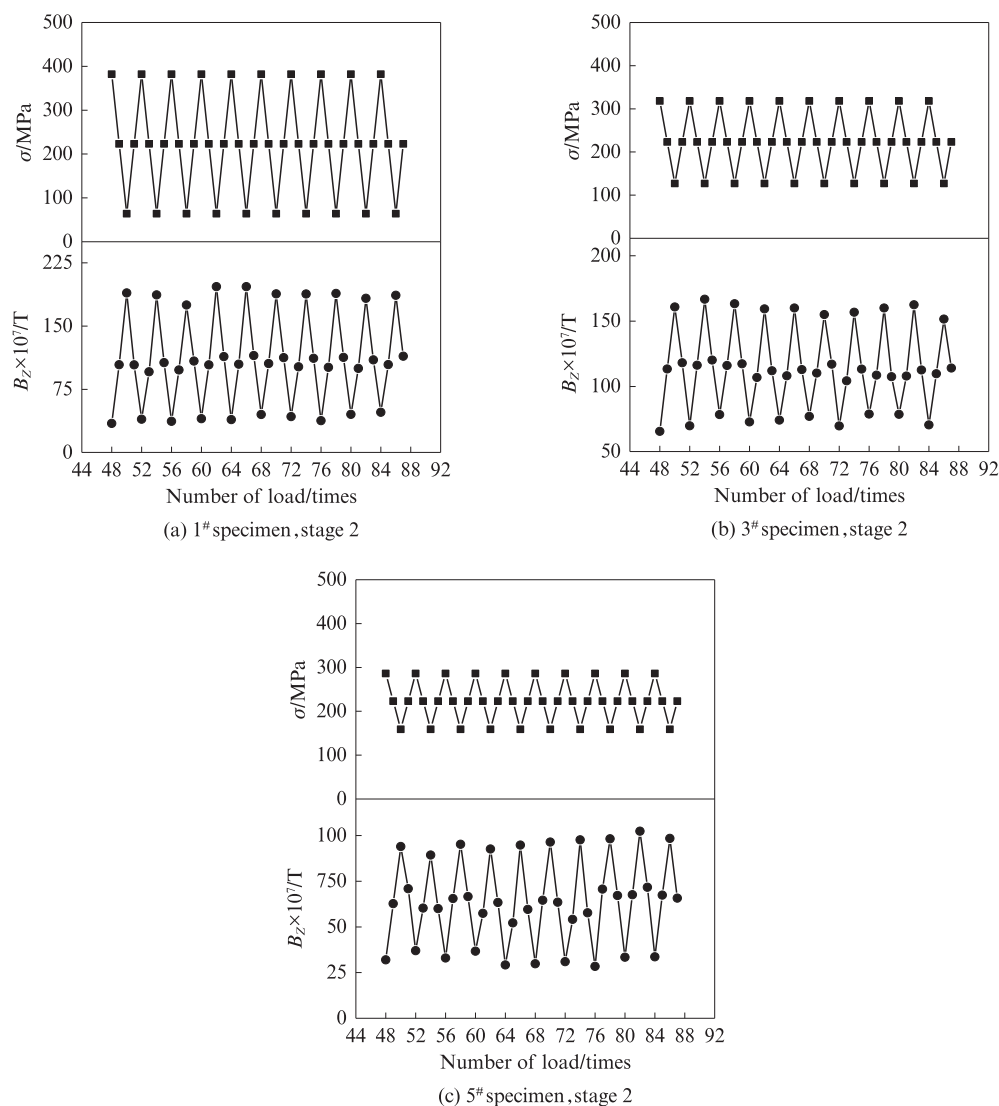
极值点平均值, $10^{-7}$  T; $B_{Z(222.8 + \sigma_{i/2})}$ 为钢筋试件10次周期内 $B_z$ 曲线的下极值点平均值, $10^{-7}$  T.

5#钢筋试件4个拉伸阶段的 $\Delta B_z$ 值见表4.由表4可知,随着应力幅 $\sigma_i$ 的增大,5#钢筋试件的 $\Delta B_z$ 增大.

钢筋试件4个拉伸阶段 $\sigma_i$ 的比例关系如式(3)所示:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \sigma_2 = \frac{1}{3} \sigma_3 = \frac{1}{5} \sigma_4 \quad (3)$$

以钢筋试件第4阶段的 $\Delta B_z$ 值为基准,比例折算出其各拉伸阶段的 $\Delta B_z$ 值,并与实际检测的 $\Delta B_z$ 值进行对比.图8为5#钢筋试件的 $\Delta B_z$ 检测值与折算值的对比曲线.由图8可见:5#钢筋试件4个测点处的检测数据与折算数据的 $\Delta B_z$ - $\sigma_i$ 曲线重合度较高,均呈单调递增,最大偏差值为 $6.0 \times 10^{-7}$  T,整体相对偏差率低于9.40%.表明钢筋试件的 $\sigma_i$ 变化率与 $\Delta B_z$ 变化率近似对等,且不同测点的 $\Delta B_z$ 均能够良好表征出钢筋应力状态的变化.

图7 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>钢筋试件的应力变化曲线与漏磁强度变化曲线对比图Fig. 7 Comparative diagram of stress variation curves and magnetic leakage intensity variation curves of 1<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> and 5<sup>#</sup> steel bar specimens表4 5<sup>#</sup>钢筋试件的 $\Delta B_z$ 值  
Table 4  $\Delta B_z$  values of 5<sup>#</sup> steel bar specimen

| Stage | $\sigma_i/\text{MPa}$ | $\Delta B_z \times 10^7/\text{T}$ |                                  |                                  |                                   |
|-------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
|       |                       | Measurement point 2 <sup>#</sup>  | Measurement point 4 <sup>#</sup> | Measurement point 8 <sup>#</sup> | Measurement point 10 <sup>#</sup> |
| 1     | 64                    | 25.1                              | 21.7                             | 16.5                             | 19.6                              |
| 2     | 128                   | 54.5                              | 45.6                             | 32.2                             | 40.0                              |
| 3     | 192                   | 78.5                              | 66.0                             | 47.9                             | 63.8                              |
| 4     | 320                   | 121.5                             | 100.1                            | 84.9                             | 96.3                              |

### 2.3.2 力磁耦合效应的量化分析

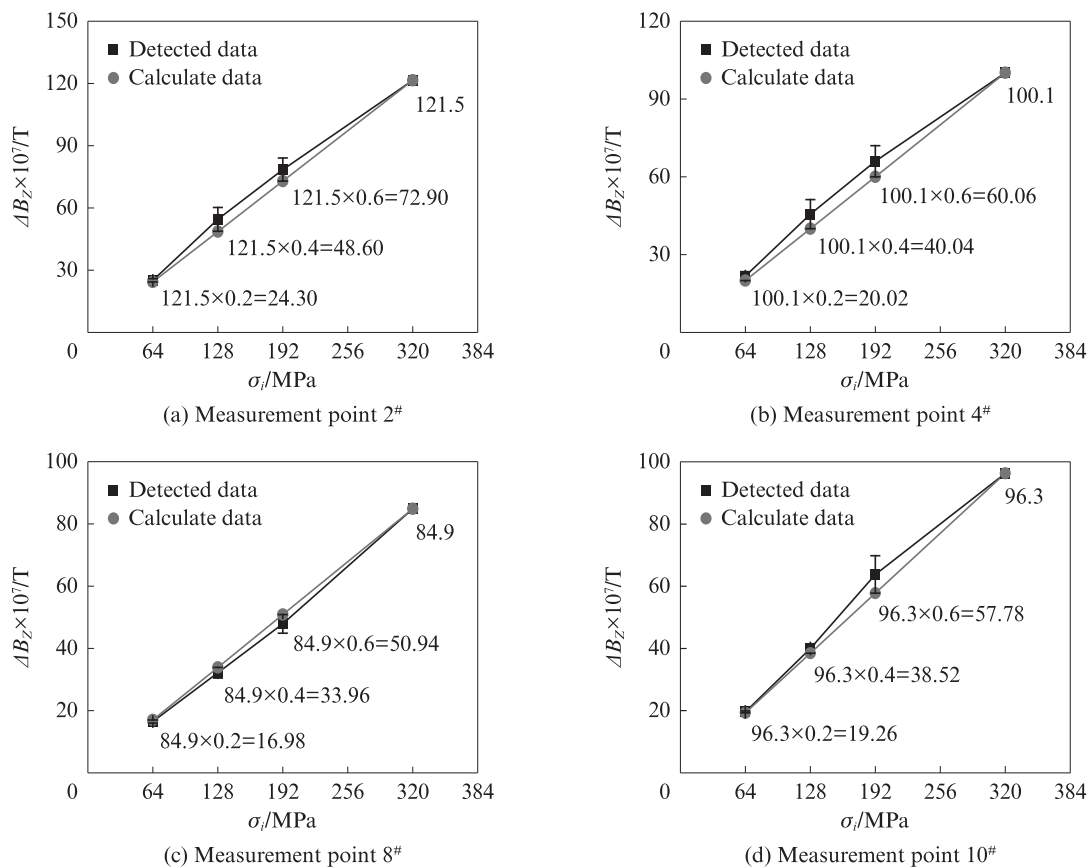
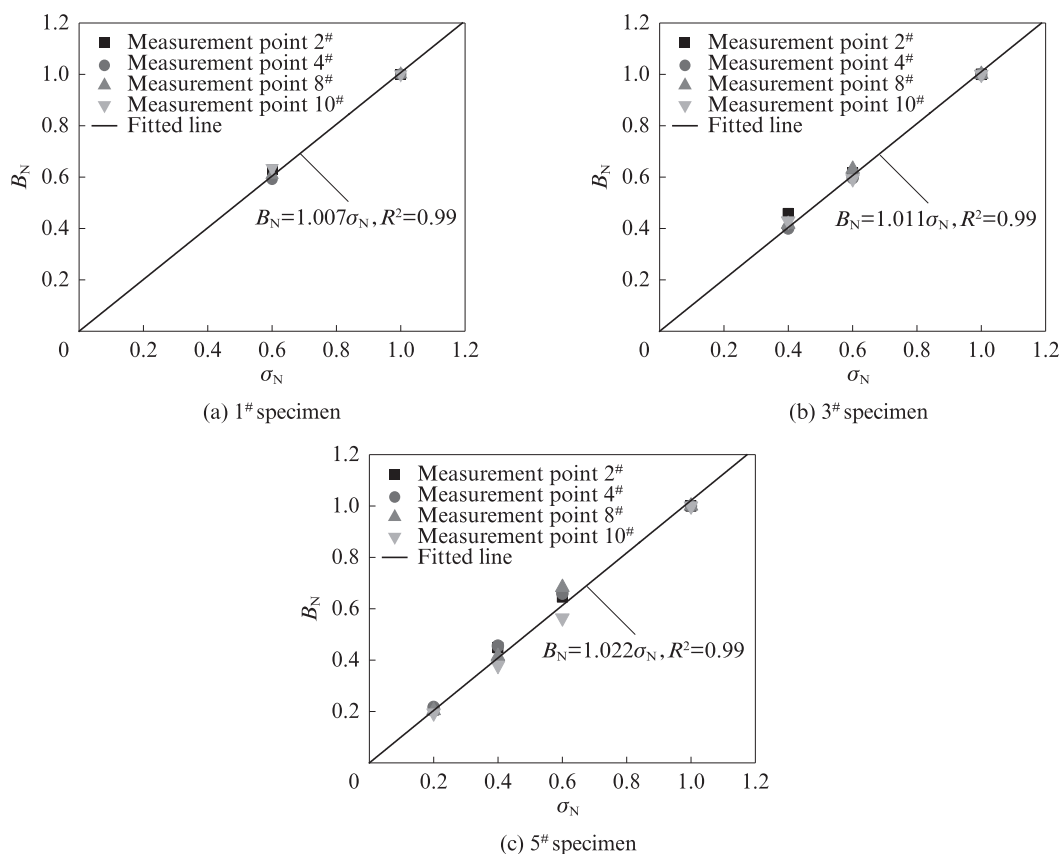
为进一步分析钢筋力磁耦合效应的量化特征,同时削弱测点差异的影响,引入“应力变化参量” $\sigma_N$ 与“漏磁强度变化参量” $B_N$ ,其表达式为:

$$\sigma_N = \frac{\sigma_i}{\sigma_m} \quad (4)$$

$$B_N = \frac{\Delta B_{zi}}{\Delta B_{zm}} \quad (5)$$

式中: $\sigma_m$ 表示钢筋反复拉伸阶段中最大应力幅,MPa; $\Delta B_{zi}$ 表示钢筋不同应力幅对应的漏磁强度变化量, $10^{-7}$  T, $i$ 为1~4; $\Delta B_{zm}$ 表示钢筋最大应力幅对应的漏磁强度变化量, $10^{-7}$  T.

选取1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>钢筋试件在各拉伸阶段的 $B_z$ 数据,计算出相应的 $\Delta B_z$ 值与 $B_N$ 值,绘制 $B_N$ - $\sigma_N$ 关系散点图并进行拟合,如图9所示.由于钢筋应力未发生

图8 5<sup>#</sup>钢筋试件的 $\Delta B_z-\sigma_i$ 实测曲线与 $\Delta B_z-\sigma_i$ 折算曲线对比Fig. 8 Comparison of the measured  $\Delta B_z-\sigma_i$  curves and the calculated  $\Delta B_z-\sigma_i$  curves of 5<sup>#</sup> steel bar specimen图9 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>钢筋试件的 $B_N-\sigma_N$ 拟合直线Fig. 9  $B_N-\sigma_N$  fitted lines for 1<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> and 5<sup>#</sup> steel bar specimens

波动时,  $\Delta B_z$  值为零, 因此控制3条拟合直线方程的截距为零, 得到  $\sigma_N$  与  $B_N$  之间的关系:

$$B_N = k\sigma_N \quad (6)$$

式中:  $k$  为拟合直线的斜率。

图9显示, 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>钢筋试件的拟合直线斜率分别为1.007、1.011、1.022。图10为1<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>钢筋试件的  $B_N$ - $\sigma_N$  拟合直线斜率值。由图10可见, 在1<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>钢筋试件的斜率值中,  $k$  的最大值为1.022,  $k$  的最小值为0.996, 与  $k=1.000$  的偏差率在2.2%之内。

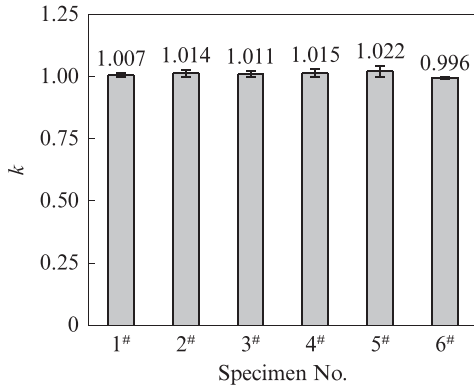
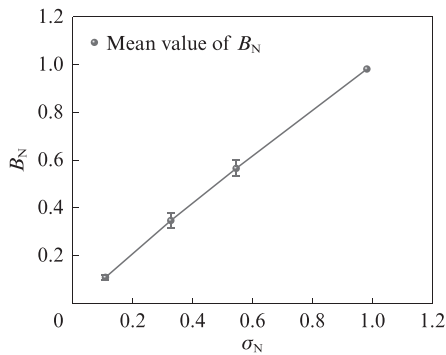


图10 1<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>钢筋试件的  $\sigma_N$ - $B_N$  拟合直线斜率值

Fig. 10 Slope values of  $\sigma_N$ - $B_N$  fitted lines for 1<sup>#</sup>-6<sup>#</sup> steel bar specimens

图11为1<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>钢筋试件的  $B_N$  均值曲线图和  $B_N$ - $\sigma_N$  关系散点图。图11(a)中的误差棒表示  $B_N$  值的标准差, 当  $\sigma_N$  为0.2、0.4、0.6时, 对应  $B_N$  值的标准差分别为0.009、0.030、0.030, 表明不同钢筋试件之间的  $B_N$  数据分散程度较小, 数据分布较为稳定。图11(b)中的并置拟合直线斜率为1.01, 线性回归的决定系数  $R^2=0.99$ , 直线的拟合优度较高。据此表明, 在反复拉伸加载过程中, 钢筋试件的  $\sigma_N$  值与  $B_N$  值近似相等, 钢筋拉伸应力幅变化率与法向漏磁强度变化率相互对等, 揭示了钢筋在波动应力作用下力磁耦合效应的量化特征。



(a)  $B_N$  mean curve

### 3 有限元仿真模拟

#### 3.1 仿真实理论与仿真模型

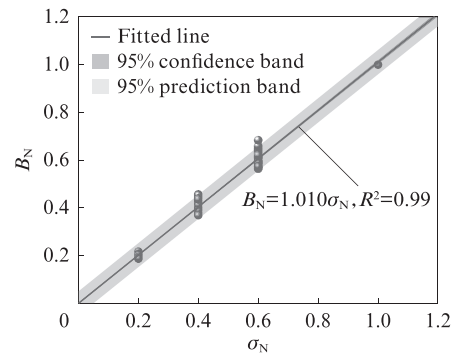
在力磁耦合理论研究中, 由Jiles等<sup>[18]</sup>建立的J-A磁机械模型适用于表征弹性阶段的力磁效应。磁化强度  $M$  与应力  $\sigma$  的关系式如式(7)所示。  $\sigma$  是有效磁化中的唯一变量; 而  $M$  与材料的相对磁导率  $\mu$  相关联。式(8)为有限元计算过程采用的应力-相对磁导率耦合理论模型<sup>[19]</sup>。

$$\frac{dM}{d\sigma} = \frac{\sigma(M_{an} - M)}{\xi E} + c \frac{dM_{an}}{d\sigma} \quad (7)$$

$$\mu = \mu_T (1 + bH/\mu_T) [a_0 + a_1 |\sigma|^m e^{n|\sigma|}] \quad (8)$$

式中:  $M_{an}$  为非滞后磁化强度, A/m;  $E$  为材料弹性模量, MPa;  $\xi$  为单位体积能量系数;  $\mu_T$  为材料初始相对磁导率, 取  $\mu_T=2000$ ;  $H$  为背景磁场强度, 取  $H=40$  A/m;  $b$  为钢筋磁化性质参数, 取  $b=2.5$ <sup>[19]</sup>;  $a_0, a_1$  为钢筋拉伸加载方位参数, 取  $a_0=0.95675, a_1=3.655 \times 10^{-5}$ ;  $m, n$  为钢筋拉伸加载强度参数, 取  $m=2.01733, n=-0.0323$ 。  $a_0, a_1, m, n$  均为钢筋拉伸应力系数, 表示应力对磁导率的影响程度, 与钢筋材料性能及其受最大应力作用后的内部微观组织特征相关, 在恒定的最大拉伸应力反复作用时, 应力系数为常数<sup>[20]</sup>。

运用Comsol软件建立三维带肋钢筋模型, 长度为800 mm (Y坐标  $L=0 \sim 800$  mm), 直径为20 mm。将钢筋分为两端不受拉区与中部受拉区, 两端夹持长度均为150 mm。在模型中设置双层矩形空气层, 内层空气涵盖受拉区, 尺寸为100 mm  $\times$  100 mm  $\times$  500 mm; 外层空气涵盖整个钢筋模型, 尺寸为400 mm  $\times$  400 mm  $\times$  1000 mm。图12为Comsol有限元钢筋模型示意图。在模型参数方面, 空气的相对磁导率为1, 钢筋两端夹持区的相对磁导率为2000, 钢筋中部受拉区的相对磁导率  $\mu$  由式(8)所得。



(b)  $B_N$ - $\sigma_N$  relationship scatter plot

图11 1<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>钢筋试件的  $B_N$  均值曲线图和  $B_N$ - $\sigma_N$  关系散点图

Fig. 11  $B_N$  mean curve and  $B_N$ - $\sigma_N$  relationship scatter plot for 1<sup>#</sup>-6<sup>#</sup> steel bar specimens

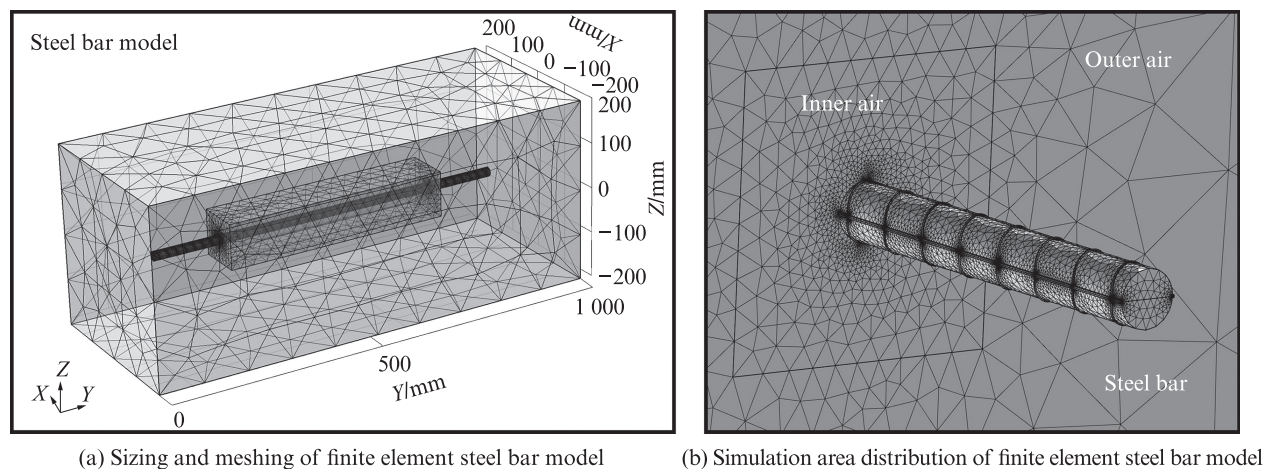


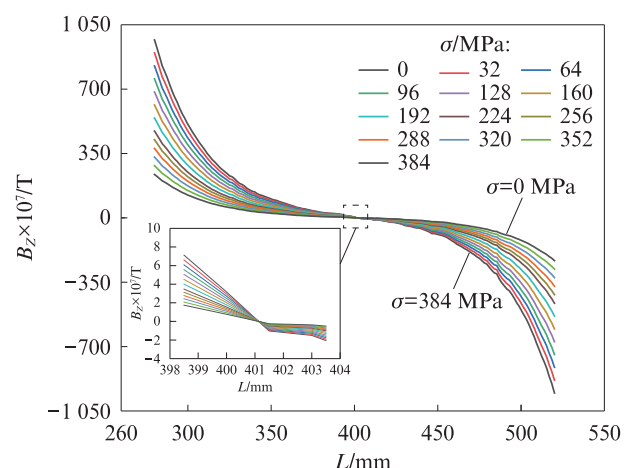
图12 Comsol有限元钢筋模型示意图

Fig. 12 Schematic of Comsol finite element steel bar model

### 3.2 仿真结果与讨论

设置三维测试路径沿钢筋模型长度方向,距离钢筋表面提高高度为10 mm,路径长度为240 mm ( $L=280\sim 520$  mm).选取模型受拉区的漏磁强度法向分量 $B_z$ 进行分析.图13为不同应力作用下的 $B_z-L$ 曲线.由图13可见: $B_z-L$ 曲线呈单调下降,左右两端的下降程度大于中部的下降程度;随着应力的增大, $B_z-L$ 曲线的变化范围逐渐减小,整体上曲线呈逆时针旋转.图13中的放大图显示整体上 $B_z-L$ 曲线相交于1点,交点处的 $B_z$ 值接近于零、 $L$ 值接近于模型中点位置.这与图3中的 $B_z$ 曲线变化规律相吻合.选取 $L$ 为280、300、320、340 mm处的 $B_z$ 值,计算5种应力幅下模型的 $B_z$ 变化量 $\Delta B_{zd}$ ,依据式(3)所示的应力幅比例,得到漏磁强度法向分量的变化折算值 $\Delta B_{zc}$ ,汇总至表5.由表5可见,不同应力幅下的钢筋模型的 $\Delta B_{zd}$ 值与 $\Delta B_{zc}$ 值相接近,

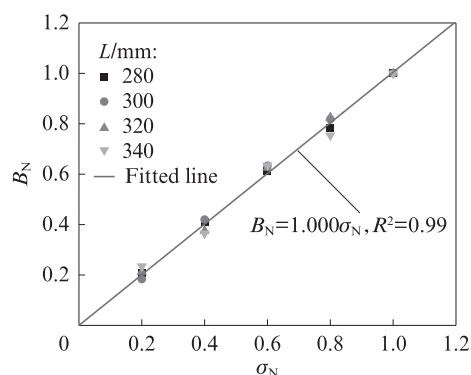
最大偏差值为 $10.0\times 10^{-7}$  T,两者的近似性与图8结果相符.

图13 不同应力作用下的 $B_z-L$ 曲线Fig. 13  $B_z-L$  curves under different stress conditions表5 不同应力幅下钢筋模型的 $B_z$ 变化量Table5  $B_z$  variations of steel bar model under different stress amplitudes

| $\sigma_i/\text{MPa}$ | $L=280$ mm                          |                                     | $L=300$ mm                          |                                     | $L=320$ mm                          |                                     | $L=340$ mm                          |                                     |
|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                       | $\Delta B_{zd}\times 10^7/\text{T}$ | $\Delta B_{zc}\times 10^7/\text{T}$ | $\Delta B_{zd}\times 10^7/\text{T}$ | $\Delta B_{zc}\times 10^7/\text{T}$ | $\Delta B_{zd}\times 10^7/\text{T}$ | $\Delta B_{zc}\times 10^7/\text{T}$ | $\Delta B_{zd}\times 10^7/\text{T}$ | $\Delta B_{zc}\times 10^7/\text{T}$ |
| 64                    | 122.2                               | 118.0                               | 55.1                                | 60.1                                | 34.1                                | 32.1                                | 20.2                                | 17.2                                |
| 128                   | 242.7                               | 236.0                               | 126.2                               | 120.2                               | 60.3                                | 64.2                                | 31.4                                | 34.4                                |
| 192                   | 360.4                               | 354.1                               | 190.3                               | 180.3                               | 100.4                               | 96.4                                | 54.6                                | 51.7                                |
| 256                   | 461.9                               | 472.1                               | 245.6                               | 240.3                               | 132.5                               | 128.5                               | 64.9                                | 68.9                                |
| 320                   | 590.1                               | 590.1                               | 300.4                               | 300.4                               | 160.6                               | 160.6                               | 86.1                                | 86.1                                |

分别计算 $L$ 为280、300、320、340 mm处的 $\sigma_N$ 与 $B_N$ ,并进行拟合.图14为钢筋模型的 $B_N-\sigma_N$ 拟合直线.其关系方程 $B_N=1.000\sigma_N$ ,线性回归的决定系数 $R^2=0.99$ .将图14中的 $B_N-\sigma_N$ 拟合直线与图11中的 $B_N-\sigma_N$ 拟合直线进行对比后发现,钢筋模型的仿真分析与试验

结果相吻合,两者的比例关系相一致.由此表明,在波动应力作用下,钢筋的内部应力变化率与外部漏磁强度变化率存在对等关系,可以根据漏磁强度法向分量的变化量来量化表征出钢筋应力状态的波动区间,以实现钢筋应力水平的有效检测.

图14 钢筋模型的  $B_N$ - $\sigma_N$  拟合直线Fig. 14  $B_N$ - $\sigma_N$  fitted straight line for steel bar model

## 4 结论

(1) 轴向拉伸加载过程中,随着应力的增大,钢筋试件表面的漏磁强度法向分量  $B_z$  曲线围绕钢筋扫描区间中点逆时针旋转. 提高高度 20、40 mm 情况下钢筋试件漏磁强度百分比分别为 87.5%、65.8%. 降低提高高度可以扩大  $B_z$  曲线的分布区间,有利于提高自发漏磁检测方法的精准度与灵敏度.

(2) 反复拉伸加载卸载过程中,钢筋试件的应力-应变( $\sigma$ - $\epsilon$ )与  $B_z$ - $\epsilon$  曲线均产生往复循环, $\sigma$  与  $B_z$  均具备可逆性,且应变幅  $\sigma_i$  与漏磁变化量  $\Delta B_z$  呈正相关. 而  $\sigma_i$  的增大促使  $B_z$ - $\epsilon$  曲线的线性斜率绝对值  $K$  减小,曲线下降坡度减小,漏磁强度变化速率减弱.

(3) 波动应力作用下,钢筋试件的  $\sigma$  与  $B_z$  的波动周期相同,但波动方向相反.  $\sigma_i$  与  $\Delta B_z$  呈正相关,且不同拉伸阶段下  $\sigma_i$  与  $\Delta B_z$  的比例关系相一致,整体相对偏差率小于 9.40%. 钢筋试件的“应力变化参量” $\sigma_N$  与“漏磁强度分量” $B_N$  具有线性关系,线性斜率接近于 1.000,线性回归的决定系数达到 0.99,其拉伸应力变化率与漏磁强度变化率相互对等. 因此,依据漏磁强度法向分量的变化能够定量表征钢筋内部应力的波动幅值.

## 参考文献:

- [1] 高国旗,陈达章,王顺风,等. 车桥耦合振动对钢纤维与磷酸镁水泥砂浆界面黏结性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(4): 353-359.  
GAO Guoqi, CHEN Dazhang, WANG Shunfeng, et al. Effect of vehicle-bridge coupled vibration on interface bond performance between steel fiber and magnesium phosphate cement mortar[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4): 353-359. (in Chinese)
- [2] 蔡元奇,张悦,石祥宇,等. 电阻应变片原位温度补偿方法[J]. 武汉大学学报, 2020, 53(7): 591-596.  
CAI Yuanqi, ZHANG Yue, SHI Xiangyu, et al. Method of in-situ temperature compensation for resistance strain gauge[J].

Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(7): 591-596. (in Chinese)

- [3] 许国东,相秋迪,赵广志,等. X射线数字成像技术检测灌浆套筒施工质量的试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(9): 6, 11-15.  
XU Guodong, XIANG Qiudi, ZHAO Guangzhi, et al. Experimental study on construction quality of grouting sleeve detected by X-ray digital radiography technology[J]. Building Structure, 2020, 50(9): 6, 11-15. (in Chinese)
- [4] 商峰,周虎. 基于早龄期超声测试的堆石混凝土工程质量检测[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(2): 214-220.  
SHANG Feng, ZHOU Hu. Construction quality assessment of rock filled concrete based on early age ultrasonic wave test[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(2): 214-220. (in Chinese)
- [5] 周建庭,龚娅,赵瑞强,等. RC梁四点弯曲加载应力自漏磁信号检测试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(12): 46-56.  
ZHOU Jianting, GONG Ya, ZHAO Ruiqiang, et al. Stress self-leakage signal detection test of RC beam under four-point bending[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(12): 46-56. (in Chinese)
- [6] 石明江,陈瑞,冯林. 基于磁记忆的金属管道缺陷检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 44-53.  
SHI Mingjiang, CHEN Rui, FENG Lin. Metal pipeline defect detection method based on magnetic memory[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 44-53. (in Chinese)
- [7] RUCKI M, GOCKIEWICZ A, SZMIATA T. Evaluation of the residual magnetic field measurement system for early identification of railway defects[J]. Metrology and Measurement Systems, 2019, 26(3): 687-696.
- [8] 卢兵兵,王海斗,董丽虹,等. 金属磁记忆疲劳损伤检测的应用现状及发展前景[J]. 材料导报, 2021, 35(7): 7139-7144.  
LU Bingbing, WANG Haidou, DONG Lihong, et al. Application status and development prospect of metal magnetic memory fatigue damage detection[J]. Materials Reports, 2021, 35(7): 7139-7144. (in Chinese)
- [9] REN S K, REN X. Studies on laws of stress-magnetization based on magnetic memory testing technique[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, 449: 165-171.
- [10] 喻宣瑞,姚国文,钟浩,等. 交变荷载和氯盐环境耦合作用下钢筋绞线的腐蚀特征及力学性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6): 1315-1321.  
YU Xuanrui, YAO Guowen, ZHONG Hao, et al. Corrosion characteristics and mechanical properties of steel strands under coupling effect of alternating load and chloride salt environment[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6): 1315-1321. (in Chinese)
- [11] SHI P, BAI P, CHEN H E, et al. The magneto-elastoplastic coupling effect on the magnetic flux leakage signal[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 504: 166669.
- [12] HUANG H H, JIANG S L, WANG Y, et al. Characterization of spontaneous magnetic signals induced by cyclic tensile stress in crack propagation stage[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2014, 365: 70-75.

- [13] 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): 454-462.  
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): 454-462. (in Chinese)
- [14] WANG H P, DONG L H, WANG H D, et al. Effect of tensile stress on metal magnetic memory signals during on-line measurement in ferromagnetic steel[J]. NDT & E International, 2021, 117: 102378.
- [15] 杨茂, 周建庭, 张洪, 等. 混凝土内部钢筋锈蚀的磁记忆检测[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2): 345-350.  
YANG Mao, ZHOU Jianting, ZHANG Hong, et al. Magnetic memory detection of rebar corrosion in concrete[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2): 345-350. (in Chinese)
- [16] SHI P P, ZHANG P C, JIN K, et al. Thermo-magneto-elastoplastic coupling model of metal magnetic memory testing method for ferromagnetic materials[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 123(14): 145102.
- [17] GONG Y, ZHOU J T, ZHAO R Q, et al. Study on stress measurement for steel bars inside RC beams based on self-magnetic flux leakage effect[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, 562: 169784.
- [18] JILES D. Theory of the magnetomechanical effect[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1995, 28(8): 1537-1546.
- [19] 李一, 任尚坤. 铁磁试件静载拉伸时应力磁化的反转效应[J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(3): 30-33.  
LI Yi, REN Shangkun. Magnetization reversal of ferromagnetic specimens under the static tension conditions[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 25(3): 30-33. (in Chinese)
- [20] 任尚坤, 周莉, 付任珍. 铁磁试件应力磁化过程中的磁化反转效应[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(12): 48-52.  
REN Shangkun, ZHOU Li, FU Renzhen. Magnetizing reversion effect of ferromagnetic specimens in process of stress-magnetizing[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2010, 22(12): 48-52. (in Chinese)