

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.003

张军,金伟良,张凯,等.混凝土结构内锈蚀钢筋的疲劳研究综述[J].水利水运工程学报,2019(6):22-30.(ZHANG Jun, JIN Weiliang, ZHANG Kai, et al. A review on fatigue research of corroded reinforcing steel bars inside reinforced concrete structures [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6): 22-30. (in Chinese))

混凝土结构内锈蚀钢筋的疲劳研究综述

张军¹,金伟良²,张凯^{1,2},毛江鸿¹,李强¹

(1. 浙江大学 宁波理工学院,浙江 宁波 315100; 2. 浙江大学 结构工程研究所,浙江 杭州 310058)

摘要: 腐蚀环境和反复荷载共同作用下混凝土结构的疲劳问题愈发突出,特别是混凝土结构在荷载作用下产生和发展的裂缝为腐蚀介质提供了快速传输通道,引起开裂区域钢筋局部坑蚀。动态荷载作用下疲劳裂纹在蚀坑底部形成并扩展,导致钢筋脆性断裂,进而导致混凝土构件的疲劳失效。回顾并分析了混凝土裂缝对钢筋疲劳性能的影响、坑蚀钢筋疲劳性能研究进展和基于弱磁效应的钢筋疲劳研究,指出掌握坑蚀钢筋的裂纹扩展行为是进行服役混凝土结构疲劳寿命预测的关键。弱磁效应能够实时地表征锈蚀钢筋的疲劳断裂行为,建立基于弱磁理论的锈蚀钢筋等效裂纹扩展长度和应力强度因子变幅表征方法,是服役钢筋混凝土结构疲劳寿命预测的一个创新方法。

关键词: 混凝土结构; 锈蚀钢筋; 钢筋疲劳; 弱磁理论; 寿命预测

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2019)06-0022-09

我国公路/铁路桥梁、码头等混凝土结构基础设施大都面临腐蚀环境作用下的钢筋锈蚀问题和反复荷载作用下的疲劳问题,两者共同作用下结构服役寿命大大缩短已得到国内外学术界和工程界的广泛认识^[1-3]。大量关于锈蚀钢筋混凝土梁疲劳性能的试验发现,其疲劳失效常由钢筋的疲劳断裂控制^[3-6]。其中,弯曲疲劳梁的破坏往往由受拉纵筋的疲劳断裂所致,随着纵筋锈蚀程度增加,梁的疲劳寿命急剧缩短。而在服役混凝土结构中,箍筋锈蚀相比纵筋更为严重,箍筋也可能发生疲劳断裂,进而导致梁发生剪切疲劳破坏^[7]。因此,锈蚀钢筋的疲劳研究是混凝土结构在腐蚀环境和反复荷载共同作用下服役性能评估和预测的关键。

由于混凝土材料抗拉能力弱,荷载作用下极易产生荷载裂缝并在反复荷载作用下不断扩展,由此形成的腐蚀介质传输通道导致钢筋发生局部坑蚀^[8-9]。钢筋疲劳裂纹更易在蚀坑处形成并快速扩展,导致混凝土结构的剩余承载力、延性以及疲劳寿命严重降低。钢筋的锈蚀形貌特征是导致锈蚀钢筋力学性能退化的最主要因素^[10-12],国内外学者亦提出了质量或横截面积损失率、坑蚀系数或锈蚀不均匀系数^[13]、3D 或 XCT 扫描^[14]等指标或技术手段表征锈蚀钢筋的形貌特征。然而,上述研究均是将锈蚀钢筋从混凝土中取出,再通过试验或数值方法等分析疲劳裂纹扩展过程^[15-16]。钢筋与混凝土是协同工作的,特别是开裂区域钢筋的蚀坑不仅削弱了有效截面积,蚀坑应力集中还会加快疲劳裂纹的形成与扩展,因此,利用先进测试手段实时监测混凝土开裂区域锈蚀钢筋的关键疲劳指标是进行疲劳寿命预测的前提。

弱磁理论及方法是利用铁磁构件在地场和外应力作用下产生的弱磁信号评估损伤,由于不需要外加磁化装置而被广泛应用,包括1997年俄罗斯学者 Dubov 提出的金属磁记忆^[17]和2008年在 Nature 上报道的压磁效应^[18]。其中,金属磁记忆关注的是面信号,即损伤区域的弱磁信号分布;压磁效应关注的是点信号,即

收稿日期: 2019-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51820105012,51908496);浙江省自然科学基金资助项目(LQ19E080011);宁波市自然科学基金资助项目(2017A310313)

作者简介: 张军(1988—),男,江苏徐州人,讲师,博士,主要从事混凝土结构长期性能研究。E-mail: zj@nit.zju.edu.cn

通信作者:金伟良(E-mail: jinwl@zju.edu.cn)

靠近损伤区域固定点弱磁信号随外力的变化。近年来,金属磁记忆和压磁效应在航空航天、输油管道、海洋平台等领域已得到广泛关注与应用,用以精确表征金属疲劳损伤的发展。同时,上述技术已逐步应用于钢筋混凝土结构疲劳、钢筋锈蚀等关键指标的表征^[19-20]。锈蚀钢筋疲劳的弱磁效应具有明显的断裂力学特性,结合断裂理论掌握所测弱磁效应的物理意义,是揭示混凝土内锈蚀钢筋疲劳断裂演化规律的关键科学问题。为此,本文以环境作用和反复荷载作用下混凝土结构内部钢筋的性能演化特征为主线,首先回顾了混凝土结构内钢筋锈蚀与疲劳研究,着重分析了混凝土裂缝对钢筋疲劳性能的影响,然后综述了坑蚀钢筋疲劳研究进展,提出基于弱磁效应研究钢筋疲劳断裂的方法,最后分析了该方法需解决的关键科学问题和研究技术路线,以期为钢筋混凝土结构的疲劳研究提供一个新的方法。

1 混凝土结构内钢筋锈蚀与疲劳研究

混凝土结构的裂缝加剧钢筋的纵向不均匀锈蚀,更易引起结构的疲劳问题。陆春华等^[21]进行了受弯开裂钢筋混凝土梁的盐溶液干湿循环试验,结果表明:横向裂缝处混凝土内的氯离子含量明显增大,内部钢筋的腐蚀电位、腐蚀电流密度以及平均锈蚀率均高于无裂缝试件。Gao 等^[22]发现横向裂缝为腐蚀介质传输提供了通道,加快了钢筋局部脱钝起锈。付传清等^[23]研究了带荷载裂缝钢筋混凝土梁内钢筋的锈蚀特征,发现横向裂缝会加大该处钢筋的截面损失,通电锈蚀下横向裂缝处的钢筋会出现明显的“颈缩”现象。Mancini 等^[24]也证实在开裂处会出现锈蚀集中现象。Jaffer 等^[25]比较了盐溶液中钢筋混凝土梁在静力及疲劳加载下的性能,结果表明梁内钢筋锈蚀仅发生在混凝土开裂区域。可见,混凝土裂缝极大地降低了混凝土的抗渗性,腐蚀介质快速侵入至钢筋表面形成大阴极和小阳极,使与裂缝接壤的钢筋发生坑蚀,锈蚀程度也最严重。

循环荷载作用下混凝土梁内部锈蚀钢筋的疲劳特性与钢筋锈蚀形态、混凝土材料损伤以及界面粘结滑移损伤密切相关。首先,混凝土开裂区域钢筋承受变幅疲劳应力。牛荻涛等^[3]进行了锈蚀钢筋混凝土梁的弯曲疲劳试验,发现随着循环次数增加,锈蚀梁纵向受拉钢筋的应力上下峰值均逐渐增大,疲劳破坏形态均为主筋脆性断裂,锈蚀显著降低了梁的疲劳寿命。Zanuy 等^[26]指出受压区混凝土性能的退化导致截面应力重分布,钢筋应力增加并发生疲劳断裂。Zhang 等^[1]基于锈蚀钢筋的 S-N 曲线和 Miner 损伤累积准则并考虑构件性能退化导致的钢筋应力变幅计算梁的疲劳寿命,结果表明疲劳寿命随锈蚀率增大不断降低。其次,蚀坑导致的应力集中加快了锈蚀钢筋疲劳裂纹的形成和扩展。Bastidas 等^[27]指出如仅考虑锈蚀导致的有效截面积减小而不考虑蚀坑应力集中导致的疲劳裂纹扩展,混凝土梁的寿命预测结果偏高。Ma 等^[16]建立了应力集中系数和锈蚀率的关系式,将蚀坑等效为初始裂纹长度并建立考虑应力集中系数的应力强度因子,最后计算了混凝土梁的疲劳寿命。Sun 等^[28]也建立了最大蚀坑深度和锈蚀率的关系式,修正 Paris 公式计算锈蚀钢筋的裂纹扩展速率以提高构件疲劳寿命的预测精度。

由上述研究和分析可知,混凝土裂缝处钢筋是混凝土构件抗疲劳作用的薄弱点,是锈蚀钢筋混凝土结构疲劳研究中需重点关注的区域。基于断裂力学方法可较好地预测锈蚀钢筋的疲劳寿命,然而裂缝处钢筋坑蚀和裂纹扩展是一个时变过程,准确获取混凝土梁裂缝区域锈蚀钢筋的疲劳行为是提高寿命预测精度的关键。

2 坑蚀钢筋疲劳性能研究

S-N 曲线是表征钢筋混凝土梁疲劳寿命的重要方法,已有锈蚀钢筋疲劳性能的研究表明锈蚀率和 S-N 曲线密切相关。曹建安等^[29]率先给出了实际钢筋混凝土构件中锈蚀钢筋的 S-N 曲线,但并未引入钢筋锈蚀率(η)。Zhang 等^[30]采用平均截面积衡量的名义应力建立考虑钢筋锈蚀率的 S-N 曲线方程,发现锈蚀率越大,疲劳寿命降低越显著。李士彬等^[31-32]研究发现锈蚀钢筋的疲劳寿命随锈蚀率的增大近似按指数规律递

减。Apostolopoulos 等^[33-34]的疲劳试验结果均表明钢筋锈蚀对其疲劳寿命影响较大,但影响程度有待量化。已有研究均证实锈蚀钢筋剩余部分的材质未发生改变,不影响材料的实际强度^[35],但钢筋不均匀锈蚀现象将随着锈蚀率的增加越发显著^[36],已有锈蚀钢筋的 S-N 曲线关注的是总疲劳寿命,难以从断裂力学角度解释蚀坑对疲劳裂纹形成和扩展的影响。

坑蚀钢筋的疲劳寿命可以分为裂纹形成寿命和裂纹扩展寿命两部分,疲劳裂纹扩展可进一步分为短裂纹扩展和长裂纹扩展。由于裂纹形成寿命与总疲劳寿命相比很短,Dolley^[37]基于损伤容限思想提出了用蚀坑缺陷裂纹扩展寿命代替腐蚀构件总寿命,忽略不确定性较高的裂纹萌生寿命。蚀坑应力集中导致的不均匀应力应变场影响了疲劳短裂纹的扩展,实质上是影响了短裂纹尖端的应力场,按长裂纹扩展规律预测短裂纹扩展寿命的结果偏高。彭修宁等^[38]研究表明蚀坑越深钢筋疲劳寿命降低程度越大。Cerit 等^[15]建立了蚀坑的三维半椭球有限元模型,发现蚀坑的深宽比是影响应力集中系数的主要参数之一。卫军等^[39]基于降载勾线法研究蚀坑对钢筋疲劳断裂特性的影响,发现初始深宽比越大,裂纹扩展速率增长越快,疲劳寿命缩短越明显。可见,蚀坑深宽比决定了应力集中程度,光圆钢筋坑蚀应力集中系数约为 1.90~2.92^[40],而变形钢筋的坑蚀多发生在钢筋肋部,应力集中现象更严重导致其力学性能退化也更明显^[10]。CM-EIFS (Corrosion Modified Equivalent Initial Flaw Size) 方法是目前使用较多的锈蚀疲劳剩余寿命估算方法,是将蚀坑等效为初始裂纹,采用 Paris 或 Forman 公式等计算疲劳裂纹扩展速率^[41]。该方法另一个关键问题就是计算循环荷载作用下的应力强度因子幅值,Ma 等^[16,28]均考虑坑蚀的应力集中效应修正应力强度因子,然后计算锈蚀钢筋的裂纹扩展寿命,但未将应力集中系数对短裂纹和长裂纹扩展速率的影响区分。蚀坑形貌决定了应力应变场的不均匀程度和区域,因此钢筋坑蚀必然影响其疲劳裂纹的扩展规律。

由上述分析可知,钢筋蚀坑形貌决定了应力应变场的不均匀程度和区域,进而影响其疲劳裂纹的扩展,基于断裂力学方法计算锈蚀钢筋裂纹扩展速率应当考虑蚀坑形貌对裂纹扩展行为的影响,以准确预测疲劳寿命。

3 基于弱磁效应的钢筋疲劳研究

3.1 基于弱磁效应的疲劳研究简述

国内外已进行了大量的锈蚀钢筋疲劳试验,主要是获取 S-N 曲线。混凝土构件层面研究则主要集中在挠度、应变、裂缝等物理量的发展规律,但这些宏观指标无法反映钢筋局部的锈蚀与疲劳裂纹。材料损伤的检测评估方法如扫描电镜、X 射线衍射、超声、巴克豪森噪声及磁声发射等可获取钢筋的物理形貌,但无法检测混凝土内部钢筋的腐蚀和裂纹。金属磁记忆方法对材料内部损伤进行诊断的原理如图 1 所示:应力集中(或缺陷)部位材料表面切向磁信号达到最大值,法向磁信号过零点。该方法对微观缺陷和早期损伤敏感,探测深度大且应用便捷,国内外学者开展了大量磁场分布特征和构件损伤状态、缺陷形貌等的研究^[42-43]。Wang 等^[42]提出了基于残余磁场分布的缺陷几何特征反演方法。Bao 等^[44]研究表明表征缺陷区域的信号畸变位置和范围等可为缺陷区域形貌重构提供必要的信息。可见,弱磁信号分布特征可以表征蚀坑形貌和裂纹长度,为计算裂纹扩展至临界值时的疲劳寿命提供边界条件。

为保证总自由能极小,自然状态下钢筋内部总磁化强度为零,而外磁场和外应力会导致磁畴转动和畴壁位移,如图 2 所示。循环应力会进一步导致材料内部的滑移位错、裂纹萌生和扩展,从而改变与微细观结构并存的磁畴结构。Erber 等^[45-46]发现不同损伤程度材料的压磁-应力或应变滞回曲线存在明显差别并观察到了裂纹扩展导致的磁信号变化,压磁参数与力学参数表征的损伤累积三阶段变化规律一致。Lo 等^[47]用 Preisach 模型分析铁碳合金疲劳过程中的磁性变化,发现 B-H 滞回线、微分磁导率等也符合三阶段变化规律。金伟良等^[48-49]开展了钢筋的压磁-疲劳试验发现钢筋压磁时变曲线和滞回曲线的特征点、变幅等参数均与疲劳损伤演化规律一致,能够记录钢筋裂纹形成和扩展过程,锈蚀钢筋的磁场变幅随锈蚀率增加而增

大。疲劳过程中钢筋压磁-应力(应变)滞回曲线的三阶段演化规律分别对应疲劳裂纹形成、裂纹稳态扩展和失稳扩展,可以表征循环荷载作用下的裂纹发展。

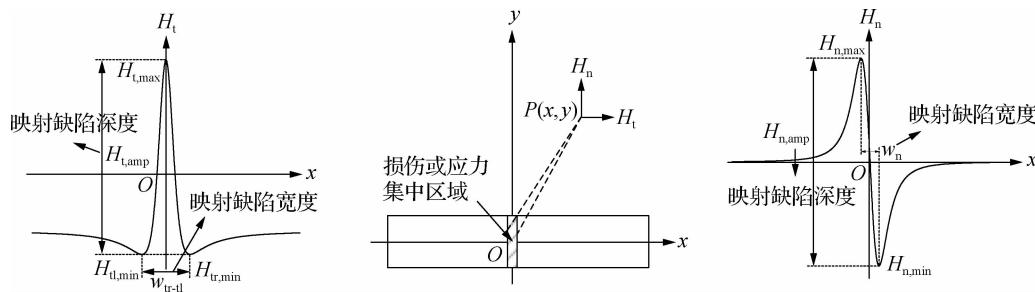


图1 损伤或应力集中区域的磁场分布(H_t 为切向磁场, H_n 为法向磁场^[44])

Fig. 1 Distribution of magnetic field in damage or stress concentration region

(H_t is tangential magnetic field, H_n is normal magnetic field^[44])

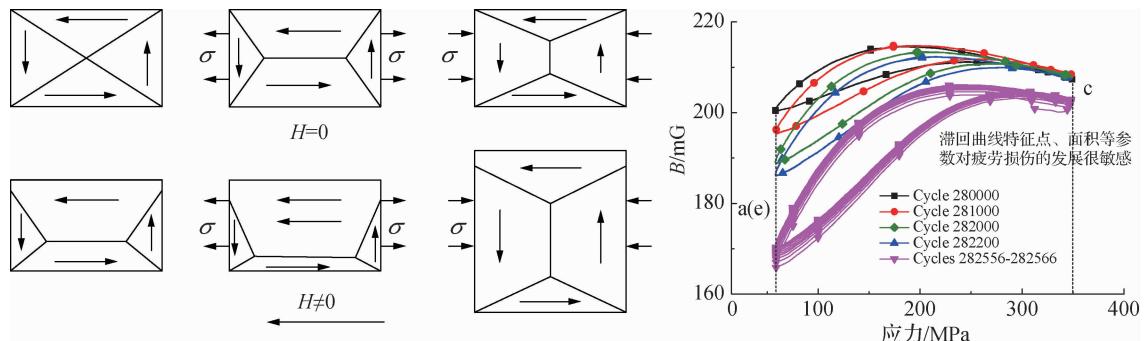


图2 在外磁场和外应力作用下的磁畴结构变化和压磁滞回曲线演化^[48]

Fig. 2 Changes of domain structure and evolution of piezomagnetic hysteresis curve under external magnetic field and external load^[48]

目前国内外学者已开展了大量关于力磁耦合效应(或磁机械效应)理论研究,关注的是均匀应力下铁磁材料整体磁性变化。Jiles 等^[50]基于接近原理和等效场理论对磁化过程中的可逆和不可逆分量分别计算,发展了目前应用最为广泛的 J-A 理论模型,但由于引入弹性仅适用于弹性阶段。此后,一些学者进行了有关塑性变形和疲劳情况下的磁特性研究,如 Sablik 等^[51]考虑塑性应变时的位错钉扎效应,修正 J-A 模型使其适用于塑性变形阶段;Xu 等^[52]假设在一个加卸载循环中位错对磁畴的钉扎系数为常数建立 J-A-F 模型,描述材料疲劳早期的磁化特性。带肋钢筋中存在的非均匀应力区、非磁性夹杂、晶界和孔洞等缺陷也有类似位错的钉扎作用,循环应力使钢筋的位错不断发展,而后微裂纹形成并互相连接形成主导裂纹,裂纹表面的形成及尖端非均匀应力均会使弱磁信号产生相应的变化,包括宏观裂纹产生的漏磁效应和不均匀应力场导致的压磁效应。已有研究在分析裂纹扩展的影响时大都使用磁偶极子模型^[17],以解释缺陷尺寸等对磁信号分布的影响,但磁偶极子模型无法考虑缺口和裂纹尖端的非均匀应力应变场。由于物理基础坚实、定义清晰,能量释放率是裂纹驱动力最根本的表征参数^[53],断裂力学理论中的应力强度因子不仅反映了裂纹尖端的应力场强度,与能量释放率也存在对应关系。压磁效应是循环加载过程中系统能量变化的磁学反映^[50],也能够表征非均匀应力应变场^[54]。

金属磁记忆能够表征钢筋的缺陷尺寸,压磁效应能够表征钢筋的疲劳损伤过程,无论从应力角度还是从能量角度出发,二者均适合于描述疲劳裂纹的扩展,需结合断裂力学掌握金属磁记忆和压磁效应等弱磁效应的物理意义,明确蚀坑和疲劳裂纹扩展对弱磁信号的影响。

3.2 基于弱磁效应的坑蚀钢筋疲劳研究分析

基于弱磁效应研究锈蚀钢筋疲劳寿命的技术路线如图 3 所示。首先研究混凝土结构内钢筋的锈蚀特性及表征方法,包括基于弱磁信号分布特征的锈蚀钢筋纵向不均匀性研究及锈蚀钢筋蚀坑的形貌重构方法研究。在此基础上,研究基于弱磁效应的坑蚀钢筋疲劳特性演化全过程表征,通过磁机械效应理论、试验和数值模拟等手段研究疲劳裂纹萌生和扩展阶段的弱磁效应演化规律。最后研究循环加载下混凝土构件内锈蚀纵筋的疲劳断裂演化过程,建立基于弱磁理论的混凝土结构疲劳寿命预测方法。

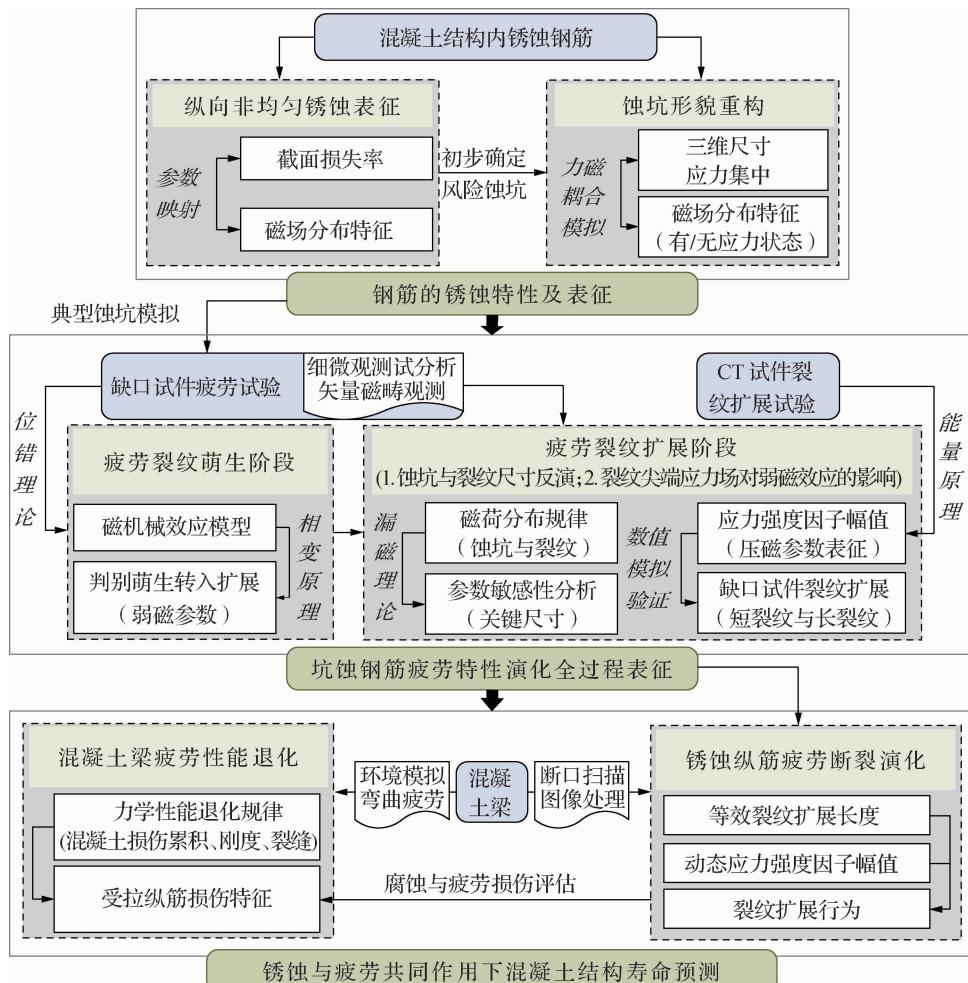


图 3 研究技术路线

Fig. 3 Studying route

Paris 公式作为广泛应用的疲劳裂纹扩展模型,能较好描述疲劳裂纹扩展,可表示为式(1),偏安全地忽略疲劳裂纹萌生寿命,式(1)两边积分并变换形式可得疲劳寿命 N_f :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

$$N_f = \int_{a_{\text{equ}}}^{a_c} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \quad (2)$$

式中: a 为裂纹长度; a_{equ} 为坑蚀钢筋疲劳的等效裂纹扩展长度; a_c 为疲劳断裂时的裂纹临界长度(可通过计算得到); N 为荷载循环次数; C 和 m 为材料疲劳裂纹扩展常数。由式(2)可知,如能基于坑蚀疲劳钢筋的弱磁信号获取其等效裂纹扩展长度 a_{equ} ,并掌握应力强度因子 ΔK 的发展规律,便能准确计算疲劳寿命。为了实现这一目的,需解决如下关键科学问题:

(1) 基于耦合磁场分布特征的蚀坑与疲劳裂纹尺寸反演方法。确定坑蚀钢筋的等效裂纹扩展长度是为剩余疲劳寿命预测提供边界条件。经受一定荷载循环次数的坑蚀钢筋已存在疲劳裂纹,其磁场分布包含了蚀坑的漏磁效应和裂纹的漏磁效应,探明蚀坑和裂纹漏磁效应对整体磁场分布参数的影响规律,进而基于磁偶极子模型实现裂纹扩展长度与蚀坑尺寸的反演是确定等效疲劳裂纹扩展长度的关键。

(2) 裂纹尖端应力场对压磁-应力滞回曲线的影响机理及表征。钢筋蚀坑形貌决定了在荷载作用下不均匀应力场的大小和区域,进而影响裂纹尖端的不均匀应力场,短/长裂纹尖端应力强度因子幅值受影响程度不同,导致蚀坑对裂纹扩展速率的影响也不同。基于能量原理探明裂纹尖端不均匀应力场致压磁效应的机理及与能量释放率的关系,进而建立压磁-应力滞回曲线参数与应力强度因子幅值的对应关系是另一关键科学问题。

4 结语

本文回顾并分析了混凝土结构内部锈蚀钢筋的疲劳研究进展,指出混凝土结构内部钢筋的疲劳行为需从结构角度出发,考虑其锈蚀行为和疲劳行为。提出基于弱磁理论的钢筋疲劳研究是服役混凝土结构疲劳性能评估和预测的一个新方法,并分析了需要解决的关键科学问题和研究技术路线,主要结论如下:

(1) 混凝土裂缝导致钢筋局部锈蚀加大,显著降低混凝土结构的疲劳寿命,目前尚无有效方法检测评估钢筋的腐蚀和疲劳裂纹,服役混凝土结构的疲劳寿命预测需考虑内部钢筋的锈蚀及疲劳裂纹扩展特征。

(2) 弱磁检测方法能够实时地表征锈蚀钢筋的疲劳断裂行为,应结合断裂力学掌握金属磁记忆和压磁效应等弱磁效应的物理意义,解决两个关键科学问题:基于耦合磁场分布特征的蚀坑与疲劳裂纹尺寸反演方法以及裂纹尖端应力场对压磁-应力滞回曲线的影响机理及表征。

(3) 国内外对于基于弱磁效应的钢筋疲劳研究均处于起步阶段,弱磁效应对钢筋疲劳损伤敏感,有望发展为服役混凝土结构内钢筋锈蚀和疲劳损伤的无损检/监测评估方法,为混凝土结构疲劳性能评估和寿命预测提供支持。

参考文献:

- [1] ZHANG W P, YE Z W, GU X L, et al. Assessment of fatigue life for corroded reinforced concrete beams under uniaxial bending [J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(7): 04017048.
- [2] 缪昌文,顾祥林,张伟平,等.环境作用下混凝土结构性能演化与控制研究进展[J].建筑结构学报,2019,40(1): 1-10. (MIAO Changwen, GU Xianglin, ZHANG Weiping, et al. State-of-the-art on performance evolution and control of concrete structures subjected to environmental actions[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(1): 1-10. (in Chinese))
- [3] 牛荻涛,苗元耀.基于车辆荷载的锈损公路桥梁疲劳性能试验研究[J].土木工程学报,2018,51(3): 1-10. (NIU Ditao, MIAO Yuanyao. Experimental study on fatigue performance of corroded highway bridges based on vehicle loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(3): 1-10. (in Chinese))
- [4] CHANG T S, KESLER C E. Fatigue behavior of reinforced concrete beams [J]. ACI Structural Journal, 1958, 55 (8): 245-254.
- [5] CHEN C, CHENG L J. Cohesive model-based approach for fatigue life prediction of reinforced-concrete structures strengthened with NSM FRP[J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 18(2): 04013042.
- [6] SCHLÄFLI M, BRÜHWILER E. Fatigue of existing reinforced concrete bridge deck slabs[J]. Engineering Structures, 1998, 20(11): 991-998.
- [7] LI C Q, MELCHERS R E. Time-dependent risk assessment of structural deterioration caused by reinforcement corrosion[J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(5): 754-762.
- [8] PICANDET V, KHELIDJ A, BELLEGOU H. Crack effects on gas and water permeability of concretes[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(10): 1551-1557.

- Research, 2009, 39(6): 537-547.
- [9] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2014. (JIN Weiliang, ZHAO Yuxi. Durability of concrete structures [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [10] 吴庆, 袁迎曙. 锈蚀钢筋力学性能退化规律试验研究 [J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 42-47. (WU Qing, YUAN Yingshu. Experimental study on the deterioration of mechanical properties of corroded steel bars [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(12): 42-47. (in Chinese))
- [11] LU C H, YUAN S Q, CHENG P, et al. Mechanical properties of corroded steel bars in pre-cracked concrete suffering from chloride attack [J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 649-660.
- [12] EL MAY M, SAINTIER N, PALIN-LUC T, et al. Modelling of corrosion fatigue crack initiation on martensitic stainless steel in high cycle fatigue regime [J]. Corrosion Science, 2018, 133: 397-405.
- [13] STEWART M G, AL-HARTHY A. Pitting corrosion and structural reliability of corroding RC structures: experimental data and probabilistic analysis [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2008, 93(3): 373-382.
- [14] LI D W, WEI R, DU Y G, et al. Measurement methods of geometrical parameters and amount of corrosion of steel bar [J]. Construction and Building Materials, 2017, 154: 921-927.
- [15] CERIT M, GENEL K, EKSI S. Numerical investigation on stress concentration of corrosion pit [J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(7): 2467-2472.
- [16] MA Y F, XIANG Y B, WANG L, et al. Fatigue life prediction for aging RC beams considering corrosive environments [J]. Engineering Structures, 2014, 79: 211-221.
- [17] DUBOV A A. Development of a metal magnetic memory method [J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2012, 47(11-12): 837-839.
- [18] PUTTERMAN S. A physicist links magnetism, force and fatigue [J]. Nature, 2008, 454(7202): 257.
- [19] 金伟良, 张军, 陈才生, 等. 基于压磁效应的钢筋混凝土疲劳研究新方法 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(4): 133-142. (JIN Weiliang, ZHANG Jun, CHEN Caisheng, et al. A new method for fatigue study of reinforced concrete structures based on piezomagnetism [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(4): 133-142. (in Chinese))
- [20] 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))
- [21] 陆春华, 金伟良, 延永东. 氯盐干湿环境下受弯横向裂缝对钢筋混凝土耐久性影响 [J]. 海洋工程, 2012, 30(1): 131-136, 144. (LU Chunhua, JIN Weiliang, YAN Yongdong. Influence of transverse cracks on durability of RC member under chloride dry and wet cycles [J]. The Ocean Engineering, 2012, 30(1): 131-136, 144. (in Chinese))
- [22] GAO Z C, LIANG R Y, PATNAIK A K. Effects of sustained loading and pre-existing cracks on corrosion behavior of reinforced concrete slabs [J]. Construction and Building Materials, 2016, 124: 776-785.
- [23] 付传清, 何家豪, 金贤玉, 等. 带横向荷载裂缝钢筋混凝土梁的钢筋锈蚀形态研究 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1): 123-131. (FU Chuanqing, HE Jiahao, JIN Xianyu, et al. Corrosion pattern of rebar in RC beam with loading transverse cracks [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(1): 123-131. (in Chinese))
- [24] MANCINI G, TONDOLO F, IULIANO L, et al. Local reinforcing bar damage in r. c. members due to accelerated corrosion and loading [J]. Construction and Building Materials, 2014, 69: 116-123.
- [25] JAFFER S J, HANSSON C M. The influence of cracks on chloride-induced corrosion of steel in ordinary Portland cement and high performance concretes subjected to different loading conditions [J]. Corrosion Science, 2008, 50(12): 3343-3355.
- [26] ZANUY C, ALBAJAR L, DE LA FUENTE P. Sectional analysis of concrete structures under fatigue loading [J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(5): 667-677.
- [27] BASTIDAS-ARTEAGA E. Reliability of reinforced concrete structures subjected to corrosion-fatigue and climate change [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2018, 12(1): 10.
- [28] SUN J Z, DING Z H, HUANG Q. Corrosion fatigue life prediction for steel bar in concrete based on fatigue crack propagation and equivalent initial flaw size [J]. Construction and Building Materials, 2019, 195: 208-217.
- [29] 曹建安, 文雨松. 锈蚀钢筋的疲劳试验研究 [J]. 长沙铁道学院学报, 1998, 16(4): 15-18. (CAO Jian'an, WEN

- Yusong. Fatigue experimental study on corrosion reinforcement [J]. Journal of Changsha Railway University, 1998, 16(4) : 15-18. (in Chinese))
- [30] ZHANG W P, SONG X B, GU X L, et al. Tensile and fatigue behavior of corroded rebars [J]. Construction and Building Materials, 2012, 34 : 409-417.
- [31] 李士彬, 张伟平, 顾祥林, 等. 加速锈蚀钢筋的疲劳试验研究 [J]. 铁道学报, 2010, 32(5) : 93-97. (LI Shibin, ZHANG Weiping, GU Xianglin, et al. Experimental study on fatigue properties of corrosion-accelerated steel bars [J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(5) : 93-97. (in Chinese))
- [32] 罗小勇, 欧阳祥森, 周正祥, 等. 锈蚀钢筋轴向拉伸疲劳试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6) : 964-970. (LUO Xiaoyong, OUYANG Xiangsen, ZHOU Zhengxiang, et al. Axial tensile fatigue properties of artificially corroded steel bars [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(6) : 964-970. (in Chinese))
- [33] APOSTOLOPOULOS C A, PAPADOPOULOS M P. Tensile and low cycle fatigue behavior of corroded reinforcing steel bars S400 [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(4) : 855-864.
- [34] HAWILEH R A, ABDALLA J A, AL TAMIMI A, et al. Behavior of corroded steel reinforcing bars under monotonic and cyclic loadings [J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2011, 18(3) : 218-224.
- [35] GU X L, GUO H Y, ZHOU B B. Corrosion non-uniformity of steel bars and reliability of corroded RC beam [J]. Engineering Structures, 2018, 167 : 188-202.
- [36] 曲福来, 刘桂荣, 赵顺波, 等. 基于长度表征不均匀锈蚀钢筋力学性能研究 [J]. 建筑材料学报, 2016, 19(3) : 566-570. (QU Fulai, LIU Guirong, ZHAO Shunbo, et al. Mechanical properties of non-uniformly corroded steel bars based on length characterization [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(3) : 566-570. (in Chinese))
- [37] DOLLEY L W. The effect of pitting corrosion on fatigue life [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2000, 23(7) : 555-560.
- [38] 彭修宁, 韦斌凝, 薛建阳. 产生坑蚀后建筑用钢筋 S-N 曲线中 C 参数劣化规律的研究 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2009, 41(5) : 627-630, 662. (PENG Xiuning, WEI Binning, XUE Jianyang. Study on the deterioration of parameter C in S-N curve of steel bars with corrosionpits used in construction [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2009, 41(5) : 627-630, 662. (in Chinese))
- [39] 卫军, 刘康, 张依如, 等. 钢筋蚀坑对其疲劳断裂特性的影响 [J]. 建筑材料学报, 2018, 21(5) : 749-753, 760. (WEI Jun, LIU Kang, ZHANG Yiru, et al. Effect of corrosion pits on fatigue and fracture properties of steel bars [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(5) : 749-753, 760. (in Chinese))
- [40] GUO W, SHEN H, LI H. Stress intensity factors for elliptical surface cracks in round bars with different stress concentration coefficient [J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(8) : 733-741.
- [41] VAN DER WALDE K, HILLBERRY B M. Characterization of pitting damage and prediction of remaining fatigue life [J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(1) : 106-118.
- [42] YAO K, SHEN K, WANG Z D, et al. Three-dimensional finite element analysis of residual magnetic field for ferromagnets under early damage [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2014, 354 : 112-118.
- [43] LIU B, HE Y Y, ZHANG H, et al. Study on characteristics of magnetic memory testing signal based on the stress concentration field [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2017, 11(1) : 2-8.
- [44] BAO S, FU M L, LOU H J, et al. Defect identification in ferromagnetic steel based on residual magnetic field measurements [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, 441 : 590-597.
- [45] ERBER T, GURALNICK S A, DESAI R D, et al. Piezomagnetism and fatigue [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1997, 30(20) : 2818-2836.
- [46] GURALNICK S A, BAO S, ERBER T. Piezomagnetism and fatigue: II [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(11) : 115006.
- [47] LO C C H, TANG F, BINER S B, et al. Effects of fatigue-induced changes in microstructure and stress on domain structure and magnetic properties of Fe-C alloys [J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(9) : 6520-6522.
- [48] 张军, 金伟良, 毛江鸿. 基于压磁效应的钢筋疲劳损伤试验研究 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(9) : 1681-1687. (ZHANG Jun, JIN Weiliang, MAO Jianghong. Experimental study on steel bars' fatigue damage based on

- piezomagnetism [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(9): 1681-1687. (in Chinese))
- [49] 金伟良, 周峥栋, 张军, 等. 基于动态压磁的锈蚀钢筋疲劳特性的试验研究 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(2): 225-230, 272. (JIN Weiliang, ZHOU Zhengdong, ZHANG Jun, et al. Experimental research on fatigue properties of corroded steel bars based on dynamic piezomagnetism [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(2): 225-230, 272. (in Chinese))
- [50] JILES D C, ATHERTON D L. Theory of ferromagnetic hysteresis [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1986, 61(1-2): 48-60.
- [51] SABLICK M J, RIOS S, LANDGRAF F J G, et al. Modeling of sharp change in magnetic hysteresis behavior of electrical steel at small plastic deformation [J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(10): 10E518.
- [52] XU M X, XU M Q, LI J W, et al. Metal magnetic memory field characterization at early fatigue damage based on modified Jiles-Atherton model [J]. Journal of Central South University, 2012, 19(6): 1488-1496.
- [53] 隋醒. 断裂力学判据的评述 [J]. 力学学报, 2016, 48(4): 741-753. (JI Xing. A critical review on criteria of fracture mechanics [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(4): 741-753. (in Chinese))
- [54] JR BROWN W F. Theory of magnetoelastic effects in ferromagnetism [J]. Journal of Applied Physics, 1965, 36(3): 994-1000.

A review on fatigue research of corroded reinforcing steel bars inside reinforced concrete structures

ZHANG Jun¹, JIN Weiliang², ZHANG Kai^{1, 2}, MAO Jianghong¹, LI Qiang¹

(1. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China; 2. Institute of Structural Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The fatigue of concrete structures under the combined action of corrosive environment and repeated loads is becoming much severer. Cracks of reinforced concrete structures are easily induced by static and cyclic loading. These compromising transmission paths for corrosive medium will result in non-uniform corrosion of reinforcing steel bars, especially etch pits. At the bottom of hazardous etch pits, fatigue cracks will form and grow under dynamic loading until brittle fracture. We reviewed and analyzed the influence of concrete cracks on the fatigue properties of steel bars, the research progress of fatigue properties of pitting corroded steel bars and the fatigue of steel bars based on weak magnetic theory. Understanding the crack propagation behavior of pitting corroded steel bars is very essential for predicting the fatigue life of concrete structures inservice. Finally, a fatigue research method based on weak magnetic field theory is proposed to characterize the fatigue fracture behavior of corroded steel bars in real time. The corresponding characterization methods of equivalent crack propagation length and stress intensity factor variation of corroded steel bars may be novel for predicting the fatigue life of reinforced concrete structures inservice.

Key words: reinforced concrete structures; corroded steel bars; steel fatigue; weak magnetic theory; life prediction