



基于3参数Weibull分布钢筋混凝土盐腐蚀环境中可靠性寿命分析

路承功 魏智强 乔宏霞 李刊

Reliability life analysis of reinforced concrete in a salt corrosion environment based on a three-parameter Weibull distribution

LU Cheng-gong, WEI Zhi-qiang, QIAO Hong-xia, LI Kan

引用本文:

路承功, 魏智强, 乔宏霞, 李刊. 基于3参数Weibull分布钢筋混凝土盐腐蚀环境中可靠性寿命分析[J]. *工程科学学报*, 2021, 43(4): 512–520. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2020.03.04.001

LU Cheng-gong, WEI Zhi-qiang, QIAO Hong-xia, LI Kan. Reliability life analysis of reinforced concrete in a salt corrosion environment based on a three-parameter Weibull distribution[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(4): 512–520. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2020.03.04.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.03.04.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

侧向冲击荷载下钢筋混凝土墩柱的性能

Performance of reinforced concrete pier columns subjected to lateral impact

工程科学学报. 2019, 41(3): 408 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.03.015>

全风向来流非高斯风场风机疲劳寿命可靠性分析

Reliability analysis of the fatigue life of wind turbines under a non-Gaussian wind field with a full-direction inflow

工程科学学报. 2017, 39(9): 1453 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.09.020>

石膏围岩隧道衬砌结构破坏模式及时变可靠度模型

Failure mode and time-dependent reliability model of tunnel lining structure built in gypsum rock

工程科学学报. 2017, 39(11): 1626 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.11.003>

组合式钢框架内填预制RC墙结构静力性能有限元分析

Finite element analysis of the static behavior of steel frames with combined precast reinforced concrete infill wall structures

工程科学学报. 2017, 39(11): 1753 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.11.019>

基于粒子群最大似然估计的焊缝早期隐性损伤磁记忆精确定位模型

MMM accurate location model of early hidden damage in welded joints based on PSO and MLE

工程科学学报. 2017, 39(10): 1559 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.10.015>

装配对典型螺栓/螺母紧固件盐雾环境腐蚀行为的影响

Influence of assembly on corrosion behaviors of bolt/nut connections in a salt-spray environment

工程科学学报. 2018, 40(2): 217 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.02.012>

基于 3 参数 Weibull 分布钢筋混凝土盐腐蚀环境中可靠性寿命分析

路承功¹⁾, 魏智强²⁾, 乔宏霞^{1,3)}✉, 李 刊¹⁾

1) 兰州理工大学土木工程学院, 兰州 730050 2) 兰州理工大学理学院, 兰州 730050 3) 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 兰州 730050

✉通信作者, E-mail: qiaohx7706@163.com

摘 要 为研究钢筋混凝土在耦合盐环境中的腐蚀劣化规律及寿命分布, 将钢筋混凝土试件置于 $0.32 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 和 $0.4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MgSO_4 盐溶液中, 利用电化学工作站定期无损检测, 以极化曲线、交流阻抗图谱及电化学参数指标进行耐久性分析, 选择 3 参数 Weibull 进行可靠性建模, 通过 Anderson-Darling 法 (A-D) 进行先验假设检验, 采用相关系数优化法 (CCOM)、极大似然法 (MLM) 及矩估计法 (MEM) 进行参数估计, 综合可靠度曲线、密度曲线、失效率曲线对钢筋混凝土在氯盐、硫酸盐、镁盐腐蚀环境中的寿命进行分析, 研究表明: 腐蚀离子综合作用下, 极化曲线逐渐向腐蚀电流密度增大和负电位方向移动, 交流阻抗图谱不断左移并向阻抗实部收缩, 钢筋锈蚀发生的阻力逐渐减小, 概率逐渐增大。可靠性寿命曲线初期保持不变, 后期加速下降, 密度曲线呈单峰对称状, 失效率曲线初始基本保持不变, 后期线性增加。3 种参数估计方法中, CCOM 和 MLM 参数估计值相近且稳定准确, 所得可靠性寿命曲线相似, MEM 参数估计值误差较大, 对于钢筋混凝土加速试验得到的小样本失效数据建议用 CCOM 和 MLM 进行参数估计, 并进行可靠性寿命分析。C35 钢筋混凝土在硫酸镁及氯化钠腐蚀环境中的可靠性寿命周期约为 760 d。

关键词 钢筋混凝土; 3 参数 Weibull; 可靠性寿命; 极大似然法; 相关系数优化法; 矩估计

分类号 TU528.1

Reliability life analysis of reinforced concrete in a salt corrosion environment based on a three-parameter Weibull distribution

LU Cheng-gong¹⁾, WEI Zhi-qiang²⁾, QIAO Hong-xia^{1,3)}✉, LI Kan¹⁾

1) School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2) School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

3) Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

✉ Corresponding author, E-mail: qiaohx7706@163.com

ABSTRACT To study the corrosion law and life distribution of reinforced concrete in a coupled salt environment, the reinforced concrete specimens were placed in $0.32 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl and $0.4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MgSO_4 salt solutions. The performance of reinforced concrete was tested regularly using an electrochemical workstation. The durability was analyzed through a polarization curve, an AC impedance spectrum, and electrochemical parameters. A three-parameter Weibull distribution was selected for reliability modeling, and a prior false test was performed by the Anderson-Darling (A-D) method. The parameters were estimated by the correlation coefficient optimization method (CCOM), maximum likelihood method (MLM), and moment estimation method (MEM). The reliability curve, density curve,

收稿日期: 2020-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51168031, 51868044); 中铁一勘院科研开发基金资助项目 (13-24-01); 兰州理工大学红柳一流学科建设计划资助项目

and failure rate curve were each used to analyze the life of reinforced concrete in chloride, sulfate, and magnesium-based corrosion environments. Results show that under the combined action of corrosion ions, the polarization curve gradually moves toward increasing corrosion current density and negative potential, and the AC impedance spectrum moves to the left and shrinks to the real part of the impedance. The resistance of steel bar corrosion gradually decreases whereas the probability gradually increases. The reliability curve is unchanged at the initial stage and rapidly decreases at the later stage. The density curve is symmetric with a single peak, and the failure rate curve remains unchanged at the initial stage and increases linearly at the later stage. Among the three-parameter estimation methods, CCOM and MLM parameter estimation values are similar, stable, and accurate, and the obtained reliability curves are similar. It is suggested that CCOM and MLM should be used for parameter estimation and reliability analysis of small sample failure data that is obtained from an accelerated test of reinforced concrete. The reliability life of C35 reinforced concrete in magnesium sulfate and sodium chloride corrosion environments is about 760 d.

KEY WORDS reinforced concrete; three-parameter Weibull; reliability life; maximum likelihood method; correlation coefficient optimization method; moment estimation

钢筋混凝土结构在实际服役环境中受到各种因素的综合作用,其耐久性能不断劣化,服役寿往往达不到设计寿命就过早的失效,造成巨大经济损失的同时,还需要在后期投入更高的加固维修费用,也给使用者带来很大的安全危机^[1].尤其我国西北内陆地区,土壤中腐蚀离子多、含量高,使该地区混凝土结构经受着更为严重的腐蚀,已经引起广大工程师和科研工作者极大的关注^[2-3].

刘赞群等^[4]研究者设计了 3 种温度、湿度不同的环境,将水泥净浆试件半浸泡于质量分数 5% 硫酸钠溶液中,通过 X 射线衍射、热重分析仪等微观手段,对钙矾石和石膏等腐蚀产物进行定量分析,指出化学侵蚀是导致半浸泡混凝土水分蒸发区破坏的主要原因.朱健健等^[5]则对 NaCl-Na₂SO₄ 复合盐环境进行半浸泡机理分析,研究表明硫酸盐单一环境中,未浸泡区混凝土失效机理为物理侵蚀,复合盐环境中高浓度 NaCl 的存在抑制了 Na₂SO₄ 的物理侵蚀.姚明博与李镜培^[6]结合地下混凝土结构实际服役环境,研究了水压力和硫酸盐共同作用对侵蚀速率的影响,并建立了综合水灰比、溶液浓度等多重因素在内的侵蚀模型.牛荻涛、赵高文等研究者在腐蚀离子侵蚀的基础上,充分考虑了干湿循环作用,对硫酸盐-干湿循环复合作用下的混凝土本构关系,以及硫酸盐-氯盐-干湿循环侵蚀下的扩散规律进行了研究,使混凝土在腐蚀环境中的侵蚀劣化机理、规律进一步明确^[7-9].

在揭示机理及退化规律的同时,部分学者也开始从耐久性退化过程着手,寻求劣化与时间的定量关系,进而对混凝土寿命进行预测^[10-12].然而当前对钢筋混凝土耐久性劣化的量化研究多基于 Fick 第二定律,通过氯盐扩散模型进而得到混

凝土结构的寿命,为耐久性设计提供了量化支撑.作为一种能够将产品性能与其失效时间量化的分布函数,Weibull 分布在电子元件、军工武器、机械设备等产品的可靠性寿命分析方面被广泛应用^[13-15],而在钢筋混凝土耐久性能与可靠性寿命的量化方面却鲜有报道.尤其是 3 参数 Weibull 分布,由于参数估计的复杂性,在钢筋混凝土可靠性寿命分析方面更少.基于此本文以 SO₄²⁻、Cl⁻ 和 Mg²⁺ 的耦合盐溶液模拟钢筋混凝土在盐渍土中的腐蚀环境,在耐久性分析的基础上得到失效数据,利用 3 参数 Weibull 分布对钢筋混凝土寿命进行可靠性分析,为耐久性评估及寿命预测提供必要的理论支撑.

1 试验过程及方案设计

兰州地处西北内陆,是我国盐渍土广泛分布的地区之一,其土壤及地下水中 SO₄²⁻、Cl⁻ 和 Mg²⁺ 等腐蚀性离子含量高,是造成该地区钢筋混凝土耐久性快速劣化的重要原因.基于此,通过对兰州地铁 1 号线 20 余个站台地下水、土壤现场调研和勘察取样,同时考虑试验方便性和周期性,在地下水和土壤腐蚀离子最高含量的基础上配置 10 倍浓度的耦合盐溶液对钢筋混凝土进行耐久性试验,耦合盐浓度为 0.32 mol·L⁻¹ NaCl 和 0.4 mol·L⁻¹ MgSO₄. 为避免长期浸泡致使溶液浓度降低,每隔 30 d 置换一次盐溶液.温度对离子侵蚀速率也有较大影响,为最大限度降低温度变化对试验结果的影响,将浸泡有钢筋混凝土试件的试验箱置于标准养护室中.钢筋混凝土试件尺寸为 100 mm³ 立方体,钢筋位于试件最中心,为方便耐久性检测和避免钢筋在养护室标准养护时锈蚀,在裸露钢筋处用铜线缠绕并引出约 100 mm 长度,然后将环

氧树脂涂抹均匀. 采用 C35 强度等级混凝土, 成型钢筋混凝土所用配合比及混凝土相关物理性能如表 1 所示, 24 h 后拆模后置于标准养护室养护, 其中强度为混凝土标准养护 28 d 所测强度, 水泥及粉煤灰化学成分如表 2 所示. 为避免钢筋混凝土在养护时就发生锈蚀, 同时考虑后期电化学测试

方便, 标准养护之前在裸露钢筋处用铜线缠绕, 并用环氧树脂涂抹, 从而阻隔水分等介质与钢筋的直接接触. 每隔 90 d 采用电化学工作站进行无损检测. 电化学工作站采用德国 Zahner 公司生产的 ZENNIUM 高精度工作站, 测试采用经典三电极测试体系, 如图 1 所示.

表 1 混凝土配合比设计

Table 1 Concrete mix design

Cement	Fly ash	Aggregate	Sand	Water	Corrosion inhibition	Water-binder ratio	Water reducer	Compressive strength/MPa	Slump/mm
300	90	1153	621	148.2	36	0.38	1.8	39.6	180

表 2 P.O 42.5 水泥及粉煤灰化学成分(质量分数)

Table 2 Chemical composition of P.O 42.5 cement and fly ash %

Raw materials	Ignition loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
Cement	1.62	26.38	9.61	4.34	50.09	3.16	2.01
Fly ash	5.4	44.36	25.13	12.64	11.94	0.82	1.23

以试件中钢筋作为工作电极, 不锈钢片为辅助电极, 饱和甘汞电极为参比电极. 试验时将试件置于金属屏蔽箱中, 并将电极电缆线的接地端与屏蔽箱相连, 以防止外界空间电场信号的干扰. 极化曲线测试时钢筋的扫描范围为相对电位 -0.1 ~

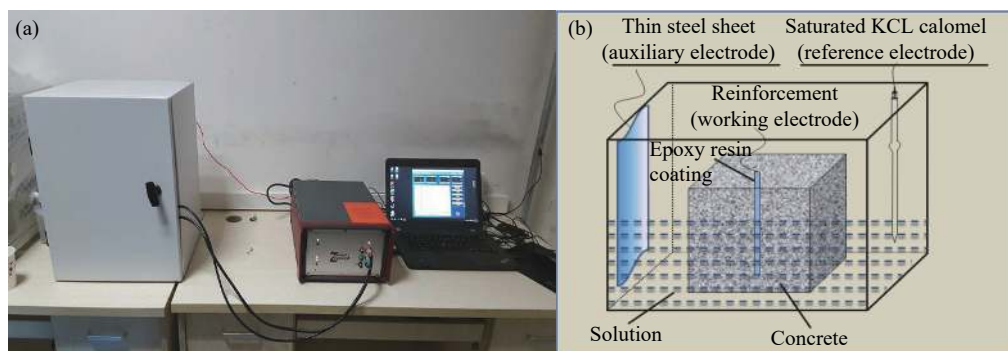


图 1 电化学测试及三电极体系图. (a) 电化学现场测试图; (b) 三电极体系

Fig.1 Electrochemical test and three-electrode system diagram: (a) field electrochemical test; (b) three electrode system

0.1 V, 扫描速率 0.334 mV·s⁻¹. 交流阻抗测量频率范围为 0.01 ~ 100000 Hz, 交流正弦激励信号幅值为 10 mV.

通过电化学测试得到极化曲线和交流阻抗对混凝土中钢筋锈蚀进行定性分析^[16], 在此基础上对极化曲线进行活化处理, 得到不同测试周期下钢筋腐蚀电流密度等电化学参数, 结合表 3 ~ 表 4 关于腐蚀程度与电化学参数之间的关系进行定量分析^[17-18], 表中 i_{corr} 表示腐蚀电流密度. 为更好反映钢筋混凝土在腐蚀破坏前耐久性能的劣化规律, 由耐久性退化数据得到失效数据, 选择 3 参数 Weibull 分布, 利用可靠度曲线、密度曲线、失效率曲线对钢筋混凝土试件可靠性寿命进行综合评价.

同时为分析参数估计方法对其可靠性寿命的影响, 分别选择极大似然法 (MLM)、相关系数优化法 (CCOM) 及矩估计 (MEM) 方法进行参数估计.

表 3 腐蚀电流密度与钢筋锈蚀程度的对应关系^[17]

Table 3 Corresponding relationship between corrosion current density and corrosion degree of reinforcement^[17]

$i_{corr}/(\mu A \cdot cm^{-2})$	Corrosion status
$i_{corr} < 0.2$	Passivation state
$0.2 < i_{corr} < 0.5$	Low corrosion condition state
$0.5 < i_{corr} < 1.0$	Moderate corrosion condition state
$1.0 < i_{corr} < 10$	Higher corrosion condition state
$i_{corr} > 10$	Highest corrosive condition state

2 耐久性结果分析

耦合盐溶液环境下, 钢筋混凝土体系的腐蚀劣化情况如图 2 ~ 图 4 所示. 从极化曲线图可以观察到腐蚀还未开始时阴阳两极极化曲线差异显著, 阳极极化曲线较陡, 阴极极化曲线短而平缓, 阴阳两极极化曲线极为不平衡. 说明腐蚀体系中

表 4 腐蚀电位与钢筋锈蚀程度的对应关系^[18]

Table 4 Corresponding relationship between corrosion potential and corrosion degree of reinforcement^[18]

American standard—ASTMC876		Chinese metallurgical ministry standard	
Potential range/mV	Corrosion discriminant	Potential range/mV	Corrosion discriminant
>-200	5% probability of corrosion	>-250	No rust
(-200)-(-350)	50% probability of corrosion	(-250)-(-400)	Maybe corroded
<-350	95% probability of corrosion	<-400	Rust

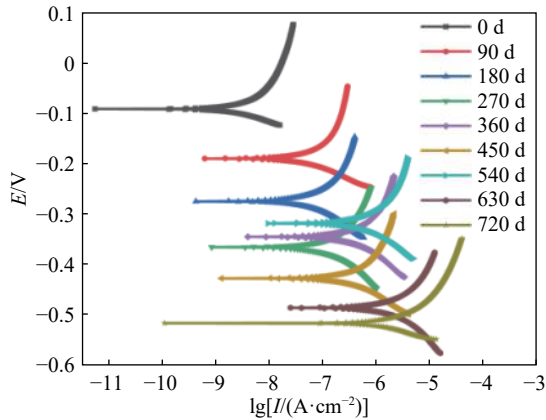


图 2 极化曲线图谱

Fig.2 Polarization curve spectrum

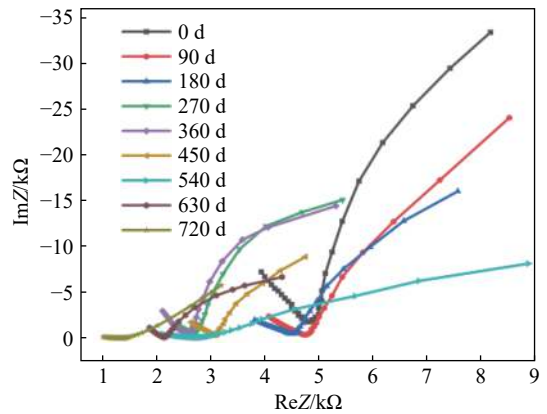


图 3 交流阻抗图谱

Fig.3 AC impedance spectrum

钢筋作为阳极溶解过程存在较大阻力, 钢筋表面钝化膜完好, 处于钝化状态. 耦合盐溶液中浸泡一定时间后, 阴阳两极的差异减弱, 逐渐转变为较为对称的平衡状态. 这是因为腐蚀离子通过混凝土孔隙进入试件内部, 并在钢筋表面富集, 活性大、半径小的氯离子极易穿过钝化膜到达钢筋表面, 钢筋发生点蚀. 阳极去极化过程所遇到的阻力大大减小, 钢筋混凝土体系的电化学回路形成, 钢筋处于腐蚀活化状态. 此时氯离子到达钢筋表面的数量, 以及氧气、水分子等介质的量共同控制反应的快慢. 腐蚀浸泡后期, 氯离子数量已经达到一定

的临界值, 整个腐蚀体系中起“搬运”作用的离子数目已经足够, 此时到达钢筋表面的氧气数量成为控制腐蚀发生的主要因素.

交流阻抗图谱能够动态跟踪钢筋混凝土体系在耦合盐溶液中的腐蚀情况. 对交流阻抗图谱进行等效, 其中高频区的容抗弧表示混凝土保护层的电阻, 低频区的容抗弧反映钢筋表面的双层电容, 其容抗弧直径越大, 钢筋表面的保护效果越好, 高频与低频交界处的电阻值, 即拐点处的电阻值反映了混凝土保护层的电阻值. 从图中观察到, 初始时刻低频容抗弧半径大, 斜率高, 表明钢筋表

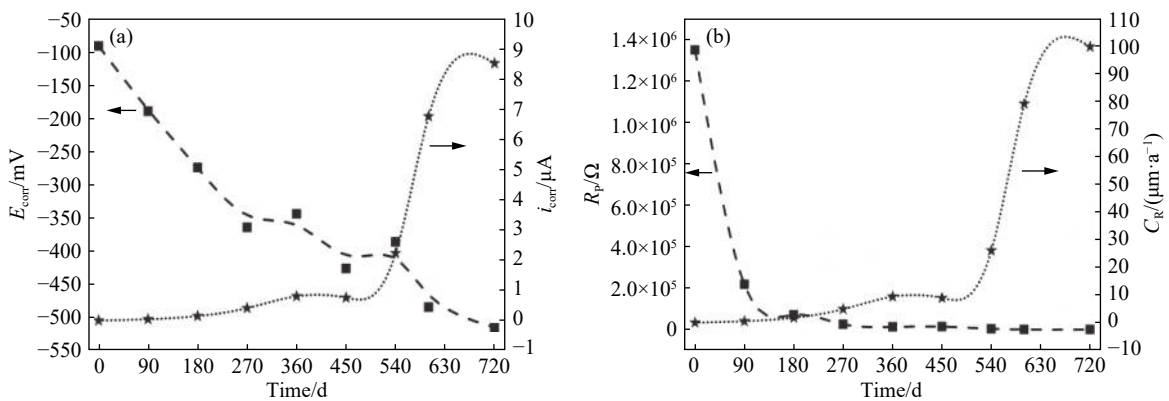


图 4 电化学参数图. (a) 腐蚀电位 E_{corr} 与腐蚀电流密度 i_{corr} ; (b) 腐蚀速率 C_R 与极化电阻 R_p

Fig.4 Electrochemical parameter diagram: (a) corrosion potential E_{corr} and corrosion current density i_{corr} ; (b) corrosion rate C_R and polarization resistance R_p

面钝化膜完好, 处于良好保护状态之中. 腐蚀开始后开始后, 低频阻抗弧开始向阻抗实部收缩, 斜率变小, 180 d 之前, 以低频容抗弧收缩为主, 并未出现较大左移. 这主要是因为混凝土中孔隙分布较为独立, 溶液中腐蚀性离子向钢筋表面的迁移较为缓慢, 虽然有数量较少的氯离子率先到达钢筋附近, 但整个钢筋混凝土体系未形成连续的离子迁移回路. 180 d 之后, 交流阻抗谱发生较大左移, 拐点位置电阻值显著减少, 低频容抗弧半径收缩, 斜率变小. 这是混凝土中的腐蚀离子开始形成连续的迁移回路, 氯离子也穿过钝化膜大量聚集在钢筋表面所致, 钢筋从钝化状态进入较为活跃的锈蚀状态. 腐蚀时间越长, 混凝土孔隙中自由离子越多, 碱性环境减弱, 电荷迁移更加顺畅, 钢筋锈蚀更加严重. 及至 720 d 时, 拐点位置最靠左, 斜率最小, 钢筋混凝土体系腐蚀加剧.

由极化曲线和交流阻抗图谱得到的腐蚀电流密度等电化学参数如图 4 所示. 结合表 3、表 4 可以看到, 腐蚀电流密度在 180 d 之前还未达到 $0.2 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, 表明钢筋还处于钝化状态, 180 ~ 450 d, 腐蚀电流密度有所增加, 但仍以较低的速率增加, 钢筋处于中等腐蚀状态. 随着钢筋混凝土在耦合盐溶液中浸泡时间的增加, 腐蚀离子与钢筋混凝土反应速率加快, 处于较高腐蚀状态. 从腐蚀电位的角度看, 180 d 之前, 腐蚀发生的概率极低, 钢筋可判定为未发生锈蚀. 180 ~ 540 d 期间, 腐蚀电位虽然在个别时间发生短暂正移, 但基本处于较为活性的腐蚀状态, 锈蚀发生概率有所增加. 540 ~ 720 d, 电位负移较大, 超过了 -400 mV 的临界值, 可判定为腐蚀已经发生. 对比两类定量指标, 与极化曲线和交流阻抗所反映的腐蚀过程吻合性较好. 从极化电阻和腐蚀速率两类指标看, 钢筋混凝土未浸泡前, 极化电阻极高, 这是钢筋处于混凝土所提供的良好碱性环境中, 一旦置于耦合盐环境中, 试件碱性环境发生改变, 表现为极化电阻锐减, 随着腐蚀时间增加, 腐蚀性离子不断破坏混凝土碱性环境, 并透过钝化膜到达钢筋表面累积, 极化电阻值进一步减小, 腐蚀速率则持续增加, 腐蚀加剧.

3 基于 Weibull 可靠性分析

可靠性是产品质量的时间特性, 指产品在规定时间内和条件下完成预定功能的能力, 其理论基础是概率论和数理统计. 可靠度是可靠性工程最为显著的特征统计量. 通过长期性能测试或者

设计加速试验得到产品在某种服役环境中的寿命数据, 利用相应数学方法计算其可靠度, 从而实现对产品安全性和可靠性的度量, 并为产品的检测、维修、设计提供参考^[19].

在可靠性工程中, 对某种产品或结构进行可靠性分析和特征量预测的前提, 是判断产品寿命数据的分布类型及其相应的参数. Weibull 分布由瑞典科学家于 1939 年引入到可靠性分析中, 因其对各种随机数据具有较好的拟合性和灵活性, 且失效模型能够适用任何一种浴盆曲线族, 成为可靠性分析中广泛使用的连续型分布^[20]. 设形状、尺度、位置参数分别为 U 、 V 、 δ , T 为寿命产品失效首次达到失效阈值的时间, 得到 Weibull 的分布函数:

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\delta}{V}\right)^U} \quad (1)$$

密度函数反应产品在时间 T 的单位时间里发生失效的概率, 其相应的密度函数为:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T < t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} = \left(\frac{U}{V}\right) \cdot \left(\frac{t-\delta}{V}\right)^{U-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\delta}{V}\right)^U} \quad (2)$$

失效率函数是指已经工作了 T 的寿命产品在 T 后单位时间内发生失效的概率, 它能比密度函数更加灵敏地表示产品失效的变化速度, 根据失效率定义可得其表达式如式 (3) 所示.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T < t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{1 - F(t)} \cdot \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{U}{V} \cdot \left(\frac{t-\delta}{V}\right)^{U-1} \quad (3)$$

3.1 Weibull 可靠性模型建立

Weibull 分布函数对产品的可靠性分析多以寿命数据为样本, 对于钢筋混凝土这类高耐久性、长寿命产品来讲, 要得到其在真实服役环境中的破坏失效数据较为困难, 因此需要在失效机理相似的情况下进行加速试验以获得寿命数据^[21]. 结合文中耐久性分析可以看到, 在加速腐蚀 720 d 时, 钢筋腐蚀电流密度已接近高腐蚀状态时所对应的界限值, 即 $10 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$. 若采取本文 90 d 的检测周期, 得到试件失效时间不准确, 因此对最能反映钢筋腐蚀状态的腐蚀电流密度进行拟合, 从而得到腐蚀环境中钢筋混凝土试件失效的“伪寿命数据”. 同时为增加样本数量, 并充分反映失效劣化趋势, 分别选择指数函数、幂次函数及三次函数对各试件进行拟合, 其拟合结果及失效天数如表 5 所示.

表 5 钢筋混凝土试件失效天数汇总表

Table 5 Summary of the failure days of reinforced concrete specimens

Functional form	Specimen 1		Specimen 2		Specimen 3	
	t/d	R ²	t/d	R ²	t/d	R ²
Exponential function	740	0.95105	736	0.94177	729	0.95045
Power function	747	0.95999	741	0.95129	731	0.95884
Cubic function	748	0.96468	742	0.95688	732	0.96425

利用上述方法得到的失效数据进行 Weibull 可靠性分析, 首先需判断该失效数据是否符合 Weibull 分布, 因此需要预先进行假设检验^[22]. 选择 Anderson-Darling(A-D) 检验方法, 确定显著性水平为 95%, 经检验其 A-D 检验值及 P 值分别为 0.381、0.424, 均大于 0.05, 表明符合 Weibull 分布.

3.2 参数估计

参数估计方法对可靠度结果影响较大, 考虑到本文样本数据较少, 为避免单一参数估计方法对可靠性评价的影响, 同时对比分析各参数估计方法的优劣及适用性分别选用相关系数优化法 (CCOM)^[23]、极大似然法 (MLM)^[24] 及矩估计法 (MEM)^[25] 对三参数 Weibull 分布函数的参数进行估计.

(1) 相关系数优化法.

假设 $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$ 是来自 Weibull 分布的一个完整样本, 其样本容量为 n , i 表示整体样本中任意随机样本, 且 $i=1, 2, \dots, n$, 则对式 (1) 进行移项并取双重对数可得:

$$\frac{1}{U} \ln[\ln(1 - F(t_i))^{-1}] = \ln(t_i - \delta) - \ln V \quad (4)$$

若对式 (4) 做如下变化:

$$x_i = \ln[\ln(1 - F(t_i))^{-1}]; y_i = \ln(t_i - \delta); B = 1/U; A = \ln V \quad (5)$$

可得 $y_i = Ax_i + B$. 可以看到, 要想得到估计参数值首先需得到 x 和 y 的值, x 的值可借助中位秩法求得, 若定义 $MR(t_i)$ 为 t_i 时刻的中位秩, 则在本文中, $F(t_i)$ 可采用式 (6) 计算得到, 进而由 (5) 式得到相应的 x_i 值. 其中 m_i 为失效数据升序排列后的序号, n 为样本容量.

$$F(t_i) \approx MR(t_i) = \frac{m_i - 0.3}{n + 0.4} \quad (6)$$

根据 Weibull 分布性质和位置参数物理意义, 可知位置参数是介于 0 至第一个寿命数据之间的一个值, 在本文中 $0 \leq \delta \leq 729$, 由实际情况和计算需要, 取位置参数的计算精度 Δ 为 0.1 d, 在 0 ~ 729 之间可以得到 7290 个位置参数, 将位置及失效数据代入式 (5) 中便可得到一系列 y 值, 借助 origin 或 Matlab 等拟合软件, 通过最小二乘法进行拟合, 其线性相关系数如式 (7) 所示. 对比分析各位置参数下的线性相关系数 ρ , 选择线性相关系数最大时的位置参数即为位置参数的估计值. 并将此时的截距和斜率代入式 (5) 便可得到形状参数和尺度参数, 具体参数估计值如表 6 所示.

表 6 参数估计值汇总表

Table 6 Parameter estimate summary

Estimation method	U	V	δ
CCOM	725.4	1.83	15.41
MLM	728.0	1.50	11.43
MEM	560.0	3.47	113.44

$$\rho = \frac{\left[\sum_i^n x_i y_i - \left(\sum_i^n x_i \sum_i^n y_i / n \right) \right]^2}{\left[\sum_i^n x_i^2 - \left(\sum_i^n x_i \right)^2 / n \right] \left[\sum_i^n y_i^2 - \left(\sum_i^n y_i \right)^2 / n \right]} \quad (7)$$

(2) 极大似然法.

极大似然法利用分布函数的密度函数, 使样本出现在观测值领域内概率最大, 是一种十分有用的参数估计方法, 尤其对于不完全寿命的情形优势明显. 由式 (2) 可得 Weibull 分布函数的似然函数如式 (8) 所示:

$$\ln[L(t_i; V, U, \delta)] = n(\ln U - \ln V) + (U - 1) \sum_i^n \ln\left(\frac{t_i - \delta}{V}\right) - \sum_i^n \left(\frac{t_i - \delta}{V}\right)^U \quad (8)$$

分别对上式似然函数的参数 U 、 V 、 δ 求偏微分并令其等于零, 可得方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln[L(t_i; V, U, \delta)]}{\partial V} = -\frac{nU}{V} + \sum_i^n \left(\frac{U}{V} \left(\frac{t_i - \delta}{V} \right)^U \right) = 0 \\ \frac{\partial \ln[L(t_i; V, U, \delta)]}{\partial U} = \frac{n}{V} + \sum_i^n \ln\left(\frac{t_i - \delta}{V}\right) - \sum_i^n \left[\left(\frac{t_i - \delta}{V} \right)^U \ln\left(\frac{t_i - \delta}{V}\right) \right] = 0 \\ \frac{\partial \ln[L(t_i; V, U, \delta)]}{\partial \delta} = (U - 1) \sum_i^n \left(-\frac{1}{t_i - \delta} \right) + \sum_i^n \left[\frac{U}{V} \left(\frac{t_i - \delta}{V} \right)^{U-1} \right] = 0 \end{cases} \quad (9)$$

可以看到, 上式是一个非线性方程组, 采用

Newton-Raphson 迭代法对该式进行求解, 即可得

到 Weibull 分布的三个参数估计值, 如表 6 所示.

(3) 矩估计法.

矩估计法是 3 参数 Weibull 参数估计方法中最早使用的一种解析方法, 其本质是用样本矩来代替总体矩, 由已知模型的密度函数及完整失效样本数据求解方程组得到参数估计值. 对于 3 参数 Weibull 分布, 其方差和均值为:

$$E(X) = V\Gamma\left(1 + \frac{1}{U}\right) + \delta; \text{Var}(X) = V^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{U}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{U}\right) \right] \quad (10)$$

式中, $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数.

根据 Cran^[26] 的定义, Weibull 的矩为:

$$\mu_k = \int_0^\infty [1 - F(t)]^k dx = \delta + \left(\frac{V}{k-U}\right) \Gamma\left(1 + \frac{1}{U}\right) \quad (11)$$

可以看到, Weibull 矩与通常矩的定义不同, 该矩是模型参数的函数. 根据矩的一般定义, 则可以计算样本矩为:

$$m_k = \sum_{i=0}^{n-1} \left(1 - \frac{i}{n}\right)^k (t_{i+1} - t_i), t_0 = 0 \quad (12)$$

令样本矩等于整体矩, 即 $\mu_k = m_k, k=1, 2, 4$ 则有:

$$\begin{aligned} U &= \ln 2 / \ln [(\mu_1 - \mu_2) / (\mu_2 - \mu_4)] \\ V &= (\mu_1 - \delta) / \Gamma(1 + 1/U) \\ \delta &= (\mu_1 \mu_4 - \mu_2^2) / (\mu_1 - 2\mu_2 + \mu_4) \end{aligned} \quad (13)$$

将失效数据代入式(12) ~ (13)便可得到矩估计法下 Weibull 参数估计值, 具体结果如表 6 所示.

3.3 可靠性结果分析

将表 6 中各参数估计值分别代入式(1) ~ (3)式中, 得到钢筋混凝土在耦合盐溶液环境中损伤劣化的可靠度曲线、密度曲线及失效率曲线, 如图 5 ~ 图 7 所示. 从图中可以明显观察到可靠度曲线呈现出两阶段变化特点, 即可靠度保持为 1 和可靠度加速下降, 且第一阶段持续时间较长, 整个可靠性寿命周期是两个阶段时间之和. 结合耐久性劣化规律, 第一阶段是腐蚀积累期, 该阶段内腐蚀性离子通过混凝土固有孔隙不断向试件内部迁移, 改变混凝土内部碱性环境的同时, 不断在钢筋表面富集积累. 由于钢筋表面钝化膜的保护作用, 腐蚀离子并不会直接与钢筋接触. 随着钢筋表面离子浓度的增加, 半径小活性大的氯离子首先突破钝化膜在钢筋表面发生点蚀, 钝化膜开始破坏. 钢筋锈蚀概率大大增加, 腐蚀周期越长, 点蚀部位越多, 水分及氧分子相继与钢筋直接接触, 钢筋锈蚀发生, 此时便迅速进入第二阶段, 即加速劣化

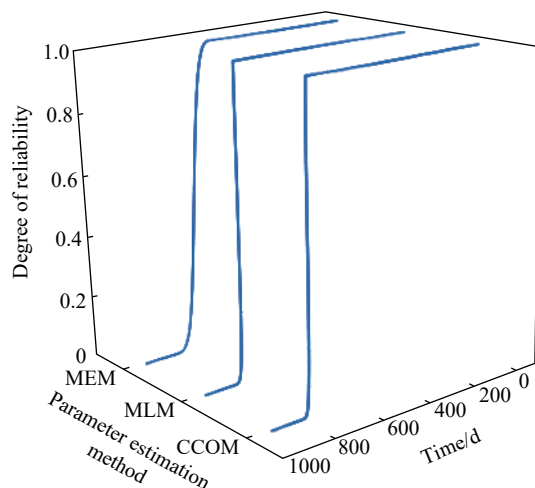


图 5 可靠度曲线

Fig.5 Reliability curves

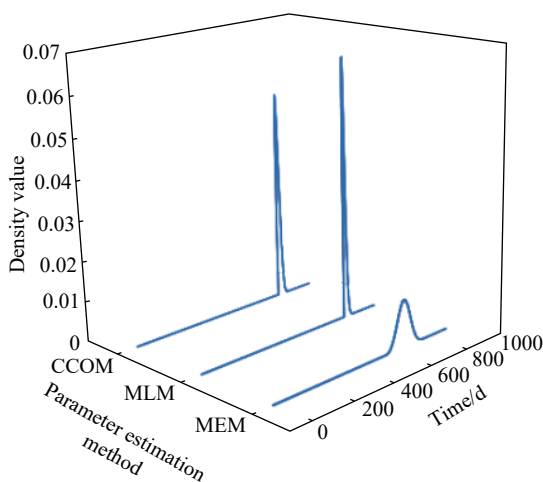


图 6 密度曲线

Fig.6 Density curves

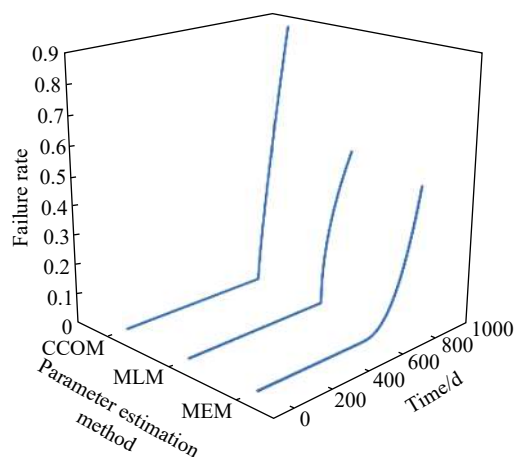


图 7 失效率曲线

Fig.7 Failure rate curves

期. 进入加入加速劣化期后, 锈蚀发生的介质, 即氧气、水分和腐蚀离子在钢筋表面大量存在, 钢筋锈蚀速率和腐蚀电流密度显著增加, 以较快的速

度达到失效阈值, 试件失效。对比 3 类参数估计方法可靠度曲线可以明显看到, 相关系数优化法和极大似然法可靠度曲线变化基本一致, 在 730 d 附近可靠度开始下降, 760 d 时可靠度下降至零, 而矩估计法可靠度下降时间明显提前, 在 560 d 时即开始下降, 730 d 时降至为零。结合失效数据可以判定, 3 类参数估计方法中相关系数优化法和极大似然法所得参数估计值稳定准确, 而矩估计法误差较大。因此对于钢筋混凝土加速试验得到的小样本失效数据, 建议用相关系数优化法和极大似然法进行参数估计, 并进行可靠性分析。

密度曲线表征混凝土试件中钢筋在单位时间里发生失效的速率, 尤其对于加速劣化段的失效表征更加明显。从图 6 中可以观察到, 耦合盐溶液加速腐蚀环境下, 密度曲线呈单峰对称状态, 其中矩估计法密度曲线偏左且峰值低, 极大似然法和相关系数优化法密度曲线偏右且跨度小、峰值大。表明矩估计法可靠度下降开始时间早, 劣化速率慢, 其他 2 类方法得到的可靠性曲线劣化出现的时间迟, 但劣化速率较大, 这与在可靠度曲线得到的结论一致。相比较密度函数, 失效率曲线是混凝土中钢筋锈蚀速率的直接反映。可以看到, 3 类参数估计方法得到的失效率曲线表现出 2 阶段变化特点, 具体表现为第 1 阶段失效率在较长的时间内为零且保持不变, 这是混凝土和钝化膜对钢筋保护作用的结果。一旦腐蚀离子和腐蚀介质通过混凝土保护层及钢筋表面钝化膜, 大量富集在钢筋基体时, 腐蚀速率显著增大, 锈蚀加速发生, 失效进入第二阶段, 失效进程大大加快, 呈现出直线增长趋势。3 类失效率曲线中, 矩估计法在中期失效率高于其他 2 类估计方法, 但在失效后期, 相关系数优化法和极大似然法失效率迅速增加并超过矩估计法。

4 结论

(1) 耦合盐溶液环境下, 随着腐蚀周期的增加, 钢筋锈蚀发生的阻力逐渐减小, 概率逐渐增大, 腐蚀速率越来越快, 宏观表现为极化曲线逐渐向腐蚀电流密度增大和负电位方向移动, 交流阻抗图谱不断左移并向阻抗实部收缩, 混凝土和钢筋表面钝化膜对钢筋保护作用减弱。

(2) 3 参数 Weibull 分布模型可靠性曲线呈现出两阶段变化特点, 在初期较长时间保持为 1, 后期迅速下降至零, 密度曲线呈单峰对称状, 失效率曲线初始基本保持不变, 后期线性增加, C35 钢筋

混凝土在 $0.32 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钠和 $0.4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫酸镁耦合环境中的可靠性寿命周期约为 760 d。

(3) 3 种参数估计方法中, 相关系数优化法和极大似然法参数估计值相近且稳定准确, 所得可靠性曲线相似, 而矩估计法参数估计值误差较大, 可靠性曲线差异明显, 对于钢筋混凝土加速试验得到的小样本失效数据建议用相关系数优化法和极大似然法进行参数估计, 并进行可靠性分析。

参 考 文 献

- [1] Yu Y J, Guo X H, Wang L, et al. Durability evaluation and repair of concrete structure under coupling action of acid and chlorine. *Ind Constr*, 2019, 49(3): 180
(于英俊, 郭小华, 王玲, 等. 酸和氯盐耦合作用下混凝土结构耐久性评估及修复. 工业建筑, 2019, 49(3): 180)
- [2] Wang C, Ge G H, Hou J G, et al. Study of durability of concrete structures and its influencing factors in south region of Xinjiang. *Eng J Wuhan Univ*, 2017, 50(3): 447
(王成, 葛广华, 侯建国, 等. 南疆地区混凝土结构耐久性现状与影响因素研究. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(3): 447)
- [3] Zhang L, Su X P. Comparison and selection of the durability evaluating parameters of concrete in saline soil region. *Adv Mater Res*, 2014, 919-921: 1751
- [4] Liu Z Q, Pei M, Zhang F Y, et al. The comparison of chemical attack products in different zones of cement paste partially exposed to Na_2SO_4 solution [J/OL]. *J Building Mater* (2019-02-28) [2019-12-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20190227.0913.014>
(刘赞群, 裴敏, 张丰燕, 等. 水泥净浆不同部分受硫酸钠侵蚀产物对比分析[J/OL]. 建筑材料学报(2019-02-28)[2019-12-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20190227.0913.014>)
- [5] Zhu J J, Gao J M, Chen F, et al. Corrosion mechanism of cement mortars partially immersed in combined $\text{NaCl}-\text{Na}_2\text{SO}_4$ solution. *J Southeast Univ Nat Sci Ed*, 2019, 49(5): 964
(朱健健, 高建明, 陈菲, 等. 水泥砂浆半浸泡在 $\text{NaCl}-\text{Na}_2\text{SO}_4$ 混合溶液中的侵蚀机理. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(5): 964)
- [6] Yao M B, Li J P. Distribution behavior of sulfate erosion in concrete piles under water pressure. *J Tongji Univ Nat Sci*, 2019, 47(8): 1131
(姚明博, 李镜培. 水压作用下硫酸盐在混凝土桩中的侵蚀分布规律. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 1131)
- [7] Jiang L, Niu D T. Study of constitutive relation of concrete under sulfate attack and drying-wetting cycles. *J China Univ Min Technol*, 2017, 46(1): 66
(姜磊, 牛荻涛. 硫酸盐侵蚀与干湿循环下混凝土本构关系研究. 中国矿业大学学报, 2017, 46(1): 66)
- [8] Zhao G W, Li J P, Fan H H, et al. Influence of chloride-sulfate attack on degradation and sulfate diffusion of cast-in-situ concrete

- structures subjected to wet-dry cycles. *J Tongji Univ Nat Sci*, 2018, 46(12): 1637
(赵高文, 李镜培, 樊恒辉, 等. 干湿循环下氯盐对现浇混凝土硫酸盐腐蚀劣化及扩散影响. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(12): 1637)
- [9] Cefis N, Comi C. Damage modelling in concrete subject to sulfate attack. *Frattura e Integrita Strutturale*, 2014, 8(29): 222
- [10] Andrade J J O, Possan E, Dal Molin D C C. Considerations about the service life prediction of reinforced concrete structures inserted in chloride environments. *J Build Pathol Rehabil*, 2017, 2(1): 6
- [11] Zhang J H, Wang W, Guan Z G. Service life prediction of reinforced concrete bridge deck under chloride attack. *Mater Rep*, 2016, 30(Suppl 2): 401
(张菊辉, 王伟, 管仲国. 基于氯盐侵蚀的钢筋混凝土桥面板寿命预测. *材料导报*, 2016, 30(增刊 2): 401)
- [12] Akiyama M, Frangopol D M, Takenaka K. Reliability-based durability design and service life assessment of reinforced concrete deck slab of jetty structures. *Struct Infrastruct Eng*, 2017, 13(4): 468
- [13] Wang Z M, Ren L N, Duan H Y, et al. Reliability assessment of cutting-tool for machine tools with three-parameter Weibull distribution under variable machining conditions. *J Xi'an Jiaotong Univ*, 2018, 52(4): 77
(王智明, 任丽娜, 段红燕, 等. 耐用度服从三参数Weibull分布的机床刀具在变加工条件下的可靠性评估. *西安交通大学学报*, 2018, 52(4): 77)
- [14] Mendez-Gonzalez L C, Rodriguez-Picon L A, Valles-Rosales D J, et al. Reliability analysis for electronic devices using beta - Weibull distribution. *Qual Reliab Eng Int*, 2017, 33(8): 2521
- [15] Liang C, Yao J W, Zhang K X, et al. Railway equipment reliability test based on Weibull distribution. *Appl Mech Mater*, 2016, 851: 340
- [16] Li L. Corrosion monitoring of reinforced concrete structure based on electrochemical theory. *J Nanoelectron Optoelectron*, 2018, 13(4): 572
- [17] Erdođdu Ş, Bremner T W, Kondratova I L. Accelerated testing of plain and epoxy-coated reinforcement in simulated seawater and chloride solutions. *Cem Concr Res*, 2001, 31(6): 861
- [18] Huang R. *Durability Research of Reinforced Concrete under the Western Environment* [Dissertation]. Nanjing: Southeast University, 2017
(黄冉. 西部环境下结构混凝土耐久性研究[学位论文]. 南京: 东南大学, 2017)
- [19] Yu Y, Si X S, Hu C H, et al. Data driven reliability assessment and life-time prognostics: a review on covariate models. *Acta Autom Sin*, 2018, 44(2): 216
(喻勇, 司小胜, 胡昌华, 等. 数据驱动的可靠性评估与寿命预测研究进展: 基于协变量的方法. *自动化学报*, 2018, 44(2): 216)
- [20] Almallki S J, Nadarajah S. Modifications of the Weibull distribution: a review. *Reliab Eng Syst Saf*, 2014, 124: 32
- [21] Zhang T L, Li W X, Dwight R. Modeling failure data by 3-parameter Weibull distribution models // 2016 11th *International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS)*. Hangzhou, 2016: 1
- [22] Voinov V, Alloyarova R, Pya N. A modified Chi-squared goodness-of-fit test for the three-parameter Weibull distribution and its applications in reliability // *Mathematical Methods in Survival Analysis, Reliability and Quality of Life*. Wiley, 2010
- [23] Liu Y, Rong X Q, Bu S P. Life expectancy of smart meter with Weibull distribution. *Electr Meas Instrum*, 2019, 56(3): 148
(刘勇, 荣雪琴, 卜树坡. 基于Weibull分布的智能电能表寿命预计. *电测与仪表*, 2019, 56(3): 148)
- [24] Freels J K, Timme D A, Pignatiello J J, et al. Maximum likelihood estimation for the poly-Weibull distribution. *Qual Eng*, 2019, 31(4): 545
- [25] Zhao H Q, Liu R Y. Moment estimation equation of the three-parameter Weibull distribution under censored samples. *College Math*, 2005, 21(1): 49
(赵海清, 刘瑞元. 在定数截尾样本下三参数威布尔分布的矩估计方程. *大学数学*, 2005, 21(1): 49)
- [26] Cran G W. Moment estimators for the 3-parameter Weibull distribution. *IEEE Trans Reliab*, 1988, 37(4): 360