基于电化学阻抗分析的多因素作用下锚杆–砂浆界面黏结性能研究

王旭晨，柯睿，王亮清*，朱悦，吕萌，郑罗斌，孙自豪

中国地质大学（武汉）工程学院，武汉 430074

第一作者，E-mail：wxc1834@126.com

* 通信作者，E-mail：wlq027@126.com

2023-11-06 收稿；2024-01-13 修回；2024-01-18 接受

基金项目：国家自然科学基金项目（42302314；42202316；41931295）

中图分类号：TU476　　文章编号：2096-8523（2025）05-0215-10　　doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230622

摘　要：影响锚杆–砂浆界面黏结性能的因素众多，而目前对该界面黏结性能的研究聚焦于单因素的影响，多因素作用下界面黏结性能的研究仍留有空白。以锚杆–砂浆为研究对象，采用电化学阻抗谱测试技术获取了不同影响因素下的锚杆–砂浆界面状态以及电化学参数，通过拉拔试验获取了锚杆–砂浆界面黏结强度，并结合电化学参数，探究了试样养护完成时，电化学参数与拉拔荷载之间的关系，分析了细砂粒径、锚杆直径和水灰比 3 个因素对锚杆–砂浆界面黏结性能的影响。由正交试验敏感性分析可知，试样的拉拔荷载主要受锚杆直径控制，孔隙溶液电阻（R_s）主要受水灰比控制，电荷转移电阻（R_{ct}）则没有明显的控制性因素；在试样养护完成时，受 3 个因素的影响，锚杆–砂浆界面会出现钝化膜完整与钝化膜不完整 2 种状态。研究结果表明，在试验所选择的范围内，拉拔荷载会随着细砂粒径的增大和水灰比的减小而增大，并且试样的拉拔荷载与孔隙溶液电阻（R_s）和电荷转移电阻（R_{ct}）呈正相关。研究成果对锚固结构砂浆配比及应用中的有效性验证具有重要意义。

关键词：锚杆–砂浆界面；多因素；界面黏结性能；电化学阻抗谱；拉拔试验

锚固技术因其优越的性能被广泛应用于水利水电工程[1-2]、隧道[3-4]、桥梁、基础[5-6]、抗震工程[7-8]以及地质灾害防治工程[9]，为工程结构的稳定性、安全性和持久性提供了重要的支持。通常情况下，锚固结构中的应力传递是通过锚杆与砂浆之间的黏结实现的，从而达到设计锚固效果[10-11]。锚杆–砂浆界面的黏结性能在诸多影响因素的作用下发生变化，进而会影响锚固结构的安全性。因此，开展多因素作用下锚杆–砂浆界面黏结性能变化规律的研究具有重要意义。

影响锚杆–砂浆界面黏结强度因素众多，包括环境因素（干湿循环[12]、冻融循环[12-13]等）、围压应力水平[14]、预应力以及材料因素（钢筋直径[11, 15-16]、钢筋表面形态[17-18]、黏结长度[17]、砂浆强度[15, 19]）等方面。根据现有的研究成果可知，锚杆直径、砂浆强度等因素对锚杆–砂浆界面的黏结性能影响较为显著。室内拉拔试验研究表明界面黏结强度与钢筋直径成反比[15]；另一方面，水灰比和细砂粒径通过改变砂浆的强度进而影响界面的黏结性能[15, 19]。锚杆–砂浆界面黏结强度影响因素的数值模拟研究[15, 20]，也得到了与室内试验相同的结论。综上所述，目前对于单因素作用下的界面黏结强度研究较为全面，而对于多因素作用下影响规律的研究尚需进一步完善。

电化学阻抗谱技术是一种利用小幅交流电压扰动研究材料性能的电化学检测方法[21-22]，能够有效避免电极在测试过程中受到杂乱电流的干扰，提高阻

著录信息：王旭晨，柯睿，王亮清，等. 基于电化学阻抗分析的多因素作用下锚杆–砂浆界面黏结性能研究［J］. 地质科技通报，2025，44（5）：215-224.
WANG Xuchen, KE Rui, WANG Liangqing, et al. Bonding performance of anchor-mortar interface under multifactor action based on electrochemical impedance analysis［J］. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44（5）: 215-224.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

抗测试的准确性[23]。而且，相比常规的电化学测量方法，电化学阻抗谱测试技术是一种频率域的测量方法，能够获得更多的电极过程动力学信息及电极界面结构的信息[23]。此外，电化学阻抗谱技术可以使用等效电路来解析电化学交流阻抗数据，从而定量描述界面状态和动力学过程[24]。目前，电化学阻抗谱测试技术已经广泛应用于混凝土的碳化行为[25-26]、锚固结构的腐蚀劣化[27-28]、混凝土材料中氯离子的渗透性[29-30] 等方面的研究，并且取得了一定成果。

综上所述，目前对锚杆−砂浆界面黏结强度的研究主要集中于某个因素的影响，而在多因素作用下锚杆−砂浆界面黏结强度的研究还存在空白。电化学阻抗谱作为一种适用于砂浆等多孔材料的检测技术，能在不损坏试样的前提下探究锚杆−砂浆界面状态，获取电化学参数。因此，笔者以锚杆−砂浆为研究对象，采用电化学阻抗谱测试技术与拉拔试验，结合电化学原理，通过电化学参数探究细砂粒径、锚杆直径和水灰比 3 个影响因素对锚杆−砂浆界面黏结性能的影响。

1　试验过程

1.1　正交试验设计

为探究细砂粒径、锚杆直径以及水灰比 3 个因素对锚杆—砂浆界面黏结性能变化规律的影响，采用正交试验法设计制作圆柱形锚杆—砂浆试样进行试验。正交试验的每个影响因素设置 3 个水平（细砂粒径设置 0.4, 0.5, 0.6 mm，锚杆直径设置 4, 6, 8 mm，水灰比设置 0.4, 0.45, 0.5），选择 L9(3*) 的正交试验表格设计试验，且不考虑各因素之间的相互作用，设计方案见表 1。

1.2　试样制备

依据《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB50086-2015)[31]，本研究采用诸城市阳春水泥有限公司生产的 P.S.A 32.5 水泥，化学成分见表 2。根据《混凝土结构后锚固技术规程》(JGJ145-2013)[32]，结合锚杆、砂浆抗拉强度、弹性模量等指标，选用螺纹钢筋作为试样的锚杆，钢筋的各项指标见表 3。试验选用筛分后的标准砂和去氯离子水配置砂浆。锚杆−砂浆样品的制备步骤如下：①按照试验设计方案筛选符合粒径要求的细砂；②将水泥、细砂、水按照表 1 的比例配置，并搅拌均匀；③将对应直径的锚杆插入模具中，用螺栓固定，并将配置好的水泥砂浆分 3 次倒入不锈钢模具中，振捣均匀，压实后封存；④在温度为 25℃、湿度为 95% 的养护箱中养护 24 h 后脱模；⑤将试样在养护箱中养护 28 d 后进行试验。

表 1　锚杆−砂浆试样设计方案

Table 1　Anchor-mortar samples design programme

试验组编号	细砂粒径/mm	锚杆直径/mm	水灰比
T1	0.40	4	0.40
T2	0.40	6	0.45
T3	0.40	8	0.50
T4	0.50	4	0.45
T5	0.50	6	0.50
T6	0.50	8	0.40
T7	0.60	4	0.50
T8	0.60	6	0.40
T9	0.60	8	0.45

表 2　硅酸盐水泥化学成分

Table 2　Chemical composition of silicate cement　w_B/%

SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	烧失量
23.5	4.1	7.4	56.4	3.2	2.2	3.2

表 3　钢筋的物理参数

Table 3　Physical parameters of reinforcing steel

直径/mm	密度/(g·cm^{-3})	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa
4，6，8	7.85	540	400	196

1.3　试验方法

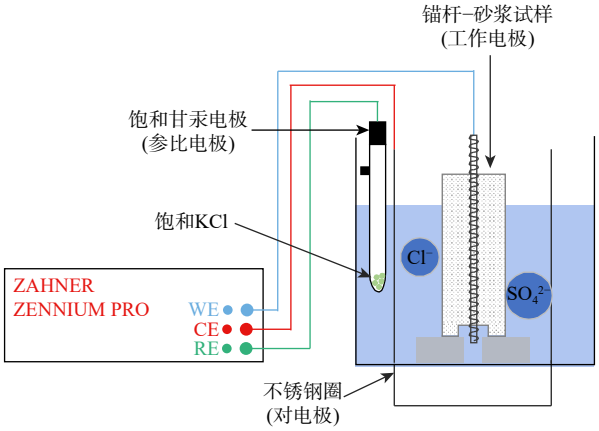
养护结束后，使用电化学工作站对试样进行电化学阻抗测试，获取锚杆−砂浆界面电极过程动力学信息，再使用电子万能试验机对试样进行拉拔试验，检测锚杆−砂浆界面的黏结性能。

1.3.1　电化学阻抗试验

电化学阻抗谱测试使用 ZAHNER ZENNIUM PRO 电化学工作站在 25℃ 的开放环境中进行。测试采用由质量分数为 3.5% 的氯化钠和质量分数为 5% 的硫酸钠组成的混合溶液，溶液由氯化钠、硫酸钠以及去氯离子水配置而成，并通过稀盐酸或者氢氧化钠调节溶液 pH 值（pH=7）。如图 1 所示，试验样品采用三电极电化学系统测试，锚杆−砂浆、不锈钢圈和饱和甘汞电极分别作为工作电极、对电极和参比电极。测试在开路电位（open circuit potential，简称 OCP）下进行，施加 10 mV 扰动信号，设置扫描频率为 10^{-2} ~ 10^{5} Hz。试验数据采用 Zsimpwin 软件进行拟合、分析。为保证测试结果的准确性，每次试验后需对不锈钢圈（对电极）进行打磨，以消除表面光泽度对测试结果的影响。

1.3.2　拉拔试验

根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T50152-2012)[33]，采用中心拉拔试验测试锚杆−砂浆界面的黏结力。试验仪器由 suns-600 型电液伺服万能试验



WE. 工作电极；CE. 对电极；RE. 参比电极；ZAHNER ZENNIUM PRO. 电化学工作站

图 1　电化学阻抗谱测试技术示意图

Fig. 1　Schematic diagram of electrochemical impedance spectroscopy technique

机(最大试验力 600 kN)和不锈钢辅助装置组成，如图 2 所示。试验采用位移控制加载，加载速率为 1 mm/min，并通过计算机采集拉拔荷载和位移数据。

2　试验结果与分析

2.1　电化学阻抗谱

图 3 为正交试验中不同细砂粒径、锚杆直径、水灰比的锚杆–砂浆试样进行电化学阻抗谱测试所得的 Nyquist 图。Nyquist 图可以反映不同试样在不同频率下的阻抗特性，从而反映试样中砂浆的微观结构变化。从图 3 中可以看出，曲线由 2 个容抗弧组成，在高频区容抗弧并不完整，而在低频区容抗弧是相对完整的。这是因为在高频区时，钢筋表面电荷转移电阻值和体系试样常数较大，而界面电容值较小，特征频率低，所以得到的是不完整的容抗弧[34]。在低频区，除试验组 T8 外，其余试验组的容抗弧形状相似，半径逐步扩大。试验组 T8 在低频区的容抗弧先呈现略微下凹的形状，而后扩展。可以明显看出，试验组 T8 的容抗弧半径比其他各试验组的容抗弧更大。

图 4 为由电化学阻抗谱测试所得锚杆–砂浆试样的 Bode 图。Bode 图由对数阻抗谱和相位角谱 2 部分组成，可以反映更多锚杆–砂浆界面的信息。从对数阻抗谱图中可以看出，各试验组的曲线具有相似的形状，在低频区，试验组 T8 的 |Z| 值最大，试验组 T3 的 |Z| 值最小。在相位角谱中，相位角在高频区略微出现峰值，而另一更为明显的峰值出现在低频区，即高频区和低频区分别有 1 个时间常数。

不同的细砂粒径和水灰比会导致砂浆的孔隙率不同，而锚杆直径的变化会影响工作电极的表面积，进而影响锚杆–砂浆界面的状态，最终呈现出不同的电化学信息。因此，根据不同细砂粒径、锚杆直径、水灰比的锚杆–砂浆试样的电化学阻抗谱演变特征，提出如图 5a, b 所示的等效电路，对数据进行拟合[35]。其中，R_s 表示砂浆中的孔隙溶液电阻，C_f 表示钢筋钝化膜电容，R_f 表示钢筋钝化膜电阻，C_{dl} 表示双电层电容，R_{ct} 表示电荷转移电阻，Z_w 表示扩散过程的 Warburg 电阻[36]。C_f 和 C_{dl} 均为恒定相位元件条件，考虑到钢筋与砂浆表面的粗糙度及不均匀性，采用恒定相位元件 CPE 代替理想电容器[37]。

锚杆–砂浆试样中，硅酸盐水泥可以发生复杂的化学反应并生成水化硅酸钙(CSH)、水化铝酸钙(CAH)等一系列的水化产物，使得砂浆内部总体为碱性环境，促使锚杆表面生成一层致密的钝化膜，保护锚杆免遭侵蚀。结合 Nyquist 图、Bode 图以及钝化膜的特

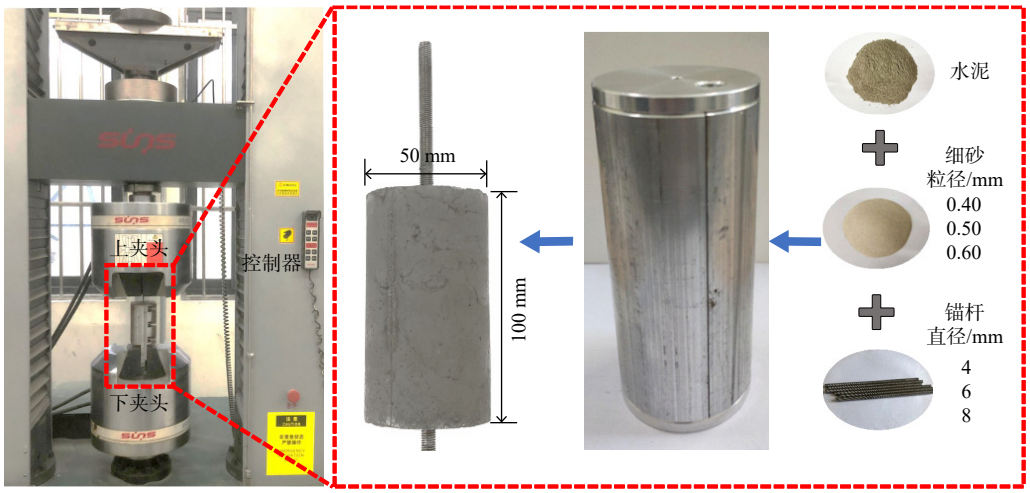
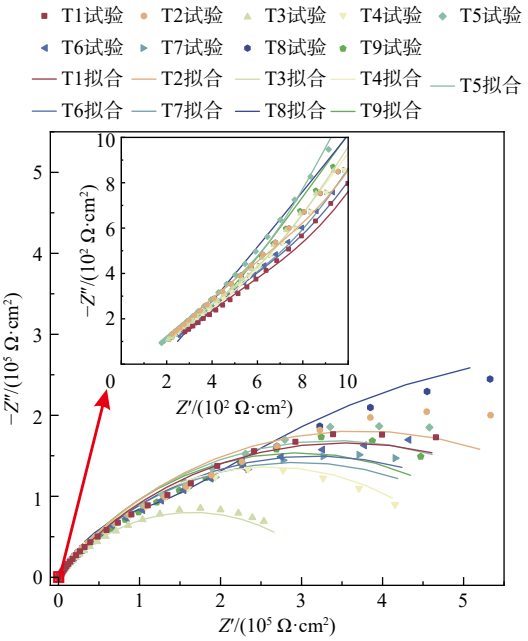


图 2　拉拔试验示意图

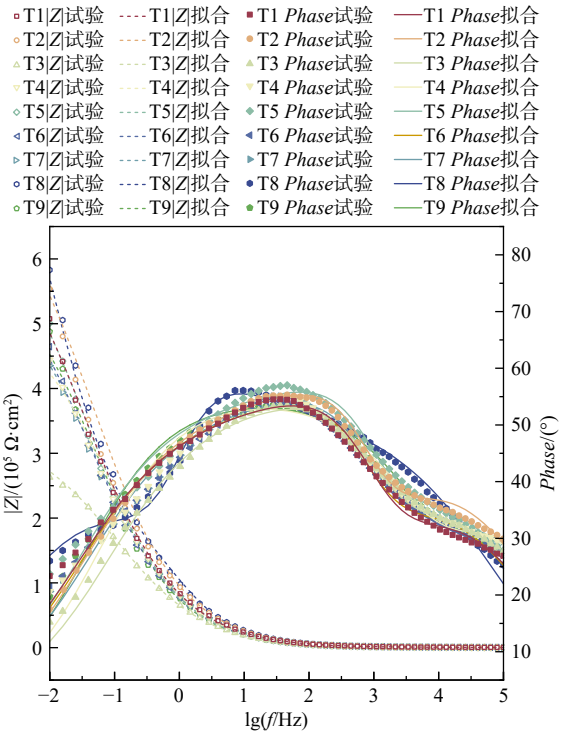
Fig. 2　Schematic diagram of pullout test



Z. 阻抗; *Z′*. 阻抗实部, 即电阻分量; *−Z″*. 阻抗虚部, 即电容或电阻分量

图 3　锚杆−砂浆试样 Nyquist 图（T1 ~ T8 设计方案见表 1）

Fig. 3　Nyquist diagram of anchor-mortar samples



|*Z*| . 阻抗模值; *Phase*. 相位角; *f*. 频率

图 4　锚杆−砂浆试样 Bode 图

Fig. 4　Bode diagram of anchor-mortar samples

性可知, 试验组 T8 的钝化膜是完整的, 采用图 5b 所示等效电路模型进行拟合; 其余试验组的钝化膜未形成完整, 采用图 5a 所示等效电路模型进行拟合[38]。

为验证上述分析的正确性, 同时获取孔隙溶液电阻(R_s)、电荷转移电阻(R_{ct})等电化学参数, 本研究采用 ZSimpWin 软件对上述等效电路模型进行拟合, 各元件参数见表 4。

2.2　界面黏结力

本研究所指的界面黏结力是指锚杆/砂浆界面的平均黏结强度, 其定义为锚杆极限拉拔荷载与锚杆/砂浆界面面积之比[39]。即:

$$\tau = \frac{N_{\max}}{\pi d l}, \qquad (1)$$

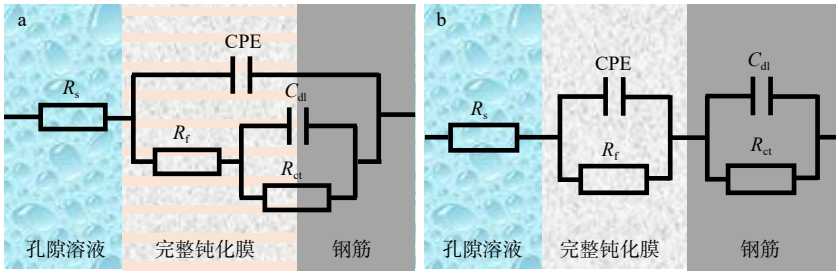
式中: τ 为锚杆−砂浆界面的平均黏结强度, MPa; $N_{\max}$ 为锚杆−砂浆试样的极限拉拔荷载, kN; d 为锚杆直径, mm; l 为锚杆黏结长度, mm。

图 6 为锚杆−砂浆试样进行拉拔试验所得极限拉拔荷载以及相对应的平均黏结强度。可以明显看出, 随着锚杆直径的增大, 试样的极限拉拔荷载呈现增长的趋势, 而界面的平均黏结强度呈下降趋势。在锚杆直径相同的情况下, 试样的极限拉拔荷载与平均黏结强度则相差较小, 说明锚杆−砂浆试样的极限拉拔荷载和界面黏结力主要受锚杆直径的影响, 细砂粒径和水灰比对其影响较小。

3　讨　论

3.1　敏感性分析

根据电化学阻抗谱测试和拉拔试验结果可知, 锚杆直径、砂浆细砂粒径和水灰比因素对锚杆−砂浆



CPE. 恒定相位元件; R_s. 孔隙溶液电阻; R_f. 钢筋钝化膜电阻; C_{dl}. 双电层电容; R_{ct}. 电荷转移电阻; 下同

图 5　等效电路模型

Fig. 5　Equivalent circuit model

表 4　拟合后锚杆–砂浆试样的电化学阻抗谱参数

Table 4　Electrochemical impedance spectroscopy parameters of fitted anchor-mortar samples

试验组编号	R_s/ Ω	C_f/（S・sec^n）	n_1	R_f/ Ω	C_{dl}/（S・sec^n）	n_2	R_{ct}/ 10^5Ω
T1	141.2	3.709×10^{-6}	0.5408	2322	2.796×10^{-8}	0.8295	7.140
T2	112.5	3.215×10^{-6}	0.5624	31310	1.349×10^{-7}	0.8977	7.296
T3	107.8	4.286×10^{-6}	0.5504	186.9	3.974×10^{-7}	0.7969	4.336
T4	122.1	7.015×10^{-7}	0.7039	258	3.632×10^{-6}	0.6141	5.207
T5	103.3	3.901×10^{-6}	0.5726	1946	2.003×10^{-7}	0.8761	6.851
T6	135.2	3.947×10^{-6}	0.5468	2542	2.763×10^{-6}	0.8313	6.365
T7	116.1	3.9659×10^{-6}	0.5949	2080	3.292×10^{-6}	0.8147	5.960
T8	150.1	2.94×10^{-5}	0.9071	67750	5.857×10^{-6}	0.5370	13.330
T9	128.7	4.189×10^{-6}	0.5527	1949	2.608×10^{-7}	0.8431	6.107

注：C_f. 钢筋钝化膜电容；n_1, n_2. 弥散系数

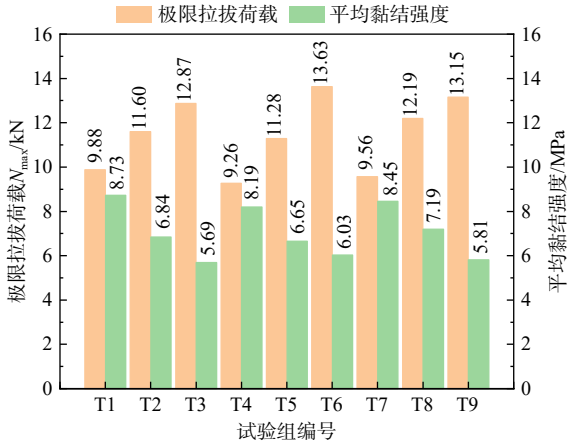


图 6　锚杆–砂浆试样极限拉拔荷载及平均黏结强度

Fig. 6　Ultimate pullout load and average bond strength of anchor-mortar samples

界面的拉拔荷载、黏结强度以及电化学参数均有一定的影响。拉拔荷载能够直观反映锚杆–砂浆界面的黏结性能，其大小受到锚杆直径、表面形态以及砂浆密实度等诸多因素的影响。孔隙溶液电阻(R_s)可以作为表征砂浆密实度的电化学参数，其本质是指砂浆孔隙溶液中电解质的电阻，受到砂浆总孔隙率的影响[23, 40]。此外，锚杆–砂浆界面的黏结性能在受到砂浆密实程度影响的同时，锚杆的表面形态同样是重要的影响因素，当钢筋的表面形态发生变化时，电荷在电解质溶液与钢筋之间的界面传递时需要克服的阻力随之变化，该阻力在电化学阻抗谱中被称为电荷转移电阻(R_{ct})[40]。因此，本研究选择拉拔荷载(N)、孔隙溶液电阻(R_s)和电荷转移电阻(R_{ct})作为指标判断各因素对其响应值的敏感程度。

3.1.1　拉拔荷载（N）

表 5 为正交试验结果中锚杆–砂浆试样拉拔荷载的极差分析，给出了拉拔荷载在各因素水平上的均值和极差。从表 5 中可以看出，细砂粒径和水灰比 2 个因素的极差相近，锚杆直径的极差最大，达到 3.650 kN，各因素对拉拔荷载敏感性的影响顺序为锚杆直径>水灰比>细砂粒径，说明锚杆直径对试样拉拔荷载起控制性作用。

表 5　拉拔荷载（N）极差分析

Table 5　Extreme variance analysis of pullout load　*N*/kN

因素		细砂粒径	锚杆直径	水灰比
均值	水平1	11.450	9.567	11.900
	水平2	11.390	11.690	11.337
	水平3	11.633	13.217	11.237
极差		0.243	3.650	0.663

此外，由于极差分析法没有提供一个标准判断各影响因素作用的显著程度，也没有把试验过程中由于试验条件的改变所引起的数据波动区分开来，为了弥补这些不足，本研究进一步采用方差分析来对各因素的影响程度进行分析，F 值用来评估影响因素作用的显著程度。在一般工程中，$F>F_{0.01}$ 为影响特别显著；$F_{0.01}\geqslant F>F_{0.05}$ 为影响显著；$F_{0.05}\geqslant F>F_{0.10}$ 为有影响；$F\leqslant F_{0.10}$ 为影响不显著，不作标记。p 值用来衡量控制组与试验组差异大小，$p\geqslant0.05$ 为差异不显著；$0.01\leqslant p<0.05$ 为差异显著；$p<0.01$ 为差异极其显著。表 6 为各因素在 3 个水平下拉拔荷载的方差分析，可以看出锚杆直径(F=401.984>$F_{0.01}$=90, p=0.002<0.05)对拉拔荷载的影响特别显著，细砂粒径(F=1.922<$F_{0.05}$=19, p=0.342>0.05)和水灰比(F=15.300<$F_{0.05}$=19, p=0.061>0.05)对拉拔荷载的影响不显著，同极差分析的结果一致。

表 6　拉拔荷载（N）方差分析

Table 6　Variance analysis of pullout load

	因素			误差
	细砂粒径	锚杆直径	水灰比	
方差	0.096	20.162	0.767	0.050
自由度	2	2	2	2
F	1.922	401.984	15.300	
p	0.342	0.002**	0.061	
R^2		0.998		

注：**. 控制组与试验组差异极其显著；F. 评估影响因素作用的显著程度；p. 衡量控制组与试验组差异大小；R^2. 决定系数，用于衡量组间差异对总变异的解释程度；下同

3.1.2　孔隙溶液电阻（R_s）

表 7 给出了正交试验结果中各因素水平下孔隙溶液电阻(R_s)的均值和极差，可知水灰比因素的极

表 7　孔隙溶液电阻（R_s）极差分析

Table 7　Extreme variance analysis of pore solution resistance

R_s/Ω

	因素	细砂粒径	锚杆直径	水灰比
均值	水平1	120.500	126.467	142.167
	水平2	120.203	121.970	121.100
	水平3	131.633	123.900	109.070
极差		11.430	4.497	33.097

差最大，为 33.097，细砂粒径次之，锚杆直径的极差最小，即各因素对孔隙溶液电阻（R_s）敏感性的影响大小依次为水灰比>细砂粒径>锚杆直径。随着锚杆直径的增大，R_s 先减小后增大。相对于锚杆直径，R_s 受细砂粒径和水灰比的影响更为显著，其随细砂粒径增大先减小后增大，与水灰比成负相关。

表 8 为各因素在 3 个水平下孔隙溶液电阻的方差分析，可以看出，对于孔隙溶液电阻，水灰比（F=38.166> $F_{0.05}$=19，p=0.026<0.05）的影响显著，细砂粒径（F=5.772<$F_{0.05}$=19，p=0.148>0.05）和锚杆直径（F=0.692< $F_{0.05}$=19，p=0.591>0.05）影响不显著，同极差分析的结果一致。

表 8　孔隙溶液电阻（R_s）方差分析

Table 8　Variance analysis of pore solution resistance

	因素			误差
	细砂粒径	锚杆直径	水灰比	
方差	254.684	30.533	1 683.915	44.121
自由度	2	2	2	2
F	5.772	0.692	38.166	
p	0.148	0.591	0.026*	
R^2		0.978		

注：*. 控制组与试验组差异显著

3.1.3　电荷转移电阻（R_{ct}）

表 9 给出了正交试验中每个因素水平的电荷转移电阻（R_{ct}）的平均值和极差，可以看出，锚杆直径的极差最大，水灰比次之，细砂粒径最小，各因素对电荷转移电阻敏感性的影响顺序为锚杆直径>水灰比>细砂粒径。随着锚杆直径的增大，电荷转移电阻呈现出先增大后减小的现象；随着细砂粒径的增大，电荷转移电阻先略微减小后增大；随着水灰比的减小，电荷转移电阻呈现增大的趋势。

表 9　电荷转移电阻（R_{ct}）极差分析

Table 9　Extreme variance analysis of charge transfer resistance

R_{ct}/10^5 Ω

	因素	细砂粒径	锚杆直径	水灰比
均值	水平1	6.257	6.102	8.945
	水平2	6.141	9.159	6.203
	水平3	8.466	5.603	5.715
极差		2.325	3.556	3.230

表 10 为各因素关于电荷转移电阻的方差分析，从中可知，细砂粒径（F=5.007<$F_{0.05}$=19，p=0.167>0.05）、锚杆直径（F=10.813<$F_{0.05}$=19，p=0.085>0.05）、水灰比（F=8.843<$F_{0.05}$=19，p=0.102>0.05）3 个因素对电荷转移电阻影响不显著。

表 10　电荷转移电阻（R_{ct}）方差分析

Table 10　Variance analysis of charge transfer resistance

	因素			误差
	细砂粒径	锚杆直径	水灰比	
方差	10.296	22.236	18.186	2.056
自由度	2	2	2	2
F	5.007	10.813	8.843	
p	0.167	0.085	0.102	
R^2		0.961		

根据对正交试验结果的分析可知，锚杆直径对试样的拉拔荷载起控制性作用，水灰比对试样的孔隙溶液电阻（R_s）起控制性作用，电荷转移电阻（R_{ct}）受 3 个因素的影响程度相近，无显著性的控制因素。从 3 个因素对孔隙溶液电阻、电荷转移电阻以及拉拔荷载的影响规律可知，锚杆–砂浆界面的电化学参数与界面黏结性能之间存在较强的相关性，可以通过电化学参数对多因素作用下界面黏结性能的变化规律进行探究。

3.2　机理分析

根据上述电化学阻抗谱测试和拉拔试验的结果以及敏感性分析可知，由于试样的细砂粒径、水灰比及锚杆直径的不同，导致锚杆表面钝化膜的完整程度参差不齐，产生了 2 种不同类型的钝化膜，需采用 2 种等效电路模型进行拟合；此外，试样的拉拔荷载与电化学参数受 3 个因素的影响规律相似。KE 等[28]指出锚杆–砂浆试样的界面黏结性能与试样的电化学参数（R_s、R_{ct}）之间具有较强的相关性。因此，可以根据等效电路模型的变化，分析电化学参数与试样拉拔荷载之间的关系，同时结合电化学参数探究细砂粒径、锚杆直径、水灰比 3 个因素对锚杆砂浆界面黏结性能的影响。

图 7，8 分别为试样的拉拔荷载随孔隙溶液电阻（R_s）和电荷转移电阻（R_{ct}）变化的折线图，从图中可以看出，在锚杆直径相同的情况下，随着 R_s 和 R_{ct} 的增大，试样的拉拔荷载整体上呈现出增大的趋势。如前文所述，R_s 会随着砂浆总孔隙率的减小而增

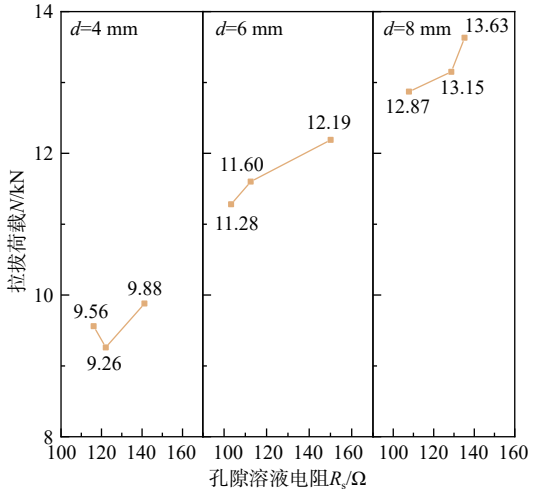


图 7　不同锚杆直径 (d) 下拉拔荷载–孔隙溶液电阻关系图

Fig. 7　Pullout load-pore solution resistance relationship for different anchor diameters

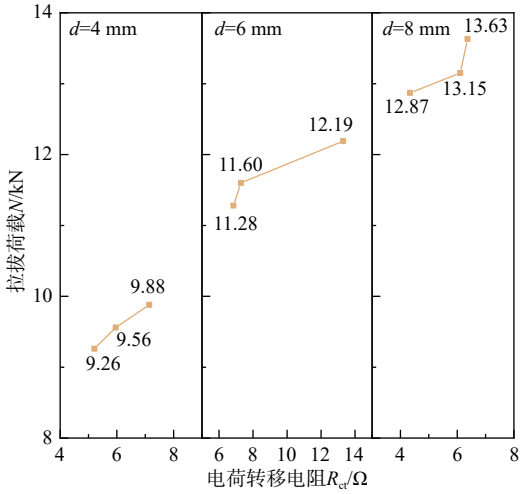
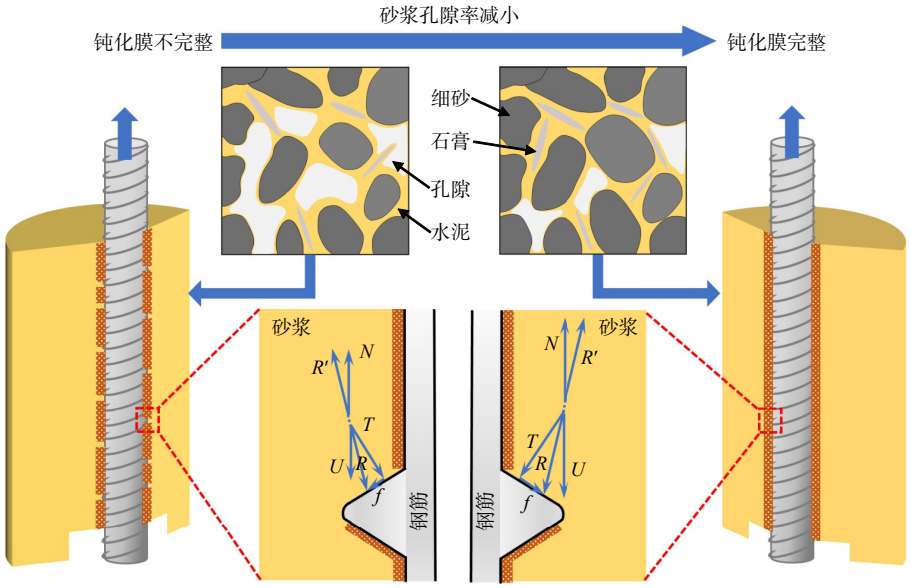


图 8　不同锚杆直径 (d) 下拉拔荷载–电荷转移电阻关系图

Fig. 8　Pullout load-charge transfer resistance relationship for different anchor diameters

大[40]，结合正交试验敏感性分析，随着细砂粒径的增大和水灰比的减小，R_s 呈现出增大的趋势，即增大细砂粒径[41] 和减小水灰比[42] 可以减小砂浆的总孔隙率，使砂浆结构更密实。而 R_{ct} 可以表征钝化膜的完整程度，通常情况下，钝化膜具有较高的电阻，近乎绝缘[43]，完整的钝化膜可以有效减少锚杆表面与溶液中电解质之间的直接接触，从而降低电荷转移的可能性，导致电荷转移电阻显著增大，即电荷转移电阻与钝化膜的完整程度呈正相关。如图 9 所示，在试样养护完成时，钝化膜的形成程度与砂浆的孔隙率密切相关，砂浆的孔隙率越低，其结构越密实，砂浆与锚杆的实际接触面积越大，硅酸盐水泥水化造成的碱性环境越稳定，钝化膜形成越完整[43]，如试验组 T8 就形成了较为完整的钝化膜。同时，钝化膜形成的过程伴随着硅酸盐水泥水化生成一次钙矾石以及石膏[44] 等水化产物填充于孔隙中[27]，使砂浆结构进一步密实，可以增大对锚杆的压力，使锚杆–砂浆界面的摩擦力增大，同时增大砂浆对锚杆的机械咬合力（砂浆对锚杆压力的轴向分力），进而导致试样的拉拔荷载增大。综上所述，细砂粒径的增大与水灰比的减小通过降低砂浆的总孔隙率，产生更多水化产物填充于孔隙中，使得试样的拉拔荷载增大，并加速钝化膜的形成，因而表现出拉拔荷载随 R_s 和 R_{ct} 的增大而增大趋势。



N. 拉拔荷载；*T*. 砂浆对锚杆的压力；*f*. 摩擦力；*U*. 机械咬合力；*R*, *R*′. 锚杆与砂浆所受合力

图 9　拉拔试验机理图

Fig. 9　Mechanism of pullout test

由拉拔荷载的敏感性分析结果可知，试样的拉拔荷载受到锚杆直径的影响程度显著高于其他 2 个因素，这是因为增大锚杆直径会直接大幅度增加锚杆−砂浆界面的面积，致使试样的拉拔荷载显著增大。而随着锚杆直径的增大，锚杆−砂浆界面的平均黏结强度则呈现出降低的趋势，这是因为锚杆直径的增大会使试样砂浆厚度有所减小，而且锚杆在拉拔荷载的作用下会产生泊松效应导致锚杆直径的轻微减小，这种直径的减小量会随着锚杆直径的增大而增大，从而导致平均黏结强度的减小[16]。同时，当锚杆直径增大时，锚杆−砂浆界面起始位置的应力集中现象更为明显，应力值更大，具有更大体积的损伤，因此，锚杆直径的增大会使界面的平均黏结强度降低[15]。

4　结　论

（1）基于电化学阻抗谱测试技术，在锚杆−砂浆试样养护完成时，由于细砂粒径、锚杆直径、水灰比等因素的不同，导致锚杆−砂浆界面出现钝化膜完整与钝化膜不完整 2 种状态，试样中仅试验组 T8（细砂粒径为 0.6 mm，锚杆直径为 6 mm，水灰比为 0.40）形成了完整钝化膜。

（2）采用极差分析法与方差分析法对正交试验进行敏感性分析，试样的拉拔荷载的控制性因素为锚杆直径（F=401.984>$F_{0.01}$=90，p=0.002<0.05），孔隙溶液电阻（R_s）的控制性因素为水灰比（F=38.166>$F_{0.05}$=19，p=0.026<0.05），电荷转移电阻（R_{ct}）则没有显著的控制性因素。

（3）根据电化学阻抗谱测试和拉拔试验的结果以及敏感性分析可知，随着细砂粒径的增大以及水灰比的减小，试样的孔隙溶液电阻（R_s）和电荷转移电阻（R_{ct}）整体上呈增大的趋势，并且发现锚杆−砂浆界面的拉拔荷载与 R_s 和 R_{ct} 呈正相关。R_s 的增大表示砂浆的孔隙率降低，R_{ct} 的增大表示形成了更为完整的钝化膜，表明砂浆越密实，钝化膜形成速度越快，并产生越多水化产物填充于砂浆的孔隙中，使砂浆越密实，增大对锚杆的压力，进而增大试样的拉拔荷载。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 王上上，陈富，李东贤，等. 锚杆不确定性对加固边坡失稳概率的影响 [J]. 地质科技通报，2022，41(2)：282-289.
WANG S S, CHEN F, LI D X, et al. Influence of anchor uncertainty on the failure probability of reinforced slope[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 282-289. (in Chinese with English abstract)

[2] WANG C L, ZHENG L B, WANG L Q, et al. Effects of the tensile and shear properties of bolts on the shear properties of bolted rock joints[J]. Journal of Earth Science, 2024, 35(5): 1626-1639.

[3] 周阳，来弘鹏，王兴广，等. 长锚杆/锚索改善深埋大跨度隧道初支结构受力试验研究 [J]. 岩土工程学报，2024，46(4)：853-863.
ZHOU Y, LAI H P, WANG X G, et al. Experimental study on improving mechanical characteristics of initial support structure of deep buried large-span tunnels with long bolts or cables[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(4): 853-863. (in Chinese with English abstract)

[4] 刘宇鹏，夏才初，吴福宝，等. 高地应力软岩隧道长、短锚杆联合支护技术研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2020，39(1)：105-114.
LIU Y P, XIA C C, WU F B, et al. A combined support technology of long and short bolts of soft rock tunnels under high ground stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 105-114. (in Chinese with English abstract)

[5] 张文翔，崔强，邱昊茨，等. 输电线路单群锚基础抗拔特征差异的现场足尺试验 [J]. 地质科技通报，2024，43(6)：114-124.
ZHANG W X, CUI Q, QIU H C, et al. On-site full-scale test research for difference of anti-pull bearing characteristics between single anchor and group anchors foundation of transmission lines[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(6): 114-124. (in Chinese with English abstract)

[6] 孙益振，郑卫锋，范志强. 输电线路节理化岩体注浆锚杆基础抗拔力模型试验研究 [J]. 岩土力学，2012，33(1)：78-82.
SUN Y Z, ZHENG W F, FAN Z Q. Tension model test research on grouted bolts foundation in jointed rock masses for transmission lines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 78-82. (in Chinese with English abstract)

[7] 吴善百，王亮清，吴琼，等. 地震作用下锚固岩质边坡动力响应研究进展与展望 [J]. 地球科学，2022，47(12)：4456-4468.
WU S B, WANG L Q, WU Q, et al. Advance and prospect for seismic dynamic response of anchored rock slope[J]. Earth Science, 2022, 47(12): 4456-4468. (in Chinese with English abstract)

[8] 李师毓，吴琼，王亮清，等. 地震作用下软硬互层顺层岩质边坡动力响应研究 [J]. 地球科学，2023，48(8)：3127-3136.
LI S Y, WU Q, WANG L Q, et al. Study of dynamic response of soft and hard interbedded rock slopes under earthquakes[J]. Earth Science, 2023, 48(8): 3127-3136. (in Chinese with English abstract)

[9] 朱鸿鹄. 工程地质界面：从多元表征到演化机理 [J]. 地质科技通报，2023，42(1)：1-19.
ZHU H H. Engineering geological interface: From multivariate characterization to evolution mechanism[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(1): 1-19. (in Chinese with English abstract)

[10] YU S S, ZHU W C, NIU L L, et al. Experimental and numerical analysis of fully grouted long rockbolt load-transfer behavior[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 85: 56-66.

[11] HAIDAR H H, MUSSA F I, DAWOOD A O, et al. Experimental study of post installed rebar anchor systems for concrete structure[J]. Civil and Environmental Engineering, 2020, 16(2): 308-319.

[12] YANG S Y, CHEN X L, HAN M, et al. Effect of sulfate attack,

drying-wetting cycles and freezing-thawing cycles on reinforced concrete columns under eccentric loads[J]. Structures, 2022, 45: 1864-1877.

[13] XU S H, LI A B, JI Z Y, et al. Seismic performance of reinforced concrete columns after freeze-thaw cycles[J]. Construction and Building Materials, 2016, 102: 861-871.

[14] MOOSAVI M, JAFARI A, KHOSRAVI A. Bond of cement grouted reinforcing bars under constant radial pressure[J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(1): 103-109.

[15] ZHANG N, GU Q, WU Y Z, et al. Refined peridynamic modeling of bond-slip behaviors between ribbed steel rebar and concrete in pull-out tests[J]. Journal of Structural Engineering, 2022, 148(12): 04022197.

[16] HU Z J, SHAH Y I, YAO P F. Experimental and numerical study on interface bond strength and anchorage performance of steel bars within prefabricated concrete[J]. Materials, 2021, 14(13): 3713.

[17] XU H. Research on anchor characteristics of anchorage body consideration of bolt corrosion[J]. Advanced Materials Research, 2011, 374/377: 2497-2504.

[18] MENG F J, CHEN W X, MA J J, et al. Bond behaviors of BFRP bars in concrete using carbon fiber rib anchorage[J]. Construction and Building Materials, 2022, 345: 128305.

[19] KALTHOFF M, RAUPACH M. Pull-out behaviour of threaded anchors in fibre reinforced ordinary concrete and UHPC for machine tool constructions[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 33: 101842.

[20] EL ALAMI E, FEKAK F E, GARIBALDI L, et al. Numerical study of the bond strength evolution of corroded reinforcement in concrete in pull-out tests[J]. Applied Sciences, 2022, 12(2): 654.

[21] 姜凤娇. 混凝土水泥水化、氯离子扩散及钢筋锈蚀的电化学分析 [D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2020.
JIANG F J. Electrochemical analysis of cement hydration, chloride ion diffusion and steel corrosion of concrete[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)

[22] 黄俊. 电催化界面和反应的电化学阻抗谱研究: 经典永不褪色 [J]. 电化学, 2020, 26(1): 1-18.
HUANG J. Electrochemical impedance spectroscopy for electrocatalytic interfaces and reactions: Classics never die[J]. Journal of Electrochemistry, 2020, 26(1): 1-18. (in Chinese with English abstract)

[23] 李国翠. 水泥基材料水化过程基本特性的电化学阻抗谱研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
LI G C. Electrochemical impedance spectroscopy study on basic characteristics of hydration process of cement-based materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)

[24] YANG L X, WU Y T, CHEN S, et al. A promising hybrid additive for enhancing the performance of alkaline aluminum-air batteries[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 257: 123787.

[25] OLIVEIRA R L N, BRAGANÇA M O G P, MEDEIROS-JUNIOR R A. Effect of coarse aggregate size on corrosion of reinforced concrete exposed to carbonation and chloride ingress by electrochemical measurements[J]. Construction and Building Materials, 2022, 361: 129665.

[26] DONG B Q, QIU Q W, XIANG J Q, et al. Electrochemical impedance interpretation of the carbonation behavior for fly ash-slag-cement materials[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 933-942.

[27] KE R, WANG L Q, ZOU Z X, et al. An analytical model for anchor-mortar interface bonding based on electrochemical impedance spectroscopy[J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 142: 105196.

[28] KE R, WANG L Q, ZHENG L B, et al. Deterioration of mechanical properties at the anchor-mortar interface considering the effect of two-phase corrosion[J]. Construction and Building Materials, 2023, 370: 130664.

[29] JIANG L H, NIU Y L, JIN W Z, et al. Influence of chloride salt type on chloride ion diffusion performance of alkali-activated slag mortar[J]. Construction and Building Materials, 2022, 351: 128930.

[30] DU F Y, JIN Z Q, SHE W, et al. Chloride ions migration and induced reinforcement corrosion in concrete with cracks: A comparative study of current acceleration and natural marine exposure[J]. Construction and Building Materials, 2020, 263: 120099.

[31] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范: GB50086-2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision,Insplieation and Quarantine of the People's Republic of China. Technical code for engineering of ground anchorages and shotcrete support: GB50086-2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese)

[32] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构后锚固技术规程: JGJ145-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for post-installed fastenings in concrete structures: JGJ145-2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)

[33] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构试验方法标准: GB/T50152-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Insplieation and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for test method of concrete structures: GB/T50152-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)

[34] 伍远辉, 罗宿星, 付盈盈, 等. 氯离子环境下混凝土钢筋的电化学阻抗谱特征 [J]. 表面技术, 2011, 40(3): 65-67.
WU Y H, LUO S X, FU Y Y, et al. EIS characteristics of the steel in concrete in environment containing chloride ion[J]. Surface Technology, 2011, 40(3): 65-67. (in Chinese with English abstract)

[35] 施锦杰, 孙伟. 等效电路拟合钢筋锈蚀行为的电化学阻抗谱研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(5): 387-392.
SHI J J, SUN W. Equivalent circuits fitting of electrochemical impedance spectroscopy for corrosion of reinforcing steel in concrete[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2011, 23(5): 387-392. (in Chinese with English abstract)

[36] RIBEIRO D V, ABRANTES J C C. Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to monitor the corrosion of reinforced concrete: A new approach[J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 98-104.

[37] CARÉ S, NGUYEN Q T, L'HOSTIS V, et al. Mechanical proper-

ties of the rust layer induced by impressed current method in reinforced mortar[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(8/9): 1079-1091.

[38] LIU G J, ZHANG Y S, WU M, et al. Study of depassivation of carbon steel in simulated concrete pore solution using different equivalent circuits[J]. Construction and Building Materials, 2017, 157: 357-362.

[39] LI Y, YIN S P, LÜ H L. Performance of interface between TRC and existing concrete under a chloride dry-wet cycle environment[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(3): 876-890.

[40] SHI T, ZHENG L W, XU X C. Evaluation of alkali reactivity of concrete aggregates via AC impedance spectroscopy[J]. Construction and Building Materials, 2017, 145: 548-554.

[41] JIANG Z, CAI G J, TIAN G L, et al. Effect of aggregate particle size on mortar pore structure[J]. Construction and Building Materials, 2022, 352: 128988.

[42] ZHENG S J, LIU T L, JIANG G S, et al. Effects of water-to-cement ratio on pore structure evolution and strength development of cement slurry based on HYMOSTRUC3D and micro-CT[J]. Applied Sciences, 2021, 11(7): 3063.

[43] XIAOYU, ZHANG Y J, QU N, et al. Electrochemical analysis of passivation film formation on steel rebar in concrete[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2016, 11(7): 5870-5876.

[44] GUTBERLET T, HILBIG H, BEDDOE R E. Acid attack on hydrated cement: Effect of mineral acids on the degradation process[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 74: 35-43.

Summary for “基于电化学阻抗分析的多因素作用下锚杆–砂浆界面黏结性能研究”

Bonding performance of anchor-mortar interface under multifactor action based on electrochemical impedance analysis

WANG Xuchen，KE Rui，WANG Liangqing*，ZHU Yue，LYU Meng，ZHENG Luobin，SUN Zihao

Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

First author，E-mail：wxc1834@126.com

* Corresponding author，E-mail：wlq027@126.com

Abstract：[**Objective**] The bonding performance of the anchor-mortar interface is influenced by multi factors, yet existing studies predominantly focus on single-factor effects, leaving a gap in understanding the combined impact of multiple factors. This study aims to address this gap by systematically investigating the interfacial bonding performance under multifactorial conditions. [**Methods**] The anchor-mortar interface is taken as the research object. Electrochemical impedance spectroscopy is used to characterize the interfacial state and derive electrochemical parameters under different varying conditions. Pullout tests are conducted to quantify the bond strength of the anchor-mortar interface. By correlating electrochemical parameters with pullout load data at the completion of sample curing, the relationship between these parameters and interfacial performance is established. Additionally, the influence of the three factors on the bonding performance of the anchor-mortar interface is analyzed. [**Results**] Sensitivity analysis of the orthogonal test results reveals that the pullout load is predominantly governed by the anchor rod diameter, whereas the pore solution resistance (R_s) is primarily influenced by the water-cement ratio. No dominant factor is identified for the charge transfer resistance (R_{ct}). During the early curing stage, two distinct interfacial states are observed under the combined influence of the three factors: A fully developed passivation film and partially developed passivation film. Within the tested parameter range, the pullout load increases with larger fine sand particle sizes and lower water-cement ratios. A positive correlation is observed between the pullout load and both the pore solution resistance (R_s) and charge transfer resistance (R_{ct}). [**Conclusion**] These findings provide critical insights for optimizing the formulation and application of anchored structural mortar.

Key words: anchor-mortar interface；multifactor；interfacial bonding performance；electrochemical impedance spectroscopy；pullout test

Received：2023-11-06；Revised：2024-01-13；Accepted：2024-01-18

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230622