

氯盐环境下钢筋连接件受拉破坏特性研究

李迎珠¹, 张 勤¹, 李文杰², 杨翹楚¹, 李 佳³, 贡金鑫³

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210024; 2. 中国交通建设集团有限公司, 北京 100088;

3. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为研究不同钢筋连接件在腐蚀环境下的拉伸性能和破坏特性, 对不同直径及腐蚀程度的双面电弧焊、套筒冷挤压、墩粗直螺纹和灌浆套筒四种钢筋连接件分别进行电化学腐蚀试验和拉伸性能试验, 研究钢筋直径、腐蚀程度及连接方式对钢筋连接件受拉破坏特性的影响, 并建立不同腐蚀程度下钢筋连接件拉伸破坏强度计算模型。结果表明: 腐蚀环境下钢筋连接件的抗拉性能明显下降, 且受钢筋直径和腐蚀程度的影响明显; 相同腐蚀程度下, 灌浆套筒连接件的拉伸性能相较于其他连接方式的钢筋连接件更为稳定, 当理论腐蚀率为 20% 时, 其拉伸荷载-位移曲线仍有明显的屈服平台, 破坏强度可达到未腐蚀试件的 95%; 所建立的拉伸破坏强度计算模型可用于腐蚀环境下钢筋连接件抗拉性能评估和破坏强度预测。

关键词: 钢筋连接件; 腐蚀; 拉伸性能; 破坏形态; 强度

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)04-0546-09

Investigation on tensile failure characteristics of steel connectors under corrosive environment

LI Yingzhu¹, ZHANG Qin¹, LI Wenjie², YANG Qiaochu¹, LI Jia³, GONG Jinxin³

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. China Communications Construction, Beijing 100088, China;

3. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to study the tensile properties and the failure pattern of different steel connectors in the corrosive environment, electrochemical corrosion test and tensile test for four kinds of steel connectors such as double-sided arc welding, cold extrusion sleeve, upsetting straight thread sleeve and grouting sleeve were carried out respectively. The effects of steel bar diameter, corrosion degree and connection mode on the tensile failure characteristics of steel connectors were studied, and the calculation model of tensile failure strength of steel connectors under different corrosion degrees was established. The results show that the tensile properties of the steel connectors degenerate obviously under the corrosion environment, and the connection properties of the connectors are more obviously affected by the corrosion levels and the diameters. With the same corrosion levels, the tensile properties of the grouting sleeve connectors are more stable than that of the other three kinds of connectors. Also, the load-displacement curves of the grouting sleeve connectors still keep an obvious yield plateau even under the corrosion level with 20% theoretical corrosion ratio, and the corresponding failure strength can still reach 95% of that of the uncorroded specimen. Furthermore, the proposed calculation model of the tensile failure strength of corroded steel connectors can be used to evaluate the tensile properties and predict the failure strength of steel connectors in the corrosive environment.

Key words: steel connector; corrosion; tensile property; tensile failure characteristic; strength

钢筋连接件是保证混凝土结构整体性的重要构件, 其受力性能直接关系着结构的安全性。随着装配式建筑在国内的大力发展, 装配式钢筋混凝土结构节点连接件尤其是灌浆套筒钢筋连接件

收稿日期: 2022-11-11 修回日期: 2023-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278496、51978125), 江苏省自然科学基金资助项目(BK20211206)

第一作者: 李迎珠(1997—), 女, 工学硕士。主要从事钢筋混凝土耐久性等研究。E-mail: hhulizyly@163.com

通信作者: 张 勤(1983—), 男, 工学博士(博士后), 副教授。主要从事钢筋混凝土结构抗震及耐久性等研究。E-mail: zhangqin8190@163.com

的连接性能成为研究热点^[1-3]。我国《装配式混凝土建筑技术标准》(GBT 51231—2016)^[4]给出常用的钢筋连接方式主要有绑扎连接、焊接连接、机械连接(包括灌浆套筒连接)等几类。针对不同类型钢筋连接件的受力性能,目前已有学者就此开展了相关研究。如采用绑扎连接施工方便,但由于搭接重叠长度较长,对钢筋直径有所限制,且钢筋重叠部分用量不经济^[5]。焊接连接虽受力性能良好但其连接可靠性受实际工况的影响易不稳定, Sun 和 Feng^[6]的研究表明,可靠的焊接件通常不存在力学和变形方面的缺陷;但也有研究^[7]认为焊接产生的热影响区、残余应力及焊缝缺陷可能会引起钢筋发生脆性破坏。机械连接的连接质量相对稳定,黄远等^[8]通过静力拉伸试验研究了钢筋半灌浆套筒连接试件的力学性能,提出了防止试件发生钢筋刮犁式拔出和套筒滑丝破坏的设计方法。郑清林等^[9]和 Wu 等^[10]则分别探讨了整体装配式结构构件中灌浆套筒钢筋连接件的力学性能与灌浆龄期、钢筋类型及灌浆缺陷等因素之间的关系。尽管上述研究对钢筋连接件的连接特性、影响因素及其适用性等方面进行了分析,但研究中尚未考虑钢筋连接件所处的不利环境影响。事实上,现实环境中钢筋混凝土结构在使用过程中会受到不同程度的腐蚀,这使得钢筋连接区受力性能发生退化并成为整个结构的薄弱区,进而对结构整体的安全性产生不利影响。因此,研究钢筋连接件在腐蚀环境下的力学性能劣化问题具有重要意义。

当前腐蚀环境下锈蚀钢筋连接件受力性能劣化问题已引起了一些学者关注。徐港等^[11]采用快速电化学腐蚀的方法对腐蚀环境下的钢筋搭接连接性能展开研究,结果表明腐蚀后的搭接承载力显著退化。Apostolopoulos 等^[12]和 Tang 等^[13]对腐蚀后的焊接接头性能展开研究,发现接头的受力性能和延伸性能均随着腐蚀率的增加而退化,并认为焊接接头受力性能下降可能与焊缝处产生的应力集中相关。Yosuke A^[14]等研究了氯离子浓度和预应力对灌浆预应力钢筋腐蚀的影响,评价了预应力钢在预应力作用下的腐蚀行为并给出了预应力作用下氯化物腐蚀的阈值。李佳等^[5]对氯盐腐蚀工况下不同钢筋连接件的拉伸破坏形态及抗拉强度进行了试验研究,结果表明钢筋连接区的破坏形态与钢筋连接方式及腐蚀程度关系密切。上述研究从不同角度对氯盐腐蚀环境下各种钢筋连接件的连接特性进行了研究讨论,但总体来看

系统性和深入性仍有待进一步提高。

为深入研究讨论锈蚀钢筋连接件的力学性能,本文重点对双面电弧焊、冷挤压套筒、墩粗直螺纹套筒和灌浆套筒四种不同的钢筋连接件在不同腐蚀程度下不同直径时的破坏形态和受拉性能进行了研究,为氯盐腐蚀环境下钢筋连接件的进一步推广应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

综合考虑不同连接方式、钢筋直径以及腐蚀程度的影响,共设计了 54 组不同工况连接件试件,每组数量为 3,共 162 根。钢筋连接件试件分别按《钢筋焊接及验收规程》(JGJ18—2012)^[15]和《钢筋机械连接技术规程》(JGJ107—2016)^[16]加工制作。各钢筋连接件直径及腐蚀量工况详情见表 1。其中,A、B、C 和 D 依次对应双面电弧焊、冷挤压套筒、墩粗直螺纹套筒和灌浆套筒 4 种连接方式,16、20 和 25 分别对应钢筋直径为 16、20 和 25 mm,0、5、10、15 和 20 分别对应理论腐蚀率为 0%、5%、10%、15%和 20%。

表 1 试件设计参数
Tab. 1 Specimens design parameters

序号	试件编号	钢筋连接方式	钢筋直径	理论腐蚀率	试件数量
1	A/B/C/D16-0	双面电弧焊/冷挤压	16	0	3
2	A/B/C/D16-5			5	3
3	A/B/C/D16-10			10	3
4	A/B/C16-15			15	3
5	A/B/C16-20			20	3
6	A/B/C/D20-0	套筒/墩粗直螺纹	20	0	3
7	A/B/C/D20-5			5	3
8	A/B/C/D20-10			10	3
9	A/B/C20-15			15	3
10	A/B/C 0-20			20	3
11	A/B/C/D25-0	筒/灌浆套筒	25	0	3
12	A/B/C/D25-5			5	3
13	A/B/C/D25-10			10	3
14	A/B/C25-15			15	3
15	A/B/C25-20			20	3

注:直径单位为 mm;腐蚀程度单位为 %。

在试件进行加载前应磨掉涂裹的环氧树脂,避免试件在拉伸过程中因夹持端的松动发生位移,影响试验结果。此外为了方便量测拉伸试件的断后伸长率,可以在钢筋连接区域外的两侧每隔 10 cm 标记一段,如图 1 所示。

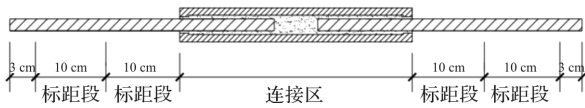


图 1 试件量测标距示意图

Fig. 1 Measurements of gauge length for specimens

1.2 材料性能

试验选择 HRB400 螺纹钢, 其力学性能如表 2 所示. 本试验设计中双面电弧焊试件的焊缝处材料与钢筋母材一致, 焊接长度统一为 200 mm, 所使用的冷挤压套筒、镦粗直螺纹套筒和灌浆套筒试件均满足国家相关标准. 表 3 给出了各钢筋连接件套筒的具体力学性能.

表 2 HRB400 钢筋机械性能

Tab. 2 Mechanical property of HRB400 steel bar

型号	直径	屈服强度	破坏强度	伸长率
HRB400	16	430	590	22
	20	435	625	25
	25	445	640	25

注: 直径单位为 mm; 强度单位为 MPa; 伸长率单位为 %.

表 3 各钢筋试件连接区套筒机械性能

Tab. 3 Mechanical property of joint sleeves for steel specimens

钢筋连接方式	直径	规格	屈服强度	破坏强度	伸长率
冷挤压套筒	16	30×5	382	630	10.5
	20	36×5.6	390	635	13.5
	25	45×7.3	391	630	13
镦粗直螺纹	16	24.4×4.7	378	605	11
	20	33.1×6.25	375	630	11.5
	25	44.1×7.45	387	635	13.5
灌浆套筒	16	315×46	463	620	12
	20	376×51	452	624	13
	25	455×60	475	664	13.5

注: 直径单位为 mm; 套筒规格单位为 mm; 强度单位为 MPa; 伸长率单位为 %.

1.3 试件腐蚀及加载

采用电化学方法对钢筋连接件进行加速腐蚀试验, 相关试验原理及实施过程参见文献[5]. 为了更接近自然环境下的钢筋腐蚀, 本文中电化学腐蚀试验中采用的电流密度为 0.02 mA/cm^2 , 通电时间, 通电时间由直径、理论腐蚀率等变量根据法拉第定律得出^[17]. 试验前应采用丙酮清洗试件, 通电腐蚀开始后, 每隔 48 小时进行一次人工除锈, 防止浮锈产物影响腐蚀进程. 电化学腐蚀完成后, 将试件用浓度 10% 的盐酸溶液清洗、除锈、烘干, 称重并记录腐蚀前后的试件质量, 计算出质量损失率, 本文所采用的理论腐蚀程度和试验所得实

际腐蚀程度均根据钢筋连接件受腐蚀前后的质量损失率计算所得.

试件腐蚀后, 采用 1 000 kN 电液伺服万能材料试验机进行拉伸试验, 如图 2 所示, 加载按位移控制, 加载速率为 1.0 mm/min . 试件发生拉伸破坏后, 拉伸试验机自动停止加载并存储荷载、位移等数据. 需要注意的是, 安装试件时, 应保持试验装置上下载荷端的顶板与试件端部距离为 1 cm, 保证试件的安装牢固.



图 2 拉伸试验装置

Fig. 2 Test setup for tensile

2 试验结果及分析

2.1 试验现象及拉伸破坏特征

2.1.1 电化学腐蚀试验现象

电化学腐蚀结束后, 连接件腐蚀区锈迹特征明显, 表面附着厚厚的暗灰色、形态疏松的锈蚀物(主要成分为未完全氧化的 Fe_3O_4), 盐酸清洗至试件表面光洁后, 腐蚀区域的钢筋均变细, 且腐蚀程度越大, 钢筋表面锈坑分布越不均匀, 锈蚀产物堆积越厚. 不同种类的钢筋连接件在腐蚀条件下的锈蚀损伤程度有所不同. 双面电弧焊试件腐蚀后, 其连接区外观上无明显残缺; 冷挤压套筒与镦粗直螺纹连接件的锈蚀量随腐蚀时间增加而不断增大, 其套筒外壁破损也逐渐明显, 并且镦粗直螺纹试件受腐蚀最为严重, 当理论腐蚀率达到 20% 时其外表面锈损接近 1/2, 锈损严重部位可直接看到内部纹路, 连接区两端钢筋明显变细; 而由于灌浆料的绝缘作用, 灌浆套筒试件套筒两侧锈蚀区钢筋表面并未出现锈蚀物, 锈蚀物仅分布在套筒区域, 酸洗后可观察到随腐蚀程度增大, 连接区外壁坑蚀变长变深, 锈坑位置及形态分布无规则. 下图为各种类钢筋连接件酸洗后的形态图.



图3 钢筋连接件酸洗后形态

Fig. 3 Modes of steel connector specimens after pickling

2.1.2 拉伸试验破坏特征

其破坏类型主要可分为钢筋母材断裂与连接区破坏两大类. 根据连接方式和腐蚀程度不同, 连接区破坏可细分为三种类型: 焊缝断裂破坏、套筒断裂破坏及粘结滑移破坏. 不同类型钢筋连接件的拉伸破坏形态如图4所示. 对于未腐蚀的对比试件, 所有钢筋连接件在拉伸破坏时均表现为钢筋母材断裂破坏, 如图4(a)所示, 这表明在无腐蚀条件下, 四种钢筋连接件均能保证良好的连接性能. 对于腐蚀后的试件, 灌浆套筒连接件试件拉伸后的破坏形态均为如图4(a)所示的钢筋母材断裂破坏, 其拉伸试验破坏特征与未腐蚀条件下的灌浆套筒连接件类似, 但初始刚度与最大位移均有所减小, 这表明由于灌浆料的绝缘作用在一定程度上阻止了锈蚀的扩散, 同时其粘结作用保证了钢筋与套筒间的较可靠连接, 但腐蚀条件对钢筋的拉伸性能有一定的削弱作用. 腐蚀程度较小时, 其余三种连接件大部分的破坏形态仍为钢筋母材拉断, 腐蚀程度较高时部分试件则表现为连接区破坏. 当理论腐蚀率增大为5%时, 对于直径16 mm的双面电弧焊连接件, 发生如图4(b)所示的焊缝断裂破坏, 这主要是由于焊缝边缘区域截面突变产生的应力局部增大与腐蚀效果叠加引起的^[17]; 而对于直径16 mm的冷挤压套筒连接件则主要发生如图4(c)所示的粘结滑移破坏, 这是由于锈蚀导致冷挤压套筒试件连接区两侧出现裂缝, 套筒内部螺纹也有所破坏, 套筒与钢筋间挤压力减小, 原先通过挤压力固定在套筒内的钢筋从套筒滑出; 当理论腐蚀率达到15%时, 对于直径25 mm的冷挤压套筒钢筋连接件和直径为25

mm的镦粗直螺纹钢筋连接件, 其拉伸破坏形式主要表现为如图4(d)和(e)所示的连接区套筒破坏, 此时套筒内部螺纹与钢筋咬合依然良好, 但筒壁在电化学腐蚀下削弱严重, 在拉伸试验过程中的破坏瞬间套筒断裂为二. 部分理论腐蚀率达到20%的镦粗直螺纹钢筋连接件发生如图4(f)所示的粘结滑移破坏, 此腐蚀率工况下的镦粗直螺纹试件连接区域套筒基本锈蚀贯通, 内部直螺纹锈蚀严重, 且套筒外表面积明显减小, 连接区几乎完全丧失受拉性能. 上述受拉破坏特征表明, 当腐蚀程度足够大时, 连接区域的破坏比钢筋母材断裂更早发生. 值得注意的是, 随着腐蚀程度的逐渐增大, 直径较大的钢筋连接件的受拉性能受腐蚀影响削弱程度要明显高于直径较小的钢筋连接件, 这是因为当钢筋直径较大时其受腐蚀的接触面越大, 从而实际腐蚀程度也越大, 以理论腐蚀率为10%的冷挤压套筒为例, 当直径分别为16、20和25 mm时, 其实际腐蚀率分别约为6.8%、7.1%和8.1%, 实际腐蚀程度逐渐增强, 为此直径较大的钢筋连接件更容易发生连接区域的破坏.



图4 试件拉伸破坏形态

Fig. 4 Tensile failure modes of specimens

2.2 钢筋连接件经腐蚀后的荷载-位移曲线

图5给出了拉伸试验下不同钢筋连接件的荷载-位移曲线. 需要说明的是, 拉伸曲线的屈服点

是根据连接件试件拉伸时第一次达到屈服应变时试件的位移和相应的荷载确定的,无明显屈服平台的试件则参照规范以产生 0.2% 残余变形的应力

值为其屈服极限^[2];而破坏点则是由试验中试件破坏前的荷载峰值点确定的。

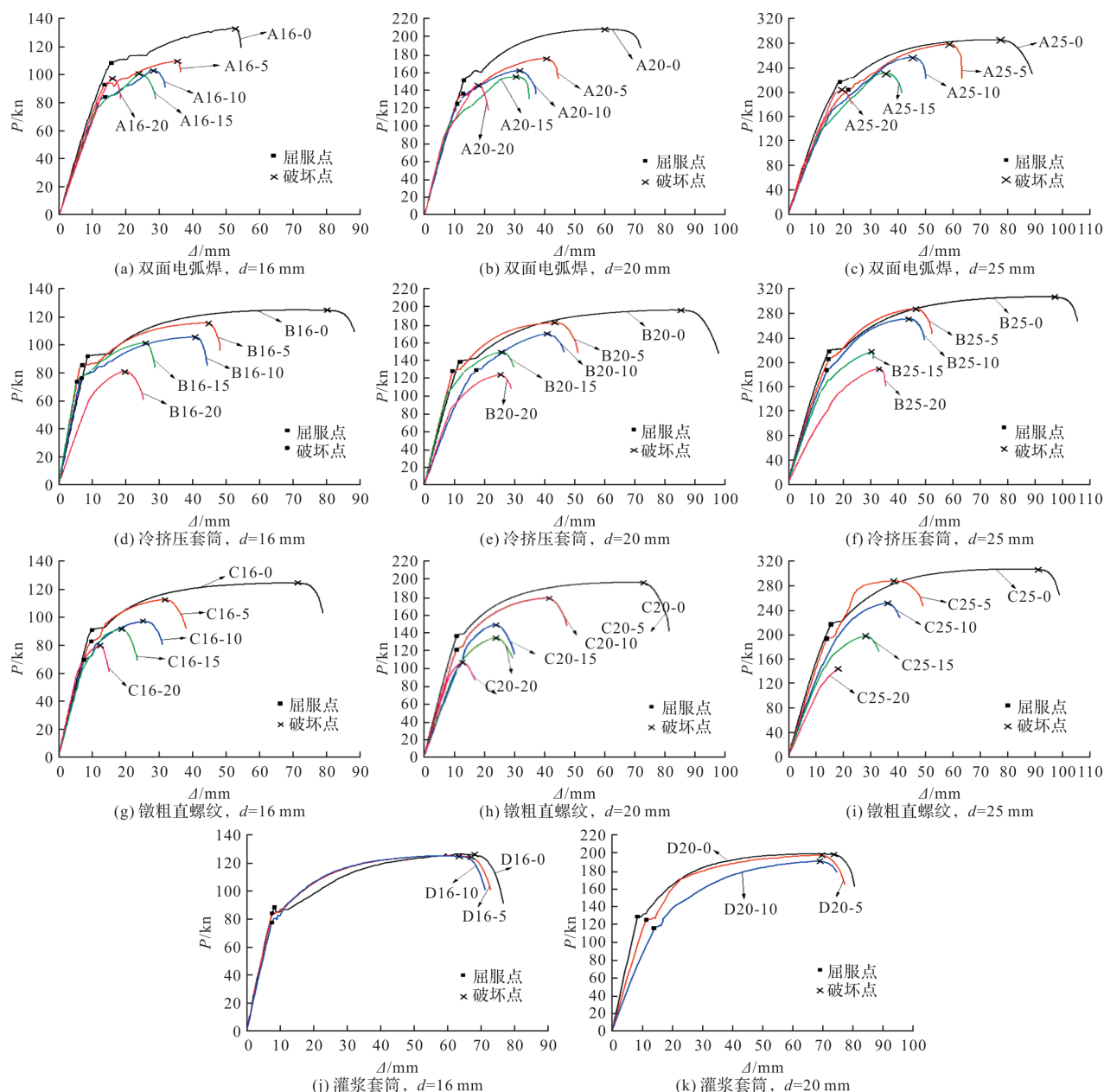


图5 拉伸作用下各锈蚀试件荷载-变形曲线

Fig. 5 Load-deformation curves of corroded steel joints under tensile loading

由图5得出,各连接件拉伸屈服前基本为弹性状态,且直径相同时随着腐蚀程度的增加弹性阶段荷载-位移曲线斜率逐渐减小。这表明,随着腐蚀程度增大,钢筋连接件的受拉刚度有所减小,且直径越大时刚度减小越明显;对于同类型钢筋连接件,钢筋直径越大,腐蚀对拉伸性能的影响越明显。随着腐蚀程度的不断增大,四种钢筋连接件的极限荷载和极限变形均有不同程度的减小,屈服平台逐渐缩短,后期变形能力显著下降,越来越趋于脆性破坏。对于参照组未经腐蚀的试件,

其荷载-变形曲线与钢筋母材的拉伸曲线基本一致,有明显的屈服平台,表现为钢筋母材拉断破坏。对于双面电弧焊连接件,当理论腐蚀率达到5%时屈服平台即明显缩短(参见图5(a))。直径为20mm、理论腐蚀率为20%时,其屈服平台几乎消失,极限变形严重降低,降低幅度可达50%(参见图5(b)),这是由于焊缝边缘处的应力集中和腐蚀环境的共同影响导致连接件发生了焊缝断裂破坏。对于理论腐蚀率达5%的冷挤压套筒连接件,其屈服平台虽有缩短,但缩短程度基本可忽略不

计, 几乎不影响其拉伸荷载-变形曲线(参见图 5(d)~(f)); 连接件拉伸试验前期荷载-变形曲线与未腐蚀的冷挤压套筒对照组连接件基本一致, 但在极限变形达到对照组的约 50% 时会突然破坏, 此时钢筋从套筒滑出发生粘结滑移破坏; 该现象也同样出现在理论腐蚀率为 5% 和 10% 的镦粗直螺纹连接件的拉伸曲线上(参见图 5(g)~(i)). 对于腐蚀率较大(如腐蚀率为 20%) 时, 冷挤压套筒和镦粗直螺纹连接件荷载-位移曲线的屈服平台段基本消失, 极限变形降低显著, 表现出明显的脆性破坏特性(参见图 5(d)~(i)). 这是由于连接区套筒随着腐蚀程度的增大腐蚀严重, 试件表现为连接区先于钢筋破坏的套筒断裂破坏. 对于灌浆套筒连接件, 其荷载-拉伸曲线屈服平台明显, 极限荷载和极限变形有所下降但可忽略不计, 体现出良好的变形能力, 连接区灌浆套筒连接件在腐蚀环境下性能稳定, 其拉伸曲线能与钢筋母材的拉伸曲线基本保持一致(参见图 5(j)和 5(k)).

由图还可以看出, 随着腐蚀程度的增大, 镦粗直螺纹连接件的拉伸性能下降最为明显, 而灌浆套筒连接件的抗拉性能下降较为平缓, 体现了较强的抗腐蚀能力. 此外, 随着腐蚀程度增大, 钢筋直径越大的连接件抗拉性能下降越迅速, 连接区更容易先于钢筋母材破坏.

2.3 屈服强度和破坏强度

2.3.1 屈服强度

为进一步分析腐蚀率对钢筋连接件的力学性能的影响, 图 8 与图 9 分别给出了拉伸荷载作用下的屈服强度和破坏强度与平均质量损失率之间的关系. 特别指出, 本文统一采用锈蚀钢筋连接件拉伸试验中屈服荷载与锈蚀钢筋的等效截面面积之比来计算屈服强度^[2].

$$f_y = P_y / A_d \quad (1)$$

式中: f_y 为锈蚀连接件的屈服强度(MPa); P_y 为拉伸试验中的屈服荷载(kN); A_d 为试件的等效截面面积.

由于电化学腐蚀后的钢筋表面腐蚀情况很不均匀, 由图 6 所示, 在实际测量中钢筋腐蚀后的最小直径无法准确确定, 因此, 屈服强度根据钢筋等效截面面积予以计算. 此外, 尽管试件连接区与待连接母材的直径有较大的差距, 理论上二者的腐蚀率会有所不同; 但文献^[5]的研究结果表明, 相同腐蚀程度下仅连接区腐蚀和连接区与钢筋母材共同腐蚀时的平均腐蚀率差距并不大(如图 7 所示), 可近似认为相等.



图 6 电化学腐蚀钢筋表面锈坑图

Fig. 6 Rust pits on the surface of steel bar

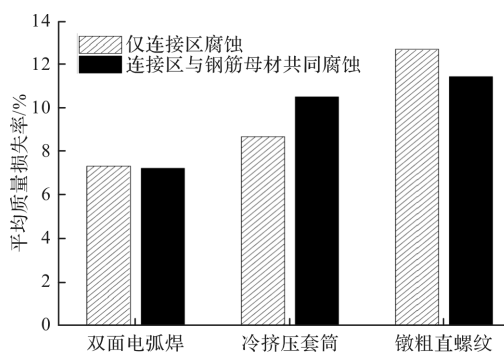
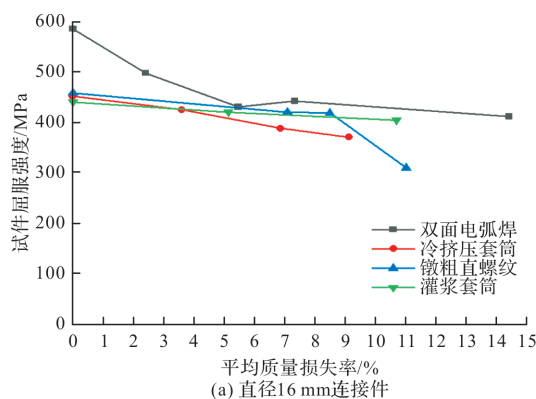


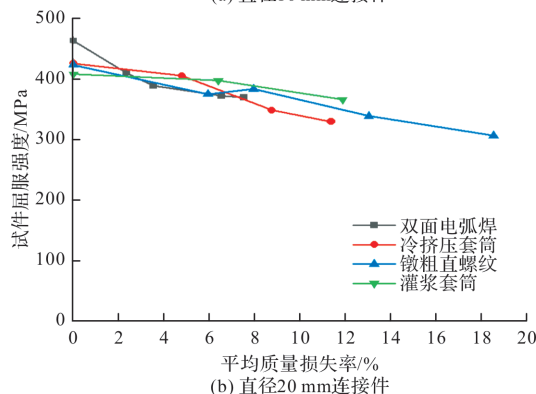
图 7 平均质量损失率对比图^[5]

Fig. 7 Comparison of average mass loss rates^[5]

图 8 为不同直径的钢筋连接件在不同腐蚀程度时的屈服强度.



(a) 直径16 mm连接件



(b) 直径20 mm连接件

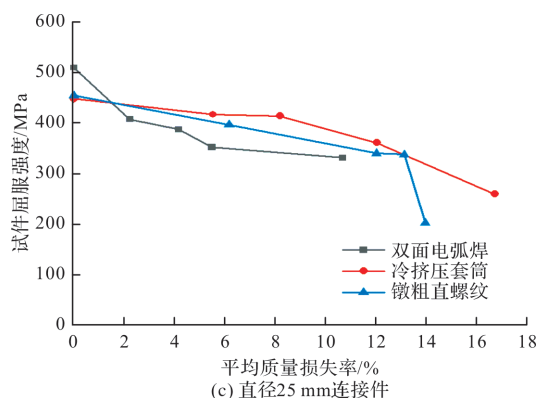


图8 试件屈服强度

Fig. 8 Yield strength of specimens

由图可看出,随着平均质量损失率的增大,试件屈服强度呈降低趋势,且直径较大的钢筋连接件比直径较小时降低幅度大。当钢筋直径相同时,双面电弧焊连接件在腐蚀环境下的屈服强度随腐蚀程度的增大降低最快,其余三种连接件的屈服强度在腐蚀率较小时均下降较为平缓。这主要是由于双面电弧焊连接件受焊接热效应和残余应力效应的叠加影响^[17],其拉伸屈服强度在腐蚀环境下的降低程度受腐蚀程度影响最大。当腐蚀率较大(如腐蚀率>10%)时,镦粗直螺纹连接件屈服强度会出现急速降低情况,这是由于高腐蚀程度下其连接区域的套筒腐蚀严重极易被锈蚀穿通,连接区内部螺纹腐蚀严重,受拉性能几乎完全丧失。

2.3.2 破坏强度

为综合考虑腐蚀程度和钢筋直径对不同连接件破坏形态和连接性能的影响,本文统一采用破坏强度来表征不同锈蚀钢筋连接件的极限承载能力和抗腐蚀能力。该强度定义为连接件受拉试验中最大荷载与钢筋连接件腐蚀后的等效截面面积之比^[2]。

$$f_t = P_t / A_d \quad (2)$$

式中: f_t 为锈蚀连接件的破坏强度(MPa); P_t 为拉伸试验中的破坏荷载(kN); A_d 为试件的等效截面面积。其中,钢筋连接件等效截面面积根据破坏形式的不同分别采用钢筋等效截面面积和连接区等效截面面积予以表征。

图9给出了钢筋连接件在不同腐蚀程度时的破坏强度变化趋势。由图9可看出,试件破坏强度随腐蚀程度的增大而降低,且钢筋直径较大的连接件比钢筋直径较小的连接件降低更明显;当钢筋直径相同时,双面电弧焊钢筋连接件的抗拉强度随腐蚀程度的增大而迅速下降,冷挤压套筒和镦粗直螺纹套筒次之,而灌浆套筒的抗拉强度退化最为缓慢。由此推断灌浆料的存在有效延缓了灌

浆套筒连接件在氯盐环境下的锈损程度,使得其抗拉强度退化程度要比其中三种连接方式的钢筋连接件要小。当理论腐蚀率为10%时,钢筋直径为16 mm和20 mm的灌浆套筒连接件其破坏强度较未腐蚀对照组试件分别仅降低了1.3%和4.3%,几乎可以忽略该水平的氯盐腐蚀影响。

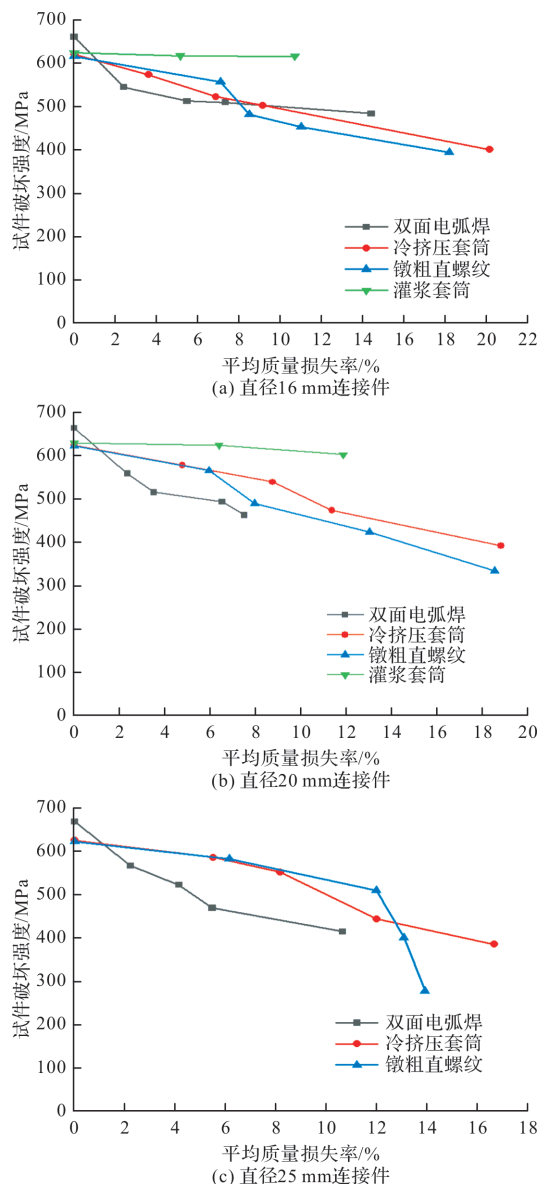


图9 试件破坏强度

Fig. 9 Failure strength of specimens

2.4 强度计算模型

根据上节分析,钢筋连接件的屈服强度和破坏强度随腐蚀程度的增加均呈指数函数下降趋势,并与连接件的连接方式、腐蚀率、钢筋直径等参数相关。因此,本文统一采用下式来计算不同连接方式的锈蚀钢筋连接件的屈服强度和破坏强度。

$$f_x = f_{0x} \times [1 - \alpha \times D \times \eta_s \times e^{\beta \times \eta_s}] \quad (3)$$

式中: f_x 为锈蚀连接件的平均屈服强度(或破坏强度)(MPa); f_{0x} 为经未腐蚀连接件的屈服强度(或

破坏强度)(MPa); η_s 为试件平均腐蚀率(%); D 为钢筋直径(mm); α 、 β 分别表示与强度相关的系数. 基于试验研究, 拟合优化确定的系数 α 、 β 值如表 4 所示. 对于不同连接方式的钢筋连接件, 其系数取值不同.

表 4 钢筋连接件腐蚀后屈服强度和破坏强度的 α 、 β 系数值

Tab. 4 α 、 β of yield strength and failure strength for corroded steel joints

	系数	双面电 弧焊	冷挤压 套筒	镦粗直 螺纹	灌浆 套筒
屈服 强度	α	0.004	0.000 6	0.001	0.000 3
	β	-0.13	0.03	-0.07	0.05
	R^2	0.92	0.87	0.88	0.96
破坏 强度	α	0.004	0.000 8	0.001	0.000 02
	β	-0.084	0.015	0.012	0.177
	R^2	0.95	0.93	0.91	0.85

将表 4 中对应的系数值分别代入式(1)得出不同腐蚀程度下不同直径的各种钢筋连接件屈服强度和破坏强度的计算值, 并将计算值与试验值相比较, 如图 10(a)、(b)所示, 二者吻合良好, 可以采用式(1)对腐蚀环境下不同连接方式钢筋连接件的平均屈服强度和破坏强度进行计算.

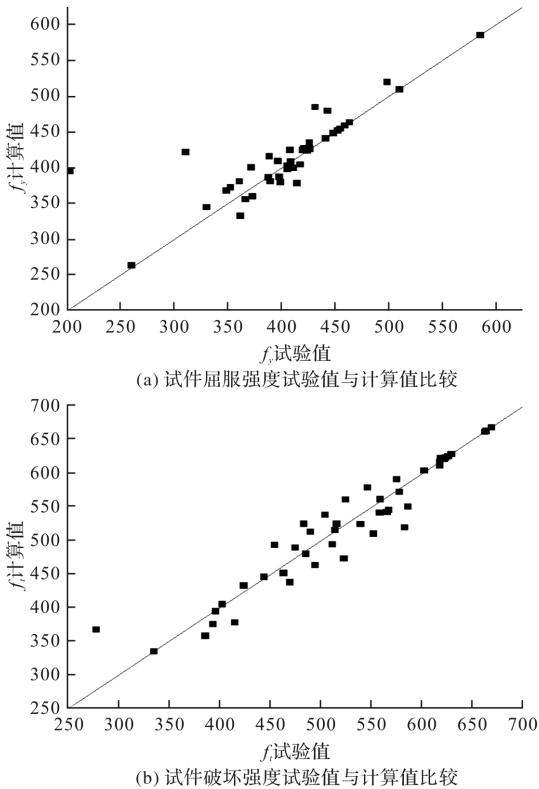


图 10 试件强度试验值与计算值比较

Fig. 10 Comparison of experimental values and calculated values of the strength for the specimens

3 结论

(1)氯盐环境下, 锈蚀钢筋连接件的拉伸性能均退化明显, 退化程度随着腐蚀率的增大而增大. 不同钢筋连接件在腐蚀程度相同时的耐腐蚀性能差异明显, 双面电弧焊连接件的耐腐蚀性能最强, 其次为灌浆套筒和冷挤压套筒, 镦粗直螺纹最差;

(2)氯盐环境下钢筋连接件拉伸破坏形式主要分为钢筋母材拉断和连接区域破坏两类. 腐蚀率较小时, 钢筋连接件主要发生钢筋母材拉断破坏; 随着腐蚀程度增大, 双面电弧焊连接区会发生焊缝断裂破坏; 冷挤压套筒会发生粘结滑移破坏; 腐蚀程度进一步增大, 冷挤压套筒和镦粗直螺纹会发生套筒断裂破坏, 钢筋直径越大越易发生连接区的破坏; 灌浆套筒连接件主要发生母材拉断破坏;

(3)钢筋连接件拉伸荷载-变形曲线受腐蚀程度影响明显, 随着腐蚀程度增大, 屈服平台缩短、屈服与破坏强度降低、极限变形减少. 镦粗直螺纹耐腐蚀能力最弱, 腐蚀后屈服平台明显缩短, 极限变形均下降 50% 以上; 灌浆套筒连接件抗腐蚀能力最强, 理论腐蚀率最大时其破坏强度依旧可达到未腐蚀试件的 95%.

参考文献 References

[1] 王茹, 王希彤, 吕伯阳, 等. 灌浆套筒连接缺陷对装配式混凝土柱抗震性能的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(6): 685-693.
WANG Ru, WANG Xitong, LV Boyang, et al. Study on the effect of the grouting sleeve splicing defects on the seismic behavior of precast concrete columns. [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(6): 685-693.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Bei Jing: China Building Industry Press, 2011.

[3] 朱东峰, 练水泉, 张伟生, 等. 新型钢筋套筒挤压连接技术在装配式建筑的应用研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(22): 51-56, 76.
ZHU Dongfeng, LIAN Shuiquan, ZHANG Weisheng, et al. Research on the application of new steel-reinforced sleeve extrusion connection technology in assembled buildings[J]. Building Structure, 2020, 50

- (22): 51-56, 76.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土建筑技术标准: GB/T51231—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for prefabricated concrete construction: GB/T51231—2016[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2017.
- [5] 李佳, 张勤, 贡金鑫, 等. 钢筋连接区锈蚀后的抗拉性能及破坏形态试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(22): 83-88.
- LI Jia, ZHANG Qin, GONG Jinxin, et al. Experimental study on tensile properties and failure patterns of corroded steel bars joint region[J]. Building Structure, 2020, 50(22): 83-88.
- [6] SUN W W, FENG W. Numerical investigation of the effects of connection rotational stiffness on block shear capacity of coped beams with a welded end connection[J]. International Journal of Steel Structures. 2011, 11(3): 325-333.
- [7] OSTERTAG C P, Microstructure characterization of fractured steel beam-to-column connections[J]. Journal of Materials Science, 1999, 34(16): 3883-3891.
- [8] 黄远, 朱正庚, 黄登, 等. 钢筋半套筒灌浆连接的静力拉伸试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 26-32.
- HUANG Yuan, ZHU Zhengeng, HUANG Deng, et al. Investigation into Half Grout Sleeve Splicing for Rebars via Static Tensile Test[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(2): 26-32.
- [9] 郑清林, 王霓, 陶里, 等. 套筒灌浆缺陷对装配式混凝土柱抗震性能影响的试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(5): 75-83.
- HENG Qinglin, WANG Ni, TAO Li, et al. Experimental study on effects of grout defects on seismic performance of assembled concrete columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(5): 75-83.
- [10] 吴小宝, 林峰, 王涛. 龄期和钢筋种类对钢筋套筒灌浆连接受力性能影响的试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(14): 77-82.
- WU Xiaobao, LIN Feng, WANG Tao. Experimental research on effects of grout age and types of steel bars on mechanical behavior of grout sleeve splicing for reinforcing bars[J]. Building Structure, 2013, 43(14): 77-82.
- [11] 徐港, 王青, 卫军, 等. 锈蚀钢筋搭接性能试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(6): 726-730.
- XU Gang, WANG Qing, WEI Jun, et al. Experimental study of behavior of lap splice of corrosive reinforcing bars in concrete[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(6): 726-730.
- [12] APOSTOLOPOULOS C A, MICHALOPOULOS D, DIMITROV L. The impact of corrosion on the mechanical behavior of welded splices of reinforcing steel S400 and B500c[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008, 17(1): 70-79.
- [13] TANG L Y, XIAO Q H, ZHANG S Y. Corrosion properties of rebar welded joints[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 166-169: 1981-1986.
- [14] YOSUKE A, SHINICHI M, KYOJI N, et al. Influence of Chloride Ion Concentration and Stress on Steel Corrosion in Cement Paste Grout[J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu E, 2009, 65(1): 103-117.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢筋焊接及验收规程: JGJ 18—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. Steel welding and acceptance procedures: JGJ 18—2012[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢筋机械连接技术规程: JGJ 107—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for mechanical connection of rebar: JGJ 107—2016[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2016.
- [17] 金南国, 何家豪, 付传清, 等. 钢筋加速非均匀锈蚀试验方法和锈蚀形态研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(3): 483-490.
- Jin Nanguo, He Jiahao, Fu Chuanqing, et al. Study on experimental method and morphology of accelerated non-uniform corrosion of steel bars[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(3): 483-490.

(编辑 郑晓龙 沈 波)