

文章编号:1007-9629(2021)02-0348-07

石墨烯/环氧涂层钢筋与混凝土的黏结性能

商怀帅¹, 王玮钊¹, 刘孝华², 郭思瑶¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033;
2. 青岛市黄岛区建设工程质量监督站, 山东 青岛 266555)

摘要:选取 4 种直径(14、18、22、25 mm)、4 种涂层(3 种石墨烯/环氧涂层、1 种无涂层)的钢筋制作钢筋混凝土中心拉拔试件,研究涂层中石墨烯掺量对钢筋混凝土黏结性能的影响。结果表明:涂层钢筋与混凝土间的黏结性能比普通无涂层钢筋试件差;涂层钢筋混凝土与无涂层钢筋混凝土的极限黏结强度之比随着钢筋直径的增加而减小;石墨烯掺量对涂层钢筋与混凝土的黏结性能影响很小;钢筋直径为 14 mm 的 2 组试件发生拔出破坏,其余各组试件均发生劈裂破坏。在实际工程中,石墨烯/环氧涂层钢筋可依据普通环氧涂层钢筋的规范加以应用。

关键词: 石墨烯; 环氧树脂; 黏结强度; 破坏类型

中图分类号: TU375

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.02.017

Bond Properties of Graphene/Epoxy Coated Steel Bars and Concrete

SHANG Huaishuai¹, WANG Weizhao¹, LIU Xiaohua², GUO Siyao¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;
2. Qingdao Huangdao District Construction Project Quality Supervision Station, Qingdao 266555, China)

Abstract: The reinforced concrete center pull-out specimens were prepared by 4 different diameters(14, 18, 22, 25 mm) and 4 different coating(3 graphene/epoxy coatings and the control). The effect of content of graphene in graphene/epoxy coating on the bonding performance of reinforced concrete was observed. The results show that the bonding performance between graphene/epoxy coated steel bars and concrete is worse than that of control. The ratio of the ultimate bond strength between coated reinforced concrete and the control decreases as the diameter of the steel bars increases. The content of graphene has little effect on the bonding performance of graphene/epoxy coated steel bars and concrete. Pull-out failure occurred in two groups of specimens with a steel bar diameter of 14 mm, and splitting failure occurred in the other groups of specimen. In practical engineering, graphene/epoxy coated steel bars can be applied according to the specifications of ordinary epoxy coated steel bars.

Key words: graphene; epoxy resin; bond strength; failure type

钢筋锈蚀是引起钢筋混凝土结构破坏最主要的原因。钢筋锈蚀后体积膨胀,导致混凝土出现纵向裂缝、保护层脱落等众多不利现象,无法保证结构的安全性和承载能力,耐久性大大降低,使用年限明显缩短,并造成大量经济损失^[1]。

为提高钢筋混凝土结构的使用寿命,减少使用期间的维护费用,在钢筋表面涂抹防腐涂层成为一种被广泛使用的有效措施^[2]。目前,常见防腐涂料有环氧树脂涂料、醇酸树脂涂料、聚氨酯涂料和富锌涂料等^[3],其中环氧树脂涂料不仅具有良好的化学稳

收稿日期:2019-11-15; 修订日期:2020-01-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778310);西部绿色建筑国家重点实验室 2019 年度开放基金资助项目(LSKF201909);滨海城乡建设工程安全与性能提升研究创新团队项目;山东省“双一流”建设工程-土木

第一作者:商怀帅(1980—),男,山东潍坊人,青岛理工大学教授,博士生导师,博士。E-mail:shanghuaishuai@163.com

定性,而且力学和机械性能优异、与钢筋黏结可靠、价格便宜,在防腐涂层中使用最多^[4].研究表明,环氧涂层具有多孔性和亲水性,施工过程中易受磨损,不能获得长期的防腐性能^[5-6];而石墨烯因其特殊的内部结构和优越的理化性能,通常被用来改性环氧树脂.黄坤等^[7]试验发现,石墨烯质量分数为 0.5% 时能有效提高涂层的耐腐蚀性能,石墨烯质量分数达到 1.0% 时涂层有导静电能力且附着力最强.谢卫刚等^[8]研究发现,当石墨烯质量分数为 0.01% 时,石墨烯/环氧树脂复合材料的拉伸强度比纯环氧树脂提高 16.88%;当石墨烯质量分数为 0.05% 时,复合材料的断裂伸长率较纯环氧树脂提高 4.78%.Mathey 等^[9]研究发现,当环氧树脂涂层厚度小于 0.28 mm 时,钢筋与混凝土间的黏结强度平均损失 6%.研究^[10-11]表明,与无涂层钢筋相比,涂层钢筋与混凝土间的黏结强度降幅为 15%~40%.

目前,针对石墨烯/环氧涂层钢筋与混凝土黏结性能的相关研究少有报道,故本文选用 3 种石墨烯掺量(质量分数,文中涉及的掺量和水胶比等均为质量分数或质量比)的环氧涂层钢筋和 1 种无涂层钢筋,来对比研究环氧涂层中石墨烯掺量

对钢筋与混凝土黏结性能的影响,为石墨烯/环氧涂层钢筋在钢筋混凝土结构中的推广和应用提供参考和帮助.

1 试验

1.1 原材料

1.1.1 环氧树脂、石墨烯及固化剂

环氧树脂采用凤凰牌 E-44 型双酚 A 环氧树脂.石墨烯由青岛理工大学材料试验室制备,制备用原材料为天然鳞片石墨(<0.15 mm)、98% 浓硫酸、盐酸、高锰酸钾、5% 双氧水、二甲苯和氢氧化钠,均为分析纯.固化剂采用 650 低分子聚酰胺,呈浅棕色.涂层材料由固化剂与石墨烯/环氧树脂以质量比 1:1 混合而成.

1.1.2 钢筋

选用直径为 14、18、22、25 mm 的 HRB 400 热轧带肋钢筋,其材料参数见表 1.每根钢筋长约 600 mm,两端平整.钢筋涂抹石墨烯/环氧树脂前,先用除锈剂除锈,再用硬毛刷将其均匀涂抹到钢筋黏结段上.制作完成后的涂层钢筋符合 JG/T 502—2016《环氧树脂涂层钢筋》的要求.

表 1 钢筋的材料参数
Table 1 Material parameters of steel bars

Nominal diameter/ mm	Actual diamete/ mm	Height of transverse rib/mm	Height of longitudinal rib/mm	Rib spacing/ mm	Coating thickness/ mm	Yield strength/ MPa	Tensile strength/ MPa
14	13.5	1.2	0.9	9.4	0.18	435	550
18	17.3	1.6	1.0	10.3	0.24	468	603
22	21.2	1.8	0.9	10.6	0.27	496	632
25	24.0	1.8	1.1	13.2	0.25	504	627

1.1.3 混凝土

为贴合实际工程,混凝土采用青岛中联混凝土有限公司(开发区二站)产 C30 预拌混凝土,水胶比 0.48.其中水泥采用青岛中联 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥;细骨料采用细度模数 3.3 的Ⅰ区机制砂,含

泥量小于 2.0%;粗骨料采用 5~25 连续级配的花岗岩碎石,压碎值 11%,表观密度 2 750 kg/m³,含水率 1.8%,含泥量小于 1.5%;拌和水采用用青岛市自来水;此外还掺有聚羧酸减水剂和Ⅱ级粉煤灰.混凝土具体配合比及力学性能见表 2.

表 2 混凝土配合比及力学性能
Table 2 Mix proportion and mechanical property of concrete

Mix proportion/(kg·m ⁻³)						Mechanical property	
Cement	Fly ash	Fine aggregate	Coarse aggregate	Water reducing agent	Water	Cube compressive strength/MPa	Split tensile strength/MPa
320.00	66.00	932.00	732.00	64.4	185.00	31.1	2.32

1.2 试件设计与制作

中心拉拔试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm,其中钢筋黏结段长度为 5 d(d 为钢筋公称直径).钢筋加载端长度约为 350 mm,自由端长度约

为 100 mm.在钢筋放入模具前,钢筋两端的未黏结段用 PVC 管套住,PVC 管与钢筋之间的缝隙用树脂封堵,以免浇筑时砂浆流入缝隙.需要说明的是,留有未黏结段的目的是通过减小黏结长度,使黏结

应力沿钢筋纵轴方向均匀分布,避免加载端产生局部应力。拆模后的试件放入青岛中联混凝土有限公司标准养护室中养护 28 d。中心拉拔试件示意图如图 1 所示。

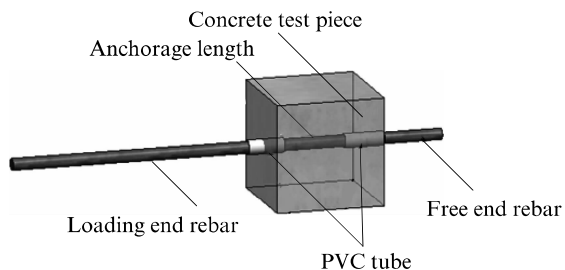


图 1 中心拉拔试件示意图

Fig. 1 Sketch of center pull-out test piece

本试验共制作 16 组试件,每组 3 块共 48 块。对 16 组试件进行编号,编号的第 1 部分表示钢筋直径,第 2 部分表示涂层种类(a 为石墨烯掺量为 0% 的环氧树脂涂层,b 为石墨烯掺量为 0.05% 的环氧树脂涂层,c 为石墨烯掺量为 0.10% 的环氧树脂涂层,d 为无涂层)。

1.3 中心拉拔试验

试件养护完成后,将其自由端的钢筋朝下穿过中心带洞钢板,钢板由支架支撑。加载装置使用带有高精度数显压力表的锚杆拉拔仪。前期采取分级加载,每级加载 2 kN,持荷时间为 30 s,持荷后采集加载端和自由端钢筋的滑移值;当达到极限荷载后改用位移控制加载。采集装置使用 DH3816N 静态应变测试采集仪,通过试件加载端和自由端上的位移传感器采集钢筋两端的滑移数据,最后传输在电脑端上,加载装置示意图见图 2。

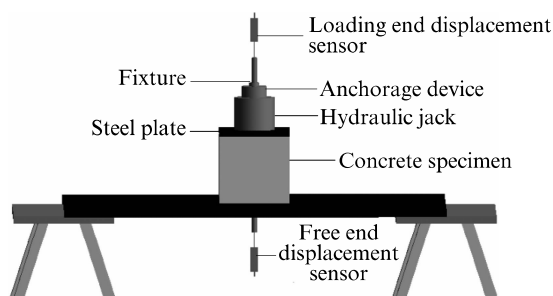


图 2 加载装置示意图

Fig. 2 Sketch map of loading device

2 结果与分析

2.1 试验现象及分析

图 3~6 分别为试件拔出破坏、劈裂破坏、涂层

状态及涂层钢筋混凝土凹槽状态。

由图 3~6 可见:除直径 14 mm 的 2 组试件(14-c 和 14-d)发生了拔出破坏(图 3)外,其余各组试件均发生了劈裂破坏(图 4)。石墨烯/环氧涂层中石墨



图 3 拔出破坏

Fig. 3 Pull-out failure



图 4 劈裂破坏

Fig. 4 Splitting failure



图 5 涂层状态

Fig. 5 Coating state

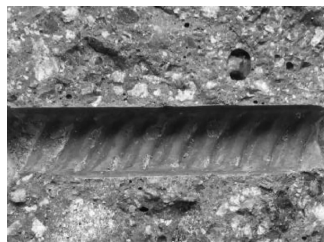


图 6 涂层钢筋混凝土凹槽状态

Fig. 6 Coated reinforced concrete groove state

烯的掺量对裂缝发展和破坏模式影响不大.在加载初期,钢筋的加载端和自由端均未出现滑移现象,这是由于夹持钢筋的夹具和锚具在加载初期未夹紧所致^[12];随着载荷的增加,钢筋的加载端首先出现滑移,此时自由端滑移值未变,继续施加荷载,自由端滑移值开始变化;当载荷接近峰值荷载时,发生劈裂破坏的试件表面出现微小裂缝,裂缝随着荷载的增加逐渐变长变宽,最终试件突然破坏;发生拔出破坏的试件表面无裂缝产生,达到峰值荷载后,荷载迅速下降并趋于稳定,滑移量猛增;发生劈裂破坏的涂层钢筋试件,其表面至少出现 1 条贯通裂缝,剖开试件后发现涂层表面基本完整(见图 5),混凝土握裹层中钢筋留下的凹槽无明显受损(见图 6),钢筋横肋在混凝土中留下的凹槽前有摩擦痕迹且部分混凝土被挤压破碎.

从裂缝的最终发展来看,涂层钢筋试件的裂缝发展情况比无涂层钢筋试件严重,且裂缝宽度稍大于无涂层钢筋试件;涂层钢筋的摩擦痕迹和混凝土破碎情况比无涂层钢筋轻微;钢筋直径越大,试件劈裂现象越严重,凹槽越明显,摩擦痕迹越轻.这与许清风等^[13]和徐有邻等^[14]的结论相一致.

涂层钢筋试件的破坏现象比无涂层钢筋试件严重,这是因为石墨烯/环氧涂层破坏了钢筋与混凝土间的黏结性.在钢筋发生相对滑移后,黏结力主要依靠摩擦力和机械咬合力,石墨烯/环氧涂层与水泥胶体间的摩擦系数较小,导致钢筋与混凝土间的摩擦力减小,锚固作用主要依靠机械咬合力的水平分力,咬合力的水平分力和径向分力增大,进而导致滑移增大、裂缝发展更早、更深、更宽^[15-16].钢筋直径越大,其肋高越高,对肋前混凝土的斜向挤压力也就越大,同时使得斜向挤压力的径向分力越大,劈裂出现得更早,破坏更严重.石墨烯/环氧涂层表面光滑,对混凝土的磨损较轻,而且不易黏附混凝土碎屑,所以混凝土握裹层的凹槽光滑,钢筋表面几乎无混凝土残留物.

2.2 极限黏结强度和峰值滑移量

当混凝土试件中钢筋黏结段长度小于某量值(一般为 $5d$)时,其黏结应力沿钢筋纵轴均匀分布,黏结强度(τ , MPa)可由式(1)计算.

$$\tau = \frac{F}{\mu_s l_a} \quad (1)$$

式中: F 为钢筋拉拔力,N; μ_s 为钢筋周长,mm; l_a 为锚固长度,mm.

由于钢筋受拉时会产生轴向变形,加载端滑移量等于实际测量值减去钢筋轴向变形值.钢筋整体

滑移量为加载端滑移量和自由端滑移量的均值.各阶段钢筋滑移量计算表达式见式(2)~(4).

$$\Delta S_l = \frac{FL_w}{1\,000E_sA_s} \quad (2)$$

$$S_l = S_{ll} - \Delta S_l \quad (3)$$

$$S = \frac{1}{2}(S_l + S_f) \quad (4)$$

式中: ΔS_l 为钢筋弹性变形值,mm; L_w 为非黏结段长度,mm; E_s 为钢筋的弹性模量,MPa; A_s 为钢筋的截面面积,mm²; S_l 为钢筋加载端滑移量,mm; S_{ll} 为钢筋加载端实际测量值,mm; S_f 为钢筋自由端滑移量,mm; S 为钢筋加载端和自由端的平均滑移量,mm.

各组试件的极限拉拔荷载、极限黏结强度和峰值滑移量见表 3.由表 3 可见:石墨烯/环氧涂层中石墨烯掺量对试件极限黏结强度和钢筋峰值滑移量影响很小;钢筋直径大于 14 mm 的各组试件中裸露钢筋的峰值滑移量和极限黏结强度最大;随着钢筋直径的增大,试件的极限黏结强度和峰值滑移量减小.与试件 14-d 相比,试件 14-a、14-b、14-c 的极限黏结强度分别下降 5.20%、1.75%和 10.35%;与试件 18-d 相比,试件 18-a、18-b、18-c 的极限黏结强度分别下降 18.02%、19.44%和 8.27%;与试件 22-d 相比,试件 22-a、22-b、22-c 的极限黏结强度分别下

表 3 各组中心拉拔试件数据结果汇总
Table 3 Summary of data results of center pull-out test pieces in each group

Specimen No.	Anchorage length/mm	Ultimate pull-out load/kN	Ultimate bond strength/MPa	Peak slip/mm
14-a	70	55	17.87	1.14
14-b		57	18.52	1.35
14-c		52	16.90	2.37
14-d		58	18.85	1.22
18-a	90	59	11.60	0.62
18-b		58	11.40	0.72
18-c		66	12.98	0.71
18-d		72	14.15	0.74
22-a	110	70	9.21	0.31
22-b		62	8.16	0.28
22-c		66	8.69	0.31
22-d		90	11.84	0.51
25-a	125	52	5.30	0.19
25-b		52	5.30	0.22
25-c		56	5.71	0.27
25-d		110	11.21	0.47

降 22.21%、31.08%和 26.61%；与试件 25-d 相比，试件 25-a、25-b、25-c 的极限黏结强度分别下降 52.72%、52.72%和 49.06%。

由此可见，钢筋上涂抹石墨烯/环氧树脂明显降低了钢筋与混凝土间的极限黏结强度，该结论与文献[9-11,14,16]一致。需要说明的是，本试验中涂层钢筋试件的极限黏结强度相较于无涂层钢筋试件下降得更多，这是因为本试验中的涂层钢筋非工厂制作，涂层相对较厚。钢筋直径越大，涂层钢筋与无涂层钢筋的极限黏结强度之比越小，这与 Choi 等^[17]结论一致。究其原因是涂层增加了钢筋的黏结面积，钢筋直径越小，黏结面积相对增加得越多，对极限黏结强度有所提升，导致小直径涂层钢筋的极限黏结

强度降低较小。

2.3 拉拔试验结果分析

不同钢筋直径下涂层类别对试件黏结-滑移(τ - s)曲线的影响如图 7 所示。由图 7 可见，试件的 τ - s 曲线大致分为 4 个阶段。

(1)初滑移阶段：此阶段钢筋还未发生相对滑移，钢筋与混凝土间的黏结主要依靠化学胶着力。各组试件的初滑移段呈线性增长，其中涂层钢筋的初滑移段较短，而文献[16]认为环氧涂层钢筋的黏结力下降，导致滑移增大，所以初滑移段较长，这与本试验所得不同；原因是文献[16]未考虑到环氧涂层表面光滑，涂层与混凝土间总的化学胶着力会减小。

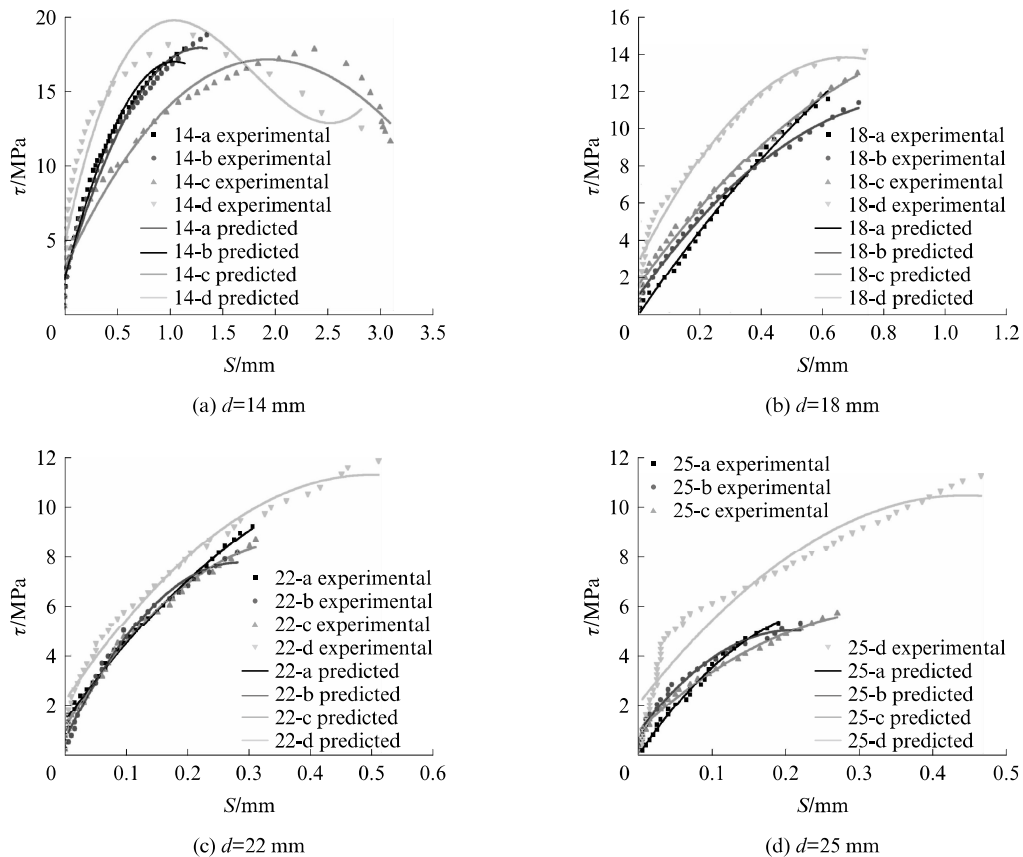


图 7 各组试件的黏结-滑移曲线
Fig. 7 τ - s curves of each group of specimens

(2)滑移阶段：当自由端钢筋产生滑移后进入此阶段，黏结力主要由摩擦力和机械咬合力组成。各组试件的滑移段呈非线性增长，滑移段曲率很小；涂层钢筋的滑移段较平缓，这是由于石墨烯/环氧树脂涂层削弱了钢筋与混凝土间的摩擦力，改变了肋高和肋角，导致黏结强度降低、滑移量增大，在 τ - s 曲线中表现为斜率降低，这与文献[14]的滑移段曲线基本相似。

(3)劈裂阶段：此阶段的 τ - s 曲线更为平缓，黏结力依旧来自摩擦力和机械咬合力。直径为 14 mm 的拔出破坏试件中，涂层钢筋的劈裂段长度略长，究其原因还是涂层界面光滑，使得钢筋肋和混凝土咬合齿之间在产生滑动后还留有一定缓冲，进而导致肋前混凝土破碎较晚，劈裂段长度增加；其余各组试件中，涂层钢筋没有明显的劈裂段。

(4)下降阶段：达到峰值荷载后，荷载迅速下降，

接着趋于稳定,滑移大幅度增加,最后钢筋被缓缓拔出,此阶段的黏结力由摩阻力提供,仅有拔出破坏的试件绘制出了下降段.涂层钢筋的下降段更陡,说明其摩阻力较小.

整体来看,涂层钢筋混凝土试件的 τ - s 曲线均在无涂层钢筋混凝土试件的下方,说明涂层钢筋混凝土试件的黏结强度比无涂层钢筋混凝土试件差;各组 a、b、c 类涂层试件的 τ - s 曲线变化不大,说明石墨烯的掺入不能改善石墨烯/环氧树脂涂层钢筋与混凝土的黏结强度;随着钢筋直径的增加,试件 τ - s 曲线的长度减小,黏结强度下降,这是由于钢筋直径越大,与混凝土间的相对黏结面积越小,试件的黏结强度也就越低,此外在试件尺寸一定的情况下,钢筋直径的增大导致保护层厚度相对减小,劈裂现象更易产生.

3 黏结-滑移本构关系

研究表明^[18-19],用多项式拟合钢筋混凝土的 τ - s 曲线简单准确,故本文采用式(5)拟合各组试件的 τ - s 曲线.

$$\tau = a + bs + cs^2 + ds^3 \quad (5)$$

式(5)中的系数见表4.由表4可以看出:试件14-d和25-d的拟合值与试验值误差较大,其相关系数 R^2 分别为0.9004和0.9346,明显低于其他试件.原因如下:(1)试件14-d的拟合曲线在初滑移阶段和滑移阶段拟合得较好,但劈裂阶段曲线斜率

表4 各组试件黏结-滑移表达式中的系数

Table 4 Coefficient in bond slip expression of each group of test pieces

Specimen No.	a	b	c	d	R^2
14-a	2.39	28.01	-13.39	0	0.9865
14-b	2.50	24.03	-9.33	0	0.9869
14-c	3.16	15.32	-4.56	0.20	0.9682
14-d	4.78	33.48	-22.72	4.25	0.9004
18-a	0.06	23.62	-6.75	0	0.9959
18-b	1.04	22.99	-12.44	0	0.9972
18-c	1.61	22.68	-9.62	0	0.9932
18-d	2.86	32.48	-24.11	0	0.9818
22-a	1.38	34.17	-28.54	0	0.9964
22-b	0.66	50.02	-87.99	0	0.9906
22-c	1.14	39.46	-51.92	0	0.9943
22-d	2.20	36.42	-36.51	0	0.9856
25-a	0.04	42.59	-76.66	0	0.9926
25-b	0.77	42.54	-107.02	0	0.9741
25-c	0.77	31.24	-51.46	0	0.9834
25-d	1.98	38.70	-44.44	0	0.9346

未降低,而是沿着滑移阶段的曲线斜率上升,这是劈裂阶段中试件滑移增长较快、数据分布较离散所致.

(2)试件25-d的拟合曲线在初滑移阶段向滑移阶段转变处误差较大,究其原因滑移阶段曲线斜率相对于初滑移阶段斜率发生了较大改变.(3)其他各组试件的相关系数 R^2 均在0.9680以上,且拟合曲线与散点图基本吻合.这说明采用式(5)拟合涂层钢筋混凝土的 τ - s 曲线是完全可行的,其中劈裂破坏曲线用二阶多项式就能很好拟合出来,拔出破坏需由三阶多项式拟合.

4 结论

(1)石墨烯/环氧涂层钢筋与混凝土间的黏结强度明显比无涂层钢筋混凝土差.石墨烯/环氧树脂涂层中石墨烯掺量对试件黏结强度的影响很小.钢筋直径越大,涂层钢筋混凝土试件与无涂层钢筋混凝土试件的极限黏结强度比越小.

(2)石墨烯/环氧涂层钢筋混凝土试件的裂缝发展和裂缝宽度比无涂层钢筋混凝土试件严重,环氧涂层中掺入石墨烯并不能改善试件裂缝发展和裂缝宽度.除试件14-c和14-d发生拔出破坏外,其余各组试件均发生劈裂破坏.

(3)石墨烯/环氧涂层钢筋混凝土试件的 τ - s 曲线初滑移阶段较短,其整体 τ - s 曲线位于无涂层钢筋混凝土试件的下方.发生拔出破坏的涂层钢筋混凝土试件劈裂段较长,下降段较陡.钢筋直径大于14 mm的各组涂层钢筋混凝土试件几乎没有劈裂段.用多项式拟合的各组试件的 τ - s 曲线与实际曲线符合较好.

(4)在实际工程中,石墨烯/环氧涂层钢筋的应用可依据环氧树脂涂层钢筋的相应规范实施.

参考文献:

- [1] 陈星国.环氧树脂涂层钢筋的试验及应用研究[J].福建建设科技,2019(2):16-18.
CHEN Xingguo. Experimental and application research of epoxy resin coated steel bar [J]. Fujian Construction Science, 2019(2):16-18. (in Chinese)
- [2] POKORNÝ P, TEJ P, KOUŘIL M. Evaluation of the impact of corrosion of hot-dip galvanized reinforcement on bond strength with concrete-A review [J]. Construction and Building Materials, 2017, 132: 271-289.
- [3] HAYATDAVOUDI H, RAHSEPAR M. A mechanistic study of the enhanced cathodic protection performance of graphene-reinforced zinc rich nanocomposite coating for corrosion protection of carbon steel substrate [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 727: 1148-1156.

- [4] 王莹,李萍,宁怀明.环氧树脂涂层钢筋在混凝土结构中的应用[J].热加工工艺,2010,39(10):133-135.
WANG Ying, LI Ping, NING Huaiming. Application of epoxy-coated reinforcing steel in concrete structure[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 39(10): 133-135. (in Chinese)
- [5] WANG J, GONG J, GONG Z, et al. Effect of curing agent polarity on water absorption and free volume in epoxy resin studied by PALS[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2010, 268(14): 2355-2361.
- [6] ERDOĞDU Ş, BREMNER T W, KONDRATOVA I L. Accelerated testing of plain and epoxy-coated reinforcement in simulated seawater and chloride solutions[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(6): 861-867.
- [7] 黄坤,曾宪光,裴嵩峰,等.石墨烯/环氧复合导电涂层的防腐性能研究[J].涂料工业,2015,45(1):17-20.
HUANG Kun, ZENG Xianguang, PEI Songfeng, et al. Research on anticorrosive performance of graphene /epoxy composite conductive coatings[J]. Coatings Industry, 2015, 45(1): 17-20. (in Chinese)
- [8] 谢卫刚,赵东林,景磊,等.石墨烯/环氧树脂复合材料的制备与力学性能[J].高分子材料科学与工程,2012,28(9):129-132.
XIE Weigang, ZHAO Donglin, JING Lei, et al. Preparation and mechanical properties of graphene/epoxy resin composites[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2012, 28(9): 129-132. (in Chinese)
- [9] MATHEY R G, CLIFTON J R. Bond of coated reinforcing bars in concrete[J]. Journal of the Structural Division, 1976, 102(1): 215-229.
- [10] TREECE R A, JIRSA J O. Bond strength of epoxy-coated reinforcing bars[J]. Materials Journal, 1989, 86(2): 167-174.
- [11] EL-HAWAWARY M M. Evaluation of bond strength of epoxy-coated bars in concrete exposed to marine environment[J]. Construction and Building Materials, 1999, 13(7): 357-362.
- [12] 胡滨.除锈方法对钢筋与混凝土粘结性能的影响试验研究[D].青岛:青岛理工大学,2018.
HU Bin. Experimental study on effect of derusting method on bond behavior between steel bar and concrete[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [13] 许清风,蒋永生.影响环氧涂层钢筋粘结锚固性能的因素分析[J].工业建筑,1999(6):45-48.
XU Qingfeng, JIANG Yongsheng. The effective factors of bond and anchorage performances of epoxy-coated reinforcement[J]. Industrial Construction, 1999(6): 45-48. (in Chinese)
- [14] 徐有邻,刘立新.环氧树脂涂层钢筋锚固性能及设计方法[J].水运工程,1999(8):33-37.
XU Youlin, LIU Lixin. Anchorage properties and design proposals for epoxy resin coated steel bars[J]. Port & Waterway Engineering, 1999(8): 33-37. (in Chinese)
- [15] 刘茂康,武文博,刘志勇.涂层钢筋与混凝土粘结锚固机理研究进展[J].混凝土世界,2018(11):62-66.
LIU Maokang, WU Wenbo, LIU Zhiyong. Research progress of bond anchorage mechanism between coated steel bar and concrete[J]. China Concrete, 2018(11): 62-66. (in Chinese)
- [16] 薛伟辰.环氧涂层钢筋混凝土结构的试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2001,29(7):769-773.
XUE Weichen. Experimental studies on concrete structures reinforced with epoxy-coated bars[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2001, 29(7): 769-773. (in Chinese)
- [17] CHOI O C, HADJE-GHAFFARI H, DARWIN D, et al. Bond of epoxy-coated reinforcement: Bar parameters[J]. Aci Materials Journal, 1991, 88(2): 207-217.
- [18] 宋启根,单炳梓,金芷生,等.钢筋混凝土力学[M].南京:南京工学院出版社,1986.
SONG Qigen, SHAN Bingzi, JIN Zhisheng, et al. Reinforced concrete mechanics[M]. Nanjing: Nanjing Institute of Engineering and Technology Press, 1986. (in Chinese)
- [19] 王栋.钢筋混凝土粘结性能的试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2010.
WANG Dong. Experimental research on bond behavior between steel bars and concrete[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010. (in Chinese)