

引用格式:钟小平,倪克挺,黄歆瑶,等.新型不锈钢覆层钢筋力学性能试验研究[J].工业建筑,2025,55(6):251-259. ZHONG Xiaoping, NI Keting, HUANG Xinyao, et al. Experimental Research on Mechanical Properties of Novel Stainless Steel-Clad Rebars[J]. Industrial Construction, 2025, 55(6): 251-259 (in Chinese). DOI:10.3724/j. gyjzG24110701

新型不锈钢覆层钢筋力学性能试验研究^{*}

钟小平¹ 倪克挺¹ 黄歆瑶¹ 张 军² 樊玮洁² 朱炳喜³ 张 瑞¹ 柴京奥¹

(1. 扬州大学建筑科学与工程学院, 江苏扬州 225127; 2. 浙大宁波理工学院, 浙江宁波 315100; 3. 江苏省水利科学研究院, 江苏扬州 225002)

摘 要 为了获得结构设计所需的力学性能指标,采用扫描电镜(SEM)及单轴拉伸试验方法,研究了新型316SC不锈钢覆层钢筋复合界面的金相组织变化及力学性能。结果表明:不锈钢覆层钢筋复合界面存在一个15 μm 左右的冶金结合层,外层不锈钢与内芯碳钢之间冶金结合紧密;不同直径的不锈钢覆层钢筋表现出不同的应力-应变曲线形状,直径12 mm的不锈钢覆层钢筋屈服平台消失,而直径16 mm和25 mm的力学性能与HRB400E钢筋相似,应力-应变曲线中有明显的屈服平台和应变强化段;316L不锈钢与HRB400E碳钢复合而成的316SC不锈钢覆层钢筋,其强度和延性在HRB400E钢筋基础上有不同程度的提高,但弹性模量有小幅降低。在试验研究及理论分析的基础上,建立了不锈钢覆层钢筋的应力-应变本构模型,给出了不锈钢覆层钢筋弹性模量复合计算公式,公式计算值与实测值吻合较好。

关键词 不锈钢覆层钢筋;单调拉伸;断口形貌;力学性能;弹性模量

Experimental Research on Mechanical Properties of Novel Stainless Steel-Clad Rebars

ZHONG Xiaoping¹ NI Keting¹ HUANG Xinyao¹ ZHANG Jun² FAN Weijie² ZHU Bingxi³

ZHANG Rui¹ CHAI Jing'ao¹

(1. College of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, NingboTech University, Ningbo 315100, China; 3. Jiangsu Water Conservancy Science Research Institute, Yangzhou 225002, China)

Abstract: In order to obtain the mechanical properties required for structural design, the metallographic structure evolution and mechanical properties of the composite interface of novel 316SC stainless steel-clad rebar were studied using scanning electron microscopy (SEM) and uniaxial tensile tests. The results showed that a metallurgical bond layer of approximately 15 μm formed at the composite interface of the stainless steel-clad rebar, with a tight bond between the outer stainless steel layer and the inner carbon steel core. The stainless steel-clad rebars with different diameters exhibited varying stress-strain curve shapes. The yield platform disappeared in the 12 mm diameter stainless steel-clad rebar, whereas the 16 mm and 25 mm diameter rebars displayed mechanical properties similar to those of HRB400E rebars, with obvious yield platforms and strain-strengthening sections in their stress-strain curves. The strength and ductility of 316SC stainless steel-clad rebars, composed of 316L stainless steel and HRB400E carbon steel, were improved to varying degrees compared to HRB400E rebars, but the elastic modulus decreased slightly. On the basis of experimental research and theoretical analysis, the stress-strain con-

^{*} 国家自然科学基金项目(52178171, 51678513);江苏省水利科学研究院科技项目(2022Z034)。

第一作者:钟小平,工学博士,教授,主要从事混凝土结构耐久性及性能提升技术等方面的研究。

电子信箱:zhongxiaoping@zju.edu.cn

收稿日期:2024-11-07

stitutive model of stainless steel-clad rebars was established. A composite formula for calculating the elastic modulus of stainless steel-clad rebars was also proposed, showing good agreement with the measured values.

Keywords: stainless steel-clad rebar; monotonic tension; fracture morphology; mechanical properties; elastic modulus

0 引言

钢筋锈蚀被认为是导致混凝土结构耐久性下降的首要原因^[1-7],为了提升钢筋锈蚀导致的结构耐久性退化,延长结构的服役寿命,近年来,国内外研发了一种新型的耐腐蚀双金属复合钢筋——不锈钢覆层钢筋。这种钢筋内芯为普通碳素钢、外层包覆不锈钢,通过各种加工方法使两层金属达到冶金结合。新型不锈钢覆层钢筋在遭受氯盐腐蚀后,既可以充分发挥外层不锈钢卓越的抗腐蚀性能,又能在初期成本增加可控的情况下,大幅提升结构的使用寿命,降低甚至免除后期的维护维修费用,因此,不锈钢覆层钢筋的推出,引起了国内外学者的广泛关注。

有关不锈钢覆层钢筋的研究,早期主要集中在加工成型领域^[8-13],研究的重点是解决芯部碳钢与不锈钢界面结合问题^[14-17]、覆层不锈钢厚度均匀性及低成本高效生产等问题^[18-20]。随着钢筋加工工艺的不断提高,金属覆层冶金结合技术逐渐成熟,为不锈钢覆层钢筋产品生产提供了强有力的技术支撑^[21]。在产品质量有了保证的基础上,部分学者开展了不锈钢覆层钢筋腐蚀特性及力学性能研究。Ogunsanya等^[22]对304L和316LN不锈钢覆层钢筋在混凝土和混凝土孔隙溶液中的氯离子腐蚀行为进行了研究,结果发现:在Cl⁻浓度为5%条件下,304L和316LN不锈钢覆层钢筋腐蚀电流密度比316LN实心不锈钢钢筋稍高,但是随着Cl⁻浓度的上升,实心不锈钢腐蚀电流密度逐渐上升,与覆层钢筋相似。Cui等^[23]研究了完好不锈钢覆层钢筋和覆层带伤口不锈钢覆层钢筋的腐蚀性能,结果表明:没有覆层破裂的不锈钢覆层钢筋,即使在温度40℃时依然不会发生脱钝现象,而在含15%氯化物的混凝土孔溶液中,带有1mm小孔的不锈钢覆层钢筋被有效腐蚀,内芯碳钢暴露在小孔中,局部腐蚀速率较高。Hua等^[24-26]针对不同腐蚀形态下不锈钢复合钢筋力学性能的研究表明:腐蚀后的不锈钢覆层钢筋应力-应变曲线形态发生了改变,覆层破损腐蚀试样的屈服平台最早消失,腐蚀导致力学性能呈线性下

降。Li^[27]、华建民等^[28-29]研究了不锈钢覆层钢筋的低周疲劳性能,证明了不锈钢覆层钢筋可用于抗震设计结构中的纵向承载钢筋。综上所述,现有关于不锈钢覆层钢筋的研究,大多集中在轧制工艺和耐腐蚀性方面,虽然部分学者对力学性能也进行了研究,但成果十分有限,用来支撑混凝土结构设计尚有距离,这主要是由于设计中所需要的关键参数如屈服强度、极限强度、应力-应变本构关系等尚未建立。不锈钢覆层钢筋作为一种新型的特殊钢筋,除了对其耐腐蚀性能的要求外,其基本的力学性能满足要求是其工程应用的前提条件,因此,本文采用室温拉伸试验,系统研究316SC不锈钢覆层钢筋的基本力学性能,确定其屈服强度、抗拉强度、弹性模量、伸长率以及应力-应变本构模型,为不锈钢覆层钢筋在工程中的应用和推广提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验钢筋材料为316SC新型不锈钢覆层钢筋,该种不锈钢覆层钢筋芯筋为HRB400E级碳钢,外层包覆316L不锈钢,如图1所示。考虑到不锈钢覆层钢筋是由外层不锈钢和内芯碳钢两种材料复合而成的双金属钢筋,其基本力学性能是2种纯钢筋的综合体现,为了更好地研究外包覆层及芯部碳钢对复合钢筋力学性能的影响,同时设置了实心316L不锈钢钢筋和HRB400E普通碳素钢筋作为对比钢筋,各种钢筋的化学成分如表1所示。表中实心316L钢筋的化学成分与316SC不锈钢覆层钢筋的外包覆层接近,HRB400E钢筋与芯部碳钢化学成分接近,因此,2种对比钢筋具有较好的对比性。以上3种材

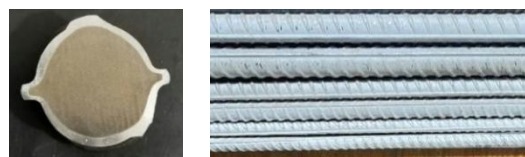


图1 不锈钢覆层钢筋试样

Fig. 1 Stainless steel-clad rebar specimen

表 1 钢筋主要化学成分
Table 1 Main chemical composition of steel rebars

钢筋种类	质量分数										
	Fe	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	V
316SC 覆层	Bal.	0.015	0.94	0.035	0.001	0.370	10.030	16.330	2.01	—	—
芯部碳钢	Bal.	0.201	1.44	0.008	0.004	0.421	0.047	0.087	—	0.454	0.057
实心 316L	Bal.	0.025	0.74	0.040	0.001	0.470	10.050	16.390	2.11	—	—
HRB400E	Bal.	0.230	1.37	0.021	0.010	0.520	0.017	0.031	—	0.030	0.024

Bal. 表示除明确列出的元素外, 剩余部分的含量, 即 Fe 的含量。

质试验钢筋, 每种考虑公称直径 12、16、25 mm 3 种规格。根据 GB/T 1499. 2—2007《钢筋混凝土用钢第 2 部分: 热轧带肋钢筋》的规定, 每组钢筋拉伸试验取 2 个平行试样, 钢筋试样长度均为 500 mm, 所有试验钢筋均为热轧螺纹钢。

1.2 不锈钢覆层钢筋几何参数

考虑到不锈钢覆层和芯部碳钢各自材料的占比会对双金属复合钢筋的力学性能产生影响, 因此, 拉伸试验之前, 用游标卡尺分别测量每根钢筋的两端和中部截面的直径 d_n (测量不包含钢筋肋部), 同时, 沿圆周方向选取 4 个位置, 测量不锈钢覆层的厚度 t , 将实测直径 d_n 和不锈钢覆层厚度 t 取平均值后列于表 2 中。根据 d_n 和 t 的实测结果, 计算得到芯部碳钢直径 d_s 、不锈钢覆层钢筋截面面积 A 、芯部碳钢面积 A_s 和不锈钢覆层面积 A_b 。表中包覆率 $\alpha = A_b/A$, 即外层不锈钢面积 A_b 与不锈钢覆层钢筋截面面积 A 之比。

表 2 316SC 的几何尺寸和截面面积
Table 2 Geometric dimensions and sectional areas of 316SC

钢筋种类	d / mm	d_n / mm	t / mm	d_s / mm	A / mm^2	A_s / mm^2	A_b / mm^2	α
316SC-12-1	12	11.17	0.57	10.04	97.89	79.06	18.82	0.19
316SC-12-2	12	11.20	0.60	9.99	98.47	78.40	20.07	0.20
316SC-16-1	16	15.33	0.72	13.89	184.56	151.54	33.03	0.18
316SC-16-2	16	15.33	0.79	13.75	184.56	148.41	36.15	0.20
316SC-25-1	25	24.47	1.30	21.86	469.91	375.18	94.74	0.20
316SC-25-2	25	24.43	1.52	21.39	468.64	359.16	109.48	0.23

d 为公称直径。

1.3 材性检测

图 2 给出了不锈钢覆层钢筋横截面的金相组织。可以看出, 不锈钢覆层与内部碳钢冶金结合紧

密, 界面没有间隙、夹渣物, 结合情况良好, 能保证二者间的协同工作。为了进一步研究冶金结合层处的细节, 采用扫描电镜 (SEM) 能谱的线扫描进行分析, 如图 3 所示, 图中 cps 为能谱计数率, 其值越大, 反映此处元素含量越高。根据图 3 可知, 不锈钢覆层处, Cr 和 Ni 元素含量基本保持恒定, 且远高于芯部碳钢处, 而 Fe 元素含量则低于芯部碳钢处。在 2 种金属交界面处, Fe、Cr 和 Ni 元素的 cps 有明显的起伏变化, 变化宽度约为 15 μm , 在该宽度范围内, Fe 的 cps 随着距离的增加而增大, Cr 和 Ni 的 cps 随着距离的增加而减小, 表明存在一个持续过渡的冶金结合层, 界面冶金结合良好。

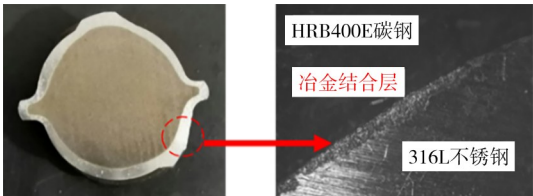
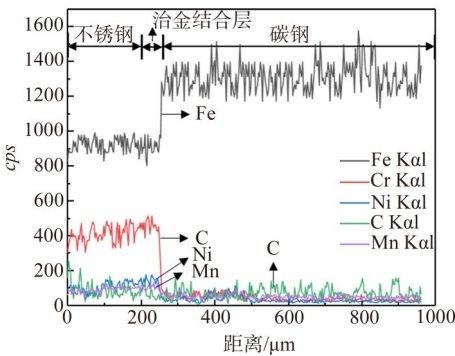


图 2 金相组织

Fig. 2 Metallographic structure



Kα1 代表的是 K 系跃迁中的第一个辐射峰。

图 3 SEM 能谱分析

Fig. 3 SEM energy spectrum analysis

1.4 试验设备与方法

拉伸试验采用 TSE106D 微机控制电子万能试验机, 试验机量程为 1000 kN。筋材的拉伸应变通过电子引伸仪测量, 试件安装就位后, 在试件中部

安装引伸仪,引伸仪的标距为 50 mm。为了确保试验结果的准确和稳定,加载制度全程按照 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》的要求执行^[30],拉伸试验采用位移控制,位移速率为 3 mm/min,试验期间保持恒定,直至将钢筋拉断,试件荷载及变形等数据由计算机自动采集并记录。拉伸钢筋原始标距取为 5 倍的钢筋直径,钢筋拉断后,取下试件,用游标卡尺量取钢筋的断后标距,并按式(1)计算断后伸长率 δ :

$$\delta = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: L_u 为钢筋的断后标距,mm; L_0 为钢筋的原始标距,mm。

2 单调拉伸试验

2.1 试件破坏过程

拉伸试验过程中,观察 316SC 不锈钢覆层钢筋、HRB400E 钢筋和实心 316L 不锈钢钢筋的变形情况,3 种钢筋颈缩、断裂的过程类似,如图 4 所示。在达到极限荷载时,钢筋虽经过弹性变形和塑性强化变形阶段,但没有明显的颈缩现象,仍保持完好的表观形貌;在达到极限荷载后,钢筋承受较大的塑性变形,通过肉眼能够观察到钢筋横肋间产生的颈缩部位,但未出现裂纹;随着颈缩部位错密度增大,塑性变形能力减弱,塑性变形逐渐到达极限,从而出现裂纹,持续的裂纹出现导致钢材断裂。实心 316L 不锈钢钢筋的断裂过程虽然与 316SC 覆层钢筋、HRB400E 钢筋相似,但与之不同的是:在受力过程中,随着位错运动的发展,实心 316L 不锈钢钢筋

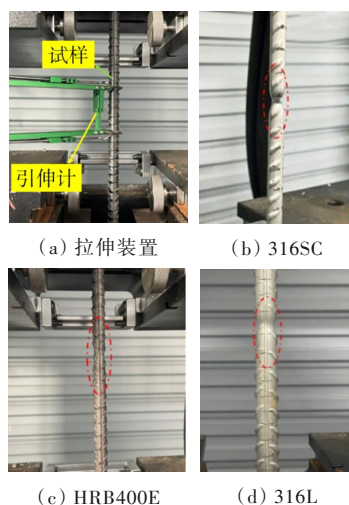


图 4 钢筋拉伸过程

Fig. 4 Tensile processes of rebars

变形阻力增加相对缓慢,延长颈缩区段的发展,使其断口被拉伸得更为细长。

为了更加直观地进行比较,图 5 给出了部分钢筋被拉断后的颈缩现象和伸长量的对比。



图 5 不同钢筋颈缩现象和伸长量对比

Fig. 5 Comparison of necking phenomenon and elongation among different rebars

从图 5 可以看出,不同材质钢筋都具有明显的颈缩现象。除了直径 12 mm 的 316SC 覆层钢筋外,钢筋试样基本上都在中段出现局部细化。随着拉力荷载的增加,细化区域钢筋的纵向长度增加,直径越来越小,直至最终发生断裂。对比 3 种钢筋可以发现,316SC 不锈钢覆层钢筋的颈缩细化区域以及断裂后的长度与 HRB400E 钢筋类似,表明不锈钢覆层钢筋的塑性性能受不锈钢覆层影响较小,主要由芯筋材料决定。实心 316L 不锈钢钢筋的颈缩现象明显,细化区域钢筋的长度相比于其余 2 种钢筋更大,这也从宏观上说明不锈钢钢筋具有更大的断后伸长率及更好的延展性。

2.2 宏观断口形貌

图 6 为部分钢筋拉断后的宏观断口形貌。可以看出,316SC 覆层钢筋宏观断口形状呈杯锥状,色



图 6 不同钢筋宏观断口形貌对比

Fig. 6 Comparison of macroscopic fracture morphologies among different rebars

泽明亮、剪切唇区明显,断口外围较为平整光滑,但中心区域比较粗糙,出现明显的褶皱条纹,表现为塑性断裂特征。拉断后不锈钢覆层与芯筋之间仍结合紧密,二者未出现分离或者间隙,表明不锈钢覆层钢筋的制作工艺好,在拉伸破坏时仍保持良好的变形协调工作性能,满足工程上的使用要求;HRB400E 钢筋的断口形貌与 316SC 覆层钢筋的断口形貌十分相似,但断口相对平直;实心 316L 不锈钢钢筋断口剪切唇区面积相对较小,断面收缩率大,这是因为不锈钢钢筋塑性变形较大,颈缩细化区段的钢筋在更小直径的状态下发生断裂。

3 试验结果分析

3.1 实测应力-应变曲线

图 7 给出了 316SC 覆层钢筋、HRB400E 普通碳钢和实心 316L 不锈钢钢筋拉伸的应力-应变关系曲线。可以看出,不同材质钢筋的应力-应变曲线形状有所区别,3 种不同直径(12, 16, 25 mm)的 HRB400E 钢筋,其应力-应变曲线均经历了弹性、屈服、强化、颈缩 4 个阶段,有明显的屈服平台,屈服前应力-应变呈线性关系。3 种不同直径(12, 16,

25 mm)的实心 316L 不锈钢钢筋,其应力-应变曲线仅有弹性、强化和颈缩 3 个阶段,呈非线性关系,无明显的屈服平台;而对于不锈钢覆层钢筋,直径 16 mm 及 25 mm 的应力-应变曲线类似于 HRB400E 钢筋,有明显的屈服平台,直径 12 mm 的应力-应变曲线则类似于实心 316L 不锈钢钢筋,表现出典型的非线性特征,无明显的屈服平台。从图 7 中局部放大图可以看出,3 种直径的 316SC 不锈钢覆层钢筋,其屈服强度或条件屈服强度(直径 12 mm 钢筋)均高于同直径的 HRB400E 钢筋和实心 316L 不锈钢钢筋。分析原因:这可能是因为不锈钢覆层先于内芯碳钢出现塑性累积,在内芯碳钢屈服时,覆层已处于强化阶段,此时增加的荷载主要由不锈钢覆层承担,应力随应变增加仍然呈增长态势,当外包不锈钢覆层的强化效应弱于芯部碳钢的屈服效应时,不锈钢覆层钢筋才出现屈服平台[图 7(b)和图 7(c)],如外包不锈钢覆层的强化效应强于芯部碳钢的屈服效应,并使芯部碳钢进入强化阶段后,屈服平台则消失[图 7(a)]。可见,不锈钢与芯部碳钢复合后,能够提高不锈钢覆层钢筋的屈服强度。

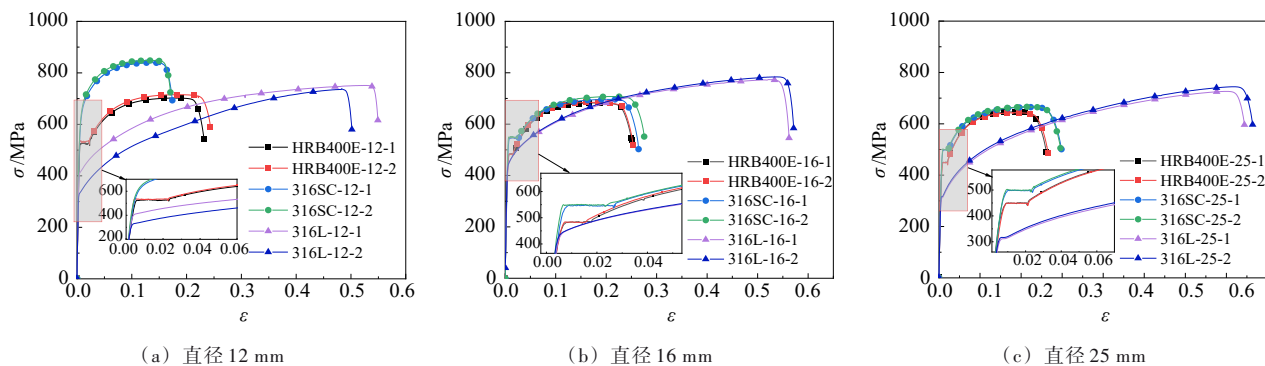


图 7 钢筋应力-应变关系曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of rebars

另外,从图 7 中还可以看出,316SC 覆层钢筋的极限应变与同直径的 HRB400E 钢筋的极限应变相近,这可能是因为内芯碳钢占据该种复合钢筋材料组成的绝大部分,其延性性能主要由芯部碳钢决定,外层不锈钢材料对其影响较小。而实心 316L 不锈钢钢筋的极限应变远大于 316SC 覆层钢筋和 HRB400E 钢筋,其延展性较好。

3.2 力学性能指标

表 3 给出了等应变单调加载下不同种类钢筋实测力学性能指标。对于无明显屈服点的不锈钢覆

层钢筋(直径 12 mm)和实心 316L 不锈钢钢筋,依据 GB/T 50010—2010《混凝土结构设计标准》的要求^[31],取残余应变 0.2% 时的非比例延伸强度作为其条件屈服强度 $f_{y,0.2}$ 。另外,考虑到设计中通常使用钢筋的公称直径,因此,表中应力都是根据公称直径计算的。

从表 3 中可知,每组 2 根平行试样钢筋的屈服强度 f_y (条件屈服强度 $f_{y,0.2}$)、极限强度 f_u 、断后伸长率 δ 及最大力伸长率 δ_{gt} 数据接近,离散性小。3 种直径的 316SC 覆层钢筋实测屈服强度在 490~582 MPa

表3 316SC、HRB400E和316L实测力学性能指标

Table 3 Measured mechanical properties of 316SC, HRB400E, and 316L

钢筋种类	f_y / MPa	$f_{y,0.2}$ / MPa	f_u / MPa	f_u/f_y ($f_u/f_{y,0.2}$)	δ / %	δ_{gt} / %	E / GPa	α
316SC-12-1	—	582	839	1.46	28.7	19.1	187	0.19
316SC-12-2	—	575	852	1.46	29.5	20.2	192	0.20
316SC-16-1	537	—	696	1.30	30.4	21.4	188	0.18
316SC-16-2	558	—	729	1.31	30.8	20.4	190	0.20
316SC-25-1	490	—	665	1.36	31.9	22.5	185	0.20
316SC-25-2	491	—	666	1.36	32.7	22.3	177	0.23
HRB400E-12-1	515	—	702	1.36	26.4	17.8	205	—
HRB400E-12-2	523	—	715	1.37	27.1	19.3	203	—
HRB400E-16-1	483	—	682	1.41	28.1	18.7	198	—
HRB400E-16-2	481	—	685	1.42	28.3	19.5	198	—
HRB400E-25-1	441	—	647	1.47	28.5	20.3	192	—
HRB400E-25-2	439	—	643	1.46	29.0	20.6	194	—
316L-12-1	—	407	751	1.85	51.2	46.3	159	—
316L-12-2	—	405	738	1.82	50.8	45.9	160	—
316L-16-1	—	425	773	1.82	53.6	49.1	157	—
316L-16-2	—	431	783	1.82	52.8	48.7	153	—
316L-25-1	—	344	726	2.11	54.4	49.2	151	—
316L-25-2	—	348	744	2.13	54.6	48.9	147	—

之间,均大于同直径的HRB400E钢筋和实心316L不锈钢钢筋(以条件屈服强度比较)。当覆层包覆率在20%左右时,直径12、16、25 mm的覆层钢筋与同直径的HRB400E钢筋相比,屈服强度平均值分别提高了11%、14%、11%,与实心316L不锈钢相比,屈服强度平均值分别提高了42.5%、27.9%、41.8%;在极限强度方面,同直径的316SC覆层钢筋较HRB400E钢筋分别提高了19%(直径12 mm)、4%(直径16 mm)、3%(直径25 mm);3种直径316SC覆层钢筋的强屈比均在1.30以上(GB/T 50010—2010对钢筋强屈比的要求是不小于1.25),可见,316L不锈钢与HRB400E碳钢复合后,屈服强度、极限强度均有所提高,其中,屈服强度提高的幅度较极限强度大,表现出较HRB400E碳钢更好的强度性能,能很好满足工程结构对钢筋使用强度的要求。

从表3还可以看出,3种直径的实心316L不锈钢钢筋的断后伸长率 δ 均在50%以上,HRB400E钢筋的断后伸长率则相对较小,在26.4%~29.0%之间,而316SC不锈钢覆层钢筋的断后伸长率介于实心316L不锈钢和HRB400E钢筋之间,其值为28.7%~32.7%之间。所有钢筋的断后伸长率均随直径的增大而增大,可见粗直径钢筋的断后伸长率更大。同直径的实心316L不锈钢钢筋与HRB400E钢筋相比,平均断后伸长率分别提高了90.7%(直

径12 mm)、88.7%(直径16 mm)、89.6%(直径25 mm),约是HRB400E钢筋的2倍,说明实心316L不锈钢钢筋具有良好的应力强化效应,变形能力出众,延性性能优异。316SC覆层钢筋的断后伸长率与HRB400E钢筋相比,分别提高了8.8%(直径12 mm)、8.5%(直径16 mm)、12.3%(直径25 mm),同直径钢筋均有小幅度提升,这主要是因为覆层不锈钢优异的变形能力使复合钢筋整体的延性性能得到提升,在拉伸过程中,不锈钢和碳钢同时发挥各自的性能,在内芯碳钢即将断裂时,表层不锈钢提供给复合钢筋更好的塑性性能,增加钢筋的整体变形能力,但由于覆层相对于钢筋直径较薄,变形性能提升有限。同样,316SC覆层钢筋的最大力伸长率 δ_{gt} (材料在达到最大荷载且暂未发生断裂时的平均伸长率,包括钢筋发生的弹性变形和塑性变形)与断后伸长率 δ 的情况类似,介于HRB400E钢筋与实心316L不锈钢钢筋之间,较HRB400E钢筋有小范围的增加。

根据表3的试验结果,还可以发现316SC覆层钢筋的弹性模量相比于HRB400E钢筋有所降低,基本保持在 $(1.77\sim 1.92)\times 10^5$ MPa之间,实心316L不锈钢钢筋的弹性模量最低,均在 1.6×10^5 MPa以下,这主要与其自身的化学成分和材料特性有关,由于实心316L不锈钢含有较高的Cr、Ni等耐蚀合金元素,使其弹性阶段变短,应力较小时就产生塑性变形,表现出非线性特征,当316L不锈钢与碳钢复合后,增加了复合钢筋弹性阶段的整体变形性能,同样,由于表面不锈钢覆层相对较薄,弹性阶段提供的变形性能有限,因而,不锈钢覆层钢筋弹性模量降低的幅度不大,与HRB400E钢筋相比,平均降低幅度为7.1%(直径12 mm)、4.5%(直径16 mm)和6.2%(直径25 mm)。

3.3 应力-应变本构模型

钢筋的应力-应变本构模型是研究钢筋混凝土结构承载力和变形性能的基础,也是结构非线性有限元分析时必不可少的本构关系。对316SC不锈钢覆层钢筋,建立其应力-应变本构模型对结构设计至关重要。由前述拉伸试验得到的应力-应变曲线可知,不同直径的不锈钢覆层钢筋表现出不同的曲线形状,直径16 mm和25 mm的不锈钢覆层钢筋具有明显的屈服点和屈服平台,且与HRB400E钢筋曲线形状接近,而直径12 mm的不锈钢覆层钢筋是一条连续光滑的曲线,屈服平台消失,但强化段曲线

形状与有屈服平台不锈钢覆层钢筋类似,为了便于工程设计和有限元分析计算运用,对实际拉伸的应力-应变关系曲线进行简化,对有明显屈服平台的不锈钢覆层钢筋,采用理想弹塑性和强化段相结合的二折线模型,如图 8(a)所示,对无明显屈服平台的则采用如图 8(b)所示的双折线模型。

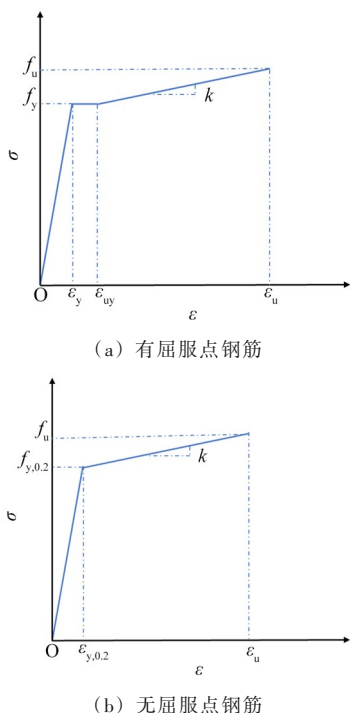


图 8 不锈钢覆层钢筋应力-应变简化模型

Fig. 8 Simplified stress-strain models of stainless steel-clad rebars

根据实测拉伸应力-应变关系曲线和上述简化思路,提出不锈钢覆层钢筋应力-应变本构模型如式(2)。

有屈服平台不锈钢覆层钢筋:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_{sb} \varepsilon_s & \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_y < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{uy} \\ f_y + \frac{f_u - f_y}{\varepsilon_u - \varepsilon_{uy}} (\varepsilon_s - \varepsilon_{uy}) & \varepsilon_{uy} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (2a)$$

无屈服平台不锈钢覆层钢筋:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_{sb} \varepsilon_s & \varepsilon_s \leq \varepsilon_{y,0.2} \\ f_{y,0.2} + \frac{f_u - f_{y,0.2}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{y,0.2}} (\varepsilon_s - \varepsilon_{y,0.2}) & \varepsilon_{y,0.2} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (2b)$$

式中: σ_s 、 ε_s 为不锈钢覆层钢筋的应力和应变; f_y 为不锈钢覆层钢筋屈服强度; $f_{y,0.2}$ 为残余应变0.2%时的条件屈服强度; ε_y 、 $\varepsilon_{y,0.2}$ 分别为 f_y 和 $f_{y,0.2}$ 对应的不锈钢覆层钢筋屈服应变,可由试验确定,本试验实

测 ε_y 在0.0073~0.0093之间, $\varepsilon_{y,0.2}$ 在0.0051~0.0059之间; ε_{uy} 为硬化起始应变,实测值为0.0234~0.0246之间; f_u 为极限强度; ε_u 为极限强度 f_u 对应的峰值应变,对有屈服平台不锈钢覆层钢筋,实测值 ε_u 在0.2046~0.2359区间范围内变化,对无屈服平台不锈钢覆层钢筋, ε_u 在0.1418~0.1458区间范围内变化; E_{sb} 为不锈钢覆层钢筋弹性模量。

由前述拉伸试验可知,复合钢筋外包不锈钢覆层与内芯碳钢之间的界面冶金结合良好,在承受荷载作用的过程中,两者变形协调,即同一截面处应变相等,因此,不锈钢覆层钢筋的弹性模量 E_{sb} 可以通过芯材碳钢和不锈钢覆层的弹性模量复合得到,如式(3)所示:

$$E_{sb} = (E_s A_s + E_b A_b) / A \quad (3a)$$

$$A_s = A - A_b \quad (3b)$$

$$E_{sb} = E_s + (E_b - E_s) A_b / A = E_s + \alpha (E_b - E_s) \quad (3c)$$

式中: E_{sb} 、 A 、 E_s 、 A_s 、 E_b 、 A_b 分别表示不锈钢覆层钢筋、芯部碳钢、不锈钢覆层的弹性模量和横截面面积。由式(3c)可见,包覆率 α 对不锈钢覆层钢筋的弹性模量有影响,随着包覆率 α 的增加,不锈钢覆层钢筋的弹性模量非线性减小,并向覆层不锈钢的弹性模量收敛。为了验证式(3c)的适用性,根据实心316L不锈钢钢筋及HRB400E钢筋的弹性模量实测值,结合表2不锈钢覆层钢筋的实测横截面参数,运用式(3c)计算出不锈钢覆层钢筋的弹性模量,列于表4中,同时也列出了3种钢筋弹性模量的实测结果。可以看出,不锈钢覆层钢筋弹性模量计算值 $E_{sb,th}$ 与实测值 $E_{sb,ex}$ 比较接近,误差在5%以内,表明用式(3c)确定不同包覆率下不锈钢覆层钢筋的弹性模量是可行的。

需要指出的是,式(3c)是基于316SC是圆形截面假设得到的,但实际钢筋表面具有不锈钢的横肋和纵肋,如果考虑横肋和纵肋的影响,不锈钢包覆率会增大,弹性模量计算值与实测值之间的误差会进一步缩小。

4 结 论

1) 不锈钢覆层钢筋复合界面存在一个15 μm 左右的冶金结合层,外层不锈钢与内芯碳钢之间没有发现脱离、空隙及夹渣,冶金结合紧密,可以保持较好的协同工作性能,满足工程上的使用要求。

2) 不同直径的不锈钢覆层钢筋表现出不同的

表 4 弹性模量实测值 $E_{sb,ex}$ 与计算值 $E_{sb,th}$ 比较
Table 4 Comparison between measured ($E_{sb,ex}$) and calculated ($E_{sb,th}$) elastic modulus values

钢筋种类	$E_{s,ex}/10^5\text{MPa}$	钢筋种类	$E_{b,ex}/10^5\text{MPa}$	钢筋种类	α	$E_{sb,ex}/10^5\text{MPa}$	$E_{sb,th}/10^5\text{MPa}$	$E_{sb,ex}/E_{sb,th}$
HRB400E-12-1	2.05	316L-12-1	1.59	316SC-12-1	0.19	1.87	1.95	0.959
HRB400E-12-2	2.03	316L-12-2	1.60	316SC-12-2	0.20	1.92	1.94	0.990
HRB400E-16-1	1.98	316L-16-1	1.57	316SC-16-1	0.18	1.88	1.90	0.989
HRB400E-16-2	1.98	316L-16-2	1.53	316SC-16-2	0.20	1.90	1.89	1.005
HRB400E-25-1	1.92	316L-25-1	1.51	316SC-25-1	0.20	1.85	1.84	1.005
HRB400E-25-2	1.94	316L-25-2	1.47	316SC-25-2	0.23	1.77	1.82	0.973

应力-应变曲线形状,直径 12 mm 的不锈钢覆层钢筋屈服平台消失,表现出硬钢特性,而直径 16 mm 和 25 mm 的不锈钢覆层钢筋的力学性能与 HRB400E 钢筋的性能相似,应力-应变曲线中有明显的屈服平台和应变强化段。

3) 不锈钢覆层钢筋的屈服强度在 490~582 MPa 之间,极限强度介于 665~852 MPa 之间,强屈比均大于 1.25,弹性模量介于 $(1.77\sim1.92)\times10^5$ MPa 之间,断后伸长率介于 28.7%~32.7% 之间,最大力伸长率均在 19.1% 以上。不锈钢覆层钢筋综合了不锈钢和碳钢的优异性能,强度和延性在 HRB400E 基础上有不同程度的提高,表现出较好的受力性能和延性能力,显示其具有良好的工程应用前景。

4) 在试验研究及理论分析的基础上,建立了不锈钢覆层钢筋的应力-应变本构模型。模型中不锈钢覆层钢筋的弹性模量随包覆率的增大呈非线性减小,并逐渐收敛于不锈钢的弹性模量。根据双金属材料复合法则,给出了不锈钢覆层钢筋弹性模量复合计算公式,公式计算值与实测值吻合较好,误差在 5% 以内。

需要说明的是,不锈钢覆层钢筋作为一种特殊的特殊钢筋,由于生产工艺较单一材料钢筋复杂,能够获得的直径规格数量有限,因此,更多直径规格及包覆率情况下的综合力学性能还有待于进一步研究。

参 考 文 献

[1] 张伟平,邱俊澧,姜超. 钢筋混凝土结构锈蚀特征的漏磁探测研究进展[J]. 建筑材料学报,2024,27(11):1022-1032.
[2] 孙佳,金祖权,秦一琦. 钢筋非均匀锈蚀与混凝土开裂试验与数值模拟研究[J]. 建筑材料学报,2024,27(8): 757-763.
[3] MEHTA P K. Concrete durability-fifty year's progress [C]//Proceeding Second International Conference on Concrete Durability, ACI SP126-1. Detroit: American Concrete Institution, 1991.
[4] 尚明刚,张云升,何忠茂,等. 盐渍土环境下钢筋混凝土恒电流加速锈蚀试验及可靠性分析[J]. 建筑材料学报,2022,25

(7):751-759.
[5] CLEMENA G G, VIRMANI Y P. Comparing the chloride resistances of reinforcing bars: evaluating new, econo-mical metallic reinforcement for its ability to withstand high salt concentrations [J]. Concrete International,2004,26(11):39-49.
[6] 金浏,张仁波,杜修力,等. 角部钢筋锈蚀引发混凝土保护层开裂行为研究[J]. 建筑材料学报,2016, 19(2):255-261.
[7] 李亚辉,郑山锁,董立国,等. 非均匀锈蚀钢筋拉伸性能试验与模拟[J]. 建筑材料学报,2022,25(9):991-998.
[8] KAZUYUKI N. Method of manufacturing clad bar: US:5004143 [P]. 1991-04-02.
[9] ANTONINO G C ,CRUD Y G . Process for manufacturing corrosion resistant composite metal products:US:6706416[P]. 2001-02-22.
[10] 何冰玲. 碳钢芯/不锈钢覆层钢筋成型理论的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2012.
[11] 高亚男,鲍远通,张全逾,等. 不锈钢/碳钢复合钢筋内外温差轧制工艺研究[J]. 铸造技术,2017, 38(7):1708-1721.
[12] SAWICKI S. Properties of bimetallic “carbon steel-stainless-steel” bars with periodic texture obtained by explosive cladding and rolling[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2012, 54(5/6):303-308.
[13] 孙俊生,孙逸群,张凌峰. 一种不锈钢复合耐腐蚀钢筋及其制备方法: CN102011463B[P]. 2012-06-20.
[14] LIU X M , FENG G H , LIU X , et al. Interface characteristics and properties of a high-strength corrosion-resistant stainless steel clad rebar[J]. Metals, 2020, 10,373.
[15] JONATHON D T, STEPHEN R S. Characterization of a stainless-clad steel reinforcing bar[C]// Transportation Research Board 94th Annual Meeting. Washington D C, United States, 2015:11 -15.
[16] 高亚男. 不锈钢碳钢覆层钢筋轧制理论及实验研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2011.
[17] JIA Z N ,GAO Y N. Process and property of hot-rolled stainless steel/carbon steel cladding bar [J]. Functional Materials ,2016, 23(2):243-248.
[18] 黄羽,张水仙. 不同孔型系统轧制不锈钢覆层钢筋的研究[J]. 冶金设备,2015, 220(1):16-21.
[19] 李鹏博. 热轧不锈钢覆层钢筋的组织与性能[D]. 昆明:昆明理工大学,2018.

- [20] FENG Y Y, YU H, LUO Z A, et al. The impact of process parameters on microstructure and mechanical properties of stainless steel/carbon steel clad rebar [J]. *Materials*, 2019, 12, 2868.
- [21] XIANG Y, HUANG L, ZENG L F, et al. Development and application prospect of hot rolled stainless steel-carbon steel composite rebar [J]. *Metal Materials and Metallurgy Engineering*, 2017, 45:84-88.
- [22] OGUNSANYA I G, STRONG V, HANSSON C M. Corrosion behavior of austenitic 304L and 316LN stainless steel clad reinforcing bars in cracked concrete [J]. *Materials and Corrosion*, 2020, 71:1066-1080.
- [23] CUI F S, SAGÜÉS A. Corrosion performance of stainless steel clad rebar simulated pore water and concrete [R]. Houston: NACE International, 2003: 5-8.
- [24] HUA J M, WANG F, HUANG L P, et al. Experimental study on mechanical properties of corroded stainless-clad bimetallic steel bars [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 287, 123019.
- [25] HUA J M, WANG F, WANG N, et al. Experimental and numerical investigations on corroded stainless-clad bimetallic steel bar with artificial damage [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44, 102779.
- [26] 华建民, 胡国松, 王斐, 等. 不同腐蚀形态不锈钢-碳钢复合钢筋力学性能 [J]. *工业建筑*, 2023, 53(5): 179-186.
- [27] LI W, WANG Q F, HUI Q, et al. Mechanical properties of HRB400E/316L stainless steel clad rebar under low-cycle fatigue [J]. *Structures*, 2022, 38:292-305.
- [28] 华建民, 王斐, 薛暄译, 等. 高温后不锈钢-碳钢复合钢筋低周疲劳性能 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(4): 150-160.
- [29] HUA J M, WANG F, XIANG Y, et al. Mechanical properties of stainless-clad bimetallic steel bars exposed to elevated temperatures [J]. *Fire Safety Journal*, 2022, 127, 103521.
- [30] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计标准: GB/T 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.