

引用本文:石建光,李国聪,胡红梅,等.鼓浪屿历史建筑带肋方形钢筋的物理性状和腐蚀原因分析[J].建筑科学与工程学报,2023,40(6):10-18.

SHI Jianguang, LI Guocong, HU Hongmei, et al. Analysis on physical properties and corrosion causes of ribbed square steel bars in Gulangyu historic building[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(6): 10-18.

DOI:10.19815/j.jace.2021.11117

# 鼓浪屿历史建筑带肋方形钢筋的物理性状和腐蚀原因分析

石建光<sup>1</sup>, 李国聪<sup>1</sup>, 胡红梅<sup>1</sup>, 谢益人<sup>2</sup>, 陈周熠<sup>1</sup>, 朱杰<sup>1</sup>

(1. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005;

2. 厦门合立道工程设计集团股份有限公司, 福建 厦门 361004)

**摘要:**从鼓浪屿历史建筑(1920~1930年)中实地取样了3种带肋方形钢筋,采用统计分析和微观测试方法,对钢筋的物理性状和腐蚀原因进行了深入研究和分析。结果表明:鼓浪屿历史建筑中混凝土构件所用带肋方形钢筋的横肋高、横肋与纵轴夹角满足国内外现行规范要求,但横肋间距、相对肋面积不满足要求;金相显示所用带肋方形钢筋没有发现有害的带状组织、魏氏组织以及回火马氏体组织;从化学成分判断,所用钢材品种类似于现代的非合金钢(碳素钢),且多为低碳钢;多数钢筋中的磷元素和硫元素含量偏高,说明当时的钢材质量等级较低;不同历史建筑、不同混凝土构件所用方形钢筋的力学性能差异较大,1<sup>#</sup>钢筋和2<sup>#</sup>钢筋分别满足现行规范对于HRB400和HRB600的性能要求,但3<sup>#</sup>钢筋不满足规范对HRB335的性能要求;结构加固计算分析时不能仅依据钢筋的表面特征划分钢筋级别,需要对其力学性能进行检测、鉴定;钢筋的铁锈成分比较复杂,包括 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\beta\text{-FeOOH}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 等多种成分,据此判断混凝土碳化、海洋环境中的氯盐侵蚀以及二者的共同作用是导致鼓浪屿历史建筑钢筋腐蚀的主要原因。

**关键词:**历史建筑;带肋方形钢筋;微观测试;物理性状;锈蚀物

中图分类号:TU375

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)06-0010-09

## Analysis on physical properties and corrosion causes of ribbed square steel bars in Gulangyu historic building

SHI Jianguang<sup>1</sup>, LI Guocong<sup>1</sup>, HU Hongmei<sup>1</sup>, XIE Yiren<sup>2</sup>, CHEN Zhouyi<sup>1</sup>, ZHU Jie<sup>1</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;

2. Xiamen Hordor Engineering Design Group Co., Ltd., Xiamen 361004, Fujian, China)

**Abstract:** Three kinds of ribbed square steel bars were sampled from Gulangyu historical buildings (1920-1930), the physical properties and corrosion causes of the steel bars were studied and analyzed in-depth by statistical analysis and microscopic test methods. The results show that the transverse rib height and the angle between the transverse rib and the longitudinal axis of the ribbed square steel bars used in the concrete components of Gulangyu historical building meet the requirements of the current norms at home and abroad, but the transverse rib spacing and the

收稿日期:2022-11-25

基金项目:厦门市鼓浪屿万石山风景名胜区管委会项目(XDHT2020145A)

作者简介:石建光(1962-),男,工学博士,教授,硕士生导师,E-mail:jgshi798@xmu.edu.cn.

relative rib area do not meet the requirements. Metallography shows that no harmful banded structure, widmanstatten structure and tempered martensite structure is found in the ribbed square steel bars. Judging from the chemical composition, the steel used is similar to modern non-alloy steel (carbon steel), and mostly low carbon steel. However, the content of phosphorus and sulfur in most steel bars is high, indicating that the quality grade of steel is low at that time. The mechanical properties of square steel bars used in different historical buildings and different concrete components are quite different. The 1<sup>#</sup> steel bar and 2<sup>#</sup> steel bar meet the performance requirements of HRB400 and HRB600 in the current code respectively, but the 3<sup>#</sup> steel bar does not meet the performance requirements of HRB335 in the code. Therefore, in the calculation and analysis of structural reinforcement, the steel bars grade cannot be divided only according to the surface characteristics of reinforcement, and its mechanical properties need to be tested and identified. The composition of steel rust is more complex, including Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, α-FeOOH, β-FeOOH, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe(OH)<sub>3</sub> and other components, according to this, it is judged that concrete carbonation, chloride corrosion in the marine environment and the combined effect of the two are the main causes of steel corrosion in Gulangyu historical buildings.

**Key words:** historical architecture; ribbed square steel bar; microscopic test; physical property; corrosion product

0 引 言

鼓浪屿由于得天独厚的自然条件和特殊的历史文化背景,岛上的历史建筑样式丰富多样,其中 70% 的建筑是 20 世纪初至 20~30 年代建造的。在这一时期,钢筋、混凝土等新型建筑材料和建筑技术在鼓浪屿得到了推广应用,大量采用钢筋混凝土的房屋兴建起来<sup>[1-2]</sup>。这些建筑体现了新材料和新结构等建筑技术在近代建筑中的应用,这时的钢筋与混凝土材料具有该特定时期的历史特点以及科学研究价值<sup>[3]</sup>。

通过调研鼓浪屿 20 多栋建筑的安全性鉴定、18 栋建筑的质量检测报告以及实地查勘发现,这些建筑在长期的自然环境、自然灾害和人为破坏等因素影响下,混凝土的梁、柱、楼板、阳台、挑檐等构件都有不同程度的损伤,出现了钢筋锈蚀导致混凝土保护层脱落、开裂、渗水等劣化现象,对历史建筑的安全性产生了严重威胁。由于历史建筑所用的建筑材料、建筑技术、结构技术和施工工法都具有历史局限性<sup>[4]</sup>,所用钢筋与现代钢筋有较大区别,大部分为方形钢筋而非圆形钢筋<sup>[5]</sup>,因此研究、分析这些方形钢筋的材质和性状特点,可以为历史建筑混凝土结构的鉴定和修复、加固提供科学依据。本文选取鼓浪屿延平戏院的混凝土梁、板中的钢筋和鹿礁路 99 号历史风貌建筑混凝土梁中的钢筋作为样本,开展了这方面的研究。

1 钢筋的表面形状特征分析

1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 钢筋分别为鼓浪屿延平戏院的混凝土梁、板钢筋,截面边长分别为 12.77、9.51 mm,外形均为带肋方钢,如图 1 所示。该建筑建于 1927 年,距今已有 94 年。3<sup>#</sup> 钢筋为鼓浪屿路焦路 99 号历史风貌建筑的混凝土梁钢筋,截面边长为 15.61 mm,外形也是带肋方形钢筋,如图 1(c)所示。该建筑建成于 1930 年,距今已有 90 余年。对以上 3 种规格钢筋的表面形状特征进行统计,并与现行规范进行比较,结果列于表 1。由于该时期的鼓浪屿建筑所采用的钢筋绝大部分从美国、德国、比利时等西方发达国家进口<sup>[2]</sup>,因此也同美国、欧盟的现行规范进行了对比。

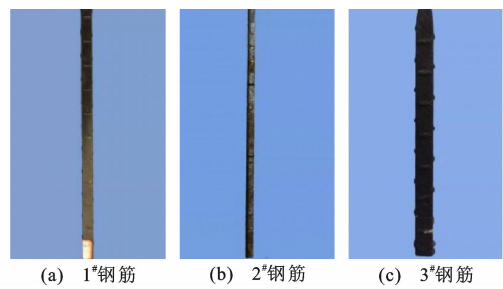


图 1 3 种钢筋实物图

Fig. 1 Three kinds of steel bar drawings

中国《钢筋混凝土用钢 第 2 部分:热轧带肋钢筋》规定:横肋与钢筋轴线的夹角不应小于 45°,当夹角不大于 70°时,钢筋相对两面上横肋的方向应

表 1 鼓浪屿历史建筑中方形钢筋表面形状特征统计结果

Table 1 Statistical results of surface shape characteristics of square steel bars in Gulangyu historical buildings								
钢筋 编号	规范	截面边长/ mm	横肋间距/ mm	横肋错位/ mm	横肋高/ mm	横肋与纵轴 夹角/(°)	横肋末端之间的 间隙总和/mm	相对肋面积
1#	检测值	12.77	28.0	4	0.98	90	13.00	0.010
	中国规范 <sup>[6]</sup>		≤9.6		0.90~1.80	≥45	≤11.00	≥0.060
	英国和欧盟标准 <sup>[7]</sup>		5.5~16.5		0.41~2.10	≥45	≤13.75	≥0.056
	美国标准 <sup>[8]</sup>		9.6		≥0.62	≥45	≤13.75	≥0.057
2#	检测值	9.51	18.0	15	0.86	90	15.20	0.012
	中国规范 <sup>[6]</sup>		≤7.3		0.60~1.40	≥45	≤8.30	≥0.055
	英国和欧盟标准 <sup>[7]</sup>		4.1~12.4		0.31~1.56	≥45	≤10.40	
	美国标准 <sup>[8]</sup>		≤7.3		≥0.47	≥45	≤10.40	≥0.057
3#	检测值	15.61	24.0	16	1.70	90	14.30	0.023
	中国规范 <sup>[6]</sup>		≤12.1		1.10~2.10	≥45	≤13.80	≥0.060
	英国和欧盟标准 <sup>[7]</sup>		6.9~20.8		0.52~2.60	≥45	≤17.31	
	美国标准 <sup>[8]</sup>		≤12.1		≥0.78	≥45	≤17.31	≥0.057

相反;横肋间距不得大于钢筋公称直径的 0.7 倍;横肋与钢筋表面的夹角不得小于 45°;钢筋相邻 2 个表面上横肋末端之间的间隙总和不应大于钢筋公称周长的 20%;公称直径不大于 12 mm 时,相对肋面积不小于 0.055,公称直径为 14 mm 和 16 mm 时,相对肋面积不应小于 0.060,公称直径大于 16 mm 时,相对肋面积不应小于 0.065<sup>[6]</sup>。

英国和欧盟标准 BS EN 10080:2005 规定:横肋高为 0.03*d*~0.15*d*,其中 *d* 为公称直径;横肋间距为 0.4*d*~1.2*d*;横肋与钢筋轴线的夹角不应小于 45°;钢筋相邻 2 个表面上横肋末端之间的间隙总和不应大于钢筋公称周长的 25%;公称直径大于 12 mm 时,相对肋面积不应小于 0.056<sup>[7]</sup>。

美国标准 A615/A615M 规定:横肋高不应小于 0.045*d*,其中 *d* 为公称直径;横肋间距最大为 0.7*d*;横肋与钢筋轴线的夹角不应小于 45°;钢筋相邻两面上横肋末端之间的间隙总和不应大于钢筋公称周长的 25%;相对肋面积不应小于 0.057<sup>[8]</sup>。

由表 1 可知:这 3 种带肋方钢的横肋高、横肋与纵轴夹角满足现行国内外规范要求,但是横肋间距、相对肋面积不满足。1# 钢筋和 2# 钢筋横肋末端之间的间隙总和和不满足国内规范要求,但满足欧盟和美国的标 准;3# 钢筋横肋末端之间的间隙总和和不满足国内外要求。该结果与淳庆等<sup>[9]</sup>对历史建筑中 66 根方钢的表面形状特征统计结果相似,说明当时采用的方形钢筋的表面形状特性基本一致,可能大部分都为进口钢材。

2 钢筋的力学性能分析

采用 GMT5305 微机控制电子万能试验机,最

大力为 300 kN,准确度等级 0.5 级。试验按照《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温拉伸试验》<sup>[10]</sup>的要求进行。为避免锈蚀影响,选取没有锈蚀的钢筋进行拉伸,但由于建筑的特殊性,试样数量有限,因此取 1# 钢筋 2 根,2# 和 3# 钢筋 1 根。试验结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出,3 种方形钢筋均具有较好的屈服台阶,流幅较大。1# 钢筋的屈服强度为 397.92 MPa,抗拉强度为 620.79 MPa,断后伸长率为 22%,其抗拉强度、断后伸长率和屈强比均满足现行规范对 HRB400 钢筋的要求,但屈服强度略低于规范要求;2# 钢筋的屈服强度为 670.59 MPa,抗拉强度为 856.02 MPa,其断后伸长率、屈服强度、抗拉强度及屈强比均满足规范要求,具有很好的力学性能,完全满足现行规范对 HRB600 钢筋的要求;3# 钢筋的断后伸长率和屈强比满足规范对 HRB335 的要求,但是屈服强度仅为 248.92 MPa,抗拉强度仅为 317.71 MPa,二者距离规范要求相差较大。3 种钢筋的力学性能试验结果及规范要求见表 2。

目前在对鼓浪屿历史建筑用钢筋进行检测鉴定时,经常缺少对于钢筋力学性能的检测及评估,而是依据《钢筋混凝土用钢第 2 部分:热轧带肋钢筋》<sup>[6]</sup>将光圆钢筋直接评定为 HPB235,带肋钢筋直接评定为 HRB335。从上述分析看出,鼓浪屿不同历史建筑、不同混凝土构件所用带肋方形钢筋的力学性能差异较大,在进行结构加固计算分析时不能仅仅依据钢筋的表面特征简单归类,有必要实测其力学性能,根据实测结果划分钢筋级别,这样的计算结果才真实可信。

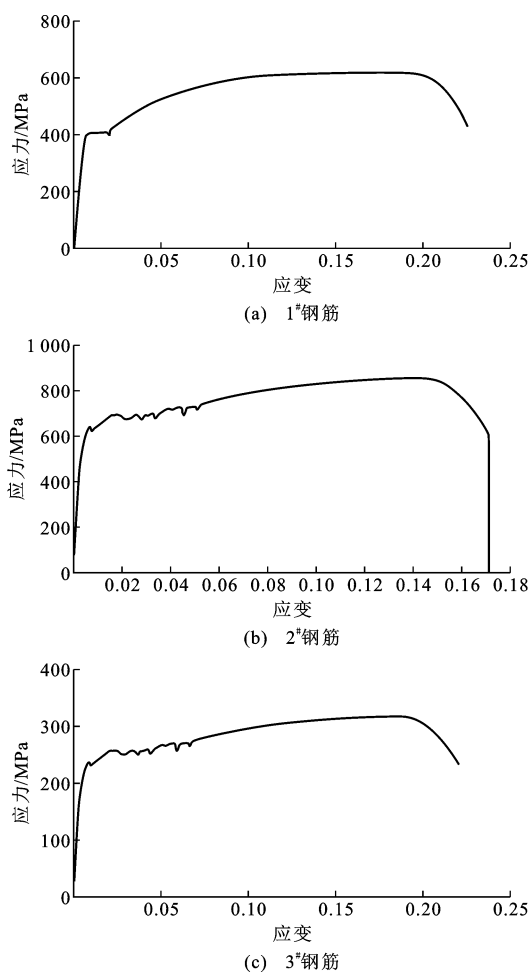


图 2 钢筋拉伸应力-应变

Fig. 2 Tensile stress-strain of reinforcement

表 2 钢筋力学性能试验结果及规范要求

Table 2 Test results of mechanical properties of reinforcement and specification requirements

钢筋编号	截面边长/mm	断后伸长率/%	屈服强度 $R_{eL}$ /MPa	抗拉强度 $R_m$ /MPa	$R_m/R_{eL}$
1#	12.77	22	397.92	620.79	1.56
2#	9.51	26	670.59	856.02	1.28
3#	15.61	31	248.92	317.71	1.28
HRB400 规范 <sup>[6]</sup> 规定值		$\geq 16$	$\geq 400.00$	$\geq 540.00$	$\geq 1.25$
HRB600 规范 <sup>[6]</sup> 规定值		$\geq 14$	$\geq 600.00$	$\geq 730.00$	
HRB335 规范 <sup>[11]</sup> 规定值		$\geq 17$	$\geq 335.00$	$\geq 455.00$	$\geq 1.25$

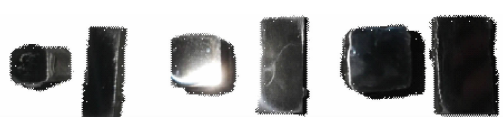


图 3 钢筋纵横截面抛光样品

Fig. 3 Polishing samples of longitudinal and transverse section of steel bars

少很多,但其力学性能却比 1# 钢筋好,可能是由于 2# 钢筋的非金属夹杂物评级均优于 1# 钢筋,钢筋基体较好。其中 D 类球状氧化物属于不变形颗粒,

### 3 钢筋的金相组织分析

将选取的带肋方形钢筋依据《金属显微组织检验方法》<sup>[11]</sup>进行打磨抛光。样品打磨抛光完成后如图 3 所示。为使钢筋的组织结构清晰显示,采用 5% 硝酸-酒精进行化学浸蚀,浸蚀时长为 10 s。

通过金相显微镜观测发现,1#~3# 钢筋中的非金属夹杂物主要有硫化物、氧化铝以及其他氧化物类,非金属夹杂物情况如表 3 所示,3 种钢筋都没有硅酸盐类夹杂物,其中 2# 钢筋的非金属夹杂物评级最优,其力学性能也最好。这 3 个规格钢筋的表层均存在腐蚀凹坑及部分腐蚀产物,且没有发现有害的带状组织、魏氏组织以及回火马氏体组织,钢筋的整体结构良好,这与钢筋的力学性能也相匹配。

图 4~6 为 1#~3# 钢筋金相显微照片。图 4 显示,1# 钢筋的组织主要由铁素体(白色部分)和珠光体(黑色部分)组成,其中珠光体占了 60%~70%,因此珠光体对其性能的影响更大。珠光体为铁素体和渗碳体的机械混合物,含碳量较低(0.8%),层状结构,塑性较好,强度和硬度较高。因此,1# 钢筋的塑性良好,强度适中,与力学性能试验结果相匹配。从显微照片可以看出,铁素体和珠光体分布比较均匀,且表层的组织与中部的组织相似。其平均晶体粒度为 9.0 级,属于细晶粒热轧带肋钢筋。

图 5 显示,2# 钢筋也是由铁素体和珠光体组成,但其珠光体含量只有 5%~10%,相对 1# 钢筋

表 3 钢筋非金属夹杂物评级

Table 3 Rating of non-metallic inclusions in steel bars

编号	硫化物类(A)	氧化铝类(B)	硅酸盐类(C)	球状氧化物类(D)
1#	2.5	2.5	0	2.5
2#	0.5	1.5	0	0.5
3#	2.5	2.5	0	2.5

其对钢筋基体的连续性会产生严重破坏,而 2# 钢筋的 D 类评级为 0.5 级,明显优于 1# 钢筋。2# 钢筋的晶体粒度为 7.0 级,属于普通热轧带肋钢筋。

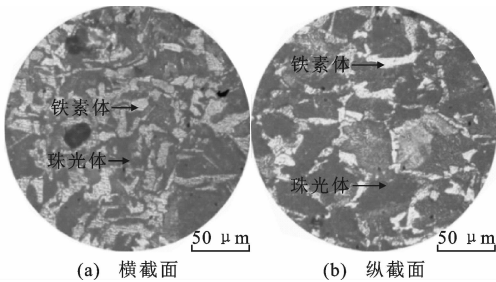


图 4 1# 钢筋金相显微照片

Fig. 4 Metallographic photographs of 1# steel bar

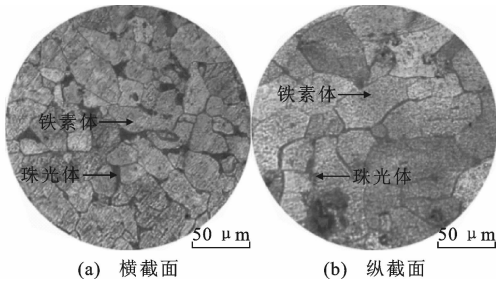


图 5 2# 钢筋金相显微照片

Fig. 5 Metallographic photographs of 2# steel bar

图 6 显示,3# 钢筋主要由铁素体和少数黑色粒状的渗碳体组成。铁素体是碳在  $\alpha$ -Fe 中的固溶体,由于  $\alpha$ -Fe 是体心立方晶格,原子间空隙小,溶碳能

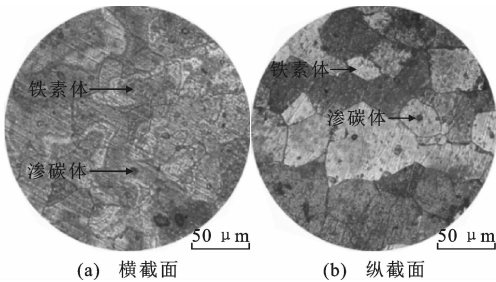


图 6 3# 钢筋金相显微照片

Fig. 6 Metallographic Photographs of 3# steel bar

力较差,故铁素体含碳量很少(小于 0.02%),由此决定其塑性、韧性好,但是强度、硬度低。渗碳体为铁和碳的化合物  $\text{Fe}_3\text{C}$ ,其含碳量高达 6.67%,晶体结构复杂,塑性差,性硬脆,抗拉强度低。同时结合表 3,其非金属夹杂物的情况也较差,因此,该钢筋的抗拉强度都较低,符合力学性能试验情况。

#### 4 钢筋的化学成分分析

采用火花放电原子发射光谱法对钢筋进行化学成分分析,按照《碳素钢和中低合金钢 多元素含量的测定 火花放电原子发射光谱法(常规法)》<sup>[12]</sup>要求进行,试验结果见表 4。

表 4 鼓浪屿历史建筑带肋方形钢筋化学成分分析

Table 4 Chemical composition analysis of ribbed square steel bar in Gulangyu historical building

钢筋编号		$\omega(\text{C})/\%$	$\omega(\text{Si})/\%$	$\omega(\text{Mn})/\%$	$\omega(\text{P})/\%$	$\omega(\text{S})/\%$	$\omega(\text{Cr})/\%$	$\omega(\text{N})/\%$	$\omega(\text{Fe})/\%$	碳当量 $C_{\text{eq}}/\%$
1#		0.284	0.191 0	1.470	0.015 6	0.020 4	0.025 0	0.000 41	97.9	0.197
2#		0.084	0.005 8	0.632	0.086 6	0.053 8	0.018 1	0.000 32	98.9	0.115
3#		0.035	0.005 7	0.437	0.069 2	0.067 9	0.016 6	$\leq 0.000 30$	99.2	0.539
规范 <sup>[6]</sup> 规定值	HRB400	$\leq 0.250$	$\leq 0.800 0$	$\leq 1.600$	$\leq 0.045 0$	$\leq 0.045 0$		$\leq 0.012 00$		$\leq 0.540$
	HRB600	$\leq 0.280$								$\leq 0.580$
规范 <sup>[11]</sup> 规定值	HRB335	$\leq 0.250$	$\leq 0.800 0$	$\leq 1.600$	$\leq 0.045 0$	$\leq 0.045 0$				$\leq 0.520$

注: $\omega(\cdot)$ 为各化学成分的质量分数。

1# 钢筋的化学成分包括 C、Si、Mn、P、S、Cr、N、Fe 元素,其碳含量达到 0.284%,远高于 2# 和 3# 钢筋,略超过低碳钢的标准,故 1# 钢筋的强度和硬度较高,同时保持较好的韧性和塑性。钢筋中 Si、Mn、Cr、P、S、N 的含量均满足中国标准<sup>[6]</sup>对于 HRB400 钢筋的要求,其中 Mn 含量相对较高,达到 0.191%,这使钢筋韧性得到较好的改善。随着 Mn 含量的升高,延伸性会降低<sup>[13-14]</sup>,这与钢筋的力学性能试验结果一致。在 3 种规格的钢筋中,1# 钢筋的 P 和 S 含量最低,低于现行规范的规定值,说明其质量控制得不错。

2# 钢筋碳含量为 0.084%,属于低碳钢,其屈服强度为 670.59 MPa,按照 HRB600 钢筋现行规范,

2# 钢筋中 C、Si、Mn、Cr、N 含量满足要求,但 P 和 S 的含量偏高,超过了现行规范的规定值,说明质量控制得较差。3# 钢筋的碳含量最低,仅为 0.035%,同属低碳钢,因此其强度最低,没有达到现行规范要求,其化学成分与 2# 钢筋类似,且 P 和 S 含量同样偏高。P 增加了钢筋的冷脆性,使钢筋的塑性和冷弯性能降低;S 含量过高将使钢筋产生热脆性,降低钢筋的塑性和韧性。从钢筋的应力-应变曲线也可以反映出 S 和 P 对钢筋性能的影响,2# 和 3# 钢筋的屈服阶段相似,与 1# 钢筋的有较大区别。在抗腐蚀性方面,P 可以增加钢筋的耐腐蚀性, $\text{PO}_4^{3-}$  可以结合  $\text{H}^+$  改善 pH 值,降低析氢速率,也可以结合  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mn}^{2+}$  形成磷酸膜<sup>[15-16]</sup>,但 S 会降低其抗腐



蚀性。

碳当量是指钢铁中各种合金元素对共晶点实际碳含量的影响折算成碳的增减,对焊接性能的评估有很好的借鉴性<sup>[17]</sup>。3 种规格钢筋的碳当量均符合要求,可以判断其焊接性能满足要求。

### 5 钢筋铁锈成分分析

钢筋的铁锈成分比较复杂,主要有  $\alpha$ -FeOOH、 $\gamma$ -FeOOH、 $\beta$ -FeOOH、 $\delta$ -FeOOH 和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  等,且环境的差异对成分组成有很大影响。因此,分析钢筋的铁锈成分,对研究腐蚀原因和锈蚀防护有重要意义<sup>[18-19]</sup>。

刮取上述 3 种方形钢筋的锈蚀成分作为样品(图 7),采用 XRD 对钢筋锈蚀成分进行了测试分析,测试结果如图 8~10 所示。



图 7 铁锈样品

Fig. 7 Rust samples

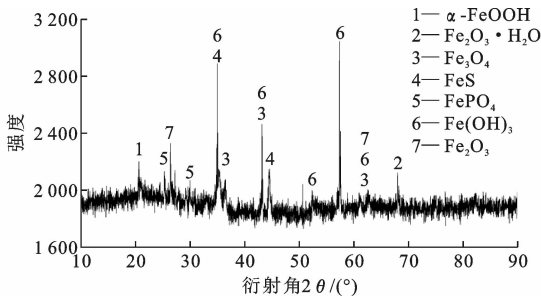


图 8 1# 钢筋铁锈 XRD 图谱

Fig. 8 XRD pattern of rust in 1# steel bar

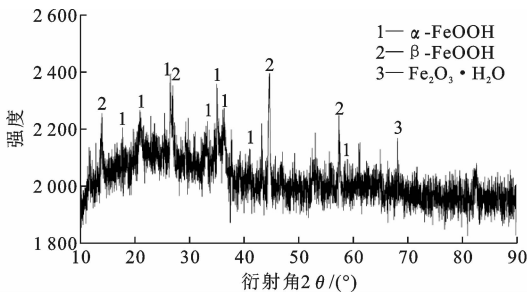


图 9 2# 钢筋铁锈 XRD 图谱

Fig. 9 XRD pattern of rust in 2# steel bar

图 8 显示,1# 钢筋的锈蚀层产物最多,也最为复杂,包括  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{FeS}$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\alpha$ -FeOOH、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{FePO}_4$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  七种。其中  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{FeS}$ 、

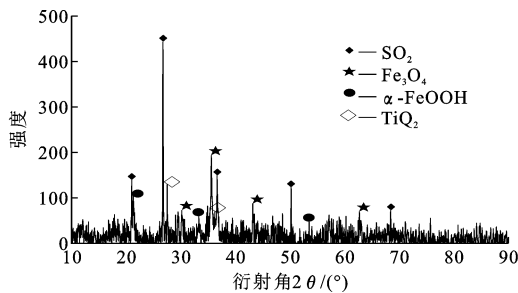
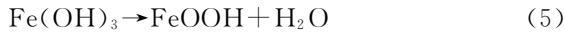
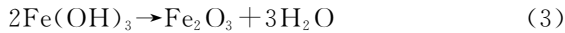
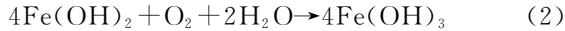
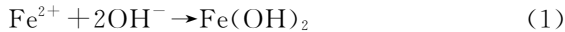


图 10 3# 钢筋铁锈 XRD 图谱

Fig. 10 XRD pattern of rust in 3# steel bar

$\text{Fe}(\text{OH})_3$  特征峰值最高且峰值较宽,说明这 3 种产物的含量最大; $\alpha$ -FeOOH、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{FePO}_4$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  峰值比较不明显,含量较低。 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\alpha$ -FeOOH 是比较稳定的锈蚀产物,这 3 种产物在正常的大气环境中便可产生,钢筋腐蚀主要是由于混凝土碳化导致 pH 值降低,钢筋钝化膜产生破坏,并与透过混凝土孔隙进来的水和氧气发生电化学反应。胡红梅等<sup>[19-20]</sup>对鼓浪屿历史建筑中混凝土构件材料的劣化原因进行分析发现,劣化混凝土的碳化程度很高。因此,从铁锈成分可以判断,1# 钢筋主要是由于混凝土碳化导致钢筋钝化膜破坏而引起的腐蚀,腐蚀产生铁锈的主要反应式如式(1)~(5)所示<sup>[21-22]</sup>。



$\text{Fe}(\text{OH})_3$  相对不稳定,随着时间的推移,其会向稳定性相对较好的  $\alpha$ -FeOOH、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  转变<sup>[23]</sup>,也有国外学者<sup>[24]</sup>认为, $\alpha$ -FeOOH 由式(6)反应产生。

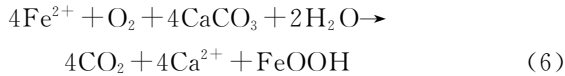


图 9 显示,2# 钢筋的锈蚀层产物主要包含  $\alpha$ -FeOOH、 $\beta$ -FeOOH、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,其中  $\alpha$ -FeOOH、 $\beta$ -FeOOH 的特征峰值最为明显,说明这两种产物含量较多, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  的特征峰值相对不明显,其含量较少。值得注意的是,只有 2# 钢筋取自于混凝土楼板之中,相对于梁、柱构件而言暴露的面积更大,铁锈层中出现了  $\beta$ -FeOOH,而  $\beta$ -FeOOH 只存在于氯离子环境中<sup>[25-26]</sup>。因此,从锈蚀成分判断,2# 钢筋是由于混凝土的碳化与海风、海雾所带入的氯盐共同作用产生的腐蚀。混凝土劣化可以分为初期、中期和后期 3 个阶段<sup>[27]</sup>,在混凝土劣化中期,混凝

土对氯盐的束缚将降低,氯盐和碳化的共同作用进一步加快了钢筋的腐蚀。目前对于  $\beta$ -FeOOH 产生的机理并不清楚,一般认为,氯离子起到了催化作用,具体反应式为

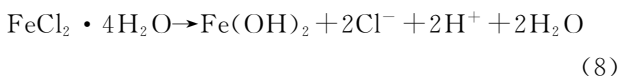


图 10 显示,3# 钢筋的锈蚀层主要由  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\alpha$ -FeOOH、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$  组成,其中  $\text{SiO}_2$  特征峰的面积最大,特征峰较宽,说明样品中  $\text{SiO}_2$  晶体的相对含量最高。这可能是样品中含有较多混凝土残留物的原因。黑色的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  含量次之。据此判断 3# 钢筋的腐蚀主要是由于混凝土的碳化引起的。

## 6 结 语

(1)鼓浪屿历史建筑中带肋方形钢筋的横肋高、横肋与纵轴夹角均满足国内外现行规范要求,但横肋间距、相对肋面积不满足要求。1# 钢筋和 2# 钢筋横肋末端之间的间隙总和和满足国内规范要求,3# 钢筋横肋末端之间的间隙总和和满足国内外规范要求,钢筋的表面特征与现代钢筋有明显差异。

(2)鼓浪屿历史建筑带肋方形钢筋中,1# 钢筋的屈服强度为 397.92 MPa,抗拉强度为 620.79 MPa,断后伸长率为 22%;2# 钢筋的屈服强度为 670.59 MPa,抗拉强度为 856.02 MPa,断后伸长率为 26%;3# 钢筋的屈服强度为 248.92 MPa,抗拉强度为 317.71 MPa,断后伸长率为 31%。1# 钢筋和 2# 钢筋分别满足现行规范对于 HRB400 和 HRB600 的性能要求,3# 钢筋不满足规范对 HRB335 的性能要求。不同历史建筑、不同混凝土构件所用钢筋的力学性能差异较大,在进行结构加固计算分析时不能仅依据钢筋的表面特征简单归类,需要对其力学性能进行检测、鉴定,为历史建筑结构鉴定和修复加固提供科学依据。

(3)鼓浪屿历史建筑带肋方形钢筋中,1#、2# 钢筋的金相组织主要由铁素体和珠光体组成,3# 钢筋主要由铁素体和渗碳体组成,分布都较均匀,没有发现有害的带状组织、魏氏组织以及回火马氏体组织,情况良好,都属于热轧带肋钢筋。

(4)鼓浪屿历史建筑带肋方形钢筋中,1# 钢筋的 C 含量为 0.284%,略高于低碳钢标准,Si、Mn、Cr、P、S、N 含量均满足规范对于 HRB400 钢材的性能要求;2# 钢筋和 3# 钢筋均属于低碳钢,C、Si、Mn、Cr、N 含量均满足现行规范对于 HRB600 和 HRB335

钢材的性能要求,但是 P 和 S 的含量均过高。说明当时钢材质量控制没有现代这么严格,钢材质量等级较低。从化学成分判断,当时所用钢材品种类似于现代的非合金钢(碳素钢),且多为低碳钢。

(5)鼓浪屿历史建筑带肋方形钢筋的铁锈成分比较复杂,其中,1# 钢筋铁锈成分为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、FeS、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\alpha$ -FeOOH、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{FePO}_4$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  七种;2# 钢筋铁锈成分为  $\alpha$ -FeOOH、 $\beta$ -FeOOH、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ;3# 钢筋铁锈成分为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\alpha$ -FeOOH。根据锈蚀成分可以判断,1# 钢筋和 3# 钢筋主要是由于混凝土碳化导致钢筋钝化膜破坏而引起的腐蚀,2# 钢筋则是在混凝土碳化与海洋环境中的氯盐侵蚀共同作用下所产生的腐蚀,所以腐蚀程度最为严重。

## 参考文献:

## References:

- [1] 钱海平,杨晓龙,杨秉德. 中国建筑的现代化进程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.  
QIAN Haiping, YANG Xiaolong, YANG Bingde. The course of the modernization of Chinese architecture [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [2] 刘思铎. 沈阳近代建筑技术的传播与发展研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2015.  
LIU Siduo. Communication and development of Shenyang modern architecture[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [3] 郭湖生. 中国近代建筑总览·厦门篇[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1993.  
GUO Husheng. The architectural heritage of modern China · Xiamen [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1993.
- [4] 张兴斌,张文革. 文物建筑预防性保护技术与工程实例[M]. 北京:中国建材工业出版社,2020.  
ZHANG Xingbin, ZHANG Wenge. Preventive protection technology and engineering examples of cultural relics buildings [M]. Beijing: China Building Materials Press, 2020.
- [5] 赵福灵. 钢筋混凝土学[M]. 北京:中国工程师学会,1935.  
ZHAO Fuling. The study of reinforced concrete [M]. Beijing: Chinese Society of Engineers, 1935.
- [6] 钢筋混凝土用钢 第 2 部分:热轧带肋钢筋:GB/T 1499.2—2007[S]. 北京:中国标准出版社,2008.  
Steel for the reinforcement of concrete — part 2: hot rolled ribbed bars: GB/T 1499.2—2007 [S]. Beijing:

- Standards Press of China, 2008.
- [7] Steel for the reinforcement of concrete — weldable reinforcing steel — general; BS EN 10080—2005[S]. London: CEN, 2005.
- [8] Standard specification for deformed and plain carbon-steel bars for concrete reinforcement; ASTM A615/A615M[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2009.
- [9] 淳庆, 王建国, 冯世虎, 等. 民国时期混凝土建筑中钢筋的物理力学性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(4): 817-821.
- CHUN Qing, WANG Jianguo, FENG Shihu, et al. Physical and mechanical performances of reinforcements in reinforced concrete buildings built during Republic of China[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(4): 817-821.
- [10] 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.
- Metallic materials — tensile testing — part 1: method of test at room temperature; GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [11] 金属显微组织检验方法; GB/T 13298—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- Inspection methods of microstructure for metals; GB/T 13298—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [12] 碳素钢和中低合金钢 多元素含量的测定 火花放电原子发射光谱法(常规法); GB/T 4336—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- Carbon and low-alloy steel — determination of multi-element contents — spark discharge atomic emission spectrometric method (routine method): GB/T 4336—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [13] 原超. 不同化学元素对建筑钢材性能影响分析[J]. 山西化工, 2020, 40(2): 31-33.
- YUAN Chao. Analysis of the influence of different chemical elements on the properties of building steel [J]. Shanxi Chemical Industry, 2020, 40(2): 31-33.
- [14] HAO L, ZHANG S, DONG J, et al. Atmospheric corrosion resistance of MnCuP weathering steel in simulated environments[J]. Corrosion Science, 2011, 53(12): 4187-4192.
- [15] ZHOU G P, ZHANG S, DONG J, et al. The improvement of weathering resistance by increasing P contents in cast strips of low carbon steels[J]. Materials and Design, 2009, 30(10): 4342-4347.
- [16] 陆文华. 铸铁及其熔炼[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- LU Wenhua. Cast iron and its melting[M]. Beijing: China Machine Press, 1981.
- [17] DILLMANN P H. Advances in understanding atmospheric corrosion of iron. I. rust characterisation of ancient ferrous artefacts exposed to indoor atmospheric corrosion[J]. Corrosion Science, 2004, 46(6): 1401-1429.
- [18] 王刚. 全珊瑚混凝土中钢筋锈蚀机理及锈蚀产物微观形貌研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
- WANG Gang. Study on corrosion mechanism of steel bars in all-coral concrete and microstructure of corrosion products[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020.
- [19] 胡红梅, 朱杰, 刘涛, 等. 鼓浪屿历史建筑混凝土构件劣化现状及原因分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2022, 61(2): 298-307.
- HU Hongmei, ZHU Jie, LIU Tao, et al. Analysis of the deterioration status and causes of concrete members in Gulangyu historical buildings[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science Edition), 2022, 61(2): 298-307.
- [20] 刘玉. 钢筋腐蚀机理及氯离子影响机制的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
- LIU Yu. Study on corrosion mechanism of steel bar and influence mechanism of chloride ion[D]. Xiamen: Xiamen University, 2007.
- [21] 尹业雄. 碳化条件下混凝土中钢筋的腐蚀行为研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- YIN Yexiong. Study on corrosion behavior of steel bars in concrete under carbonation condition[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [22] 周大元. 耐蚀钢筋组织及合金元素对耐蚀性能影响的研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2017.
- ZHOU Dayuan. Study on the influence of microstructure and alloy elements of corrosion-resistant steel bars on corrosion resistance[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2017.
- [23] DUFFOG S, MORRIS W, RASPINI I, et al. A study of steel rebars embedded in concrete during 65 years [J]. Corrosion science, 2004, 46(9): 2143-2157.
- [24] JAEN J A, IGLESIAL J, HERNADEZ C. Analysis of short-term steel corrosion products formed in tropical marine environments of Panama [J]. International Journal of Corrosion, 2012(1): 162729.
- [25] VERA R, VILLARROEL M, CARVAJAL A M, et al. Corrosion products of reinforcement in concrete in marine and industrial environments[J]. Materials



Chemistry and Physics,2009,114(1):467-474.

[26] 商百慧. 混凝土劣化历程对两种钢筋腐蚀行为影响的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2019.

SHANG Baihui. Study on the influence of concrete deterioration process on corrosion behavior of two kinds of steel bars[D]. Hefei: University of Science

and Technology of China,2019.

[27] SUZUKI S, TAKAHASHI Y, SAITO M, et al. Atomic-scale structure of  $\alpha$ -FeOOH containing chromium by anomalous X-ray scattering coupled with reverse Monte Carlo simulation[J]. Corrosion science, 2005,47(5):1271-1284.