

港珠澳大桥桥梁耐久性设计创新

孟凡超 吴伟胜 刘明虎 王麒 张梁

(中交公路规划设计院有限公司 北京 100088)

摘要:以港珠澳大桥使用年限120年为例,分别对混凝土结构的碳化过程和氯离子侵入过程进行了定量分析,并详细阐述了提高其耐久性的措施,同时对钢结构中钢箱梁、桥面、斜拉索、钢锚梁、钢锚箱等钢结构组件防腐措施分别进行详细阐述,为桥梁在同类环境下耐久性设计提供一定的参考。

关键词:耐久性 混凝土结构 钢结构 防震 使用年限

1 项目概况

港珠澳大桥跨越珠江口伶仃洋海域,是连接香港特别行政区、广东省珠海市、澳门特别行政区的大型跨海通道,是列入《国家高速公路网规划》的重要交通建设项目。项目建设内容包括:海中主体工程(粤港分界线至珠海澳门口岸段)、香港口岸、珠海澳门口岸、香港连接线、珠海连接线及澳门连接桥。

海中主体工程采用桥隧组合方案,长约

29.6km,其中海中桥梁长约23km,海底隧道长约6km,两个隧道人工岛共长约1.25km,人工岛上桥隧过渡段共长约0.6km。

主体工程按6车道高速公路标准设计,设计使用寿命120年。

2 桥位区水文地质条件及环境分区

2.1 水文地质

2.1.1 海水

港珠澳大桥位于珠江口的伶仃洋海域,汇集

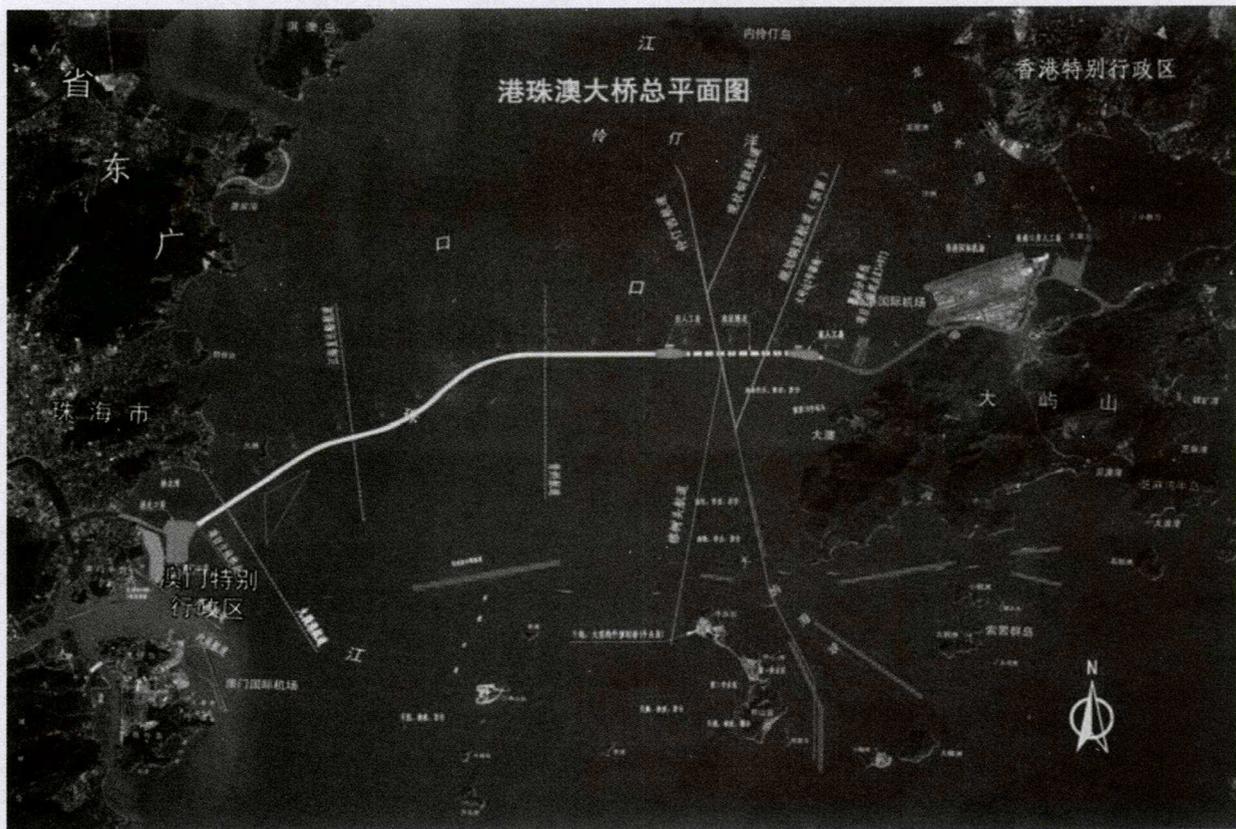


图1 港珠澳大桥项目总平面布置图

了珠江入海八个口门中的虎门、蕉门、洪奇沥和横门四个口门的径流,为珠江主要出海口和最大的河口湾。

涨潮流来自辽阔的南海方向,潮流以海水为主;退潮流来自陆域方向,沿岸主要为珠江水体向海中排泄,海水被冲淡。其溶解性总固体低潮位最低值为13689mg/L,高潮位最高值为43838mg/L,侵蚀性CO₂一般未检出。海水水化学类型均为Cl-Na型。

2.1.2 地下水

根据含水层的岩性、埋藏条件及地下水的赋存条件、水理性质和水力特征,将地下水划分为松散岩类孔隙潜水、承压水含水岩组和基岩裂隙水三大类。

① 松散岩类孔隙潜水含水岩组

该含水岩组分布于两岸的丘陵、坡麓残坡积、冲洪积地层中,受地形影响较大,迳流条件好,地表水排泄顺畅,渗入量少,储水条件差,水量中等~贫乏,仅在低洼盆地,富水性稍好,水量较集中。主要分布于山坡、山麓前缘、剥蚀残丘周围,缓坡和切割不深的沟谷两侧。地下水主要赋存于粉土、粉质粘土之薄层砂夹层及碎石层中。花岗岩、变质岩风化后在沟谷中常形成颗粒粗、厚度较大的松散堆积物,富水性增强。

② 松散岩类承压水含水岩组

该含水岩组分布于两岸及海域,含水层多为单层,局部为双层,表层为淤泥、淤泥质土或粘性土覆盖。主要由④₂层细砂及④₃层细、中砂(Q₃^{al})组成,总体上上细下粗,岩相、厚度变化较大,富含孔隙承压水,多为咸水,由勘察所取地下水水质分析结果表明,地下水水化学类型为Cl-Na。

该含水层具承压性,由于其排泄口与海水相通,主要接受海水的补给。

③ 基岩裂隙水含水岩组

该含水岩组在勘探区均有分布,其含水介质主要为花岗岩、混合花岗岩等,基岩裂隙水主要为风化裂隙和构造裂隙水,富水性与岩性、断裂

构造、降水、植被、地形坡度关系较密切,在构造断裂带附近往往富水。其与上覆孔隙承压水无明显的隔水层。

2.1.3 水质评价

① 海水腐蚀性评价

根据《公路工程地质勘察规范》(JTJ064-98),结合勘察区自然地理条件,拟建桥区环境类别为Ⅱ类。据此进行场地水对混凝土的腐蚀性评价,海水对混凝土结构具中等结晶类及强结晶分解复合类腐蚀,无分解类腐蚀,综合评价海水对混凝土结构具强腐蚀性。

同时还根据《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)进行了海水腐蚀性评价,评价结果表明:海水对钢筋混凝土结构中的钢筋在干湿交替条件下具强腐蚀性、在长期浸水条件下具弱腐蚀性;对钢结构具中等腐蚀性。

② 地下水腐蚀性评价

根据《公路工程地质勘察规范》(JTJ064-98)进行地下水对混凝土的腐蚀性评价,西人工岛至江海直达船桥以西段具结晶类弱腐蚀性,其它段无结晶类腐蚀性。

同时还根据《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)进行了地下水腐蚀性评价,西人工岛至江海直达船桥以西段在干湿交替条件下对钢筋混凝土结构中钢筋具强腐蚀性,在长期浸水条件下具弱腐蚀性,其它段在干湿交替条件下具中等腐蚀性、长期浸水条件下无腐蚀性;地下水对钢结构全区均具中等腐蚀性。

2.2 环境分区

2.2.1 环境分类及作用等级

本工程区年平均相对湿度在78%~80%之间,但季节变化明显,春夏季相对湿度可达100%,冬季最小相对湿度只有10%,因为空气中存在一定浓度的CO₂,且75%左右湿度是发生碳化的适宜湿度,因此需考虑钢筋混凝土的碳化;工程区年平均气温在22.3℃~23.0℃之间,因此可不考虑混凝土结构由于冻融循环产生的破坏及相应的除冰盐引起的钢筋锈蚀;根据海水水质分析结果,海水中氯离子含量达到10759.9mg/L~

14564.63mg/L。因此对于桥梁结构需考虑含有氯离子的海水腐蚀；桩基及承台等处于地下水中的结构还需考虑地下水的化学侵蚀（见表1）。

2.2.2 港珠澳大桥海水环境混凝土部位划分（见表2）

2.2.3 基本环境类别与作用等级划分（见表3、表4）

根据港珠澳大桥工程选址的环境条件分析，环境对混凝土结构的作用类别和作用等级可以进行如下划分（见表5）。

表1 港珠澳大桥环境类型及作用等级评价

环境分区	环境类型/作用等级	作用程度描述	工程部位
浸没于海水的水下区、泥下区	XC1	轻微	承台及桩基（含岛上桥梁）
	XS2	中等	
	XA3	严重	
水位变动区	XC4, XS3	很严重, 严重	承台, 桥墩
浪溅区	XC4, XS3	很严重, 严重	承台, 桥墩
接触空气中盐分, 不与海水直接接触的大气区	XC4, XS2	很严重, 中等	上部结构及桥墩（含岛上桥梁）、主塔、附属构件

表2 港珠澳大桥海水环境混凝土部分划分

区域	无掩护条件（按港工设计水位）		无掩护条件（按天文潮位）		挪威DNV规范（参考）	
	计算方法	高程(100年重现)	计算方法	高程	计算方法	高程
大气区	高于设计高水位加(η ₀ +1.0m)	> +9.30m	最高天文潮位加0.7H _{1/3} 以上	> +6.26m	最高天文潮位加0.6H _{1/3} 以上	> +5.87m
浪溅区	大气区下界	+9.30m	大气区下界至最高天文潮位减H _{1/3}	+6.24m	大气区下界至最低天文潮位加0.4H _{1/3}	+5.87m
	至设计高水位减η ₀	~		~		~
水变区	浪溅区下界	-1.36m	浪溅区下界至最低天文潮位减0.2H _{1/3}	-0.40m	-	+0.25m
	至设计低水位减1.0m	~		~		~
水下区	水位变动区以下	< -2.51m	水位变动区以下	< -2.10m	浪溅区以下	< +0.25m

表3 环境类别划分（GB/T 50476 表3.2.1）

环境类别	名称	腐蚀机理
I	一般环境	保护层混凝土碳化引起钢筋锈蚀
II	冻融环境	反复冻融导致混凝土损伤
III	海洋氯化物环境	氯盐侵入混凝土内部引起钢筋锈蚀
IV	除冰盐等其它氯化物环境	氯盐侵入混凝土内部引起钢筋锈蚀
V	化学腐蚀环境	硫酸盐等化学物质对混凝土的腐蚀

表4 环境作用等级规定 (GB/T50476表3.2.2)

环境作用等级	A	B	C	D	E	F
环境类别	轻微	轻度	中度	严重	非常严重	极端严重
一般环境	I-A	I-B	I-C	-	-	-
冻融环境	-	-	II-C	II-D	II-E	-
海洋氯化物环境	-	-	III-C	III-D	III-E	III-F
除冰盐等其它氯化物环境	-	-	IV-C	IV-D	IV-E	-
化学腐蚀环境	-	-	V-C	V-D	V-E	-

表5 港珠澳大桥基本环境作用类别与作用等级

环境类别	作用因素	作用等级	具体环境条件
I 一般环境	大气中的	I-A	室内干燥环境; 永久的静水浸没环境
	温湿度变化与CO ₂	I-B	非干湿交替的室内潮湿环境; 非干湿交替的露天环境; 长期湿润环境
		I-C	干湿交替环境
III 海洋氯化物环境	海水、海浪和飞沫中的氯离子	III-C	海水的水下区和土中区
		III-D	海洋环境的大气轻度盐雾区: 距平均水位15m高度以上的海上大气区, 涨潮岸线以外100-300m内的陆上室外环境
		III-E	海洋环境的大气重度盐雾区: 距平均水位上方15m高度以内的海上大气区, 离涨潮岸线100m以内、低于海平面上15m的陆上室外环境; 一侧接触海水另一侧暴露于空气的条件
		III-F	潮汐区、浪溅区
V 化学腐蚀环境	侵蚀性物质对混凝土的化学腐蚀作用 (SO ₄ ²⁻ , Mg ²⁺ , CO ₂ , pH)	V-C	水中硫酸根: 200-1000 mg/L, 土中硫酸根: 300-1500 mg/kg 镁离子浓度: 300-1000 mg/L, 侵蚀性CO ₂ 浓度: 15-30 mg/L 海水pH值: 6.5-5.5
		V-D	水中硫酸根: 1000-4000 mg/L, 土中硫酸根: 1500-6000 mg/kg, 镁离子浓度: 1000-3000 mg/L, 侵蚀性CO ₂ 浓度: 30-60 mg/L, 海水pH值: 5.5-4.5
		V-E	水中硫酸根: 4000-10000 mg/L, 土中硫酸根: 6000-15000 mg/kg, 镁离子浓度: >3000 mg/L, 侵蚀性CO ₂ 浓度: 60-100 mg/L, 海水pH值: <4.5

3 结构耐久性设计目标、内容及技术要求

3.1 结构耐久性设计目标

3.1.1 耐久性极限状态

混凝土构件, 包括素混凝土构件、钢筋混凝土构件和预应力混凝土构件, 构件的耐久性终态对应的状态称为耐久性极限状态。根据其具体劣化过程的不同, 构件的耐久性极限状态汇总于表6, 确定耐久性设计的极限状态需要综合考虑构件的正常使用功能和构件自身的安全性。

3.1.2 构件设计使用年限

港珠澳大桥的整体设计使用年限为120年。

结构整体使用年限通过构件的设计使用年限的设定来实现。构件的设计使用年限需要综合考虑构件的重要性、可更换性, 针对具体环境作用下的耐久性极限状态来确定。构件设计使用年限的总体确定原则是: 不可更换的构件、难以维护的构件以及结构主要构件至少需要达到结构整体使用年限; 可更换构件、可维修的次要构件的设计使用年限可视具体情况低于总体设计使用年限, 但要明确其预定的更换次数和维修次数(见表7)。

3.2 设计内容

对大桥结构进行耐久性设计, 满足主体结构

表6 混凝土构件耐久性设计极限状态

极限状态	环境作用	极限状态含义	应用范围
(a)钢筋开始发生锈蚀的极限状态	I,III,IV	允许腐蚀性介质侵入混凝土内部,但不允许钢筋发生锈蚀	预应力构件;难以检测、维护的重要构件
(b)钢筋发生适量锈蚀的极限状态	I,III,IV	允许腐蚀性介质侵入混凝土内部,允许钢筋锈蚀发生,但锈蚀量不得大于预定值,如钢筋锈蚀深度不得大于0.1mm	可维护的钢筋混凝土构件
(c)混凝土表面发生轻微损伤的极限状态	II,V	允许混凝土劣化过程发生,但劣化程度不得超过限定值	混凝土构件

表7 港珠澳大桥工程构件设计使用年限组成分析

结构	构件	设计使用年限		控制环境作用等级	耐久性极限状态	
		(年)	更换次数			
非通航孔桥	钢梁 (海中段)	120	-	III-D	(a)	
	主梁(接人工岛段)	120	-	III-F	(a)	
	混凝土桥面铺装	15	7	-	-	
	钢桥面铺装	12	9	-	-	
	伸缩缝	20	5	-	-	
	护栏主体	60	1	-	-	
	支座	60	1	-	-	
	桥墩	120	-	III-F	(b)	
	承台	120	-	III-F	(b)	
	钻孔桩	120	-	V-D	(c)	
	钢管复合桩	120	-	V-D	(c)	
	通航孔桥	索塔	120	-	-	-
		斜拉索	25	4	-	-
钢箱梁		120	-	-	-	
钢桥面铺装		12	9	-	-	
伸缩缝		20	5	-	-	
支座		60	1	-	-	
护栏主体		60	1	-	-	
桥墩(辅助墩)		120	-	III-F	(b)	
承台		120	-	V-D	(c)	
钻孔桩		120	-	V-D	(c)	
钢管复合桩	120	-	V-D	(c)		

120年设计使用年限。

- (1) 对各部位混凝土的强度指标、保护层厚度、抗氯离子渗透系数提出设计要求;
- (2) 提出混凝土结构外加防腐蚀措施;
- (3) 提出钢结构外加防腐蚀措施;

3.3 技术要求

(1) 基于可靠度理论120年设计使用年限的耐久性设计技术

按照可靠度理论进行耐久性设计,确保港珠澳大桥混凝土结构在120年内不产生耐久性失效

的保证率 $\geq 95\%$ 。

(2) 满足结构耐久性要求的混凝土结构控制技术

从低热、低收缩高体积稳定性混凝土配合比优化,从避免应力集中、合理布置配筋、减小结构约束设计优化、从温度应力场仿真分析合理规定构件制作过程中施工控裂措施改进等三方面提高混凝土结构的抗裂性能,确保混凝土结构不出现影响耐久性的裂缝。

(3) 满足强度、耐久性、抗裂性、工作性及经济性的高性能混凝土制备技术

在满足结构设计强度、耐久性所需强度和便于施工的前提下,最大限度地提高混凝土本身抗环境腐蚀能力,达到120年设计使用年限目标。

(4) 基于全寿命成本分析的特殊(关键)

部位外加防腐措施

按目前国际上已经采用的全寿命周期成本分析(LCC)理论,在全寿命周期120年内对不同耐久性设计方案进行综合分析研究,确定各构件和部位全寿命成本最经济的耐久性设计方案。

4 混凝土结构耐久性设计要求

4.1 混凝土结构耐久性设计

按照港珠澳工程环境作用特点的分析,对碳化过程和氯离子侵入过程进行定量分析,选用合理的耐久性设计数学模型,并根据港珠澳工程选址的具体环境调查和暴露试验结果修正模型中具体参数的表达,形成用于港珠澳大桥工程120年耐久性设计的数学模型,从可靠度的角度出发提出港珠澳大桥混凝土结构耐久性控制指标。

4.2 耐久性设计指标

表8 港珠澳大桥混凝土构件120年使用寿命耐久性指标建议

构件	环境/部位	设计年限(年)	环境等级	失效标准4	最低强度等级	混凝土保护层1(mm)	NT Build492氯离子扩散系数(10-12 m ² /s)	
							28天	56天
箱梁	大气区,外侧	120	III-D	(a) 2	C50	50	6.0	4.0
箱梁	浪溅区,外侧	120	III-F	(a)	C55	80	6.0	4.0
箱梁	内侧	120	III-B	(b)3	C50	45	6.0	4.0
桥墩	大气区	120	III-D	(b)	C50	55	7.0	4.4
桥墩	浪溅区	120	III-F	(b)	C50	80	7.0	4.4
承台	浪溅区	120	III-F	(b)	C45	80	7.0	4.4
	水下区	120	III-C	(a)	C40	60	7.0	4.4
钻孔桩	水下区	120	III-C	(b)	C40	60	7.0	4.4

1 表中为钢筋混凝土最小保护层厚度,设计图纸中的名义保护层厚度应为最小保护层厚度加上施工偏差;

2 钢筋脱钝为耐久性极限状态;

3 钢筋发生适量锈蚀为耐久性极限状态;

4 失效标准(a)对应极限状态(a),失效标准(b)对应极限状态(b)。

用于港珠澳大桥混凝土构件氯离子环境中满足120年设计使用寿命并具有相应保证率的耐久性指标(见表9、见表10)。

4.3 耐久性混凝土配制

4.3.1 混凝土原材料

(1) 本工程宜采用强度等级不低于42.5级的中低热硅酸盐水泥,水泥质量应符合国家标准《硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》(GB175-1999)的规定,不宜采用矿渣硅酸盐水泥、火山

灰质硅酸盐水泥和粉煤灰硅酸盐水泥。水泥的氯离子含量应低于0.03%,C3A含量不宜超过10%。

(2) 粉煤灰(PFA)应按照BS 3892: Part 1中的有关规定采用。

(3) 磨细高炉矿渣粉应为符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》(GB/T18046-2000)规定的S95级矿粉。

(4) 硅灰(SF)应符合《海港工程混凝土结构防腐技术规范》(JTJ275-2000)的规定且硅

表9 港珠澳大桥通航孔桥各部位混凝土设计参数

部位	混凝土最低强度等级	无附加措施最小保护层厚度2 (mm)		有附加措施最小保护层厚度2 (mm)		可采用附加防腐措施	混凝土类型	构件类型	备注
		内部	外部	内部	外部				
预制桥面板	C50	45	50	45	50	硅烷浸渍3		预应力	叠合梁、大气区
现浇桥塔	C50	45	50	45	50	硅烷浸渍3		普通钢混	桥面上/下、大气区
现浇墩身	C50	45	50	45	50	硅烷浸渍3		普通钢混	大气区
现浇塔、墩座4	C50	50	80	50	70	防腐钢筋/外加电流	海工高性能混凝土	普通钢混	浪溅区
现浇承台4	C45	/	80	/	70	防腐钢筋/外加电流5		普通钢混	浪溅区、水位变动区
钻孔灌注桩	C40水下	/	60	/	/	/		普通钢混	水下区
钢管复合桩	C40水下	/	60	/	/	涂层+牺牲阳极6		普通钢混	水下区
护栏底座	C45	/	50	/	50	硅烷浸渍3		普通钢混	叠合梁、大气区

1 强度等级为耐久性要求的最低强度等级，也可采用满足要求的涂层替代硅烷浸渍；

2 表中保护层厚度为未考虑施工偏差的最小保护层厚度，设计图纸中的名义保护层厚度应为最小保护层厚度加上 施工偏差；

3 采取附加措施主要为增加安全储备考虑，因此没有再降低对最小保护层厚度的要求；

4 浪溅区混凝土结构采用外加电流阴极保护或环氧钢筋等防腐措施后其最小保护层厚度可降低10mm；

5 现浇承台同时处于浪溅区及水位变动区，应按照最严酷腐蚀等级计算其最小保护层厚度，当在承台侧面及顶面分别采用永久的防撞措施、外加电流阴极保护措施后，其最小保护层厚度可降低10mm；

6 涂层+牺牲阳极阴极保护的复合措施为针对钢管复合桩防腐采取的附加措施。

表10 港珠澳大桥非通航孔桥各部位混凝土设计参数

具体部位	混凝土最低强度等级1	无附加措施最小保护层厚度2 (mm)		有附加措施最小保护层厚度2 (mm)		可采用附加防腐措施	混凝土类型	构件类型	备注
		内部	外部	内部	外部				
预制桥面板	C50	45	50	45	50	硅烷浸渍3		预应力	大气区
预制箱梁	C50	45	50	45	50	硅烷浸渍3		预应力	大气区
现浇箱梁	C50	45	50	45	50	硅烷浸渍3		预应力	大气区
现浇箱梁	C50	45	50	45	50	硅烷浸渍3		普通钢混	大气区
箱梁4	C55	50	80	45	50/80	硅烷浸渍/防腐钢筋		普通钢混	浪溅区

(续下表)

(接上表)

预制墩身5	C50	50	80	/	70	硅烷浸渍/ 涂层/防腐 钢筋6	部分预 应力	大气区、 浪溅区、 水位变
现浇墩身5	C50	50	80	/	70	硅烷浸渍/ 涂层/防腐 钢筋6	海工 高性 能混 凝土	普通钢 混 下区
预制承台	C40	/	60	/	/	/	普通钢 混	泥下区
现浇承台	C40	/	60	/	/	/	普通钢 混	泥下区
钻孔灌注桩	C40水下	/	60	/	/	/	普通钢 混	泥下区
钢管复合桩 填芯	C40水下	/	60	/	/	涂层+牺牲 阳极7	普通钢 混	泥下区
护栏底座	C45	/	50	/	50	硅烷浸渍3	普通钢 混	大气区

- 1 强度等级为耐久性要求的最低强度等级，也可采用满足要求的涂层替代硅烷浸渍；
- 2 表中保护层厚度为未考虑施工偏差的最小保护层厚度，设计图纸中的名义保护层厚度应为最小保护层厚度加上施工偏差；
- 3 采取附加措施主要为增加安全储备考虑，因此没有再降低对最小保护层厚度的要求；
- 4 位于浪溅区的箱梁在外部最外侧采用不锈钢筋，内部采用硅烷浸渍的防腐措施后可降低保护层厚度，其中外部不锈钢筋最小保护层厚度为50mm、普通钢筋最小保护层厚度为80mm，内部普通钢筋最小保护层厚度为45mm；
- 5 墩身结构同时处于大气区、浪溅区及水位变动区，应按照最严酷腐蚀等级计算其最小保护层厚度，采用涂层防腐措施后最小保护层厚度可降低10mm，岛上桥梁及匝道桥采用现浇墩身；
- 6 位于水位变动区下界至设计高水位范围结构（-2.51m~3.47m）采用涂层防腐（底漆与中间漆采用环氧湿固化类涂料，面漆配套聚硅氧烷涂料），设计高水位（3.47m）以上部位采用硅烷浸渍；
- 7 涂层+牺牲阳极阴极保护的复合措施为针对钢管复合桩防腐采取的附加措施。

灰中的SiO₂含量不小于85%，烧失量不大于6%，含水率不大于3%，比表面积不小于18000m²/kg。

(5) 细骨料宜采用干净、坚硬、耐久性较好、无潜在活性且细度模数为3.0~2.3的中粗天然河砂（见表11）。

(6) 粗集料应质地均匀坚固，粒形和级配良好、吸水率低、堆积空隙率小且无潜在活性的5~25mm碎石，其中岩石的抗压强度与混凝土强度等级之比不应小于2，吸水不宜超过0.8%，针片状含量不超过5%。

(7) 水：一般宜采用干净的淡水。拌和用水宜采用符合国家标准的饮用水，严禁使用未经处理的海水、工业污水和pH值小于5的酸性水。混凝土拌和水应符合《混凝土用水标准》(JGJ 63-2006)的规定。

(8) 混凝土外加剂：硅酸盐水泥和水泥制品所使用的掺料应符合BS 1014有关规定。混凝土

促凝剂、缓凝剂和减水剂的使用应符合BS 5075: Part 1的规定。超塑化剂的使用宜符合BS 5075: Part 3中的规定。混凝土中外加剂中氯化物含量按外加剂质量考虑不宜超过2%，按胶凝材料质量考虑不超过0.01%（见表12）。

4.3.2 配合比设计原则

混凝土的配合比设计应在保证满足高性能混凝土工作性能、力学性能、耐久性能要求的前提下，尽量降低混凝土拌和物中的浆体比率，采用最低的用水量。将通过使用级配、粒形良好的集料来降低混凝土中浆体比率、提高混凝土的体积稳定性，通过掺入大量矿物掺合料来降低混凝土水化热温升、提高混凝土的抗渗性能，通过掺入与胶凝材料匹配的优质高效缓凝型减水剂来降低混凝土升温速率及混凝土中的拌合用水量，通过掺入适量的引气剂来提高混凝土的体积稳定性、

降低混凝土的粘性,提高混凝土的施工性。

4.3.3 具体构件混凝土性能指标及要求

港珠澳大桥具体构件混凝土配合比设计将在试验的基础上,根据试验不同类型混凝土各种性能的变化规律,针对桩基、承台、墩身、箱梁等典型构件的具体要求设计混凝土配合比。

(1) 承台、桩基混凝土

桩基、承台等实心大体积混凝土结构需要重点控制的是胶凝材料水化热以及收缩,在配合比设计中应该掺入大掺量的矿物掺合料,使用尽量

低的浆体比率,以尽量降低胶凝材料的用量(见表13、表14)。

试验采用的承台、桩基各组混凝土物理性能指标如表所示。可见,混凝土28d抗压强度均在48MPa以上,氯离子扩散系数均小于 $6 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$,可以满足承台、桩基对混凝土性能指标的要求。试验发现,对于水胶比相同的混凝土,用4%的微量硅灰替代水泥可以明显提高混凝土28d的抗氯离子渗透性。

表11 细集料性能指标要求

序号	项目	指标
1	含泥量(按质量计), % , <	2
2	泥块含量(按质量计), % , <	0.5
3	云母(按质量计), % , <	1
4	轻物质(按质量计), % , <	1
5	有害物质 含量	有机物含量(比色法) 合格
6	硫化物及硫酸盐含量(按 SO_3 质量计), % , <	0.5
7	氯离子含量, % , <	0.02
8	表观密度, kg/m^3 , >	2500
9	坚固性(重量损失), % , <	8
10	松散堆积密度, kg/m^3 , >	1350
11	碱集料反应(膨胀率), % , <	0.1
12	松散堆积空隙率, % , <	47

表12 粗集料性能指标要求

序号	项目	指标
1	含泥量(按质量计), % , <	0.5
2	泥块含量(按质量计), % , <	0.25
3	坚固性(重量损失), % , <	8
4	针片状颗粒含量(按质量计), % , <	8
5	压碎值指标, % , <	14
6	表观密度, kg/m^3 , >	2500
7	松散堆积密度, kg/m^3 , >	1450
8	吸水率, % , <	2
9	岩石抗压强度/混凝土强度等级, \geq	2
10	有机物含量	合格
11	碱集料反应(膨胀率), % , <	0.1
12	硫化物及硫酸盐含量(按 SO_3 质量计), % , <	0.5

表13 承台、桩基混凝土性能指标要求

区段	部位	腐蚀环境	强度等级	NT Build492 氯离子扩散系数 ($10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	坍落度 (mm)
通航孔/非通航孔桥	钻孔灌注桩	水下区	C40	≤ 7.0 (28d)	180~220
通航孔桥	钢管复合桩填芯	水下区	C40	≤ 7.0 (28d)	180~220
非通航孔桥	预制承台	水下区	C40	≤ 7.0 (28d)	180~220
	现浇承台		C40	≤ 7.0 (28d)	180~220
通航孔桥	现浇承台	浪溅区、水变区	C45	≤ 7.0 (28d)	180~220

表14 承台、桩基混凝土物理性能指标

编号	抗压强度 (MPa)				劈裂抗拉强度 (MPa)				NTBuild492 扩散系数 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)		
	3d	7d	28d	56d	3d	7d	14d	28d	28d	56d	90d
	CT-1	21.1	31.5	48.1	55.8	1.8	3.0	3.5	3.8	5.38	3.31
CT-2	24.8	40.9	62.7	70.3	2.2	3.0	3.9	4.5	1.98	1.63	1.22
CT-3	28.8	46.2	65.9	74.8	2.6	3.1	3.8	3.8	5.27	3.11	1.25
CT-4	29.1	45.9	67	77.4	2.4	3.0	3.5	3.4	2.00	2.60	1.76

(2) 墩身、箱梁混凝土

墩身结构同时处于大气区、浪溅区及水位变动区,其腐蚀等级按最严酷的浪溅区环境考虑,要求混凝土具有较高的强度及抗氯离子渗透性。除了桥隧结合部外,大部分箱梁均处于大气区,其腐蚀程度较轻,但出于自重、配筋等原因考虑,箱梁的保护层厚度远小于墩身,同时由于早期张拉的原因,箱梁混凝土同样需要较高的强度

及更高的抗氯离子渗透性(见表15、表16)。

4.4 混凝土外加防腐措施

4.4.1 混凝土外加防腐措施的关键部位

港珠澳大桥作为海洋工程的典型结构物,应针对结构所处的不同海洋环境区域,结合混凝土结构的耐久性以及经济效应,综合考虑结构主要受力区以及结构不能更换的部位,采用相应必要的防腐措施(见表17)。

表15 墩身、箱梁混凝土性能指标要求

区段	部位	腐蚀环境	强度等级	NT Build492 氯离子扩散系数 ($10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	坍落度 (mm)
非通航孔桥	预制箱梁	大气区	C50	≤ 6.0 (28d)	180~220
	现浇箱梁		C50	≤ 6.0 (28d)	180~220
	箱梁	浪溅区	C55	≤ 6.0 (28d)	180~220
	预制墩身	大气区、浪溅区、水变区	C50	≤ 7.0 (28d)	180~220
现浇墩身	C50		≤ 7.0 (28d)	180~220	
通航孔桥	现浇桥塔	大气区	C50	≤ 7.0 (28d)	180~220
	现浇墩身	浪溅区	C50	≤ 7.0 (28d)	180~220

注:以上满足耐久性设计的最小强度等级。

表16 墩身、箱梁混凝土性能指标

构件	编号	抗压强度 (MPa)				劈裂抗拉强度 (MPa)				NTBuild492 扩散系数 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)		
		3d	7d	28d	56d	3d	7d	14d	28d	28d	56d	90d
墩身	DZ-1	27.8	52.8	75.6	87.8	2.92	4.15	5.21	4.68	4.06	1.88	1.61
	DZ-2	29.3	40.5	56.9	72.5	2.7	3.5	3.8	3.8	6.44	3.68	
	DZ-3	27.9	43.4	66.7	71.7	2.4	3.5	4	3.9	6.21	3.03	
	DZ-4	23.7	46.4	67.5	72.8	2.27	3.38	4.5	4.31	6.00	2.19	1.61
箱梁	XL-1	45.4	52.8	72.6	84.4	3.2	3.6	3.7	4.4	4.26	2.38	
	XL-2	41.8	56.1	74	93.5	3.2	3.5	4.4	5	3.22	1.64	
	XL-3	45.1	56.9	77.3	87.1	2.9	3.7	4.1	5.3	4.43	2.74	
	XL-4	48	54.5	84.8	95.1	3.6	3.9	4.2	5.5	4.97	2.46	

表17 混凝土防腐蚀区域划分

结构物	所处的环境类别	需外加防腐蚀措施的部位
桥梁	上部面板、主梁、等结构	大气区 可不采用
	主梁	浪溅区 箱梁外底面、侧面
	主塔	大气区、浪溅区 塔座及其附近的下塔柱
	承台	浪溅区、水位变动区、泥下区(含岛上桥梁) 海中陆地、泥下区不需采用、其余需采用
	桥墩	大气区、浪溅区、水位变动区 结构处于浪溅区、水位变动区的部位、靠近浪溅区的大气区部分
钢管复合桩	水下区以及泥下区 需采用	
钻孔灌注桩	水下区以及泥下区(含岛上桥梁) 可不采用	

4.4.2 外加防腐蚀措施(见表18)

4.5 混凝土裂缝控制

混凝土是多种材料组成的混合物,是一种脆性材料,在受到温度、湿度、压力和外力的作用下,都有出现裂缝的可能性。因此,将裂缝控制在无害的范围就是裂缝控制技术研究的重点。应从设计和施工两个方面对混凝土裂缝进行控制,主要从结构的构造配筋、降低外部约束度、控制施工时混凝土温度、采用施工附加措施等方面进行。

裂缝控制过宽会影响结构的某些功能,但过

度的控制导致配筋过密不仅会带来浪费,而且在工程中容易出现因钢筋过密混凝土得不到充分振捣而严重影响混凝土结构整体的质量。稍宽的裂缝不一定有损耐久性。对于耐久性来说,重要的是改善保护层混凝土的质量(低水胶比和适当的原材料选择)并增加其厚度,至于裂缝宽度的限制看来并不需要过分关注。现在为了限制裂缝宽度的计算值,有的工程甚至不敢采用较大的保护层厚度。反过来妨碍了混凝土结构耐久性的提高。由于目前尚没有可靠的数学模型进行裂缝宽度与锈蚀进程关系的计算;因此表中的控制值以

表18 外加防腐措施

防腐措施	适用范围	成本	优点	缺点
涂层(聚氨脂)	大气区、潮差区以及浪溅区	65-100元/m ²	施工简便,可在湿表面施工,成本较低	防腐作用仅限于混凝土表层,易受外界作用而破坏,需定期维修,保护年限为15-20年
硅烷浸渍	大气区以及浪溅区	80-100元/m ²	施工最为简便;对混凝土外观无影响(有利于混凝土表面的检查);达到使用年限后的重涂较容易。	不适用于潮差区、保护年限为15年
外加电流阴极保护	大气区、潮差区以及浪溅区	750-1000元/m ²	防腐蚀效果最好,尤其可避免“点蚀”	造价较高
环氧涂层钢筋	潮差区以及浪溅区	每吨钢筋涂层费2000-3000元	对钢筋直接施加保护	钢筋黏结锚固强度降低;对涂层缺陷敏感度高;施工过程技术要求高;不可与阴极保护联用。
阻锈剂	潮差区以及浪溅区	每方混凝土附加100-200元	对钢筋直接施加保护	可能影响混凝土质量,防护效果持续的时间不明确
不锈钢钢筋	潮差区以及浪溅区	32000元/吨	对钢筋直接施加保护	造价很高
包覆不锈钢钢筋	潮差区以及浪溅区	20000元/吨	对钢筋直接施加保护	造价较高
透水模板布	大气区	40元/m ² 左右	提高混凝土质量	增加造价

《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62-2004)的规定为基础,考虑了混凝土构件周围是否存在干湿交替的条件对裂缝宽度进行了调整。根据港珠澳大桥各混凝土结构所处的环境特征及其作用程度,确定其裂缝宽度限值(见表19)。

5 钢结构耐久性设计要求

5.1 钢箱梁防腐的设计

港珠澳大桥钢箱梁(外侧)防腐的设计采用金属热喷涂方法,即电弧喷涂Zn-Al合金体系(体积比1:1),预计防护寿命 ≥ 25 年~30年,钢梁箱内设置抽湿机,保持箱内湿度小于50%(见表20)。

5.2 钢桥面防腐设计

目前,钢桥面防腐通常也会选用电弧喷铝、锌加封闭层和富锌底漆涂装两种方法。虽然电弧

喷铝、锌的防护效果相对较好,但由于电弧喷铝、锌中的铝或锌与钢铁具有不同的伸长系数,在桥面荷载、温度变化、台风产生的挠度和变形的作用下,易产生脱落和分离,而目前尚未很好地解决电弧喷铝、锌与桥面铺装的兼容性问题,所以钢桥面防腐较少采用电弧喷铝(锌)。

对于钢桥面防腐,富锌底漆涂装能满足防腐要求,且工期短、施工简单、经济,是较为经济有效的方案。

港珠澳大桥钢桥面防腐设计如下表所示(见表21)。

5.3 斜拉索防腐设计

斜拉索的腐蚀主要是索体中的钢材与周围介质发生电化作用,造成氧化还原反应所致。引起斜拉索腐蚀的常见因素有空气、水、氯离子以及持续作用于高强钢丝的拉应力等,这些因素都会

表19 港珠澳大桥混凝土结构表面裂缝宽度允许值

区段	部位	腐蚀环境	结构类型	裂缝宽度 ¹ (mm)
非通航孔桥/通航孔桥	预制桥面板	大气区	预应力	/
	钻孔灌注桩	水下区	普通钢混	0.20
	钢管复合桩填芯	水下区	普通钢混	/
	护栏底座	大气区	普通钢混	0.20
非通航孔桥	预制、现浇箱梁	大气区	预应力	/
	预制、现浇箱梁	浪溅区	普通钢混	0.15
	预制墩身	大气区、水变区、浪溅区	部分预应力	/
	预制、现浇墩身		普通钢混	0.15
	预制承台	水下区	普通钢混	/
	现浇承台	水变区、浪溅区	普通钢混	/
通航孔桥	现浇桥塔(桥面以上)	大气区	普通钢混	0.20
	现浇桥塔(桥面以下)	大气区、水变区、浪溅区	普通钢混	0.15
	现浇墩身	大气区、水变区、浪溅区	普通钢混	0.15
	现浇承台	水变区、浪溅区	普通钢混	/

1 表中裂缝宽度为参照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62-2004)的规定并结合不同环境对钢筋混凝土构件的限制,对于预应力混凝土构件的限制参见相关规范。

表20 港珠澳大桥钢箱梁防腐设计

部位	涂装用料	道数	厚度
外部表面(除桥面), 包括悬臂外表面, 边腹板	二次表处喷砂	清洁度 Sa3.0级、粗糙度 Rz60~100 μ m	
	大功率二次雾化电弧喷锌铝		120 μ m
	环氧低粘度封闭漆	1道	30 μ m
	环氧云铁中间漆	2道	2 \times 50 μ m
	氟碳树脂面漆	2道	2 \times 30 μ m
钢箱梁内部表面, 风嘴内表面	二次表处喷砂	清洁度 Sa2.5级、粗糙度 Rz40~80 μ m	
	环氧富锌底漆	2道	80 μ m
	改性环氧耐磨漆	1道	50 μ m
	改性环氧耐磨漆	1道	50 μ m

表21 港珠澳大桥钢桥面防腐方案

防腐构件	涂层	涂料品种	道数/干膜厚度(μ m)
钢桥面	底漆层	环氧富锌底漆	1/80
	总干膜厚度		80

引起钢材腐蚀,产生应力腐蚀裂缝和氢化断裂。在斜拉索钢丝中的合金元素、渗碳体及其它杂质往往构成阴极,铁元素构成阳极,当斜拉索表面凝结吸附水汽而形成水膜时,就构成了无数微电池,空气中的氧、二氧化硫及二氧化碳等还会不断地溶解到水膜中去,促进铁元素电离,加快钢

材的腐蚀速度,最终致使斜拉索被腐蚀。

港珠澳大桥斜拉索采用带PE防护的平行钢丝吊索,钢丝直径7mm,其斜拉索防腐设计如下表所示(见表22)。

斜拉索防护以及拉索导管出口处防护如图2和图3所示。

表22 港珠澳大桥斜拉索防腐设计

防腐构件	方案	技术要求
斜拉索	镀锌钢丝	平行钢丝拉索中应填充具有水汽隔绝、阻蚀防腐和润滑抗磨双重作用的油性蜡; 钢丝镀锌层附着量大于 300g/m^2
	缠绕细钢丝或纤维增强聚酯带	
	内层黑色聚乙烯护套	
	外层彩色聚乙烯护套	
锚管内部	填充聚氨发泡材料	
锚具外露部分	涂一层专用的防护油脂, 外部加罩不锈钢护罩	密封性
拉索导管出口处	不锈钢防雨护罩	
减振器下表面	包覆 0.5mm 厚不锈钢皮	

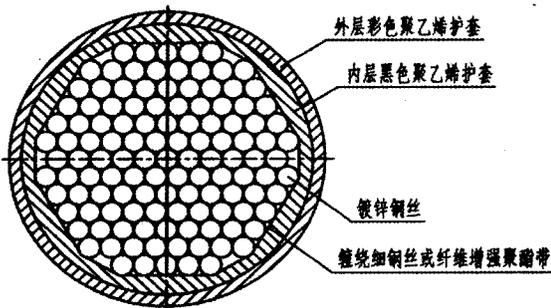


图2 斜拉索防护图

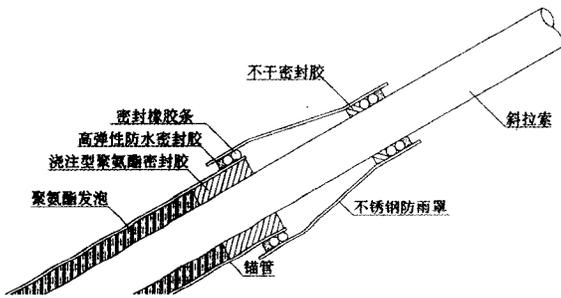


图3 斜拉索导管出口处防护图

5.4 钢索塔防腐设计

由于钢索塔同样处于大气区, 因此采用与钢箱梁相同的涂层体系。

5.5 钢锚梁或钢锚箱防腐设计

耐候钢是指可在表面形成保护性锈层, 耐大气腐蚀, 可用于制造车辆、桥梁、塔架、集装箱等钢结构的低合金结构钢。与普通碳钢相比, 耐候钢在大气中具有更优良的抗蚀性能。但由于耐候钢的锈层稳定化过程受钢材的化学成分、使用环境、构造细节的滞水积尘和机械磨损等条件的影响, 如果使用

不当, 破坏了稳定保护性锈层的生成条件, 耐候钢也会产生严重腐蚀。

锚固钢锚梁和钢锚箱采用耐候钢。耐候钢需经双层氧化铁-磷酸盐系处理。

5.6 检修车以及混凝土预埋件防腐设计

港珠澳大桥检修车以及混凝土预埋件防腐的设计见表23所示。

5.7 钢护栏及其它小型钢构件防腐设计

护栏横梁、立柱、底座经喷砂或抛丸的表面前处理, 见表24。

由于此方案采用面涂氟碳漆涂层, 其表面抗老化寿命为15年。

5.8 高强螺栓的防腐处理

对于港珠澳大桥高强螺栓处防腐的设计见表25所示。

5.9 桥梁支座的防腐处理

对于港珠澳大桥支座防腐处理的设计见表26所示。

5.10 预制墩身连接高强粗钢筋防腐设计

对预制墩身连接高强粗钢筋 (直径 $\geq 75\text{mm}$ 、连接器接长、极限强度 $\geq 1030\text{MPa}$) 进行三层防腐设计: 采用热浸镀锌预应力粗钢筋, 配塑料波纹管并实施真空辅助压浆工艺, 同时采用外加电流阴极保护系统。

5.11 钢管复合桩防腐设计

港珠澳大桥采用直径2.0m、2.2m、2.5m的钢管复合桩基础, 设计采用钢管内、外环氧涂层 (外壁采用双层环氧粉末涂层, 内壁采用无溶剂液体环氧

表23 港珠澳大桥检修车以及混凝土预埋件防腐设计

防腐构件	涂层配套	厚度(μm)	备注
检修车以及混凝土预埋件	环氧富锌底漆	80	防腐涂层设计年限 20年
	环氧云铁中间漆	80	
	环氧云铁中间漆	80	
	氟碳树脂面漆	30	
	氟碳树脂面漆	30	
	总干膜厚度	300	

表24 港珠澳大桥钢护栏等小型钢构件防腐设计

涂层	涂料种类	干膜厚度(μm)
底漆	HDX6000锌基涂镀涂料	100
中间漆	环氧云铁	80
面漆	氟碳漆涂层	60
	总计	240

表25 港珠澳大桥高强螺栓防腐设计

防腐构件	涂层配套	厚度(μm)
高强螺栓(摩擦面)以及高强螺栓孔(摩擦面)	无机富锌	80
	耐磨改性环氧漆	50
	耐磨改性环氧漆	50
	总干膜厚度(不包括热浸锌层)	180

表26 港珠澳大桥支座防腐设计

防腐构件	涂层配套	厚度(μm)	备注
钢支座以及橡胶支座钢结构部位 (不锈钢除外)	热喷铝	200	支座螺栓建 议采用不锈 钢螺栓,使用 寿命60年
	环氧封闭漆	50	
	环氧云铁中间漆	75	
	环氧云铁中间漆	75	
	氟碳树脂面漆	40	
	氟碳树脂面漆	40	
	总干膜厚度(不包括热喷铝层)	280	

涂层)和牺牲阳极阴极保护的联合防腐方案。非通航孔桥钢管复合桩钢管全部处于泥下区,阳极块更换相对不便,因此施工时一次安装,阳极块消耗量按70年设计;对于通航孔桥钢管复合桩钢管处于水下区的部分,阳极块消耗量按25年设计,按期更换。后50年,设计中采用预留腐蚀厚度,非通航孔桥按0.06mm/年预

留,通航孔桥按0.2mm/年预留。涂料性能要求见表27、表28、表29、表30。

5.12 防撞钢套箱

港珠澳大桥防撞钢套箱采用聚氨酯表面防护,预期防护寿命10~15年,防腐的设计见表31,采用涂层和牺牲阳极阴极保护联合防护。

表27 钢管复合桩外防腐内层、面层环氧粉末涂料实验室评价的性能指标

实验项目	内层环氧粉末质量要求	面层环氧粉末质量要求	试验方法
胶化时间 (s)	230℃ ≥ 12, 或满足买方的要求	230℃ ≥ 12, 或满足买方的要求	Q/CNPC 38-2002 附录 A
固化时间 (min)	230℃ ≤ 3.0, 或满足买方的要求	230℃ ≤ 3.0, 或满足买方的要求	SY/T 0315-2005 附录 A
挥发份含量 (%)	≤ 0.4	≤ 0.4	Q/CNPC 38-2002 附录 B
粒度分布 (%)	150 μm ≤ 3.0 250 μm 筛上粉末 ≤ 0.2	150 μm ≤ 3.0 250 μm 筛上粉末 ≤ 0.2	Q/CNPC 38-2002 附录 C
密度(g/cm ³)	1.3 ~ 1.5	1.3 ~ 1.5	GB/T 4472
磁性物化合物(%)	≤ 0.0015	≤ 0.0015	JB/T 6570
热特性	ΔH (J/g) ≥ 45	≥ 45	SY/T 0315-2005
	T _g 2(℃) ≥ 100	≥ 100	附录 B

表28 钢管复合桩外壁复合普通双层实验室试件的涂层质量要求

序号	实验项目	复合普通双层涂层质量指标	实验方法	
1	外观	平整、色泽均匀、无气泡、开裂及缩孔, 允许有轻度桔皮状花纹。	目测	
2	阴极剥离(65℃, -1.5V, 48h), (mm)	≤ 4.0	SY/T 0315-2005 附录 C	
3	底层断面孔隙率(级)	1 ~ 2	SY/T 0315-2005 附录 D	
4	底层粘结面孔隙率(级)	1 ~ 2	SY/T 0315-2005 附录 D	
5	附着力(95℃, 15天), (级)	1 ~ 2	SY/T 0315-97 附录 H	
6	耐磨性(Cs10砂轮, 1000g, 1000转), mg	≤ 20	GB/T 1768	
7	抗15J冲击(23 ± 3℃)	无针孔	Q/CNPC 38-2002 附录 E	
8	抗2°弯曲性(-30℃ ± 3℃)	无裂纹	Q/CNPC 38-2002 附录 D	
9	粘结强度(拉开法, 5个样品的平均值), (MPa)	70	GB/T 6329	
10	电气强度(MV/m)	≥ 35	GB/T 1408.1	
11	体积电阻率(Ω·m)	≥ 1 × 10 ¹³	GB/T 1410	
12	耐化学性能, 增重率(60℃, 浸泡15天), (%)	蒸馏水	≤ 3.0	GB/T 1034
		3.5%NaCl	≤ 2.0	
13	涂层海水防污性能(1年)	≥ 95	GB/T 5370-2007	
14	耐划伤性能(μm)	≤ 350	Q/CNPC 38-2002 附录 F	

表29 钢管复合桩内壁涂层无溶剂液体环氧涂料性能指标

序号	试验项目	单位	技术指标	测试标准
1	外观	/	色泽均匀、无结块	目测
2	固体含量	%	≥ 95	GB/T 1725
3	表干时间(常温)	小时	≤ 4, 或满足买方的要求	GB/T 1728
4	实干时间(常温)	小时	≤ 24, 或满足买方的要求	GB/T 1728
5	密度	g/cm ³	1.3 ~ 1.6	GB/T 6750

表30 钢管复合桩内壁涂层无溶剂液体环氧涂层性能指标

序号	测试项目	单位	技术性能指标	执行标准
1	外观	/	平整、色泽均匀、无气泡。	目测
2	抗 1.5J 冲击性 (-30℃)	/	无裂纹	SY/T 0315
3	耐磨性 (Ca10 砂轮, 1kg, 1000r)	mg	≤40	GB/T 1768
4	附着力 (撬剥法, 95℃, 15 天)	级	1~2	SY/T 0315
5	粘结强度 (拉开法, 5 个样品的平均值)	MPa	≥35	GB/T 6329
6	阴极剥离 (65℃, -1.5V, 48h)	mm	≤6.5	SY/T 0315
7	电气强度	MV/m	≥35	GB/T 1408.1
8	体积电阻率	Ω.m	≥1 × 10 ¹³	GB/T 1410
9	蒸馏水增重率 (60℃, 浸泡 15 天)	%	≤3	ASTM D570

表31 防撞钢套筒表面防护方案

防撞钢套筒	二次表处喷砂	清洁度 Sa2.5 级、粗糙度 Rz20~40 μm	
	环氧富锌底漆	2 道	2 × 30 μm
厚浆型环氧云铁中间漆	2 道	2 × 150 μm	
脂肪族丙烯酸聚氨酯面漆	2 道	2 × 35 μm	

6 结束语

港珠澳大桥工程处于伶仃洋海域, 受海水、海风、盐雾、潮汐、高温、干湿循环等众多恶劣环境因素影响, 要保证港珠澳大桥主体混凝土结构的120年设计年限, 就设计而言, 我们必需采

用能够确保工程品质与先进的施工方法——即大型化、工厂化、标准化、装配化, 采用安全、合理的结构构造与材料, 采用必要的附加耐久性防护措施才能实现其长寿命目标。

(上接第10页)

(4) 提高专业化水平, 加快附属部件和养护监测设备制造业的发展。

前面提到的各种桥梁附属部件和管养监测设备虽然不是大型装备, 但却是现代桥梁不可缺少的组成部分, 特别是在全寿命可持续发展的新理念和设计原则下, 发达国家正在大力发展这类企业, 而且专业化水平日益提高, 分工更为精细。21世纪的中国大桥建设必须也拥有这样的中小型企业制造产业, 提供产品和服务, 而不能由施工企业包揽一切, 采用落后的设备, 工具, 通过人海战术, 日夜三班倒的方式去完成。目前, 很多中国企业仍须采购一些国外先进部件组装在产品中, 即使买断了专利, 不存在知识产权纠纷, 还不能称为“完全自主知识产权”, 而且引进的部件还可能只是十年前的技术, 并不是最先进的。还有一些企业实际上只是外国产品的代理商和安装施工队。

5 结束语

经过30年改革开放政策下的大规模建设, 中国桥梁界已经走出了一条自主建设大桥的成功道路,

许多大桥在规模和跨度上已名列前茅。但我们仍不能盲目自满, 要看到在工业现代化进程中的差距。中国产品数量多而质量差, 中国桥梁跨度大而耐久性差是我们的软肋, 今后30年我们一定要在质量和耐久性上狠下功夫, 赶超世界先进水平。中国的桥梁产业任重道远, 每一家企业只有建设好高水平的研发队伍和技术中心, 才能完成这一重任, 这也是中国桥梁从大国走向强国的必由之路。换句话说, 中国桥梁强国之梦的实现在很大程度上将取决于桥梁产业(包括设计公司和施工产业)研发技术中心的水平和自主创造力。当然, 中国大学是否能通过教育改革解答“钱学森之问”, 培养出具有创造力的领军人才, 也是十分关键的。最后, 衷心期待年轻一代的桥梁工作者不辱使命, 为国争光。

参考文献

- [1] 中国现代化战略研究课题组, 中科院中国现代化研究中心: 中国现代化报告2010—世界现代化纵览, 北京大学出版社, 2010
- [2] 项海帆、范立础: 桥梁工程学科的现状 & 前沿发展方向, 土木工程发展现状及前沿发展方向研究, 中国工程院, 2010
- [3] 项海帆等: 中国桥梁史纲, 同济大学出版社, 2009