

青岛地铁1号线过海区间水泵材质选型分析

张岩
青岛市地铁一号线有限公司

摘要：本文结合青岛地铁1号线工程项目实际情况，在分析了海底隧道水质的基础上，结合海底水辅食机理，对过海区间的水泵材质的合理选型进行了重点研究。

关键词：地铁；过海区间；水泵；材质选型

一、工程概况

青岛地铁1号线过海区间为瓦屋庄站~贵州路站区间，起自黄岛区瓦屋庄站，线路沿既有胶州湾隧道东侧向北下穿胶州湾湾口海域后，接入青岛主城区贵州路站，线路全长约8.1 km，其中海域段长度约3.49km，采用钻爆法和TBM工法施工。

根据施工及运营需求共设置3座施工斜井（青岛端2座、青岛端1座），3座区间风井。同时海底隧道设有变电室等重要设备机房，如排水设计时考虑问题不周，轻则增加投资浪费运行成本，重则排水无法排出造成隧道阻塞，甚至隧道底部各种电器设备受损。

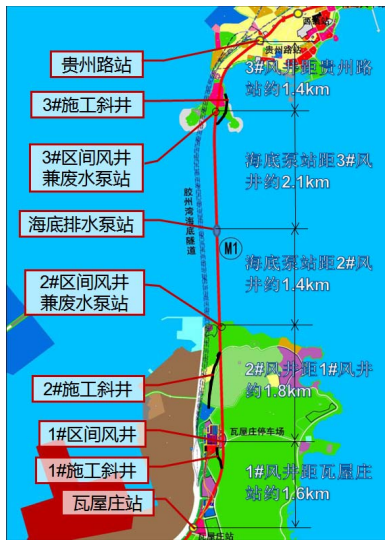
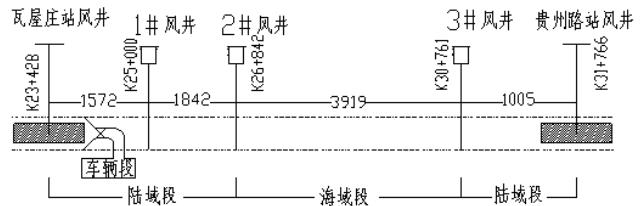
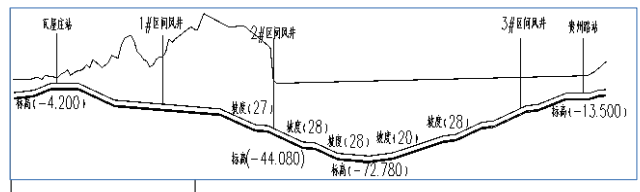


图1-1 过海区间平面示意图



过海区间平面示意图



过海区间线路纵断面示意图

海底泵站设置3台排水泵，1#、2#、3#风井底部均设置2台排水泵，排水管路采用两路排水，正常模式从1#风井（薛家岛端）出户排放，应急工况下从3#风井（青岛端）出户排放，满足过海区间排水要求。

海底泵站至1#风井处压力排水管路损坏检修、排水管路接管、1#风井或2#风井排水泵站水泵及零部件需要更换时，需将海底泵站排水方向调整至3#风井（青岛端）排放。

在整个排水系统中，水泵是最关键的设备，是整个排水系统的核心，其材质必须采用可靠耐腐蚀适用于海底隧道排水的材质。

二、海底隧道水质分析

根据青岛地铁1号线岩土工程勘察报告：

1号线过海区间场区地表水主要为海水，地下水以基岩裂隙水为主；本区段工程以深埋为主，工程结构处于地下水位以下。勘察选在有代表性钻孔中取基岩裂隙水和海水进行水质分析，并与已建胶州湾隧道水质分析成果进行了对照，水质分析结果见下表。

水质分析成果表

项目	取样地点	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	OH ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	侵蚀性CO ₂	矿物化度	pH值
		mg/l									
薛家岛岸	SDZ3	58.4	17.01	0.28	-	258.23	147	64	0	575	7.54
	SDZ8	82.41	13.49	0.19	-	183.56	90	64	21.12	500	7.03
	M1Z2-TWG-3	136.3	26.6	<1.0	90.9	166.0	132.8	63.4	44.3	533	7.3
	M1Z2-TWG-6	39.1	4.52	<1.0	26.74	36.9	20.6	9.32	45.47	118	6.7
海水		2929	1326	<0.5	9186	282.83	17983	1286	0	32583	8.3
海水（低潮）		2852.3	1157.52	<0.5	10511	141.41	18091	397	1.11	33085	8
海水（高潮）		2878	1170	<0.5	10231	122.97	17661	386	1.11	32403	8
海域地下水	M1Z3-TWG-93	1619	1413	<0.5	8057	178	18257	2004	2.20	32168	6.7
	M1Z3-TWG-74	1619	947	<0.5	8694	122	17170	1281	6.65	29775	7.3
	M1Z2-TWG-06	3134.92	1092	<0.5	11808	202.9	19910	536	4.43	36584	7.4
	M1Z2-TWG-21	2723.78	1326	<0.5	8671	196.75	17391	1286	8.87	31497	7.4
团岛岸	NDZ6	2032.38	1023.58	0.07	-	214.68	15012	411	4.82	26718	7.5
	NDZ12	2001	27	2.7	-	236.5	90	44.5	7.68	497	7.43

根据《铁路工程地质勘察规范》(TB10012-2007) 侵蚀性判断结果如下:

环境水对混凝土的侵蚀类型和侵蚀程度的判定

化学侵蚀类型		陆域及远海陆域段基岩裂隙水		海水、海域及近海陆域段基岩裂隙水	
		离子含量 mg/l	环境作用 等级	离子含量 mg/l	环境作用 等级
硫酸盐类侵蚀	SO ₄ ²⁻ 含量	39~136	无	1619~3134	H2
酸性侵蚀	PH值	6.7~7.5	无	6.7~8.3	无
二氧化碳侵蚀	侵蚀性二氧化碳	21.2~45.47	H2	1.1~8.87	无
镁盐类侵蚀	Mg ₄ ²⁺	4.5~26.6	无	947~1326	H2

同时为确定跨海区间水质情况, 1号线项目公司张岩等在土建施工阶段, 组织施工单位对施工期间隧道内外水质进行采样分析, 测试结果如下:

隧道外海水水质为检测报告

样品来源		常规海水		
采样人	王金	样品状态	液态	
水温(°C)	22	取样日期	18.06.04	
样品名称	自来水	检测日期	18.06.05	
样品规格/型号	500mL	样品数量	1瓶	
水质检测标准		GB 50050-2007		
序号	检测项目	单位	控制标准	检测数据
1	钙硬度	mg/L	<350	551
2	总硬度	mg/L	<600	3748
3	总碱度	mg/L	<500	147
4	氯离子	mg/L	<600	10895
5	PH	/	7.0~9.2	8.07
6	电导率	us/cm	<3500	60000
7	油度	NTU	<20	1.8
8	总磷	mg/L	2.5~5.0	0

渗入隧道内的水水质检测报告

样品来源		渗透海水海水		
采样人	王金	样品状态	液态	
水温(°C)	22	取样日期	18.06.04	
样品名称	自来水	检测日期	18.06.05	
样品规格/型号	500mL	样品数量	1瓶	
水质检测标准		GB 50050-2007		
序号	检测项目	单位	控制标准	检测数据
1	钙硬度	mg/L	<350	1540
2	总硬度	mg/L	<600	6200
3	总碱度	mg/L	<500	189
4	氯离子	mg/L	<600	19276
5	PH	/	7.0~9.2	7.85
6	电导率	us/cm	<3500	5840
7	油度	NTU	<20	38
8	总磷	mg/L	2.5~5.0	0

由水质分析可见, 渗入隧道内水基本为开水, 且氯离子海量比海水还要高将近1倍。

三、海水腐蚀机理分析及材质选择对比

金属腐蚀主要包括点蚀、应力腐蚀等，而在海水中，由于氯离子含量高，主要发生的为点蚀。

氯离子半径比较小，扩散难以受到阻碍，当它运动到金属表面时，可以吸附在金属表面，且其本身具有一定的络合性，在吸附在铁表面后，由于其较高的活性，可以与钝化膜发生反应形成原电池，在阳极区的腐蚀电流使腐蚀速度加大，使得钝化膜缺陷处迅速形成腐蚀深坑形成点蚀。

点蚀是一种破坏性和隐患较大的腐蚀形态之一，是海水中经常遇到的问题。

目前主要以抗点蚀当量（PREN）来衡量不锈钢材料的抗海水腐蚀性：

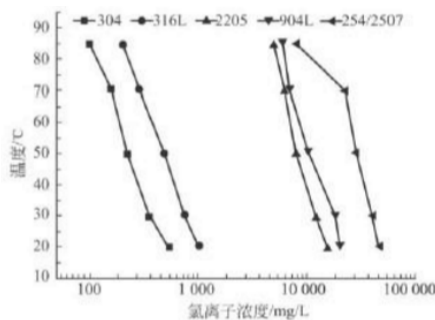
PREN是定量评定与标示不锈钢综合耐腐蚀性能的重要参数，用于评价不锈钢在氯化物环境中抵抗点蚀的能力。常用到的不锈钢的抗点蚀当量对比如下：

不同金属材质抗点蚀当量对照

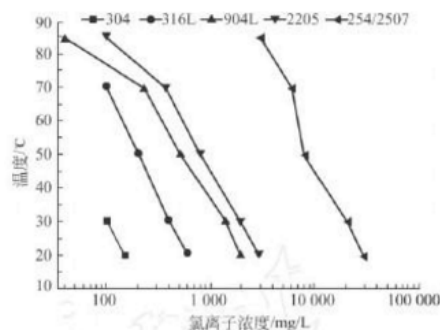
类别	牌号	PREN
奥氏体不锈钢	304（美国ASTM）	18.5
	316（美国ASTM）	24.2
双相不锈钢	2205（美国ASTM）	34.1
超级双相不锈钢	1.4469（欧洲）	41

不锈钢包括铁素体不锈钢、奥氏体不锈钢及奥氏体-铁素体双相不锈钢等，其中双相不锈钢兼有奥氏体和铁素体不锈钢的特点，与铁素体相比，塑性、韧性更高，与奥氏体不锈钢相比，强度高且耐晶间腐蚀和耐氯化物应力腐蚀有明显提高。双相不锈钢具有优良的耐点蚀性能。

超级双相不锈钢为在双相不锈钢基础上发展而来，通常指含25-27% Cr、6.5-7.5% Ni、3-4% Mo、N≤0.3%，含适量Cu、W、Si等元素、超高洁净度、相比比例精细控制、耐点蚀当量PREN≥40的高Cr、高Mo、高N的超低碳双相不锈钢。这类钢比通常的双相不锈钢有更好的耐苛刻介质局部腐蚀的性能与更好的焊接性能。但该种材料生产、铸造、加工难度较大，价格昂贵。



不锈钢点蚀与氯离子浓度关系



不锈钢缝隙腐蚀与氯离子浓度关系

由图可知，不锈钢腐蚀与氯离子浓度存在一定相关性。一般认为双相不锈钢可用于较低离子浓度环境（Cl⁻低于18000mg/L），而根据勘察报告隧道海域海水氯离子浓度19391.15mg/L，且渗入隧道内的海水氯离子反复被富集浓度更高，故双相不锈钢存在较大腐蚀可能性。

从不锈钢耐海洋腐蚀性能看，根据ASTM G48进行临界点蚀或缝隙腐蚀试验。PRE值越高，耐海水腐蚀越好，要求PRE值大于40，即不小于41。

目前国内外相关标准中，并没有明确规定不锈钢在天然海水环境出现腐蚀时间做相应规定，目前测量不锈钢腐蚀的方法主要有以下几种：失重法、表面分析法、电化学分析法。其中失重法是简单而直接的方法，即腐蚀试验结束后，将腐蚀产物从金属表面去除，然后称重。和腐蚀之前试样的重量进行比较，得出腐蚀速率。虽然目前各种电化学分析方法和表面分析方法不断应用于腐蚀的研究，但是失重法仍然是最基本的定量评定腐蚀性的方法。

对比超级双相不锈钢2507、双相不锈钢2205、奥氏体不锈钢316L、304L化学成分如下。

表 2-3 不锈钢试样成分表 (wt.%)

Table 2-3 Chemical compositions of samples (wt.%)

不锈钢型号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Fe
2507	0.017	0.45	0.79	0.021	0.001	24.93	6.6	3.79	0.15	0.279	剩余
2205	0.03	0.66	1.52	0.0218	0.0007	22.52	5.78	3.11	0.163	0.1715	剩余
316L	0.02	0.25	1.30	0.03	0.001	16.14	10.05	2.08	--	--	剩余
304L	0.03	0.58	0.82	0.029	0.002	18.29	8.75	0.14	--	--	剩余

合金成分对不锈钢耐点蚀能力的影响非常大，国际通常采用耐点蚀当量（PRE）值来表征材料的耐点蚀性能。可用定量的公式计算表示： $PRE = (wt. \%Cr) + 3.3 (wt. \%Mo) + 16 (wt. \%N)$ ，其中wt.%Cr、wt.%Mo、wt.%N分别为钢材中Cr、Mo、N的质量百分比。PRE值越高，材料的耐点蚀能力也越强。通过表2-3中的数据计算可得2507、2205、316L、304L四种型号的钢材的PRE值分别是41.9、35.5、23、18.8。试验采用上述四种不锈钢板用激光切割分别加工成，50mm×25mm×1.5mm。试样均用150#、400#、800#、1200#水磨砂纸依次打磨，每换一种型号砂纸打磨之前都需要用去离子水超声清洗保证试样表面的砂纸颗粒去除干净，且打磨的方向与上次垂直以保证能均匀打磨试样表面，再用去离子水、无水乙醇清洗干净，冷风干燥之后放入干燥器中备用。

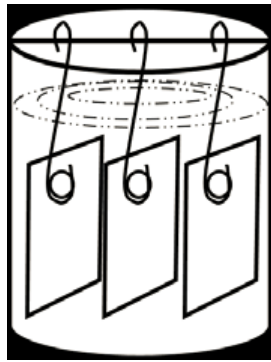
空白试验：取两片材质，状态，尺寸与腐蚀试验的试样相同的试样，按与腐蚀试样相同的程序（表面处理、清洗、称重等）处理后在未腐蚀的状态下，用同一方法进行化学清洗，将清洗后的试样洗净，干燥、称重。计算两片试样的平均失重，取此值作为校准失重。实验室腐蚀试验，一个周期的试验时间通常为24h-168h（1-7天），如果腐蚀速率中等或较低，试验周期（T）按经验公式：

$$T = 50/R \text{ 式 (2-1)}$$

式中R：腐蚀速率，mm/a T：试验周期，h

试验周期根据国际标准《ISO 18069-2015 金属与合金的腐蚀.液体中不锈钢和镍基合金均匀腐蚀速率的测定》确定为21天。

配置含氯离子溶液体系，根据模拟海水氯离子浓度18000mg/L进行配比。将各牌号不锈钢试样悬挂浸泡在溶液中。



失重法试验装置示意图及计算腐蚀速率公式如下：

$$R = \frac{8.76 \times 10^7 \times (M_1 - M_2 - M_3)}{S \times T \times D}$$

式中：R：腐蚀速率，mm/a

M₁：试样初始重量，g

M₂：去除腐蚀产物后试样的重量，g

M₃：去除产物后空白试样的失重，g

S：试样面积，cm²

T：试验周期，h

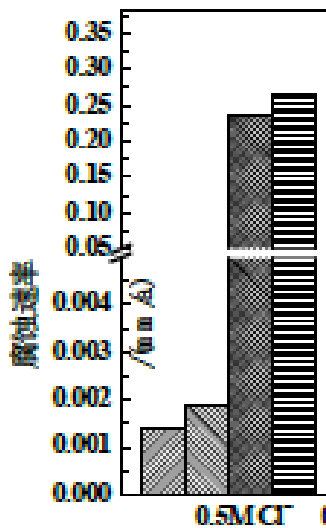
D：材料的密度，kg/m³

时间经过21天浸泡实验，奥氏体不锈钢316L和304L在三种溶液中的腐蚀速率都超过了0.1 mm/a，而双相不锈钢2205和2507的腐蚀速率则在10⁻³ mm/a，两者相差两个数量级，得到实验数据如下表所示：

表3-1 腐蚀速率 (mm/a)

	2507	2205	316L	304L
溶液1	0.00139	0.00191	0.2347	0.26573

不同不锈钢材质在模拟海水溶液中腐蚀速率比较表



不同不锈钢材质在模拟海水溶液中腐蚀速率示意图

由于受实验条件时间制约，长期的超级双相不锈钢与双相不锈钢耐腐蚀条件对比体现不充分。故对比胶州湾隧道采用的超级双相不锈钢水泵材质与厦门翔安隧道采用的双相不锈钢材质使用情况。



普通双相不锈钢海水点蚀情况



某国产普通双相不锈钢海水点蚀情况

借鉴相关类似工程经验，材质采用超级双相不锈钢，满足防海水腐蚀的国际ISO标准，抗点蚀当量大于40。

参考文献

[1]陈芬兰. 地铁区间水泵远程控制方式分析[J]. 中国科技纵横, 2016 (7).
 [2]刘云辉, 彭雄略. 广州地铁区间排水系统水泵控制优化改造[J]. 科技风, 2014 (7): 5-6.
 [3]廖权明. 水量实测法校验地铁区间隧道水泵实际工况[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17 (5): 154-155.
 [4]刘明先. 北京地铁机场线区间排水系统水泵控制优化改造研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2017, 000 (014): 2770-2771.