

冶金科技资料

国外耐海水低合金钢



冶金部情报标准研究所

一九七七年六月

目 录

一、概述.....	1
二、海洋结构用钢的特性要求.....	1
三、海水性质及影响海水腐蚀的因素.....	3
四、海水腐蚀环境的分类与合金元素的效果.....	5
五、钢种及特性.....	9
参考文献	

一、概 述

占地球面积71%的海洋是人类取之不尽的资源宝库，同时也是各国之间相互交往的天然渠道。近年来，海洋开发与宇宙开发、原子能开发相并列，成为世界三大开发之一。有些资产阶级学者认为“七十年代是海洋开发的时代，是继六十年代宇宙开发而开始的人类新的开发目标”。目前，海洋开发事业正在迅速进行：海洋深处加速勘探，海上采油装置日益增多，海岸设施和海洋建筑不断兴建。对于材料的需要量越来越多。

海洋开发使用的材料有钢铁（包括不锈钢）、铁、铝、混凝土、塑料、玻璃等，但最主要的材料还是钢铁。据报道，日本在今后十年间海洋开发方面的钢铁需要量约为5000万吨，其中包括石油天然气、生物资源、锰及其他矿物资源、海洋能量利用、海水淡化等海洋资源用钢4500万吨，沿岸填海造地、海上飞机场、海底隧道、跨海大桥等海洋空间利用用钢2500万吨，此外海洋游艺、工程用船、机器等用钢1000万吨⁽¹⁾，到1980年每年的需要量将达到1000~1200万吨，约占钢年产量的10%⁽²⁾。

海底石油、天然气的开发，是海洋开发的一个重要方面。国外海上采油始于1890年，当时利用木制栈桥进行钻探，到1916年才开始设置钢质固定平台。根据至1974年的统计，海上钻机已达五百台，每年打的井超过三千六百口，17%的石油来自海上油田，⁽³⁾到八十年代有一半的石油将来自海洋。海上钻采平台工作条件很差，如北海中的平台需经受大的风暴，风速达200公里/小时，浪高达30米，冬季气温可降至-15℃。平台的设计寿命一般为20~30年，而大桥、海洋站、人工岛、海上油罐、管线等则要求50~100年的寿命。这些海洋结构应能经受得住风浪、水流的作用力，海水的腐蚀。作为海洋结构应具有的重要性能有强度、塑性、破坏韧性、疲劳抗力、可焊性、耐腐蚀以及抗应力腐蚀性能等。

目前，海洋结构用钢大量使用的还是普碳钢和低合金高强度钢。耐海水低合金钢虽已研制了四十年左右，但应用范围尚不广泛。由于其耐腐蚀性有限，且受到韧性、焊接、成型性能的限制，仅用于钢桩、浮标、海水容器、管道、海水淡化装置等方面。以日本为例，七十年代以来耐海水钢材最高订货量为16765吨（1970年），1973年以来大大下降，74年仅为1195吨，75年的2350吨全部出口，国内用途基本上是土木建筑（包括钢桩）。象钻采平台、船舶等一些海洋结构件，广泛使用的仍是普碳钢和低合金高强度钢，而用涂层、阴极保护等作为防锈的手段。平台用钢基本上采用船体钢，挪威于1974和1975年分别出版了《固定式海上结构设计建造和检验规程》以及《活动式海上装置建造和分类规程》，规程中规定的钢已用于海上活动钻台和固定平台，屈服强度为270~400牛/毫米²（27.5~40.8公斤/毫米²）^(4,5)。高强度钢的用量也在增加。性能优异而且经济性好的低合金耐海水钢，有待于进一步研制。

二、海洋结构用钢的特性要求^[6,7,8,9]

海洋结构物的种类很多，除船舶、潜艇外还有海上采油平台、海底石油采掘设备、

石油貯藏设备以及海底管路、海上机场、海洋观察塔等等。现在，海洋结构物用钢如海上钻井平台等虽然大都采用船舶用钢，但新的海洋结构毕竟与船舶用钢要求不完全相同。

1. 焊接性

由于大型海洋结构物大多是管件、圆柱构架状的组合，形状变化大。而且往往需要将数根组合的管子，在应力集中处进行焊接。另外，海洋设施大多在露天或海上作业条件很复杂的情况下进行焊接。作业困难、焊接复杂。所以特别需要有比船舶用钢更好的焊接性。焊接部位的缺陷，将很快导致脆性破坏，所以对焊条的选择和焊接的施工方法都必须注意。

2. 耐蚀性

海洋结构物在海洋环境下，将受到潮流、水温、盐分、微生物等影响的腐蚀。虽然在海洋环境中的腐蚀情况，随地区、环境、结构物的种类等而异，但一般都较内陆大气腐蚀要剧烈得多。而且海洋结构物与船舶不同，一旦投入运转，就难于定期的进行维修和重新涂装防锈涂料，所以希望材料有更好的耐蚀性。

3. 韧性

海洋设施一般系厚壁管型结构居多。由于海洋结构物的特殊结构形式，加上局部连接处受到波浪、风力等冲击所造成的应力集中，远比船体发生脆性破坏的危险性大。因此要求材料必须具有充分的韧性。特别是在寒冷地区更需要注意。钢材在过冷的情况下，抗张强度、屈服点、硬度增加，而延伸率、冲击值随之下降，即出现低温脆性断裂问题。

4. 疲劳强度

海洋结构物一方面受到波浪、风力等的影响，同时在水面附近又不断受到波浪力的作用，特别是在海水腐蚀和疲劳双重因素的作用下，将使钢材急剧地发生疲劳破坏。材料上讲，疲劳破坏与钢中夹杂、气体等有关。在结构上则与断面大小、缺口、应力集中和焊接缺陷有关。

5. 冷加工性

一般船体结构用钢，大型的也仅为30~40毫米厚的板材，而像海底石油采掘设备等大型海洋结构则需用60~70毫米或更厚的板材，而且主要是进行冷加工，因此需要有良好的冷加工性。

6. 应力腐蚀

海洋结构物在波浪、风力等作用下所产生的应力，以及焊接、冷加工作业等所存在的残余应力下，将产生应力腐蚀和腐蚀疲劳。作为防止应力腐蚀的办法，是消除焊接、加工作业时的残余应力，通过涂层避免易产生裂纹的金属与腐蚀性物质接触，采用阴极

保护。为了防止应力腐蚀破裂, 焊件整个表面必须经酸洗限制在220 (HV) 以下。

7. 价格

一般海洋设施都是大型化, 一座石油采掘设备达7000吨, 一般的采油平台的1万吨, 大型半固定平台约10万吨, 而设想中的未来海上机场等则需50万吨。因此, 钢材的价格问题不能不作为选择材料的因素之一。必须选择性能和经济相平衡的材料。

三、海水性质及影响海水腐蚀的因素

1. 海水性质^[10-11]

海洋的表面积约为 361×10^6 千米², 占地球总面积的71%, 总容量 1.37×10^{21} 升, 平均深度3795米, 表面温度 $-2^{\circ}\text{C} \sim 35 \sim 45^{\circ}\text{C}$, 深海温度由于受太阳热、风浪、潮差的影响小, 在热带也不超过 10°C 。海水的pH一般在8.1~8.3之间。海水的密度和导电率决定于海水的盐度和温度, 在盐度为19‰、温度 20°C 时, 其密度为1.0243克/厘米³, 导电率0.047欧姆·厘米。海水的组成及盐度一般随地区变化不大, 其主要成分之间的比例基本上是一常数(表1), 盐度大致在3.3~3.8‰之间。

海水中盐类组成

表 1-10

离 子	%	离 子	%
Cl ⁻	55.04	Mg ²⁺	3.69
Br ⁻	0.19	Ca ²⁺	1.16
SO ₄ ⁼	7.68	Sr ²⁺	0.04
HCO ₃ ⁻	0.11	K ⁺	1.10
F ⁻	0.0	Na ⁺	30.61
H ₂ BO ₃	0.07		

2. 影响海水腐蚀的各种因素^[12-16]

(1) 溶解氧: 海水中氧的溶解量随着温度的升高而减小, 在通常盐度下, 在 -2°C 、 20°C 与大气平衡的量分别为 8.52、5.88 ml/l。海水中氧的溶解量对腐蚀起着重要的作用。氧在阴极面上形成去极化作用, 从而加速对钢的腐蚀, 但氧过多的存在时, 对钢面供应非常充分则反而会形成钝化, 而又有抑制腐蚀的倾向。此外, 当钢面上溶解氧的浓度不同时, 则将形成氧的浓差电池, 以低氧浓度的钢面为阳极产生局部腐蚀。

(2) 盐分浓度: 海水中的腐蚀特点是氯化物为主的盐分作用。其影响如图2所示,

在低盐度时腐蚀随盐度增高而增大，但当浓度超过 10 克/升之后，由于氧的溶解度降低，腐蚀也随之而减小。

(3) 温度：海水中钢的腐蚀随温度的升高而加剧。在腐蚀速度受海水中氧的扩散量所支配的场合，海水温度每升高 10℃，可使钢的腐蚀速度增大 20~30%。但在开放系统中，当海水温度提高到 80~90℃ 以上时，由于溶解氧量减少，所以腐蚀减小。在密闭系统中，腐蚀速度则随温度的升高而增大。

(4) 流速：虽然微小的海水流动，可以防止氧浓差电池的形成，但随着流速的增大，钢表面的钝化膜被破坏和腐蚀产物不断地从钢表面被除去而暴露出新的金属面，从而加速了腐蚀。

(5) 海生物：在海水中生存着大量的贝类等海生物，这些海生物粘附在钢的表面造成氧的不足，使之形成氧的浓差电池，从而导致在钢的表面产生局部腐蚀和穿孔。

在微生物细菌方面，作为与钢腐蚀有关的嫌气性细菌有硫酸盐还原细菌、硝酸盐还原细菌、甲烷发酵细菌等和好气性细菌如铁细菌、硫氧化细菌等。硫酸盐还原细菌消耗局部电池中阴极上的氢而产生的去极化作用，促进了腐蚀的进行，表 2 是有无硫酸盐还原细菌时金属的腐蚀情况。好气性细菌虽然本身没有腐蚀性，但由于它的存在改变了气氛、养育了嫌气性细菌，对腐蚀间接地发生了影响。

(6) pH：在 pH 在 4~9 范围时，由于钢表面上复盖着氢氧化物皮膜，所以腐蚀速度决定于穿透皮膜而进行扩散的氧的作用，与 pH 无关。pH 在 4 以下时，皮膜被溶解，发生氢型的急速腐蚀。

(7) 污染海水：近年来，许多海域的海水污染日益严重。在污染的海水中，

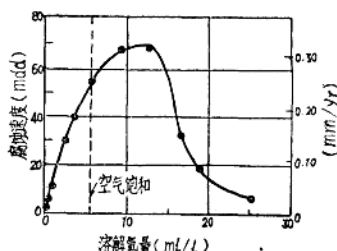


图 1 溶解氧对钢腐蚀的影响 [16]

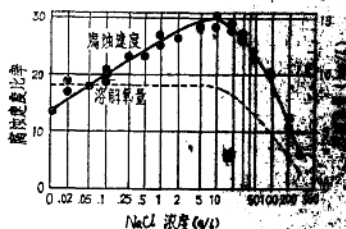


图 2 钢的腐蚀率和溶解氧量与盐分浓度的关系 [12]

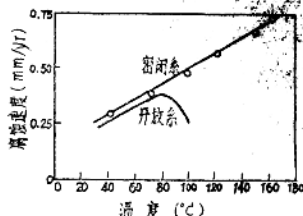


图 3 海水温度对钢腐蚀的影响 [12]

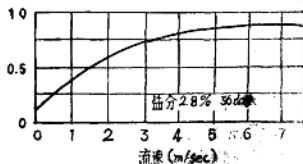


图 4 流速对钢腐蚀的影响 [12]

pH降低, 硫酸离子、氨离子、有机物、悬浮物等增加, 硫酸盐还原细菌比清洁海水增多一千多倍, 因此腐蚀比清洁海水严重。

硫酸盐还原细菌和金属的腐蚀情况

表 2 [16]

	铁	13Cr钢	电气钢	黄铜	青铜	铝(52S)	铸铝铸件	铝
无 菌	7.39	0.18	1.65	0.65	1.54	0.28	1.95	微量
有 菌	25.81	0.17	2.30	0.57	1.61	0.33	1.80	0.05

四、海水腐蚀环境的分类与合金元素的效果

海洋结构在海水中的腐蚀, 虽然都是受到海水这一介质的作用, 但在不同的区域, 即: 海洋大气带、飞溅带、全浸带、海土带中, 其腐蚀情况和合金元素的效果是不相同的(图5)。

1. 海洋大气带

海洋大气带是指比飞溅带高的区域。在海洋大气带, 腐蚀受含海盐粒子大气的影响, 距海面愈近腐蚀愈剧烈。在海洋大气带, 钢的腐蚀大多显示全面腐蚀的形态, 在钢结构物上, 锈层成片状剥落。腐蚀率一般为内陆地区的4~5倍[17]。关于钢中合金元素在海

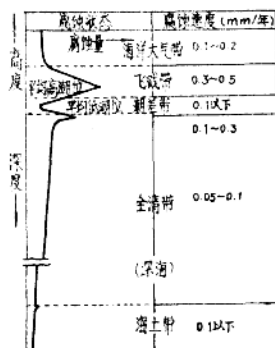


图 5 海洋结构的腐蚀状态 [18]

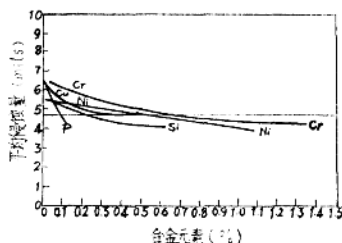


图 6 在海岸大气中钢的腐蚀与合金元素的关系 [14]

洋大气带的耐腐蚀效果，比较早就已有过许多试验研究。根据一些试验研究的结果，在钢中添加Cu、Ni、P、Si、Al、Mo、Cr等元素对降低钢在海洋大气中腐蚀是有效的〔19, 20, 29〕。而效果最显著的是P和Cu。〔18〕

2. 飞溅带

飞溅带虽然是根据涨潮和波浪高度来决定，不过一般来说是指平均潮位受到波浪作用的上限部份。在这个区域由于受到海水交替的干湿，溶解的氧量也较多，同时由于日光的照射使温度增高，再加之在海面的污损生物、浮油等的附着以及台风、流冰等的冲击等促进腐蚀因素，所以腐蚀极为剧烈，是海水腐蚀环境中腐蚀最剧烈的区域，其腐蚀率到达海洋大气带的数倍。而且在飞溅带的腐蚀不是象大气腐蚀那样随着暴露时间的增长而减小，而是如图7那样，与暴露时间基本上呈直线关系变化。关于钢中合金元素在飞溅带腐蚀影响的研究还不很多，根据一些研究者的试验研究结果认为〔21, 22, 26, 19〕，提

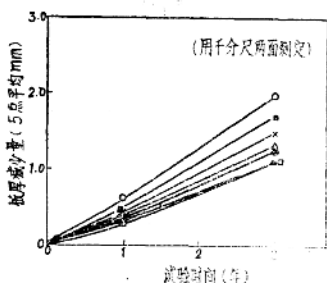


图7 各种钢在飞溅带的腐蚀

○: 0.1C, ■: $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$, ×: 0.5Cu-0.5Ni-0.1P, △: 0.8Si-0.2Cu-0.5Cr, ·: 0.3Cu-0.5Cr-0.2Ni-0.08P, ▲: HT80 (1Cr-0.5Mo系), □: 1Cr-0.5Mo

高钢在飞溅带耐蚀能力的有效元素有P、Cu、Mo、Ni、Cr、Si、W、Ti等〔图8、9〕，而效果最显著的是P、Cu、Mo〔18〕。Mo和W在锈层中以 MoO_4^{2-} 、 WO_4^{2-} 形态存在，在阳极不活性部份成为难溶性的金属盐抑制阳极反应〔32〕，并增强锈层的附着性和致密性。除此之外Mo在提高钢的耐蚀性的同时，还有减少点蚀的作用。Cu和Ni的作用大体上与海洋大气中腐蚀的效果相同。特别是Cu，在氯离子存在的环境中抑制 Fe_3O_4 的生成，从而使锈层变得致密〔32〕。在Si、Cr共存的钢中，Si和Cr在钢的表面生成硅酸盐、铁酸盐的防锈锈膜从而提高了耐蚀性，同时具有抑制硫酸盐还原细菌繁殖的作用。而且在硅量比铬量高时，形成以硅酸盐为主体的锈膜，效果更好〔24, 30〕。如文献

〔24〕规定，Si:Cr要大于1.5。关于Mn、P、Cr的效果，高村等〔23〕通过小型试样的现场试验认为，在飞溅带上部Mn、P、Cr有效，在飞溅带下部或潮差带P有效，而Cr却有使耐蚀性降低的倾向。当P与Cu共存时，对提高钢的耐蚀性有更显著的效果。不过，P的存在将产生使钢脆化和焊接性能降低等问题，所以作为焊接结构的钢材大都尽量加以限制。此外，Larrabee〔25〕和门智等〔26〕还分别做了Ni-Cu-P系和0.13%C、0.8~1.3%Mn的钢中Si、Cr、Mo、Ni的效果的试验，并得到了0.5%Ni-0.4%Cu-0.1%P系，和高Si-中Cr、高Si-中Cr-Mo、低Si-高Cr-Mo系在飞溅带有良好的耐蚀性试验结果。

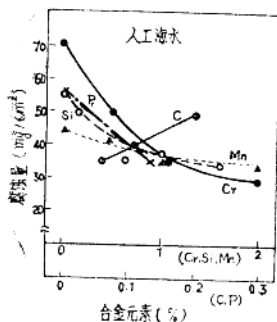


图 8 反复干湿试验合金元素的影响 [22]

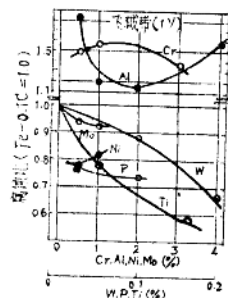


图 9 在海水飞溅带合金元素的效果 [21]

3. 潮差带

在潮差带的腐蚀由于和在飞溅带的同样的原因，照理说来腐蚀也应是剧烈的，但由于相对其邻近全浸海水的侧面为阴极，形成了所谓氧的浓差电池而受到了保护，所以腐蚀是意外的小。

4. 全浸带

全浸带是指低潮位到海底泥线之间海水浸着的部分。在全浸带，由于上述的浓差电池作用和由于海水的流动，所造成在金属面上氧的分布不均匀，而形成的氧的浓差电池，以及海生物等的作用，不同的金属接触产生的电化腐蚀等，所以在海水中的腐蚀除了金属的均匀腐蚀外还将产生局部腐蚀或点蚀。

在深海，由于溶液氧量少，海水温度随着水深而降低（图10），所以腐蚀量较小，而且点蚀也少，钢的腐蚀面平整。另外，在海水中，由于海中动物对氧的消耗，以及由上层下沉的动物遗体分解对氧的消耗，所以当通过对流补充的氧不足时，则会形成一个缺氧层。这一缺氧层的水深范围，通常是在200~600米，在这种场合下，钢的腐蚀更小（图11）。

在海水中，作为减小钢腐蚀的有效元素是Cr、P、Al、Mo、Si等。（18、19、26）其中，特别值得注意的是元素Cr。Cr量与腐蚀量的减小基本上是呈直线关系（图12）。特别是当与Al或Al、Mo、Si共存时，效果更为显著，而且Al的存在还可以改善钢的焊接性能，降低焊接热影响区的硬化性。^[26]不过需要注意的是，虽然添加Cr可以使钢的腐蚀减小，但Cr存在着逆转现象。当Cr的添加超过一定的量时，在长期的海水浸蚀下，其耐蚀效果将消失或者反过来促进腐蚀。图13系3%、5%的Cr钢在海水浸蚀下的腐蚀情况，可以看出，在初期其耐蚀性比碳钢高，但从第4年以后，其腐蚀就发生了逆转。

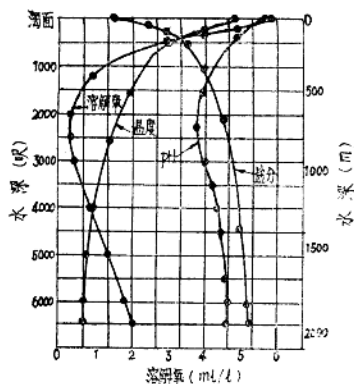


图10 溶解氧量、水温、pH、盐分的水深分布

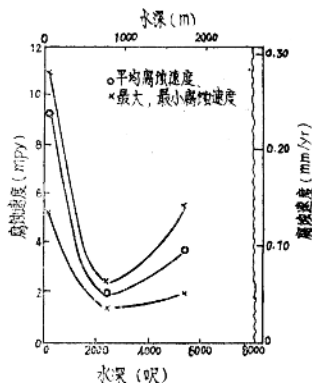


图11 钢材的腐蚀量与水深的关系

这时Cr钢的腐蚀速度为 $3.5 \sim 3.8 \text{ mpy}$ ，而碳钢的腐蚀速度仅为 2.7 mpy 。到16年之后，3%、5%Cr钢的失重分别比碳钢大22%和45%^[31]。避免Cr的这种逆转现象的办法，一是适当的控制Cr的添加量，从现有的耐海水钢种来看，都是在3%以下。再则就是添加适量的Al或Mo等其它元素来加以抑制。此外，钢中Cr量的增加还将使点蚀增大，为了阻止或减少点蚀，添加适量的Ni或Mo、Si等是有效的。^[26]

在有效元素中，门智^[26]等试验还指出在2%Cr钢中添加适量的Ti、Nb、Zr等可减小钢的腐蚀（图14）。另外在含铜钢中添加0.4%Be对提高钢的耐蚀性也是有效的。

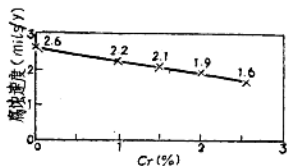


图12 Cr量与耐海水腐蚀的关系

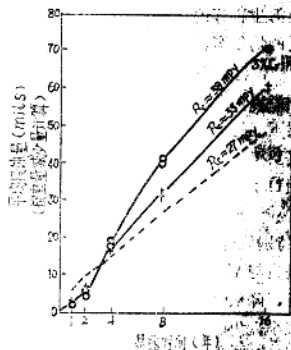


图13 3%、5%Cr钢长期海水腐蚀的结果

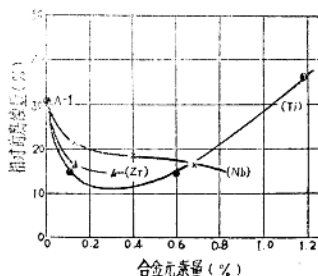


图14 Ti、Nb、Zr对2%Cr钢的耐蚀效果

在深海，由于溶解氧量少，合金元素的效果也不明显，所以在深海，低合金钢的腐蚀与碳钢差别不大。

5. 海土带

在泥线下的海土中，由于溶解氧量不足，而且腐蚀环境变化不大，所以腐蚀一般是最轻微。不过当海土中，特别是在浅海海土中，由于从陆上流入的污染土中存在大量促进腐蚀的微生物，或在海水使砂土流动较大的场合，腐蚀也较为剧烈。

五、钢种及特性

耐海水低合金钢的历史还是比较短的。关于耐海水钢的基础研究，英国钢铁研究协会 (BISRA) 的Hudson于1937年对六十多种钢进行了试验；在美国，美国钢铁公司的Larrabee、国际镍公司的La Que和May以及美国海军研究实验室 (NRL) 的Southwell等也都做了大量工作。美国钢铁公司于1964年左右将Ni—Cu—P系的Mariner钢投入市场，这是最早的耐海水低合金钢。法国Pompey钢厂也搞了Cr—Al系的APS20A。此后，许多国家都进行了大量的试验研究。特别是日本，由于它是岛国，对海洋开发非常重视，因此在海水用钢的研制方面下了许多功夫。近年来在国外公开文献、专利、国际会议上发表的许多海水用钢钢种大部分都是日本研制的。

国外一些工业生产的耐海水低合金钢的成份性能见表3。一些申请专利的钢种见表4。按照成份系统可以分为Ni—Cu—P、Cr、Cr—Nb、Cr—Cu、Cr—Al、Cr—Cu—Si、Cr—Cu—Si—Mo、Cr—Cu—Al、Cr—Cu—Mo、Cr—Cu—P、Cr—Al—Mo等。其耐蚀性因腐蚀条件不同而异，一般为碳钢的2~5倍。这些钢除Mariner外都含有Cr，特别是在全浸带使用的钢都有Cr+Al或单独加入Cr。在飞溅带使用的钢都加有Cu，作为辅助元素还加入Si、Mo、P、Ni等。磷是提高海洋大气和飞溅带耐蚀性的有效元素，

国外耐海水鋼

鋼 号	生 産 廠	適 用 厚 度 (mm)	化 学 成				
			C	Si	Mn	P	S
Mariner	U.S. Steel (美)		≤0.22	≤0.10	0.60~ 0.90	0.080~ 0.150	≤0.040
APS 20A	Pompey (法)	1.0~20	0.10		0.40		
APS 20M			0.10		0.40		
APS 25			0.15		0.40		
MARLOY P50		6~25	≤0.11	≤1.00	≤1.50	≤0.030	≤0.030
S41		3.2~32	"	≤0.55	"	"	"
S50	新日鐵	6~25	"	"	"	"	"
G41		3.2~32	"	"	"	"	"
G50		6~25	"	≤1.00	"	"	"
T50		6~25	≤0.10	"	0.50~ 0.90	"	"
NK マリンG	日本鋼管	6~20	≤0.20	≤0.55	≤0.90	0.070~ 0.150	≤0.040
NK マリン50		3.2~40	≤0.15	≤0.55	≤1.50	≤0.030	≤0.030
NEP-TEN50 (13)	三 菱	3.2~40	≤0.13	≤0.50	≤0.60	0.08~ 0.15	≤0.03
NEP-TEN60			≤0.18	"	"	"	"
CR4A-50		6~12.7	≤0.15	≤0.55	≤1.20	0.070~ 0.150	≤0.040
CR4B-50	住 友	12.7~	"	"	≤1.50	≤0.040	"
		6~23	"	"	"	"	"
2Cr-0.2Mo (14) (試驗)		管	≤0.08	0.35~ 0.75	0.40~ 1.20	≤0.030	≤0.030
TAICOR M50 A.B.C.	神 戶	6~50	≤0.15	≤0.75	1.0~ 2.0	≤0.040	≤0.040

蚀低合金钢

表 3

份,		%		其 他	最低屈服点 kg/mm ²	最低抗拉强度 kg/mm ²	主要用途
Cu	Ni	Cr	Al				
≥0.50	0.40~0.65	—	—	—	36	50	钢板桩, 钢桩
		4.0	0.90		31.5	50	常化 (<20mm) (见正文)
		4.0	0.90	0.15Mo	31.5	50	
		4.00	0.60	0.15Mo, 0.80Ni	60	85	
0.15~0.40	—	0.50~0.80	—		33	50	(见正文)
—	—	0.80~1.30	—		25	41	
—	—	"	—	≤0.10Nb	33	50	
0.15~0.40	—	"	—	≤0.30Mo	25	41	
"	—	"	—	"	33	50	
"	—	1.70~2.20	—	"	24	50	
0.20~0.60	—	0.20~0.80	—	根据需要加 Ni	36	50	钢管桩, 钢板桩
0.20~0.50	—	0.50~0.80	0.15~0.55	根据需要加 ≤0.40Ni ≤0.10Nb或V	33	50~62	飞溅带, 全浸带
0.60~1.50	—	0.5~3.0	0.5~1.5	—	36	50~60	飞溅带, 全浸带耐
"	—	"	"	—	40	60~70	蚀结构
≥0.20	—	0.30~0.80	—	按情况加 Ni, Nb, V	36	50	钢管桩
"	—	0.80~1.50	—	"	36	50	"
"	—	"	—	Nb + V 0.15以下	32	50~62	(16~20mm) 要求 焊接性的海洋结构
≤0.40	—	1.90~2.40	≤1	0.10~0.30 Mo	24.7 (φ 76.3 × 6.5)	49.9	冷却海水、高温脱 气海水热交换器、 海水淡化。耐蚀性 为软钢 2 倍, 对高 温脱气海水为软钢 10 倍
≤0.40	—	≤0.50	—	≤0.20Mo	36 (16~40mm)	50~62	飞溅带

日本一些专利耐海

	化 学					
	C	Si	Mn	P	S	Ni
4850923	<0.15	<1.0	1.50~3.0	<0.10		
75028889	≤0.10	≤1.00	0.30~1.50	≤0.04		0.05~0.60
51108619	0.01~1.0	0.75~2.0	0.3~2.0			0.13~3.5
50098420	0.01~1.0	0.01~2.0	0.3~1.50	0.001~ 0.08		0.03~3.5
50017315	0.25~1.0	0.8~2.0	0.3~2.0			0.1~3.5
昭51-21934	≤0.20	≤0.10	0.8~3	≤0.035	≤0.035	—
	≤0.20	≤0.10	0.8~3	≤0.035	≤0.035	—
昭49-25527	≤0.20	≤0.60	≤1.50			0.20~0.5
	≤0.20	≤0.60	≤1.50			0.20~0.5
昭49-30887	0.001~ 0.025	0.49~2.0	0.3~2.0	0.001~ 0.040	0.01~0.04	
	0.001~ 0.025	0.49~2.0	0.3~2.0	0.001~ 0.040	0.01~0.04	

水 低 合 金 钢 的 成 份

表 4

成 分				%	
Cu	Al	Mo	Cr	其	它
0.05~0.5		0.01~1.0		(W) 0.05~0.5	
0.20~0.50			0.60~1.20	(Ti) 0.03~0.10	
0.05~0.5		0.01~0.5	0.01~1.0	(W) 0.01~0.5 (Co) 0.01~1.0	(Ti, V, Nb, Zr) 一种或一种以上 0.01~0.5
0.03~0.50			0.03~3.5	(W) 0.03~0.50	(Ti, V, Nb, Zr) 0.01~0.50
0.05~0.5		0.05~0.2	0.05~2.0	W 0.05~1.5	(As, Sn, Be, Bi, Pb, Ge, Sb, Te, Se) 0.02~0.20 和/或 Ti + V = Nb + Zr 0.01~0.5
0.25~0.6	—	0.01~1.2	2~5		
0.25~0.6	< 1	0.01~1.2	2~5	(Ti) < 0.5	
0.20~0.60			0.50~3.0		
0.20~0.60	0.30~3.0	—	0.50~3.0	Sb 0.05~0.20或	Sb(0.05~0.15) + Sn或 As(0.05~0.10)共0.10 ~0.20
0.10~0.29			0.01~ < 0.50 (Si/Cr > 1.5)	(As, Sn, Be, Bi, Pb, Ge, Sb, Se, Te) 两种以上0.02~0.20	
0.10~0.29			0.01~ < 0.50 (Si/Cr > 1.5)	(As, Sn, Be, Bi, Pb, Ge, Sb, Se, Te) 两种以上0.02~0.20, Ti, Zr, Nb, V, Mo, Ni中1种或1种以上, (Ti, Zr, Nb, V 0.01~0.50, Mo, Sb 0.1~1.5, Ni 0.1~3.5)	

但是高磷钢的焊接性和韧性差，不适于做焊接结构，只是在钢桩之类用途的钢中添加。此外，为提高材料强度还可加入微量Nb、V等。从强度级别来看，这些钢的抗拉强度在40到60公斤/毫米²之间，大部份为50公斤级。

现将一些典型钢种介绍如下：

1. MARINER

美国钢铁公司自1946年开始研究耐蚀钢板桩。因为在海水中使用时飞溅带的腐蚀最显著，因此提高这一部份的耐蚀性急待解决。根据大量的试验结果研制了飞溅带耐蚀性良好的Ni—Cu—P钢，命名为Mariner，自1951年起在全美十个地方进行钢桩试验，1964年5月开始出售。日本的新日铁、川崎制铁等均引进了这个钢种。

这种钢是半镇静钢，含有0.40~0.65%Ni、≥0.50%Cu、0.08~0.15%P。屈服强度和抗张强度分别在36和50公斤/毫米²以上，延伸率在18%以上。

Ni—Cu—P钢和碳钢制的20呎长扁钢试样，在Wrightsville湾进行了对比试验，结果见表5。

海洋大气和潮差区的腐蚀速度（5年后，mil/年）^[33]

表 5

距顶端距离 (呎)	碳 钢	0.28Ni—0.20Cu—0.14P	0.54Ni—0.52Cu—0.12P
1.5	87	21	13
2.5	98	45	17
高潮线			
3.5	48	6	4
4.5	1	1	1
5.5	2	3	1
6.5	14	28	37
低潮线			
7.5	56	42	52

由表可见，在海洋大气和高潮区，最有效的成份是含有等量Ni、Cu的Mariner。在距顶端4.5~6.5呎的阴极区，因受到低潮线以下阳极区的保护，腐蚀速度较低。图15为Mariner与碳钢（ASTM A-328）钢板桩9年试验后的结果。Mariner在飞溅带的性能大大提高。

Mariner在飞溅带中的锈层致密，与基体结合牢固。电子探针试验表明，在飞溅带基体的锈层中有Cu的富集，再向外有Ni的富集^[32]。

Mariner的特点有：

①飞溅带的耐蚀性好，是普碳钢的2~3倍，并且很少发生点蚀。

②由于飞溅带耐蚀性好，即使没有混凝土上包复等防护措施也可以长期服役。

③屈服点高，可以提高许用应力，节约钢材。

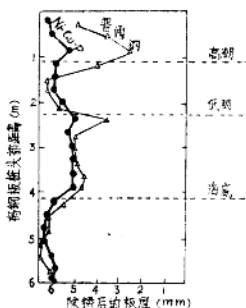


图15 Mariner 与普通钢板桩耐腐蚀性比较 (9年后)

APS25^[34, 35]。这些钢均含有4%Cr。APS20A 和 20M的含铝量为 0.90%，APS-25含

④在有涂层时，涂膜寿命高。

通过长期的试验和使用证明，它是一种较好的耐海水钢种，国外很多生产厂仍以此钢作为生产钢板桩、H钢桩的名牌钢种。但是此钢也有其局限性，①全浸带的耐蚀性与普通碳钢差别不大；②含磷高，焊接性和缺口韧性存在一些问题，特别是较厚的板（如大于20毫米），则易产生焊接裂纹。因而主要做护岸、筑堤等用的钢桩，而不适于焊接海洋结构。

2. APS铬—铝钢

法国Pompey钢厂研制了一系列Cr—Al耐海水钢，包括APS20A、APS20M和

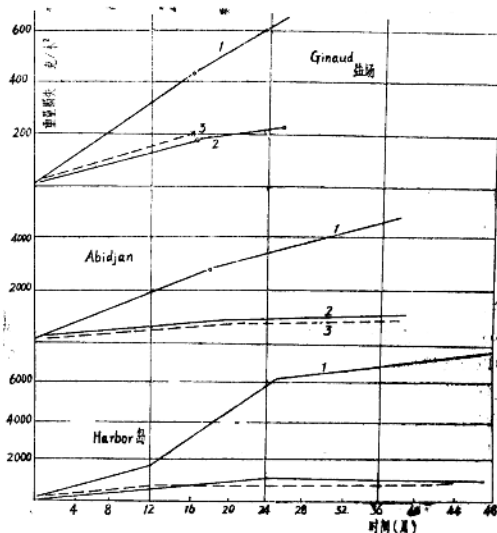


图16 Cr—Al钢在海水中的腐蚀试验结果

1. 普碳钢
2. 4Cr—0.7Al (APS20M)
3. 4Cr—0.7Ni—0.7Al (APS25)