

不锈钢船用焊接技术解析



由只能修船到自行建造现代化船艇，经过几十年的奋斗拼搏，中国已经和韩国、日本一同跻身世界造船三甲之列。然而，进军世界第一造船大国的目标不仅是造船总量的增长，要成为造船强国，必须在造船技术和水平上有所突破和提高。进入 21 世纪以来，中国造船业在尖端领域加速了“攀高”的步伐，并且已经取得了举世瞩目的成就。目前，除常规船型外，中国已经能够建造 30 万吨级巨型油轮 (VLCC)、大型集装箱船、成品油船、液化天然气 (LNG) 船，双相不锈钢化学品船等各类高技术、高附加值船舶，具备了多种船型的建造能力。



图 1：不锈钢船

不锈钢船是目前世界造船业公认的高技术含量、高附加值的船型之一，与普通常规船型比较，具有独特的优势。例如，优异的耐腐蚀性、良好的力学性能、在超低温深冷条件下仍能保持足够的韧性，这些都是其他常规船型所不具备的，因此不锈钢船能够在各种恶劣的特殊条件下使用，包括不同的腐蚀介质、服役温度和力学状态。另外，由于奥氏体不锈钢及双相不锈钢焊接性良好，因此在造船业得到了广泛的应用。尤其是近几年，随着我国不锈钢船建造技术的日趋成熟，各种蕴含尖端技术的不锈钢化学品船、液化天然气船等陆续建成下水，开创了我国船舶建造事业的新局面。

造船业的发展离不开焊接，不锈钢船的建造需要与之相适应的焊接技术及配套的焊接材

料。本文将重点讨论液化天然气(LNG)及双相不锈钢化学品船项目中，不锈钢结构的焊接技术及焊接材料。

一、液化天然气(LNG)船焊接技术及焊接材料

随着我国经济的发展，能源消耗不断增长。液化天然气作为一种重要的能源之一，其需求量也随之增加，势必要建造大量的 LNG 设施，以满足天然气的开采、运输、加工及储存等多种功能的需求。这些设施工作环境、条件各不相同，需要的材质也不尽相同。例如，超低碳奥氏体不锈钢、9%Ni 钢、C-Mn 低合金钢及各种不同 Ni 含量的低合金钢等，对于不同的母材需要选用与之相匹配的焊接材料。目前能够提供用于 LNG 船焊接的配套焊材品种越来越多，质量已接近或达到国外同类产品水平。这些品种包括药芯焊丝、实芯焊丝、埋弧焊丝、手工电焊条等。在液化天然气(LGN)设备中需要大量的管道系统，对于在超低温条件下工作的系统 304L、316L 类低碳奥氏体不锈钢无疑是理想的材料。这些管道系统的焊接接头同样要求具有和母材相当的耐腐蚀性能和足够的低温冲击韧度，这就需要通过适当的焊接工艺方法和选择专用焊材来实现。

1. 超低温韧性要求及夏比冲击试验

304L、316L 类不锈钢不仅具有优良的耐腐蚀性，而且同时具有优异的超低温韧性，在 -196°C 甚至更低的使用温度下仍能保持足够的韧性。奥氏体钢、双相钢及铁素体钢三类不锈钢的韧性与试验温度关系曲线对比如图 2 所示。

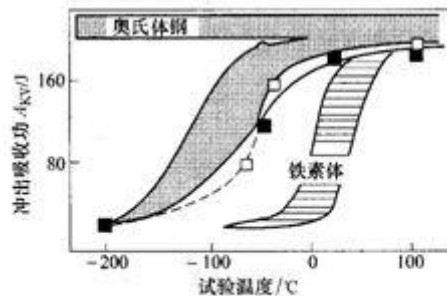


图2 三类不锈钢的韧性与试验温度的关系曲线对比

用于焊接液化天然气(LGN)设施的不锈钢焊材不同于普通的不锈钢焊材。按照惯例，只有通过了船级社认证的产品才允许用于造船。根据中国船级社(CCS)《材料与焊接规范》中的要求，当奥氏体不锈钢用于深冷条件时，应在 -196°C 条件下进行冲击试验(见表 1)。而普通的奥氏体不锈钢焊材执行国标，一般只需要做熔敷金属的拉伸试验，考核项目包括抗拉强度和伸长率，而 CCS 船检规范要求的试验项目和考核指标比国标要苛刻得多。CCS 对于初次认可产品的力学性能不仅要求熔敷金属试验(平焊位置)，考核项目包括：抗拉强度 R_m ，伸长率及 -196°C 夏比 V 形缺口冲击功；而且还要进行对接试验(平、焊、立、仰各位置)，考核项目包括：接头抗拉强度、弯曲试验及 -196°C 夏比 V 形缺口冲击试验。在所有试验项目中 -196°C 夏比 V 形缺口冲击试验是最关键的一项试验。表 2 是试样在液氮中放置 8h 和 24h 后的冲击

试验结果。

表1 不锈钢焊接材料熔敷金属的力学性能

焊接材料级别		奥氏体不锈钢		奥氏体-铁素体双相不锈钢		
		304L	304LN	2205	2550	2750
		316L	316LN			
		317L	317LN			
		309L	347			
规定非比例延伸强度 /MPa	$R_{p0.2}$	≥270	≥290	≥450	≥550	≥550
	$R_{p1.0}$ ^①	≥10	≥330	≥490	≥590	≥590
抗拉强度 R_m /MPa		≥500	≥550	≥620	≥690	≥790
伸长率 A_5 (%)		≥25	≥22	≥25	≥15	≥15
夏比V形缺口冲击试验	试验温度/℃	-20/-196 ^②		-20		
	平均冲击功/J	≥29				

注：①表中规定非比例延伸强度 $R_{p1.0}$ 值，除另有协议外，一般不作验收数据。

②奥氏体不锈钢应在-20℃条件下进行冲击试验；当奥氏体不锈钢用于深冷条件时，应在-196℃条件下进行冲击试验。当协议有要求时，也可按协议的规定进行冲击试验。

表2 试样在液氮中放置时间对-196℃冲击韧度的影响

焊材分类	-196℃冲击功平均值/J	
	8h	24h
THA102(E308—16)	34	29
THA022(E316L—16)	47	35

2. LNG 船用焊接材料

普通的奥氏体不锈钢焊材一般也可以达到-196℃夏比V形冲击功≥29J的规范要求，但是稳定性不理想。对于采用TIG和MIG焊的焊丝而言，由于保护条件好于需要焊剂保护的，如手工焊条、药芯焊丝等，低温韧性的稳定性要好一些，因此为获得稳定的超低温韧性，用于LNG项目的手工焊条、药芯焊丝设计专用的配方进行生产是必要的。试验发现配方渣系（碱性或酸性渣系）对超低温韧性影响不大，而焊缝金属中铁素体含量对超低温冲击韧度有一定的影响。图3是大桥牌THA022和THA102焊条熔敷金属铁素体数与-196℃冲击韧度之间的关系。

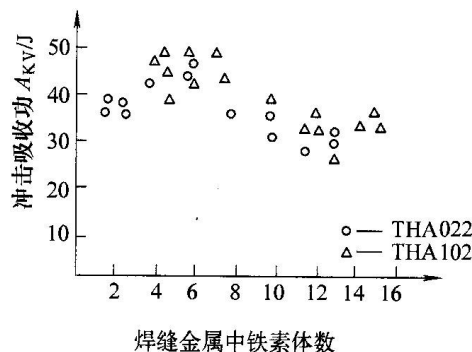


图3 焊缝金属中铁素体数与-196℃冲击功的关系

由图3可见，随着铁素体含量增加，超过8FN后-196℃冲击功有下降的趋势，过高的铁

素体含量对低温冲击韧度不利。同时考虑到少量的铁素体对抵抗结晶裂纹发生是有利的，保留少量铁素体也是必要的。因此对于 LGN 船用不锈钢焊接材料焊缝金属中铁素体可以控制在 5FN 左右。通过调整 C_{req} 、 Ni_{eq} 可以控制焊缝金属中的铁素体含量。表 3 为大桥牌 LNG 专用焊材 THA102、THA022 的典型力学性能。

表3 THA102、THA022焊条熔敷金属典型力学性能

焊条牌号	非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 A_5 (%)	夏比V形缺口冲击试验	
				试验温度/°C	平均吸收功/J
CCS规范	≥ 270	≥ 500	≥ 25.0	-20 -196	≥ 29
THA102 (E308-16)	471	620	41.0	-20 -196	60、62、68/63.3 36、38、36/36.7
THA022 (E316L-16)	393	571	36.0	-20 -196	92、102、84/92.7 40、40、34/38

二、双相不锈钢化学品船焊接技术及焊接材料

1. 双相不锈钢的特点

双相不锈钢的主要特点是耐腐蚀性强，同时又有较高的强度，这些都是由双相不锈钢自身的性质所决定的。双相不锈钢的性质主要取决于其化学成分和组织，双相不锈钢的组织是由铁素体和奥氏体两相组成，二者各约占 50%。由于两相组织互相制约阻止了双相不锈钢的晶粒长大，所以同样的加工方式，同尺寸的钢材双相不锈钢晶粒只相当于奥氏体不锈钢的一半。细晶粒强化和 Cr、Mo、Ni 等合金元素的固溶强化，以及冷变形强化的共同作用使得双相不锈钢的屈服强度和抗拉强度远远高于奥氏体不锈钢。图 4 是三种不同类型不锈钢的力学性能对比。

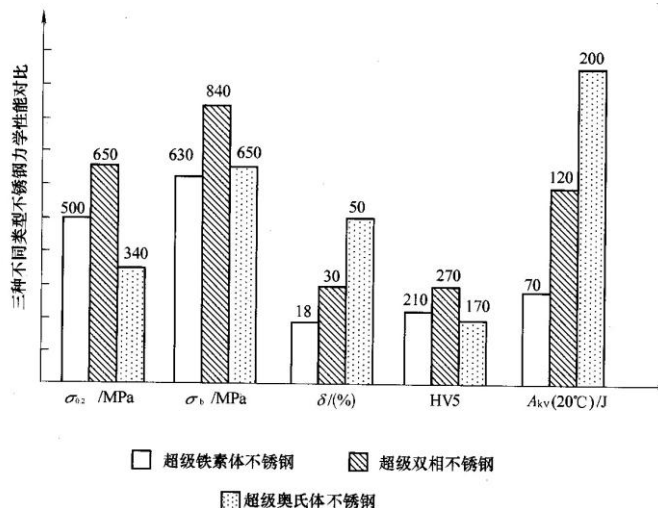


图4三类高合金超级不锈钢的力学性能对比

另外，双相不锈钢的硬度与强度有关，较高的硬度有助于提高钢的耐磨损腐蚀性能。双相不锈钢的韧性虽然随钢中合金元素的增加略有下降，但固溶态的双相不锈钢仍然有足够高的韧性 (230J)，它的脆性转变温度均在 -60°C ，因此能够适应化学品船的使用条件。对于双

相不锈钢的耐腐蚀性，可以通过耐点蚀当量 PREN 来表示，例如 2205 标准双相不锈钢的 PREN 为 30~36，可见其耐腐蚀性能比较强。

由于双相不锈钢与奥氏体不锈钢比较具备了上述的性能优势，如今双相不锈钢已在多个领域被广泛的推广和应用。尤其在化学品船舶建造行业，典型的 2205 双相不锈钢已经替代 316L、317L 奥氏体不锈钢而成为海上化学品运输船的标准用材。

近几年，在国外海上化学品船行业是双相不锈钢的最大用户，其消费量约占热轧板的 50%。由于化学品船装载的液体货物多种多样，包括化学、石油产品、食品等，有些产品是对环境或安全有相当危害的有毒、可燃液态化学品，所以要求船舱材料既有耐腐蚀性，又要有较高的强度，这样才能保证装载货物的化学稳定性及运输安全。

2. 双相不锈钢化学品船焊接技术

双相不锈钢化学品船的焊接关键是获得与母材相当的焊接接头，因此需要采用相应的焊材和相适应的焊接技术来实现。对于双相不锈钢常用的焊接方法有焊条电弧焊和钨极氩弧焊。焊条电弧焊适用于全位置焊接，简便易操作，通用性强是被大量使用的一种焊接方法。钨极氩弧焊通常用于薄板或管和管板接头的焊接，这种方法采用纯 Ar 或 Ar+2%N₂ 做为保护气体，由于保护条件良好，因此焊缝的力学性能优越，尤其是低温冲击韧度，但其熔敷效率较低。对于双相不锈钢的厚板焊接也可以采用埋弧焊，这种方法熔敷效率高，但稀释率也较大，通过采取合适的坡口形式，正确的热输入量及严格控制层间温度，可以对稀释率加以控制。

由于 2205 双相不锈钢的焊接性良好，热裂纹倾向低，脆化倾向小，一般焊前不需预热焊后也无需热处理。为使焊缝和焊接 HAZ 能有合适的奥氏体数量，以保证焊缝和接头有满意的力学与耐腐蚀综合性能，焊接时必须注意热输入量和层间温度，建议使用的热输入量 0.5~2.5kJ/mm，最高层间温度 150℃。在焊接过程中，随时检测铁素体含量，采用多层焊能使整个焊接接头的组织和性能得到显著改善，因为在进行多层多道焊时，后续焊道对前层焊道有热处理作用，焊缝金属和 HAZ 中的铁素体可以进一步转变成奥氏体，成为以奥氏体占优势的两相组织。在附加工艺焊缝存在困难的情况下，制定焊接工艺时，要保证最后一层焊缝处于非工作介质面上。

3. 双相不锈钢化学品船用焊接材料

对于 SAF2205 这种含氮的双相不锈钢，选用焊接材料时通常是填充材料的镍含量高于母材，氮含量与母材相同，目的仍然是保证焊缝金属获得足够的奥氏体组织，保留铁素体含量在 30%~40%。钨极氩弧焊用焊丝如 H00Cr22Ni8Mo3N、309MoL，手工焊用焊条如 E2209、E309MoL 等。表 4 是 SAF2205 钢的化学成分。表 5 是 SAF2205 钢焊接时使用的焊接材料。表 6 是大桥牌 FHAF2209 焊条典型的化学成分，表 7 是大桥牌 THAF2209 焊条典型的力学性能。

表4 SAF2205钢化学成分 (质量分数) (%)

钢号	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	N
SAF2205	≤0.03	≤1.0	≤2.0	≤0.02	≤0.03	22	5.5	3.2	0.18

表5 SAF2205钢用焊接材料化学成分 (质量分数) (%)

牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	焊缝铁素体
22.8.3L (焊丝)	≤0.02	0.5	1.6	≤0.020	≤0.015	22.5	8	3.0	0.14	30~40
22.9.3LR (钛型焊条)	≤0.03	1.0	0.8	≤0.030	≤0.025	22	9	3.0	0.14	30~40
22.9.3LB (碱性焊条)	≤0.04	<0.9	0.8	≤0.030	≤0.025	22	9	3.0	0.15	30~40

表6 大桥牌THAF2209焊条熔敷金属化学成分例值 (质量分数) (%)

焊条分类	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	N	Cu
AWSA5.4:2006 E2209- × ×	≤0.04	21.5~23.5	8.5~10.5	2.5~3.5	0.5~2.0	≤1.00	≤0.04	≤0.03	0.08~0.20	≤0.75
THAF2209	0.02	23.30	9.10	3.06	0.99	0.78	0.021	0.010	0.14	0.25

表7 大桥牌THAF2209焊条熔敷金属力学性能例值

焊条分类	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A_5 (%)
AWSA5.4:2006 E2209- × ×	≥690	—	≥20
THAF2209	815	549	26

双相不锈钢化学品船与液化天然气船、液化石油气船等同属于高技术含量、高附加值的特种船舶，市场前景十分广阔。目前，国际上只有美国、挪威、澳大利亚、日本及韩国等少数国家可以生产。近几年，我国的造船业已经攻克了双相不锈钢船舶建造的难关，成功建造了数条双相不锈钢化学品船。

来源：摘自网络