工程应用获好评，焊材工艺显其能（上）

——双相不锈钢焊接材料应用综述

太原理工大学焊接材料研究所 （山西 030024） 孙 咸

【摘要】本文分析了双相不锈钢的焊接性，探讨了该钢焊接材料的选用原则，介绍了该钢焊接材料的种类及工艺，综述了焊接材料在不同工程中的应用。结果表明，双相不锈钢焊接性的主要问题是焊接HAZ氢致冷裂纹和HAZ中温脆化倾向。该钢焊接材料的选用，可以采用“准成分匹配”原则，即尽可能使焊缝的主要化学成分接近母材，控制Ni含量比母材高、N含量略低于母材，保证接头获得最佳的使用性能（含耐腐蚀性能）和焊接性。该钢焊接材料的种类有5种，工艺方法各具特色，采用专用药芯焊丝FCAW打底＋实芯焊丝GMAW填充的新工艺，优势明显。不同厚度或不同位置的双相不锈钢接头，分别采用匹配的焊接材料和合理的工艺，均在不同工程中获得成功应用。实芯焊丝ER2209及其工艺方法（GTAW及GMAW）仍然是目前比较成熟和可靠的工艺方法。

随着工业化进程的快速推进，双相不锈钢以其优良的耐腐蚀性和力学性能，不仅在海洋平台、船舶制造、石化设备和桥梁建造等行业获得了应用，而且最新资料显示，在一些国际或国内重大工程中，如烟气脱硫工程、海水淡化工程、石油天然气工程、生物燃料工程，以及食品和饮料工业中获得了越来越多的成功应用。与奥氏体不锈钢焊接相比，该钢的焊接热裂纹敏感性明显减弱；与铁素体

（6）检测 所有全熔透焊缝必须在焊后间隔48h后才能做探伤检测，主焊缝UT检测（见图22）。

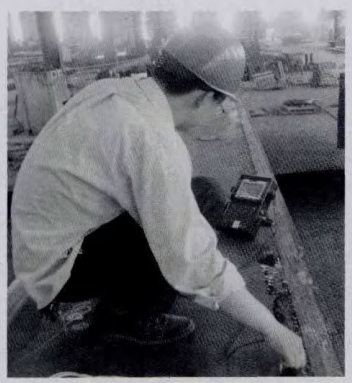


图22 主焊缝超声波探伤检测

6. 注意事项

（1）CO_2气体保护焊采用多层多道焊，一次焊接厚度≤4.5mm，热量输入控制在13kJ以下。

（2）焊接过程中及焊后，不得借助鼓风机或电风扇对构件吹风来增加焊缝的冷却速度。

（3）全熔透焊缝，背面用碳弧气刨清根后，无论有无夹碳或粘渣，都必须用砂轮机对刨槽进行打磨，去除渗碳层呈现金属光泽。

（4）Q420D－Z15钢板当厚度≥40mm时，为保证焊接质量，焊前应对坡口及坡口两边100mm范围的母材进行UT探伤，确认无裂纹等缺陷时再进行焊接。

7. 结语

Q420D－Z15D大厚板焊接时存在一定的难度，通过选择合理的焊接方法和工艺参数，对焊材、施焊环境、热输入、预热、层间温度及后热的有效控制，在满足工艺评定试验合格的基础上，加强制作过程的质量管理，完全能制造出高质量的高强钢箱形结构件。**MW**（全文完） （20120301）

不锈钢焊接比较，该钢焊接接头焊后状态的脆化程度较低。但这并不意味着在所有情况下都能获得满意的接头性能。在一些情况下，焊接HAZ经历快速冷却的影响，保留了更多的铁素体，增大了HAZ腐蚀倾向和氢致裂纹（脆化）敏感性。虽然说有关双相不锈钢焊接方面的研究逐年增多，但是研究内容大多集中在焊接工艺和接头组织性能方面，深入研究焊接材料内容的甚少，而焊接材料的品质和性能恰恰又是双相不锈钢焊接接头性能的决定性因素。

为此，本文特意将双相不锈钢焊接材料的选择与该钢焊接性、焊接材料的种类及工艺方法相联系，探讨焊接材料的选用原则及冶金机理，综述焊接材料在不同工程中的应用。该项工作对推动双相不锈钢焊接材料的创新开发，以及配套工艺的锐意改进，具有积极意义和参考价值。

1. 双相不锈钢焊接性分析

所谓双相不锈钢，是指在室温下其微观结构具有奥氏体＋铁素体两相组织的钢，其典型组织应由50%铁素体和50%奥氏体组成。通常铁素体含量在30%～60%之间的奥氏体-铁素体钢均应称为双相不锈钢。表1、表2列出了4种典型双相不锈钢化学成分及力学性能。可以看出，双相不锈钢的合金系是Fe-Cr-Ni-N。在该合金系基础上调整钢的成分，使其获得铁素体含量在30%～60%之间的奥氏体-铁素体双相组织。

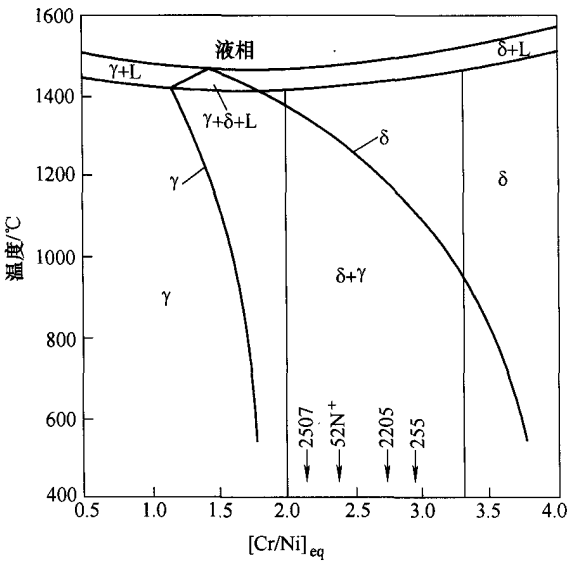
钢中主要合金元素的作用：①氮是作为合金元素加入钢中，以加速奥氏体相的形成。在双相不锈钢中，高温时氮稳定奥氏体的能力比镍大。氮能提高双相不锈钢的耐点蚀和耐缝隙腐蚀能力。氮还是强力的固溶强化元素，它能显著提高钢的强度。②铬是铁素体形成元素，主要作用是保证双相不锈钢有合理的相比例。随着铬含量的增加，钢的耐腐蚀性也提高。③镍是奥氏体形成元素，主要作用是调整双相不锈钢有一个合理的相比例。④钼是铁素体形成元素，钼与铬的协同作用能提高双相不锈钢的耐点蚀和耐缝隙腐蚀性能。但钼含量较高时，会增加钢的脆性。⑤钨和（或）铜有时也加入某些双相不锈钢中，以改善耐蚀性。

下图1是一个根据美国焊接研究委员会（WRC－1992）采用的铬、镍当量比值绘制的Fe-Cr-Ni三元截面相图（变种）。对于图中4种典型合金成分钢（铬当量和镍当量的比值均在2.0～3.3内）凝固时，首先从液相析出δ相，进入两相区L＋δ；继续冷却，进入单相区δ；在固相线以下，发生δ→γ转变，进入两相区δ＋γ。该钢的室温组织是奥氏体＋铁素体。

表1 典型双相不锈钢的化学成分

钢种	UNS No.	化学成分（质量分数，%）									
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Cu
2304	S32304	0.030	2.50	0.040	0.030	1.00	21.5～24.5	3.0～5.5	0.05～0.60	0.05～0.20	0.05～0.60
2205	S31803	0.030	2.00	0.030	0.020	1.00	21.0～23.0	4.5～6.5	2.5～3.5	0.08～0.20	—
255	S32550	0.04	1.50	0.040	0.030	1.00	24.0～27.0	4.5～6.5	2.9～3.9	0.10～0.25	1.50～2.50
2507	S32750	0.030	1.20	0.035	0.020	0.80	24.0～26.0	6.0～8.0	3.0～5.0	0.24～0.32	0.50

注：表中单个值表示最大值。



Fe-Cr-Ni三元截面相图（变种）

表2 典型双相不锈钢的室温力学性能

钢种	UNS No.	抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 R_{eL}/MPa	断后伸长率 A/(%)
2304	S32304	600	450	25.0
2205	S31803	620	450	25.0
255	S32550	760	550	15.0
2507	S32750	795	550	15.0

与奥氏体不锈钢焊接相比，双相不锈钢具有更高的铁素体含量，线膨胀系数较低，自身综合力学性能所体现的良好塑韧性，以及双相组织抗裂机制等一系列有利因素，使该钢焊接热裂纹敏感性明显

减弱，即要比奥氏体不锈钢小得多。与体素体不锈钢焊接比较，该钢焊接接头焊后状态脆化程度低，而且焊接HAZ中单相铁素体的粗化程度也较低。但这并不意味着在所有情况下都能获得满意的接头性能。研究表明，该钢焊接性的主要问题在焊接HAZ。因为在焊接热循环作用下，焊接HAZ处于快冷非平衡状态，冷却后总要保留更多的铁素体，从而增大了HAZ腐蚀倾向和氢致裂纹（脆化）敏感性。

（1）HAZ氢致裂纹　受焊接热循环的影响，当焊缝冷却速度快时，也就是焊接热输入较小时，焊接HAZ的铁素体相含量增多，在高应力情况下，就会出现HAZ氢致冷裂纹。

（2）HAZ475℃脆化　HAZ在475℃脆化温度范围（300～520℃）停留后，δ和γ晶界α′相的析出，使HAZ韧性急剧降低。

（3）σ相脆化　在焊接HAZ和再热焊缝金属中，总有一些区域一次或多次地在570～1000℃区间停留，极易形成σ相或其他金属间化合物，使该区韧性明显降低。

总体上看，双相不锈钢焊接性的主要问题是焊接HAZ氢致冷裂纹和HAZ中温脆化倾向。确定正确的焊接材料之后，合理的焊接工艺是控制和改善该钢焊接性的必要技术手段。

2. 双相不锈钢焊接材料的选用原则

（1）同种双相不锈钢焊接材料的选用　为了同时满足双相不锈钢高的抗应力腐蚀性能、足够的抗点蚀和抗缝隙腐蚀能力，以及良好的塑韧性要求，在选用焊接材料时通常应考虑成分匹配原则，即选用与母材成分基本相同的同类焊材。然而，采用严格的等成分匹配时，由于焊接熔池受到熔入母材金属的稀释，焊缝金属中的镍含量下降，焊缝中的铁素体相含量增多，奥氏体相含量不足，焊缝的韧性和耐腐蚀性能下降，严重影响接头的使用性能。因此，对于含氮的双相不锈钢和超级双相不锈钢焊接材料的选用，可以采用“准成分匹配”原则。所谓“准成分匹配”原则，是指焊缝中的主要元素及其含量与母材基本一致（或在母材成分范围内）。对于C含量可稍低于母材，对于P、S等杂质元素应尽量控制在较低水平。特别强调的是，Ni含量要高于母材，并且加入与母材相当的N含量，控制焊缝金属中的奥氏体数量为60%～70%。前者的加入量是考虑到Ni元素是奥氏体形成元素，必须用高于母材含量来抵消母材对焊缝稀释作用，以保证焊缝金属获得足够数量的奥氏体相。后者则考虑N不仅是奥氏体相形成元素，更是提高金属强度、增加耐点蚀和耐缝隙腐蚀能力的元素，为了补充和平衡母材熔入焊缝对N的稀释，在焊材中加入适量的N是必须的。从表3可以看出，典型焊接材料熔敷金属化学成分与“准成分匹配”原则是一致的，焊缝中铁素体含量亦是预期的数值。

表3 典型焊接材料熔敷金属化学成分

母 材	焊接方法	填充金属牌号	化学成分(质量分数，%)									焊缝中 A_5 (%)
			C_{max}	Si	Mn	P_{max}	S_{max}	Cr	Ni	Mo	N	
SAF 2304和SAF 2205	TAW、MIG、SAW	22.8.3.L	0.02	0.5	1.6	0.02	0.015	22.5	8	3	0.14	30～40
	SMAW	22.9.3.LR	0.03	<1.0	0.8	0.03	0.025	22.5	9	3	0.12	30～40
		22.9.3.LB	0.04	<0.5	0.8	0.03	0.025	22	9	3	0.15	30～40
SAF 2507	FCAW	22.9.3.LT	0.03	<1.0	1.5	0.03	0.025	22.5	9	3	0.15	30～40
	TAW、MIG、SAW	25.10.4.L	0.02	0.3	0.4	0.02	0.020	25	10	4	0.25	30～40
	SMAW	25.10.4.LR	0.03	0.5	0.7	0.03	0.025	25	10	4	0.25	30～40
		25.10.4.LB	0.04	0.4	0.9	0.03	0.025	25.5	9.5	4	0.25	30～40

注：TAW为钨极氩弧焊；MIG为熔化极惰性气体保护焊；SAW为埋弧焊；SMAW为焊条电弧焊；FCAW为药芯焊丝电弧焊。
填充金属牌号后的符号：L为焊丝；LR为钛型电焊条；LB为碱性电焊条；LT为药芯焊丝。

MW（待续）（20120111）