



5Y690级别高强钢埋弧焊材研制

李开添 李好生 贾军 常云琪

【摘要】为满足国内海洋工程高强钢焊材市场需要，开发5Y690级埋弧焊丝焊剂组合，根据性能级别要求进行焊剂渣系选择，并根据焊缝金属合金系设计焊丝成分。通过对焊丝焊剂组合进行熔敷金属及焊接接头性能试验，对熔敷金属的化学成分、力学性能及焊接接头的微观组织及力学性能进行分析研究。结果表明，焊丝焊剂组合的熔敷金属性能满足CCS及DNV船级社规范中5Y690级的相关要求。在设定的工艺条件下焊接F690钢板，焊接接头各项性能全面满足ABS及CCS船级社规范中5Y690级的相关要求。

关键词：5Y690；埋弧焊丝焊剂；熔敷金属；对接接头；力学性能

屈服强度690MPa级别的高强钢在海洋工程结构和装备中得到应用广泛，如浮吊、海洋平台、风车安装船、海洋风电安装船及铺管船等。由于这些海洋结构的工况环境较恶劣，故其配套焊材对其焊接接头的力学性能，特别是低温冲击韧性的要求要比普通船体结构钢高很多。目前国内企业在进行该类钢种焊接时，普遍采用国外知名品牌的焊材。昆山中冶宝钢焊接材料有限公司通过大量试验和研究，研制出了屈服强度690MPa以上，-60℃低温冲击吸收能量70J以上的埋弧焊材组合，这也就是海工统称的5Y690级别海工专用埋弧焊材。

1. 焊丝焊剂的研制

(1) 化学成分 为保证焊缝的强度及韧性，焊丝的化学成分设计如表1所示。

(2) 合金系统的确定 所研制的焊丝焊剂组合要求熔敷金属屈服强度>690MPa，抗拉强度>770MPa，-60℃低温冲击吸收能量70J以上，因此焊缝的合金系统以C-Mn-Cr-Ni-Mo为主。

(3) 焊剂渣系的选择 目前国际上一般常用的渣系有九种，即：硅锰型、硅钙型、硅钙型、钛硅型、铝钛型、铝碱型、铝硅型、铝氟型及氟碱型。其中氟碱型焊剂的特点是焊剂含有较多的碱性氧化物，如CaO、MgO、MnO及CaF₂等，焊剂中的SiO₂含量较低，冶金特性为中性，即需

要与较高含锰量的焊丝相匹配。大多数氟碱型焊剂具有较高的碱度，因此焊缝非常纯净，焊缝含氧量较低，具有较高的韧性。因此，我们在焊剂成分设计方面，碱度按3.0左右来调整，焊剂的主要成分如表2所示。

(4) 熔敷金属试验材料及方法 熔敷金属试板尺寸为500mm×180mm×20mm，由于母材为D36船用钢板，其化学成分及力学性能与焊接材料熔敷金属相差较大，因此在实际施焊前，分别采用符合5Y690级的BHG—4M实芯气体保护焊丝对

表1 焊丝的化学成分(质量分数) (%)

C	Si	S	P	Mn	Ni	Mo
0.10~0.15	≤0.25	≤0.01	≤0.02	1.4~1.2	1.8~3.0	0.6

表2 焊剂的主要成分(质量分数) (%)

SiO ₂ +TiO ₂	CaO+MgO	MnO+Al ₂ O ₃	CaF ₂	其他	碱度
10~15	30~40	15~25	25~35	适量	3.0

坡口两侧及衬板进行表面堆焊，堆焊层厚度约为6mm。

参照《材料与焊接规范》的相关要求，将焊接坡口加工成单边10°，坡口间隙16mm（见图1），熔敷金属焊接参数如表3所示。

（5）对接接头试验材料及方法 对接接头试板尺寸为500mm×200mm×40mm，采用BAOSTEEL钢铁公司生产F690船用钢板，坡口形式采用X坡口，钝边4mm，焊接时采用双面焊背面清根，坡口尺寸如图2所示。

由于F690钢板的碳含量及碳当量均较高，而且钢板的厚度达40mm，所以为防止冷裂纹产生，对接接头采取焊前预热125~150℃，焊后进行300℃保温2h消氢处理的方式；同时为了提高焊接接头的力学性能，焊接热输入控制在2.5kJ/mm以内，焊道间温度控制在135~165℃之间，F690钢板埋弧焊对接接头焊接参数如表4所示。

（6）熔敷金属性能研究 研制焊丝/焊剂熔敷金属的化学成分和力学性能如表5、表6

所示。

（7）对接接头性能研究 焊接接头的力学性能如表7所示。

（8）熔敷金属扩散氢含量 熔敷金属扩散氢试验采用ISO3690规范中水银法进行，扩散氢含量为4.5mL/100g。

（9）焊接接头金相分析 焊接接头的微观组织分析采用4%硝酸酒精溶液腐蚀后，通过光学

金相显微镜进行分析，如图3和图4所示。焊缝为细小粒状贝氏体为主+少量先共析铁素体，热影响区粗晶区组织为下贝氏体及少量板条状马氏体。

2. 试验结果分析

（1）焊缝组织对焊缝力学性能的影响 在普通的Mn-Si合金系统中，当Mn和Si的含量适中时，得到细晶铁素体和针状铁素体的焊缝组织，具有较高的韧

表3 熔敷金属焊接参数

焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /mm·min ⁻¹	预热温度 /℃	道间温度 /℃	热输入 /kJ·mm ⁻¹	焊后消氢 /℃×h
530	30	450	130	150	2.27	300×2

表4 对接接头焊接参数

焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /mm·min ⁻¹	预热温度 /℃	道间温度 /℃	热输入 /kJ·mm ⁻¹	焊后消氢 /℃×h
530	30	450	130	135~165	2.27	300×2

表5 熔敷金属的化学成分（质量分数）（%）

牌号	C	Si	S	P	Mn	Cr	Ni	Mo
BHM—4M+XUN—123	0.081	0.13	0.006	0.016	1.18	0.41	3.61	0.6

表6 熔敷金属力学性能

焊材牌号	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 （%）	-60℃夏比冲击吸收能量/J
BHM—4M+XUN—123	709	793	22.4	92、98、88/93
5YQ690标准	≥690	770~940	≥17	≥69

表7 焊接接头的力学性能评定结果

焊材牌号	接头拉伸	接头侧弯	-60℃冲击吸收能量/J		
	R _m /MPa 断裂位置	D=3a, 180°	焊缝	熔合线	线外1mm
BHM—4M+XUN—123	790 母材	合格	103、98、100	192、190、193	200、199、203
4YQ690标准	≥770	— 缺陷长度 ≤3mm	≥69		

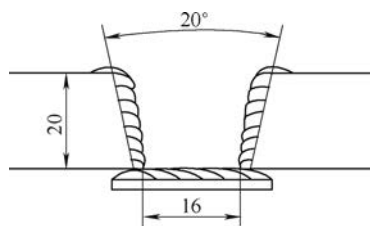


图1 熔覆金属焊接试件

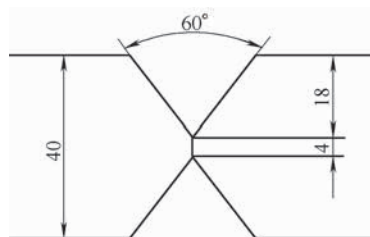


图2 对接焊接试件



图3 焊缝

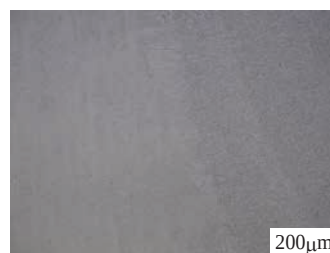


图4 热影响粗晶区

性。当硅锰含量较低时,得到粗大的先共析铁素体;硅锰含量较高时得到侧板条铁素体,二者均使韧性降低。

在高强钢焊接中,单纯采用Mn和Si来提高强度,势必导致焊缝韧性降低,尤其是Si含量较高时, Si将增加先共析铁素体的含量,使焊缝韧性下降。在埋弧焊中,由于热输入较大,焊缝金属冷却速度较慢,难以避免产生粗大的先共析铁素体和侧板条铁素体,因此必需通过合金化的方式,在提高强度的同时,保证焊缝韧性。本试验采用的是C-Mn-Ni-Cr-Mo多元合金系统,随着合金总量的提高,淬硬性增强,奥氏体向铁素体的转变被推迟,焊缝组织为中温转变组织,细小粒状贝氏体和少量的先共析铁素体。这种低碳粒状贝氏体组织之所以具有高的低温冲击韧性是由其显微组织决定的,在粒状贝氏体形成过程中,从过冷奥氏体析出的铁素体最初是板条状,而且板条状铁素体具有较高的位错密度,因此与铁素体珠光体钢

相比,粒状贝氏体钢有更细的铁素体板条和更高的位错密度,是细晶强化和位错强化这两种强化方式综合作用的结果。细小的铁素体板条具有更小的有效晶粒尺寸,能有效地阻止裂纹扩展。在增加钢强度的同时并未明显地降低钢的韧性和塑性。

(2) 焊剂组成对熔敷金属扩散氢的影响 该5Y690级焊材研制选用氟碱型渣系,焊剂碱度控制在BIIW3.0。对于高强钢来讲,焊缝中的扩散氢含量、含氧量是决定焊缝低温韧性的关键。为了保证高强钢的低温韧性,焊剂必须选择高碱度渣系,以保证焊丝的合金过渡、焊缝的含氧量等。一般高碱度焊剂的扩散氢含量比较高,这主要是由于焊接电弧区域内含氧量低,而氢的活度比较大,从而使焊缝的扩散氢含量较高。以前解决高碱度焊材扩散氢含量高的问题,主要是通过减少原材料的结晶水含量及提高烘干温度,保证焊接材料的含水量在较低的水平。但只从这方面入手,很难解决目前超高强度钢

对焊缝扩散氢含量的要求。为此,通过加入一种特殊的材料,保证高碱度焊剂的扩散氢含量在H5以下,从而保证了高强钢焊缝的低温韧性。

3. 结语

(1) 通过合理的合金系统设计具有理想的焊缝组织,在满足高强度的同时得到了很好的低温韧性。

(2) 提高焊剂的碱度,使焊缝更加纯净,且具有较高的韧性。

(3) 通过对焊剂成分研究,有效地控制了高碱度焊剂的扩散氢含量,使之达到低氢的要求,并且获得了较好韧性。

(4) 焊丝焊剂组合为BHM—4M+XUN—123焊材能够满足海工高强钢焊接要求,符合5Y690级别各项技术参数,在屈服强度690MPa钢板焊接中得到了很好地应用,产品满足船规5Y690的要求。

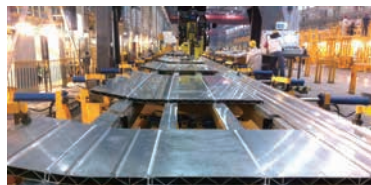
作者简介:李开添等,昆山中冶宝钢焊接材料有限公司。

MW 20160726

(上接第19页)



(a) 正装焊接



(b) 反装焊接

图5 整体大侧墙搅拌摩擦焊焊接

采用柔性化设计,可同时满足铝合金A、B型鼓形及T形侧墙结构,侧推、压紧及工装切换装置均采用自动化液压装置,工装自动化程度高。

(2) 侧墙搅拌摩擦焊工艺优

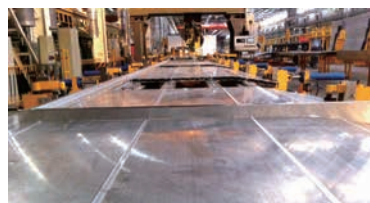


图6 侧墙轮廓度测量

化,当焊接速度为2 000mm,旋转速度为1 800r/min,焊接压力为18kN时,可以得到满足ISO25239及工艺要求的焊接接头,焊缝抗拉强度为256MPa,达到母材的88%,满足工业化生产需求。

(3) 采用整体大侧墙搅拌摩擦焊焊接工艺,侧墙整体轮廓度 $\leq 1\text{mm}$,大大提高了侧墙整体美观度。

作者简介:付宁宁等,中车南京浦镇车辆有限公司。

MW 20160723