屈服强度F460MPa级海工埋弧焊材工艺试验研究

李好生　李开添　常云琪

【摘要】采用国内两种F460级埋弧焊材分别进行熔敷金属及焊接接头性能试验，对两种焊材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了分析研究。结果表明，对比的国内两种焊材熔敷金属化学成分设计上有一定差异，但焊缝金属的微观组织及力学性能接近，在设定的工艺条件下焊接F460钢板，焊接接头各项性能全面满足DNV船级社规范中F460级的相关要求。

关键词：F460 埋弧焊材；熔敷金属；对接接头；力学性能

1. 概述

在海洋工程结构和装备中，屈服强度460MPa级高强钢应用广泛，由于海洋的工况环境较恶劣，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海洋平台、风车安装船、海洋风电安装船、铺管船等装备制造过程中，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，开发出屈服强度F460级高强度高韧性海工专用埋弧焊材。本文对该焊材与国外同级别埋弧焊材进行对比试验，通过分析焊材熔敷金属及焊接接头的成分组织对力学性能的影响，开发出具有自身特点的高强钢合金体系，弥补高强钢埋弧焊丝品种的不足，为海洋工程产品的埋弧焊接生产进行技术储备。

2. 试验材料和方法

（1）试验材料　焊接材料选用昆山中冶宝钢焊接材料公司生产的BHM-16焊丝+XUN-121焊剂和国内某公司生产的GCR-ENi5-S焊丝+GXL-121焊剂两种埋弧焊丝焊剂组合，焊丝规格均为ϕ4.0mm。熔敷金属试验采用20mm厚的E40船用钢板，对接焊钢板采用BAOSTEEL钢铁公司生产的40 mm厚F460，两种钢板的化学成分如表1所示。

（2）熔敷金属焊接条件　熔敷金属试板尺寸为500mm×180mm×20mm，由于母材为E40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F460级的BHG-2实芯气保焊丝对坡口两侧及衬板进行表面堆焊，堆焊层厚度约为6 mm。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16 mm，如图1所示。正式焊接前，对两种焊剂进行350 ℃保温2h烘干，熔敷金属焊接条件如表2所示。

表1　试验用钢板的化学成分(质量分数)　（%）

钢板	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Nb	V	Al
E40	0.07	0.18	1.54	0.012	0.006	0.020	0.23	0.24	0.014	0.029	0.038	0.029
F460	0.12	0.11	1.23	0.006	0.003	0.43	1.98	0.33	0.019	0.011	0.032	0.050

表2　熔敷金属焊接条件

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/℃	热输入量/kJ/mm	焊后消氢/℃×h
520~550	28~30	450	130	135~165	2.27	300×2

（3）对接接头焊接条件 对接接头试板尺寸为500mm×200mm×40mm，坡口形式采用X坡口，钝边4 mm，坡口尺寸如图2所示。焊接时采用双面焊背面清根。由于F460钢板的碳含量及碳当量均较高，而且钢板的厚度达40mm，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；同时为了提高接头的力学性能，焊接热输入的控制在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3所示。

（4）熔敷金属及焊接接头试验方法 熔敷金属的拉伸、冲击试验按照GB/T8110—2008《气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝》规定进行；焊接接头的横向拉伸、焊缝金属及焊接热影响区低温冲击、焊接接头侧弯试验分别按照GB2650—2008《焊接接头冲击试验方法》、GB2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》、GB/T 2652—2008《焊缝及熔敷金属拉伸试验方法》、GB2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》规定进行；熔敷金属的化学成分按照GB228.1—2010《金属材料拉伸试验》 第一部分 ：室温试验方法规定进行。焊接接头的微观组织分析采用4%硝酸酒精溶液腐蚀后，采用光学金相显微镜拍摄照片进行研究。

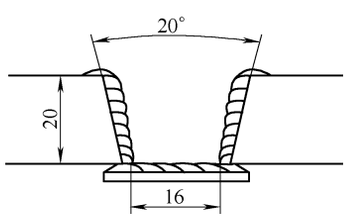


图1 熔覆金属焊接试件

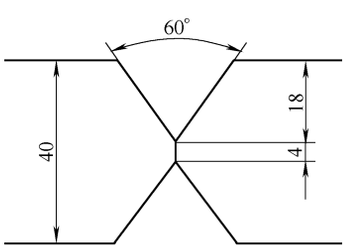


图2 对接焊接试件

3. 试验结果及分析

（1）熔敷金属的化学成分及力学性能 表4为两种焊接材料熔敷金属的化学成分。可见，两种焊材熔敷金属合金体系均为Ni-Mo系，但合金含量有所差别，与GCR-ENi5-S焊丝+GXL-121焊剂组合相比，焊丝BHM-16+XUN-121焊剂组合熔敷金属中的Si、Ni含量低、Mo、Mn含量相当。

在普通的Mn-Si合金系统中，当锰和硅的含量适中时，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，单纯采用锰和硅来提高强度，势必导致焊缝韧性降低，尤其是硅含量较高时，硅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。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。由于两种焊丝镍含量较高，BHM-16+XUN121熔敷金属的钼含较高，硅略低，使得熔敷金属的韧性比GCR-ENi5-S焊丝+GXL-121焊剂组合略高。镍是奥氏体化元素，增加奥氏体的稳定性，推迟相变，镍在焊缝金属中既可以提高焊缝强度，又提高焊缝韧性的元素；两种焊材组合通过提高熔敷金属的镍含量，来弥补硅含量增加带的韧性下降。

钼是固溶强化元素，当钼含量较低时，有益于改善焊缝的淬硬性，也有利于抑制先共析铁素体组织出现，促使针状和多边铁素体形成，以确保强度和韧性；当钼含量较高时，则焊缝金属硬度会大幅度增高，使韧性下降。因此应该控制钼的含量。

经过大量的试验研究，确定的BHM-16+XUN-121焊丝焊剂组合的熔敷金属化学成分，在力学性能方面与国外同类产品相当。

两种焊材熔敷金属的力学性能见表5所示。可见，两种焊材熔敷金属的拉伸性能及低温冲击韧性相近，各项力学性能指标均能满足挪威(DNV)船级社ⅤY46M级焊材的相关要求，特别是两种焊材熔敷金属-60℃夏比冲击吸收能量远远高于标准，

表3 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 /℃	热输入量 /kJ·mm^{-1}	焊后消氢 /℃×h
520~550	28~30	450	130	135~1650	2.27	300×2

有较大的储备量。

（2）F460接头的力学性能及微观组织　采用两种焊材焊接的F460焊接接头的综合力学性能如表6所示。可见，两种F460接头拉伸均断于母材，接头侧弯（D=3a，180°）无任何缺陷产生；焊接接头（焊缝、熔合线及线外3 mm热影响区）-60 ℃冲击吸收能量均稳定在46J以上。可以看出，采用国外和国内两种焊材焊接的F460接头，综合力学性能基本相同，各项力学性能指标优良，全面满足DNV船级社ⅤY46M标准要求。

焊接接头的微观组织分析结果如图3所示。可见，两种焊材焊接的F460焊接接头焊缝金属微观组织相貌相似，均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马氏体+下贝氏体及少量先共析铁素体。

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。它由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。尽管两种产品的合金含量不同，通过对焊缝组织的控制，得到了与之相同的焊缝组织，韧性也与之相当。

表4　熔敷金属化学成分(质量分数)　（%）

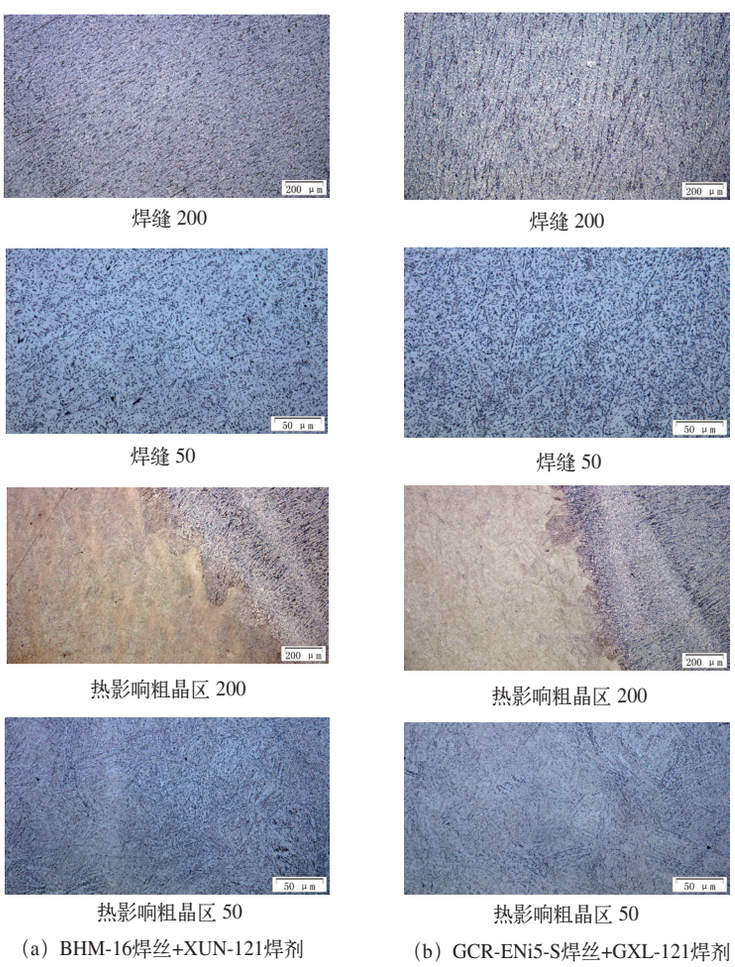
焊材牌号	C	Si	S	P	Mn	Cr	Ni	Mo
GCR-ENi5-S+GXL-121	0.05	0.50	0.009	0.012	1.20	0.023	1.00	0.20
BHM-16+XUN-121	0.07	0.33	0.004	0.016	1.20	0.028	0.93	0.28

表5　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
GCR-ENi5-S+GXL-121	495	615	28	89、92、88/90
BHM-16+XUN-121	564	634	28.4	120、147、142/136
ⅤY46M标准	≥460	570~720	≥19	≥46

表6　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		
	抗拉强度/MPa	断裂位置	D=3a，180°	焊缝	熔合线	线外3 mm
GCR-ENi5-S+GXL-121	612/616	母材	合格	68、57、68/64	222、222、218/220	204、202、198/210
BHM-16+XUN-121	627/622	母材	合格	64、74、72/70	220、220、218/219	200、202、200/200
ⅤY46M标准	≥570	—	缺陷长度≤3 mm	≥46		



（a）BHM-16焊丝+XUN-121焊剂　（b）GCR-ENi5-S焊丝+GXL-121焊剂

图3　两种焊材焊接的F460焊接接头各部位微观组织

（下转第44页）

3. 试验结果

焊缝金属化学成分和焊后热处理力学性能如表5、表6所示。

在实际应用中，P91钢埋弧焊的焊接难点：一是裂纹；二是强度和冲击韧性的匹配。其根本原因是P91钢是经过TMCP工艺形成的，而焊接破坏了原先TMCP得到的性能，导致HAZ的韧度和焊缝金属的韧度远低于母材。P91钢焊接材料的研发，通过化学成分的控制成功的解决了韧度这一问题，但是成分的精确控制对工艺参数的选择和规范焊接工艺流程提出了更高的要求，因此在焊接过程中须严格遵循焊接工艺。

重点注意事宜如下：①焊前打磨，保证焊缝的清洁干净。②焊前预热到200℃以上，层间温度≤350℃。③焊前调整机头位置，保证焊道的布置。④焊缝成形呈凸形，避免焊缝呈凹形。⑤焊后消氢处理（290~350）℃/2h。⑥确保回用焊剂的清洁度和干燥，焊接作业完成或中断后，料斗内的所有未用焊剂都应转移至一个可加热的料斗内（120~150℃），保存最长≤24h。在重新使用前，该部分焊剂应与两倍量的新焊剂混合后才可用于焊接。

法国液化空气焊接公司非常重视跟进标准的更新，根据ASME BPVC-I-2015（P92页）最新要求提出承压管的填充材料Mn+Ni的含量≤1.2%，从上述焊接结果可以看到OE S1CrMo91+OP 90W焊缝金属Mn+Ni=1.08%，满足了ASME的最新要求。而ASME提出该要求（Mn+Ni<1.2%），是为了确保P91钢的A_{c1}线在热处理温度760℃之上。

表5 OE S1CrMo91+OP 90W焊缝金属化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
ASME规范	0.08~0.13	1.20	0.80	0.010	0.010	8.0~10.5	0.80
实测值	0.11	0.46	0.24	0.005	0.008	9.00	0.62
元素	Mo	Cu	V	Nb	N	Al	Mn+Ni
ASME规范	0.80~1.20	0.10	0.15~0.25	0.02~0.10	0.03~0.07	0.04	1.20
实测值	0.94	0.046	0.20	0.040	0.04	0.002	1.08

表6 OE S1CrMo91+OP 90W焊缝金属力学性能

—	测试温度	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）	冲击韧性/J	热处理温度/℃×h
ASME	—	540	620-760	17	27	760×2
实测值	+20℃	562	684	21	85，78，86	760×2

4.结语

电厂蒸汽管道P91钢的焊接需要高度重视，严格遵守工艺规范，以确保焊接接头质量，从而避免安全事故的发生。

作者简介：钟利等，法国液化空气焊接公司。
MW 20160826

（上接第42页）

热影响区的粗晶区是焊接接头最薄弱的区域之一，对于单丝埋弧焊而言，一般在熔化线外1mm的位置。当热输入过大时，容易产生粗大组织。本次试验所得的热影响区粗晶区为下贝氏体及少量的板条状马氏体。在低碳低合金钢中的下贝氏体中的铁素体形态呈平行的板条束，碳化物分布于铁素体的内部，因此它的强度和韧性都优于上贝氏体；而板条状马氏体的形成温度较高，具有自回火的特点，因此有较好的强韧性。由于母材中的合金元素，在热输入2kJ/mm的规范下，有效地控制了奥氏体晶粒长大，并得到具有较好韧性的组织。

4. 结语

通过对BHM-16焊丝+XUN-121焊剂组合其熔敷金属化学成分的调整，得到了韧性较好的细小粒状贝氏体及少量的先共析铁素体组织，其各项力学性能达到船级社规定的ⅤY46M级焊材的技术要求。

两种国内焊丝+焊剂组合的焊接工艺性能与水平相当，完全满足F46级钢的埋弧焊焊接需求，可以在大型海洋工程产品中使用。

作者简介：李好生等，昆山中冶宝钢焊接材料有限公司。
MW 20160826