

低合金高强钢用高韧性超低氢焊条研制及应用

TG422.1

冶金部钢铁研究院(北京) 靳飞 孙永令 潘川
北京市焊接材料厂 阮国钰 王志娟

摘要 研制的超低氢高韧性低合金系列焊条具有优良的焊接工艺性, 极低的扩散氢含量和优异的低温缺口韧性以及优良的抗冷裂性和抗脆断性能, 满足了重大工程对焊接接头强韧匹配的技术要求, 为重要焊接结构和低温压力容器制造提供了优质焊条。

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF LOW HYDROGEN ELECTRODE SERIES USED FOR WELDING OF HSLA STEELS

Jin Fei et al.

Abstract The ultra-low-hydrogen electrode series are developed with which the good welding performance, very low diffusion hydrogen content of weld metal and high toughness at low temperature for weld metal can be obtained. Also the electrodes have the properties of good resistance both to cracking and to brittle fracture. The electrodes fulfill the requirements of matched strength and toughness welded joint for low temperature vessel and important welding structure fabrications.

关键词: 超低氢高韧性焊条 扩散氢 缺口韧性 冷裂纹

0 前言

屈服强度为 350~500 MPa 的低合金高强钢是我国最常用的低合金结构钢, 亦是重要的压力容器用钢。冶金技术的进步使钢材的质量和性能得到很大改善和提高, 加之进口低合金钢的应用, 提出了焊缝金属的缺口韧性要高于母材, 至少与母材相当的技术指标要求。另一方面, 为避免产生焊接裂纹, 要求焊材具有超低氢、高韧性, 以提高产品制造和使用安全性。

1 合金系的选择

采用微量多元合金元素改善和提高了焊缝金属的低温缺口韧性, 并提高了在厚板多道多层焊缝金属抗回火能力。焊缝金属低温缺口韧性的改善要靠控制其金相组织获得。研究表明, 铁素体焊缝金属最适宜的金相组织是针状铁素体, 裂纹较难在针状铁素体中扩展断裂。

调整化学成分, 如加入 Ni、Mo 等元素可使焊缝金属连续冷却转变曲线右移, 促使针状铁素体形成。但是添加微量多元素, 使焊缝金属的抗拉强度和屈服强度提高, 为了不提高同一级别焊条的强度, 并改善低温缺口韧性, 在合金配比中另一关键是 Mn、Si 元素含量和配比。MnS 有利于防止因 FeS 夹杂而形成的热裂纹, 但 Mn 含量过高或过低, 都会使低温缺口韧性下降。Si 提高焊缝金属的屈服强度, 但降低了缺口韧性。因此控制 Mn、Si 的含量和比例, 可改善低温缺口韧性, 并获得较好的强韧性匹配。

研究表明: 在低 C-Mn 合金系的基础上, 采用微量多元素合金化是能够达到不提高同一级别焊条的强度限和屈服限并大幅度提高焊缝金属的低温缺口韧性。无论是采用焊芯合金化、还是采用优质焊芯通过药皮过渡合金化, 效果相同。控制好熔敷金属化学成分(表 1), 可达到较理想的强度和低温缺口韧性的匹配。

表1 超低氢高韧性低合金系列焊条熔敷金属化学成分 (%)

焊条类别	C	Mn	Si	S	P	Ni	Mo	Cr
J427B	0.05~0.08	0.40~0.65	0.15~0.35	≤0.020	≤0.020	0.40~0.70	-	-
J507B	0.05~0.08	0.50~1.00	0.15~0.30	≤0.020	≤0.020	0.65~0.10	0.15~0.25	-
J607B	0.05~0.08	0.78~1.82	0.15~0.35	≤0.010*	≤0.012*	0.70~0.94	0.45~0.65	-
J607Ni	0.05~0.08	0.80~1.45	0.15~0.35	≤0.020	≤0.020	1.50~2.30	0.15~0.30	0.10~0.20

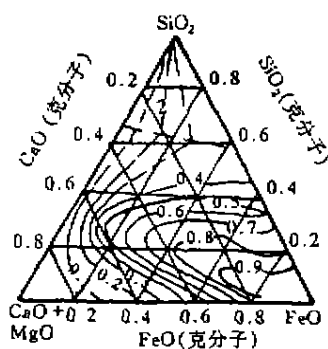
* 核级材料要求。

2 药皮配方设计

超低氢高韧性系列焊条配方选用大理石和萤石为主的 $\text{CaF}_2 - \text{CaO} - \text{TiO}_2$ 渣系。为了改善其焊接工艺性能,在药皮中加入一定量的铁粉。加入铁粉后,熔渣中的 FeO 要按分配律向液体金属扩散,使焊缝金属的含氧量增加,导致其缺口韧性下降。对此应注意以下几个问题。

2.1 减少 FeO 在熔渣中的活度 (a_{FeO})

由图1可知, a_{FeO} 和熔渣中 SiO_2 和 FeO 的摩尔数有关。 a_{FeO} 随 SiO_2 的增加而减少,随 FeO 的增加而增加。因此配方设计时,为使 a_{FeO} 减少,必须限制 FeO 的生成。通过适当增加熔渣中 SiO_2 的量来降低 a_{FeO} 。但考虑到 SiO_2 的增加,有可能使焊缝金属的 Si 量增加,对此可通过调整 TiO_2 的含量来控制 Si 的增量。

图1 FeO 在 1600°C ($\text{CO} + \text{MgO}$) - SiO_2 - FeO 内的活度

2.2 萤石加入量

萤石在酸性渣系中,能达到去氢的效果。碱性焊条焊接时, CaF_2 的去氢机理和效果

还有待进一步研究。但从热力学角度分析, CaF_2 和水蒸汽及氢可直接反应而去氢。此外, $\text{CaCO}_3/\text{CaF}_2$ 的比值对熔渣覆盖熔滴和熔池有较大影响。适量的 CaF_2 可改善熔渣对金属的保护效果,因而可减少金属的吸氢量。 CaF_2 还将影响电弧的稳定性,使熔滴直径增大,短路时间增长,并使焊接时飞溅增加。因此, CaF_2 的加入量要综合考虑上述二个方面的因素。试验表明: CaF_2 在药皮中的总量应控制在 32 % 以下。

2.3 大理石加入量

大理石作为造渣剂和造气剂,对焊接工艺性和焊接冶金反应影响较大。试验表明,熔渣中 $\text{CaO}/\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2$ 的值以 2~2.5 为宜。

2.4 铁粉加入量

铁粉的加入量可在较宽的范围内变动,对焊条的工艺性无明显影响。但铁粉的质量、特别是铁粉的颗粒度、松装比和含氧量对焊条的工艺性、焊缝金属的扩散氢含量及对焊缝金属中的气孔影响甚大,需选择和控制。药皮的组成在表2范围内,焊条具有良好的工艺性能。

表2 焊条药皮成分的组成 (wt %)

大理石	萤石	钛白粉 + 金红石	石英	铁粉	铁合金	其它
20~45	18~32	2~10	2~8	5~40	5~20	2~5

3 系列焊条典型的化学成分和各项性能

3.1 熔敷金属的化学成分和力学性能

系列焊条典型的熔敷金属化学成分和力学性能分别见表3、表4、表5。

表3 熔敷金属化学成分(%)

焊条类别	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
J427B	0.074	0.15	0.43	0.018	0.018	-	0.43	-
H507B	0.074	0.21	0.94	0.012	0.014	-	0.84	0.21
J607B	0.050	0.23	1.43	0.006	0.010	-	0.87	0.49
J607Ni	0.080	0.28	1.26	0.018	0.015	0.13	1.83	0.22

表4 熔敷金属力学性能

焊条类别	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_b (MPa)	δ_5 (%)	ψ (%)	$A_{kv}(J)$				备注
					室温	-20℃	-40℃	-50℃	
J427B	453	530	25	72	192	196	76	13	焊态
					212	179	120	18	
J507B	475	567	26	76	242	271	184	66	焊态
					242	196	153	66	
J607B	522	609	25	79	180	148	40	40	焊后热处理 610℃×20h
					200		88	84	
					176	176	112	64	
J607Ni	571	654	23	74	149	129	131	76	焊态
					149	118	87	80	
					156	96	47	72	

表5 J607B、J607Ni 焊条熔敷金属 350℃时的力学性能

焊条类别	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_b (MPa)	δ_5 (%)	ψ (%)	备注
J607B	423	540	22	70	焊后热处理 610℃×20h
J607Ni	455	565	21	68	焊后热处理 610℃×20h

表6

焊条类别	试验温度(℃)							无塑性转变温度 变温度(℃)	备注
	-75	-70	-65	-60	-55	-50	-45		
J607B	-	-	-	×	×	×	×	-45	P3 试样
J607Ni	×	×	×	×	×	×	×	-70	P3 试样

注: ×——断裂; ○——未断。

3.3 夏比 V 形缺口冲击韧性

超低氢高韧性系列焊条的夏比 V 型缺口冲击韧性试验结果见图2、图3、图4、图5。

3.4 熔敷金属的扩散氢含量

按 GB3965—83 标准甘油法和按 ISO 3690 标准水银法, 测定了 $\phi 3.2$ mm 和 $\phi 4.0$ mm 系列焊条不同烘干温度的扩散氢含量。试验参数和试验结果见表7、表8。系列焊条药皮的含水量均小于 0.10%, 一般在 0.06%~0.08% 之间。

3.2 焊接工艺性

超低氢高韧性低合金系列焊条电弧燃烧稳定, 焊接熔池平静、清晰, 脱渣性良好, 特别是深坡口脱渣性能好, 能满足全位置焊接的工艺要求。

J607B、J607Ni 焊条的落锤试验结果列于表6。

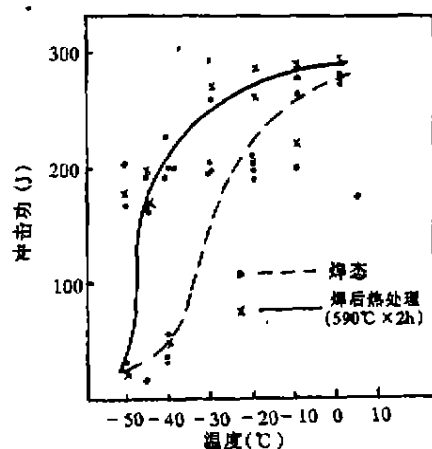


图2 J427B 熔敷金属冲击功

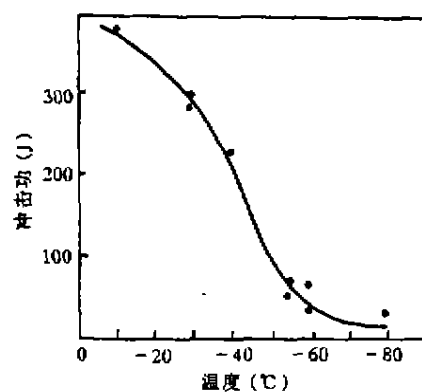


图3 J507B 熔敷金属冲击功

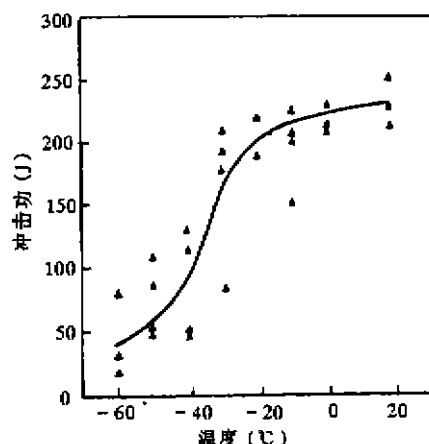


图4 J607B 熔敷金属冲击功

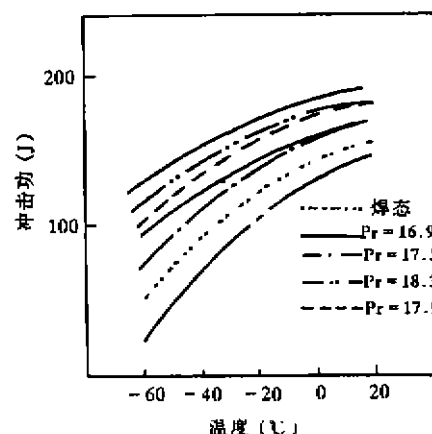


图5 J607Ni 熔敷金属冲击功

Pr—回火参数

表7 测氢试验

焊条直径 (mm)	焊接电流 (V)	焊接电压 (V)	焊接速度 (mm/s)	试验温度 (°C)	相对湿度 (%)
φ3.2	110~120	22~24	3.0	12	42
φ4.2	160~170	22~24	2.7	12	42

表8 扩散氢含量

试验方法	φ3.2 mm 焊条			φ4.0 mm 焊条	
	300 °C × 1 h	350 °C × 1 h	400 °C × 1 h	400 °C × 1 h	400 °C × 1 h
甘油法 (mL/100 g)	2.18	1.02	0.31	0.35	0.72
水银法 (mL/100 g)	4.43	2.27	2.27	—	1.64

4 生产与应用

4.1 生产质量控制

(1) 焊条盘元的 S, P 含量应控制在 0.020 % 以下。

(2) 控制药粉杂质元素特别是 S, P 含量。

(3) 控制铁粉的颗粒度、松装比和含氧量。

(4) 建立和完善生产、检验等质保体系, 确保焊条稳定的工业化生产。

4.2 系列焊条的特性、特点

系列焊条具有良好的焊接工艺性, 极低的扩散氢含量和优异的低温缺口冲击韧性。系列焊条在 20gZ 等钢上进行斜 Y 形坡口焊接裂纹试验, 考核焊条的抗冷裂纹性能。测定临界应力值和焊缝金属的断裂韧性。为系列焊条配套

的不同强度级别钢种制定预热温度, 并为焊接结构的安全性评估提供试验数据。为系列焊条的推广应用打下试验基础(图 6、表 9、表 10)。

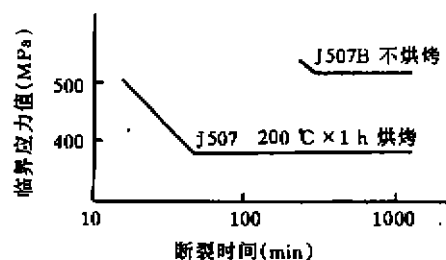


图6 J507B 和 J507 焊条插销试验结果对比

试验结果表明: 超低氢高韧性焊条大幅提高临界应力值, 并具有和优异缺口韧性值相对应的较高的断裂韧性值, 显示出该类焊条优良的抗冷裂纹及抗脆性破断性能。

表9 斜Y型坡口焊接裂纹试验结果
(无裂纹的最低预热温度)

母材和焊条的匹配	预热温度*(C)
20 gZ 配 J427B 焊条	10
SPV355N 配 J507B 焊条	20
FG-43 钢配 J507B 焊条	70
508 Ⅲ 锻板配 J607B 焊条	100
DG50 钢配 J607Ni 焊条	32

*: 试板(表面、根部、断面)裂纹率为零。

表10 J507B、J607Ni(LB62N)焊条
焊缝金属室温 COD 值(δ_i)

焊条	J506B	J607Ni	LB62N
δ_i (mm)	0.352	0.108	0.098

4.3 应用

超低氢高韧性低合金系列焊条已批量稳定工业化生产,并应用于北京市液化石油气公司第一储备厂2台1000 m³,12台2000 m³球罐;北郊、西郊和南郊罐瓶厂、北京市高碑店污水处理厂等几十台球罐的建造;航空部四川高空试验台、300MW核电站核压力壳的制造及压力容器、蒸压釜和低温压力容器的修复。

5 结论

(1)超低氢高韧性 $\text{CaF}_2 - \text{CaO} - \text{TiO}_2$ 渣系的低合金 J427B、J507B、J607Ni 系列焊条,具有优良的焊接工艺性;极低的扩散氢含量及优异的低温缺口韧性。

(2)超低氢高韧性低合金系列焊条已批量工业化生产,质量稳定。作为优质焊条和替代进口焊条,已应用于北京市和国家重点工程关键装备的制造及大量在役压力容器和低温压力容器的修复。

参考文献

- 1 Kirkwood P R. Microstructural and Toughness Control in low Carbon Weld Metal. Metal Construction, 1978, 10(5)
- 2 Yoshinori Ito et al. Effects of Oxygen on low Carbon Steel Weld Metal. Metal Construction, 1982, 14(9)
- 3 Snyder J P. The Effects of Titanium on Submerged Arc Weld Metal. Welding Journal, 1982(7)
- 4 Heuschkel J. Weld Metal Property Selection and control. Welding Journal, 1973(1).
- 5 宋忠臣等. 国产 508-Ⅲ 钢焊接性试验研究. 压力容器, 1995(2)

(收稿日期 1997 01 18)

TF748,2

TG404

180 t 转炉的焊接及振动时效处理

鞍钢建设机电公司 林成德

摘要 对大厚度 16MnD 钢采用不预热焊接。试验结果表明:由于不间断地连续施焊,不会使焊缝发生裂纹,而且可缩短工期;介绍了采用 VSR(振动时效)取代 TSR(热时效)消除焊接应力在 180 t 转炉上的成功应用。

WELDING AND VIBRATING AGEING TREATMENT FOR A 180 TON REVOLVING FURNACE STEEL STRUCTURE

Lin Chengde

Abstract Experiment for welding heavy 16Mn steel plate is carried out without use of pre-heating. The results show that the procedure developed can avoid weld cracking and can shorten the operating times as welding keeps continuously. A 180 ton revolving furnace is welded using the procedure above and vibrating ageing treatment is used for residual stress relieving in stead of post heating ageing.

关键词: 炉壳焊接 不预热 振动时效 热时效

炼钢炉, 转炉