

CNIC-01509
CAEP-0059

HR-4 钢电子束焊接工艺研究
RESEARCH ON ELECTRON BEAM WELDING
TECHNOLOGY OF STEEL HR-4
(In Chinese)

中国核情报中心
China Nuclear Information Centre

CNIC-01509
CAEP-0059

HR-4 钢电子束焊接工艺研究

郭 鹏 关 凯

(中国工程物理研究院, 成都, 610003)

摘 要

对 HR-4 类 J75 和 J90 钢的电子束焊接工艺进行了研究。提出了能满足设计和使用要求的焊接工艺参数, 并对焊接与热处理不同的处理顺序对焊后机械性能的影响作出了评价。

**Research on Electron Beam Welding
Technology of Steel HR-4**
(In Chinese)

GUO Peng GUAN Kai
(China Academy of Engineering and Physics, Chengdu, 610003)

ABSTRACT

The electron beam weldability of HR- 4 steels (J75 and J90) is studied and the welding parameters needed for design and usage are presented. The assessment on the effect of mechanical properties by different processing order of welding and heat-treatment is made.

引言

HR-4 钢包括 J75 和 J90 两个钢种, 其基本性能指标为: $\sigma_b \geq 980 \text{ MPa}$, $\sigma_{0.2} \geq 690 \text{ MPa}$, $\alpha_k \geq 78.6 \text{ J/cm}^2$ 。在经过锻造、焊接及热处理后, 要求以上数值均不得低于母材的 90%, 为了实现这一目标, 必须对其焊接工艺进行深入研究, 以寻找最佳焊接工艺参数及相应的工艺措施, 并对焊接及热处理不同处理顺序对机械性能的影响作出评价, 为焊接生产提供技术依据。

1 试件材料

1.1 原材料

研究用原材料: J75, J90 均为 LsM-3 批炉号钢。化学成分见表 1。

表 1 原材料化学成分 (%)

化学成分	C	Si	V	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Al	Co	Nb
J75	0.016	略	略	<0.006	<0.006	14.53	31	略	略	略	—	—
J90	0.015	—	—	<0.006	0.004	—	38	—	略	略	14.88	略

锻造制度: 锻造终始温度见表 2。

表 2 锻造终始温度 °C

原材料	始锻温度	终锻温度	锻后处理
J75	1000	820~850	锻后水冷
J90	1000	870~900	锻后水冷

热处理制度: J75: 980°C, 保温 1 h, 水冷+740°C, 保温 8 h, 空冷。

J90: 950°C, 保温 1 h, 水冷+580°C, 保温 16 h, 空冷。

机械性能: 见表 3。

表 3 机械强度 MPa

原材料	σ_b	$\sigma_{0.2}$
J75	1142	765
J90	999	795

金相: J75, J90 组织均为奥氏体, 原始晶粒度 6 级。原材料理化分析, 未见缩孔、裂纹、夹杂、针孔等金相缺陷, 原材料拉伸断口均为韧性断裂, 组织未见白点、分层、疏松等缺陷。

1.2 试件设计

试件尺寸 220 mm×60 mm×6 mm。焊接方法与接头形式: 电子束焊接、带止口平板对接。

1.3 焊前处理

固溶。

1.4 原材料焊接性能分析

J75 是在 JBK75 钢基础上，为改善抗氢和焊接性能而发展起来的 50Fe-30Ni-15Cr 系铁基合金。其主要合金元素 Cr 对组织影响为：缩小 γ 相区，形成 γ 相圈，对性能的影响是增加钢的淬透性并有二次硬化作用，易发生 σ 相和 475 °C 脆化，对母材焊接性能产生不利影响。Ni 元素对组织的影响为扩大 γ 相区，形成无限固溶体，对性能的影响为主要奥氏体形成元素起到改善钢的耐蚀性能，细化晶粒作用^[1]。Si, S, P 等对焊接不利的元素含量较低，还含有强碳化物形成元素 Ti，降低了碳的有害作用，可避免产生晶间腐蚀现象。

J90 为 40Fe-15Co-40Ni 系合金，与 J75 相比，提高了 Ni 元素含量。不含 Cr 而增加了 Co，Co 元素对组织的影响为无限固溶于 γ 铁，属于非碳化物形成元素，对性能的影响有固溶强化作用。赋予钢红硬性，改善钢的高温性能和抗氧化及耐腐蚀能力。不含 Si, P 和 S 的含量也极低，非常有利于焊接。除 Ti 外，还含有 Nb，强化了 Ti 的有利作用。

综上所述，J75 和 J90 均为含镍较高的单相奥氏体钢，具有良好的焊接性能。由于它们导热系数小，线膨胀系数大，自由状态下易产生较大的焊接变形，故应选用焊接能量集中的焊接方法，尽可能地快速焊接^[2]。电子束焊接是优先选择的焊接方法。

2 焊接试验

2.1 试验设备

ESW1002/7.5-150 型真空电子束焊机。

2.2 焊接速度的选择

焊接速度对焊接质量影响较大，焊接速度不适当，焊缝表面将出现凹陷、塌边、裂纹等缺陷，焊缝内部可能出现裂纹、未焊透、气孔等缺陷^[3]。

焊接速度分别选择为 25 mm/s，15 mm/s，20 mm/s。

试验表明，合适的焊接速度使焊缝表面成型美观，焊缝均匀、饱满，边缘无沟槽，且焊接时飞溅较小，J75 和 J90 的电子束焊适合的焊接速度均为 20 mm/s。

2.3 焦点位置的选择

电子束焦点位置影响焊缝形状^[3]。具体见表 4。

表 4 焦点位置对焊缝形态的影响

	焦点位置	焊缝剖面
A	上聚焦	U 形断面
B	表面聚焦	中凸形断面
C	下聚焦	平行形断面
D	过下聚焦	V 形断面

应根据焊接接头设计和工艺的需要，通过选择聚焦方式（焦点位置）获得适宜的焊缝剖面。

2.4 偏转函数的选择

为了评价偏转函数对焊缝机械性能及焊缝质量的影响，试验时选择 A, B 两种偏转进行焊接。

A 种偏转加函数：搅拌频率为 2000 Hz，函数图形为椭圆；B 种偏转未加函数。

2.5 其它参数

电子束焊缝质量除上面三种因素外，还受到高压、工作距离、聚焦电流、阴极电流的影响，即便单一因素为最佳选择，也还涉及与其它参数的匹配，故而要获得最佳的工艺参数还必须进行大量的摸索、试验及对比工作^[4]。

经过采用“正交实验法”，试验确认部分参数为：高压为 120 kV，工作距离为 300 mm，聚焦为 488 mA，焊接电流为 19.5 mA，室真空度 $>1.33 \times 10^{-2}$ Pa，其余略。

2.6 焊后处理

分别采用不处理和时效处理两种方案。

3 试验结果

将焊接后的对接试板制成拉伸、弯曲、冲击标准试样，进行机械性能试验。

3.1 各种焊接及热处理状态拉伸、弯曲及冲击试验结果

有关数据见表 5~9。

表 5 J75 状态：固溶+焊接¹⁾

试件编号	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa
J75-A-1	747.12	606.90
J75-A-2	727.18	558.27
J75-A-3	719.70	542.67
J75-A-4	710.98	537.04
J75-A-5	742.76	576.14
J75-A-6	758.96	565.74
J75-B-1	584.14	522.13
J75-B-2	761.50	569.08
J75-B-3	720.37	503.69
J75-B-4	759.00	566.34
J75-B-5	717.88	526.88
J75-B-6	723.24	512.41

1) 弯曲试验：压至 180° 开裂。

表 6 J75 状态：固溶+焊接+时效¹⁾

试件编号	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa
J75-A-7	1124.01	754.03
J75-A-8	1147.78	761.75
J75-A-9	1120.76	731.51
J75-A-10	1128.48	750.81
J75-A-11	1159.36	767.80
J75-A-12	1149.07	755.32
J75-B-7	1098.88	728.94
J75-B-8	1091.16	703.85
J75-B-9	1091.16	702.38
J75-B-10	993.37	730.87
J75-B-11	1033.90	694.46
J75-B-12	1095.02	730.86

1) 弯曲试验：压至 180° 未开裂。

表 7 J90 状态：固溶+焊接

试件编号	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	弯曲试验
J90-A-1	694.08	367.19	压至 120°开裂
J90-A-2	719.81	375.79	压至 120°开裂
J90-A-3	699.86	378.56	压至 70°开裂
J90-A-4	689.57	378.24	压至 70°开裂
J90-A-5	711.44	391.91	压至 45°开裂
J90-A-6	708.78	387.28	压至 45°开裂
J90-B-1	684.78	378.08	压至 110°开裂
J90-B-2	727.22	387.13	压至 110°开裂
J90-B-3	688.91	383.51	压至 50°开裂
J90-B-4	702.79	390.78	压至 50°开裂
J90-B-5	721.43	397.05	压至 80°开裂
J90-B-6	610.84	380.02	压至 80°开裂

表 8 J90 状态：固溶+焊接+时效¹⁾

试件编号	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa
J90-A-7	1047.09	802.12
J90-A-8	1071.38	839.99
J90-A-9	1067.64	816.00
J90-A-10	1053.94	803.34
J90-A-11	1045.22	809.92
J90-A-12	1047.71	816.63
J90-B-7	1017.19	822.85
J90-B-8	1047.71	814.91
J90-B-9	1004.71	785.52
J90-B-10	1050.21	812.74
J90-B-11	1002.98	770.35
J90-B-12	1025.90	788.60

1) 弯曲试验：压至 180° 未开裂。

表 9 J90 状态：固溶+焊接+时效

试件编号	δ_5 /%	α_k /J·cm ⁻²
J90-1-1	26	125.0
J90-1-2	26	141.7
J90-1-3	27	130.6

3.2 焊缝及热影响区金相组织

(1) J75 金相组织见图 1。



图 1 J75 焊缝及热影响区金相照片图

焊缝及热影响区均为奥氏体，焊缝内有氧化物，如 MnO，Al₂O₃，SiO₂ 及 FeC，CrC 等析出物，在光学显微镜下未见明显偏析及其它金相缺陷。

(2) J90 金相组织见图 2。



图 2 J90 焊缝及热影响区金相照片图

焊缝组织为胞状晶，热影响区为奥氏体，也有少量氧化物存在，金相组织纯净，在光学显微镜下未见明显偏析及其它金相缺陷。

(3) 焊缝区化学成分见表 10。

表 10 焊缝化学成分

	Al	Si	Mn	Ti	Nb	Cr	V	Mo	Ni	Co
J75	0.60	0.45	0.24	3.21	—	15.07	0.37	3.08	29.32	—
J90	1.68	0.41	—	1.80	2.22	—	—	—	37.72	13.93

(4) 无损探伤

所有试验焊接试件进行 X 射线透射检查，焊缝内部质量参照国标 GB 3323—87，评定为一级。

(5) 拉伸断口分析

a. J75 状态：固溶+焊接

焊缝未全溶合，其中 A 区局部溶合。溶合区有韧窝，B 区基本溶合。

b. J75 状态：固溶+焊接+时效

断面的边沿平滑，中部较粗糙，其中 A 区的大韧窝较多，B 区韧窝较均匀。

c. J90 状态：固溶+焊接

d. J90 状态：固溶+焊接+时效

断面两侧较平整，中部较粗糙，A 区为韧窝，无裂纹特征，B 区为较小均匀的韧窝。

a~d 中均未发现脆性断裂特征。

3.3 晶间腐蚀试验

通过耐酸钢晶间腐蚀倾向试验方法 (GB 1223—75) C 法检验。

4 试验结果分析

(1) 根据其机械性能试验结果可见，J75 和 J90 的两种状态固溶+焊接+时效的抗拉强度均已超过 1000 MPa，已经达到母材的 90%，其 $\sigma_{0.2}$ 值也已达母材的 90%。其余 α_k 值、弯曲角、 δ_5 等值也均已达到目标要求。

试件进行晶间腐蚀试验，认为焊缝无晶间腐蚀倾向。

(2) 焊缝区组织成分与基体成分无明显差异，说明在焊接过程中元素烧损很小，能保

持与基体化学成分的一致性。

(3) 加偏转函数的焊接接头综合力学性能优于未加偏转函数的。

(4) 对焊缝组织进行分析结果表明, J75 和 J90 的焊接金相组织良好, 焊缝及热影响区均未发现气孔、焊瘤、裂纹等缺陷。电子束焊接热源能量密度大, 溶深溶宽比优于其他焊接方式, 有利于使焊缝及热影响区组织纯净。

(5) 根据对接头断口的分析, 断裂方式均为韧性断裂, 表明焊接、热处理后其焊缝组织良好。

5 结 论

(1) HR-4 钢 J75, J90 采用电子束焊接方法是适宜的, 所获得的焊接接头综合性能均能达到技术要求, 焊缝表面成型良好, 焊缝内部质量优良。

(2) HR-4 钢焊后必须进行时效热处理, 未进行时效处理的焊接接头其抗拉强度仅为时效处理后的 60%左右, 焊接后其时效作用降低。

(3) HR-4 钢中 J75 焊接性能略优于 J90。

参 考 文 献

- 1 机械工程手册编委会. 机械工程手册 (材料部分). 北京: 机械工业出版社, 1978
- 2 傅积和. 焊接数据资料手册. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 3 周振丰. 焊接冶金与金属焊接性. 北京: 机械工业出版社, 1988
- 4 王之康. 真空电子束焊接工艺与设备. 北京: 原子能工业出版社, 1990

郭鹏：高级工程师。1984年毕业于南昌航空工业学院材料科学与工程系。现在中国工程物理研究院机械制造工艺研究所从事焊接技术研究工作。

GUO Peng: Senior engineer. Graduated from The Department of Material Science and Engineering, Nanchang Institute of Aeronautics in 1984. Now, majoring in material welding field at China Academy of Engineering Physics.