

原成(81)-001

内 部

科学技术成果报告

S271钢焊缝辐照实验总结

杨忠科 杨文斗 马珠鱼 崔金新

中国科学院原子能研究所

一九八一年十二月

S 271 钢焊缝辐照实验总结

提 要

本报告总结了 S271 钢的焊缝、熔合线和热区共八组试样辐照后冲击实验的结果。介绍了钢的辐照效应测量和考核标准以及实验过程,还对实验结果进行了初步讨论。

S271 钢是反应堆压力壳用钢。由于它是在高温、高压和中子辐照下使用的,因此要求它具有强度高、塑性韧性大等良好的机械性能,而且辐照效应要小。压力壳是一个庞大的焊接件,除了压力壳钢本身的性能符合要求外,焊缝也要经得起考验。我们知道,焊缝的性能比母材差,所以,它对反应堆的安全起着决定性的影响。这就需要选用冷态性能好、辐照效应小的焊接材料,来保证压力壳在反应堆运行过程中不发生问题。本实验是将几种不同焊料焊接的 S271 焊缝试样,在反应堆中进行辐照,比较其辐照效应的大小,以期给反应堆压力壳焊接材料的选择,提供一个实验依据。

一、辐照效应的测量及考核标准

当材料受到快中子轰击以后,便产生了缺陷。对压力壳钢来说,主要的是点缺陷——空位和间隙原子。这些缺陷的存在阻碍了位错的运动,导致了材料硬化,脆性转变点升高,冲击值-温度曲线的上平台降低,材料变脆,这就是材料经辐照后的脆化效应。研究材料的辐照效应重点就是研究脆性,所用的办法是冲击韧性实验。

国外的实践证明,当压力壳在弹性破断转变温度 FTE 之上使用时,是安全的。弹性破断转变温度与材料的零塑性温度 NDT 有如下的关系: $FTE = NDT + 33^{\circ}\text{C}$ 。NDT 是由落锤实验测出的,它与材料的脆性转变温度 T 有一定的对应关系^[1,2]。因此,用冲击实验测出脆性转变温度 T ,即可判断材料在使用中的安危。

脆性转变点 T 的确定,是按美国机械工程协会 (ASME) 推荐的规范^[3],根据材料的屈服强度,取 $5.2\text{kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 所对应的温度,作为材料脆性转变点 T 的值。

二、试样的制取

实验中所用的试样,均取自电炉冶炼、电渣精炼的 S271 钢半工业性产品,分别在 153 焊剂和 250 焊剂保护下,用 548 焊丝, ($\text{HO}_6\text{Mn}_2\text{NiMoA}$) 埋弧自动焊的焊缝。表 1 给出了焊丝和焊剂的成份。

表1 实验用焊丝和焊剂的化学成份

成份, % 材 料	C	Mn	Si	Mo	Ni	S	P	Ti	冶 炼 工 艺	
548 焊丝(HO 6Mn2NiMoA)	0.06	1.64	0.21	0.62	1.45	0.006	0.008	0.12	电 炉	
低 Ni	0.05	1.76	0.14	0.65	1.07	0.002	0.008	0.10	"	
548 焊丝 HT S271 手工焊条	0.028	1.12	0.15	0.29	1.25	0.012	0.0075	0.12	电炉 + 电渣 加入	
成份, % 焊 剂	CaF ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	MgO	MnO	BaO	K ₂ O	Mo ₂ O ₃	NaAlF ₆
HJ 153	20 —24	26 —30	6	18 —22	18 —22	≤ 3	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 0.6	≤ 1.0
250	23 —30	18 —23	4 —8	18 —22	12 —16	5 —8	/	4 —2	/	/

实验中所用试样共分八组:

1、250 焊缝: 548 焊丝 + 250 焊剂焊接的 S271 钢试环上截取试样。焊后热处理: 530°C × 50 小时 + 610°C × 8 小时, 空冷。

2、老 153 焊缝: 548 焊丝加老 153 焊剂焊接的 S271 钢试环上截取。焊后热处理同第一组。

3、高 Ni 新 153 焊缝: 在 548 丝 + 高 Ni 新 153 剂焊接的 S271 试板上截取。焊后热处理: 530°C × 50 小时 + 610°C × 20 小时, 空冷。

4、低 Ni 新 153 焊缝: 548 焊丝中 Ni 含量为下限 (约 1%), 其余同第三组。焊后热处理: 530°C × 50 小时 + 610°C × 23 小时, 空冷。

5、高磷手工焊缝: 焊条含磷量约 0.020%, 试样取自 S271 试板。焊后热处理: 530°C × 50 小时 + 610°C × 20 小时, 空冷。

6、低磷手工焊缝: 焊条含磷量约 0.010%, 其它均同第五组。

7、8、热影响区试样及焊缝熔合线试样各一组。

无论取自环件或板件上的试样, 均是在距内表面四分之一厚度处截取。试样的型式为 Charpy-V 型缺口冲击试样。试样的成份和机械性能见表 2。

三、实 验 过 程

1、辐照 八组试样分两次在游泳池式轻水堆 B⁵ 孔道中辐照。各组样品在孔道

中位置及相应通量如图 1 所示。辐照温度为 $270 \pm 15^\circ\text{C}$ 。为使孔道上、下各部分温度均匀，在辐照装置的上、中、下三段分别装了三个电炉。样品主要靠 γ 加热，不足部分由电炉供给。温度的均匀性：径向温差为 $7-12^\circ\text{C}$ ；轴向温差为 5°C ，满足了任务要求 ($\pm 15^\circ\text{C}$)。

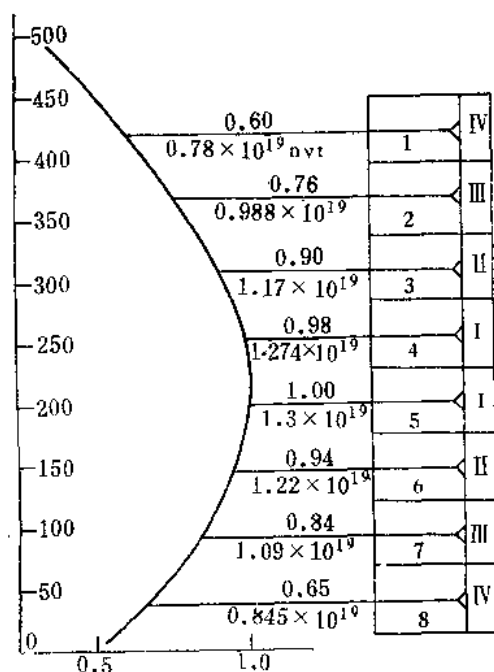


图 1 辐照位置与通量图

- 1——高低磷手工焊；
- 2——高低 Ni 新 153；
- 3——250 焊剂 S271HAZ；
- 4——老 153 熔合线；
- 5——老 153 熔合线；
- 6——250 焊剂 S271HAZ；
- 7——高低 Ni 新 153；
- 8——高低部手工焊。

辐照通量是利用 $^{24}\text{Mg}(n, p)^{24}\text{Na}$ 反应，先测出孔道轴向分布曲线，由开堆的兆瓦日计算得到的。

为克服由于物理特性造成的阴、阳面温度和通量的差别，辐照到半个周期时，将辐照装置旋转 180°C 。

2、冲击实验 当快通量 ($> 1\text{MeV}$) 达到 $1.3 \times 10^{19} \text{ nvt}$ 以后，从堆中取出辐照装置。衰减数月后，在热室中取出试样，运至半热室，在 JB30 冲击机上进行实验。高温冲击实验，用电炉加热试样；低温实验，用液氮气流冷却样品。样品达到要求温度后，保温半小时，然后进行冲击。实验的重点是测量转变点，在此处所用样品数量较多。

四、实验结果

图 2 至图 9 为实验得到的八条冲击值-温度曲线。试样辐照前后的冲击性能见表 2。分析实验结果，我们可以看到：

1、实验中所用的 548 焊丝配合六种不同焊剂的焊缝，经 270°C ， $10.8-1.31 \times 10^{19} \text{ nvt}$ 辐照后，脆性转变温度都显著地增加了，说明辐照后材料变脆了。其增加的幅度比母材——S271 钢大得多。辐照后，脆性转变温度最高的是 250 焊缝， $\Delta T = 32^\circ\text{C}$ 。它的弹性破断转变温度 $\text{FTE} = 65^\circ\text{C}$ 。设计要求要低于 100°C 。所以，它们都能满足设

表 2 焊缝的成分、工艺、性能
(辐照温度为 $270 \pm 15^\circ\text{C}$)

材 料	辐照 通量, 10 ¹⁹ nvt	脆性转变点		焊缝的主要成份, %						常温机械性能				焊后热处理工艺		
		辐照 前, °C	辐照 后, °C	辐照 增值 后, °C	C	Si	P	S	Mo	Ni	Mn	σ _s	σ _b		δ ₅	ψ
250 焊缝	1.2	-32	32	64	0.05	0.22	0.015	0.008	0.62	1.42	1.68	56.5—	65.5—	22.5—	68—	530°C×50小时+
老153 焊缝	1.3	-20	23	43	0.05	0.32	0.017	0.006	0.64	1.30	1.34	55.5—	61.5	26.0	73	610°C×8小时,空冷
新153(高 Ni)焊缝	1.04	-40	23	63	0.05	0.34	0.017	0.006	0.69	1.49	1.50	60.5	60.5	26.2	70.0	#
低Ni新 135焊缝	1.04	-38	-2	36	0.05	0.34	0.017	0.006	0.69	1.0	1.50	57.5—	65.0—	21.5—	71.5	530°C×50小时+ 610°C×20小时,空冷
高P手工 焊缝	0.813	-28	22	50	0.046	0.326	0.020	0.008	0.48	1.41	1.41	58.0	67.0	23.0	610°C×23小时,空冷	530°C×50小时+
低P手工 缝焊缝	0.813	-28	5	33	0.054	0.326	0.010	0.008	0.48	1.41	1.41		68.5—	22.2—	69.0—	530°C×50小时+ 610°C×20小时,空冷
熔合线 S271热 影响区	1.3 1.2	-34 -80	-5 -56	29 24									71.2	23.7	71.5	
S271	3.59	-49	-22.5	26.5	0.21		0.004			0.77	1.1					

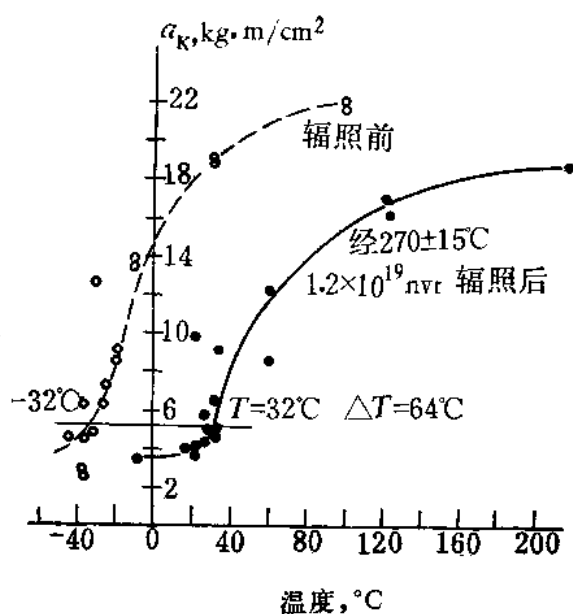


图2 250焊缝辐照前后转变曲线

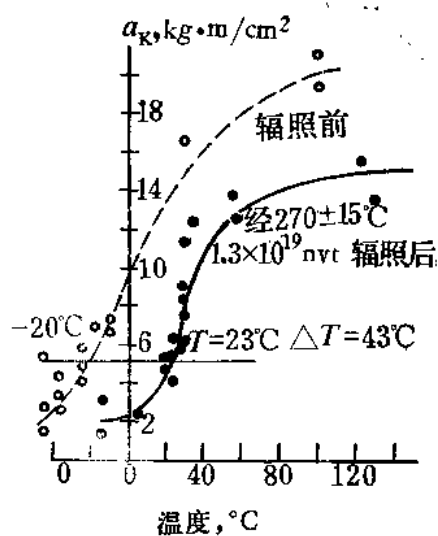


图3 老153焊缝辐照前后转变曲线

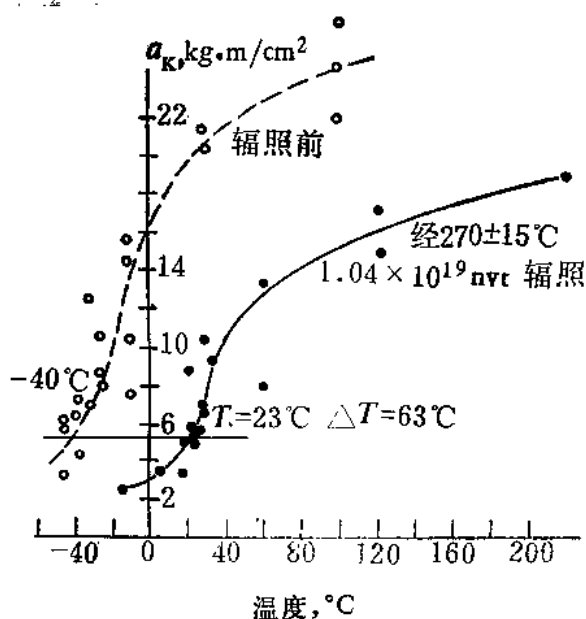


图4 新153焊缝辐照前后转变曲线

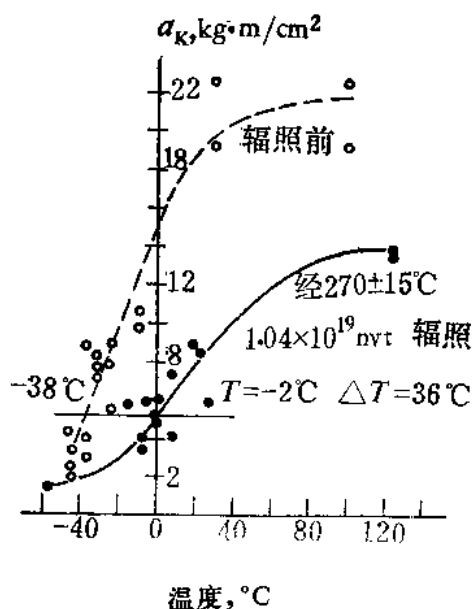


图5 低Ni新153焊缝
辐照前后转变曲线

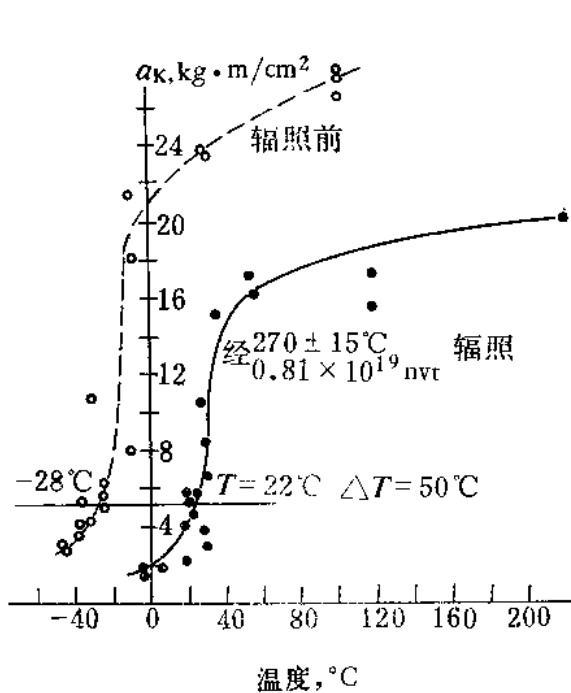


图6 高磷手工焊辐照前后转变曲线

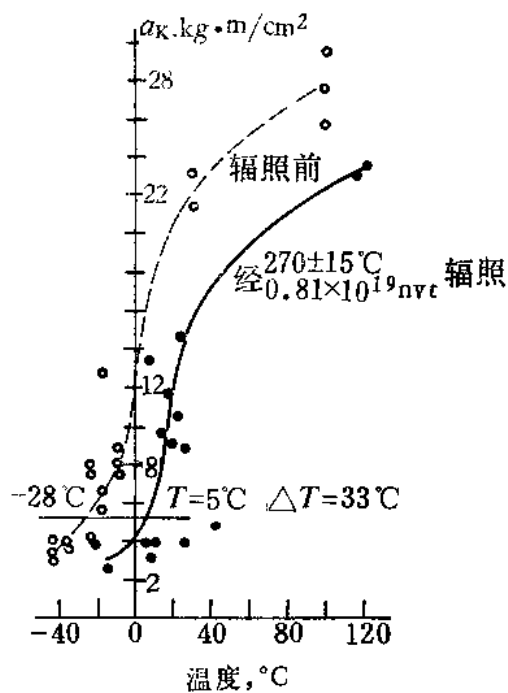


图7 低磷手工焊缝辐照前后转变曲线

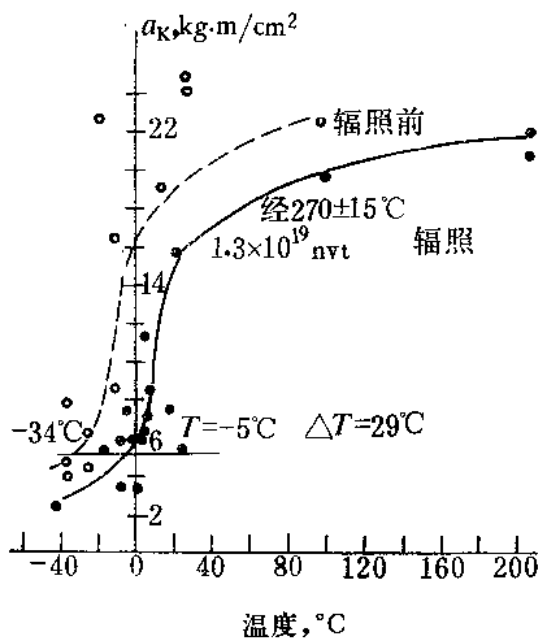


图8 熔合线辐照前后转变曲线

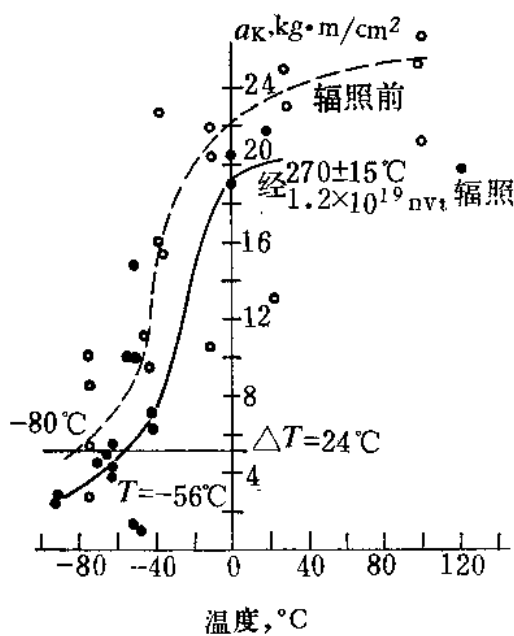


图9 S 271 热影响区辐照前后转变曲线

计要求。

2、合金成份的影响

(1) Ni 和 Mn: 从实验结果中看到, 250 焊缝、高 Ni 新 153 焊缝辐照后脆性转变温度的增值, 都比老 153 焊缝大。从 250 焊缝和老 153 焊缝比较看来, 它们的焊接工艺是相同的, 从它们所含的合金元素的含量上看, 除 Ni 和 Mn 以外也基本相同。250 焊缝含 Ni 和 Mn 分别比老 153 多 0.12% 和 0.34%。由于 Ni 和 Mn 有降低转变点的作用, 所以冷态的 250 焊缝转变点低。辐照以后正相反, 250 焊缝试样的转变点比老 153 高了 9°C。这说明 Ni 和 Mn 对辐照有害, 它们增加了材料的辐照效应。新 153 焊缝含 Ni 和 Mn 比老 153 高 (Ni 高 0.19%、Mn 高 0.16%), 辐照以后, 它的脆性转变温度的增值比老 153 高。从高 Ni 新 153 焊缝和低 Ni 新 153 焊缝的比较中, 使我们更清楚地看到 Ni 对辐照的有害作用。这两组试样的辐照温度和通量相同, 焊接工艺也相同, 成份上除 Ni 的含量差 0.49% 外, 其它成份是一样的。高 Ni 的转变温度增值达到 63°C, 低 Ni 的只有 36°C。

在我们对国产压力壳钢辐照性能的研究中, 也得到了 Ni, Mn 对辐照有害的结果^[4]。

Ni 和 Mn 是扩大 γ 相区的元素, 有降低 A_3 点的作用。辐照过程中, 在快中子所引起的“热峰”的作用下, 出现高于奥氏体化温度的微区数量, 由于 A_3 点的降低而增加了, 淬火后, 产生晶格畸变的数量也随之增加了。所以 Ni, Mn 含量高的钢辐照效应大。

(2) P: 比较高低磷手工焊缝辐照前后的情况, 看到低磷的辐照效应小。这两种焊缝除磷的含量不同外, 其它的情况都相同。辐照前, 脆性转变温度都是 28°C。辐照后, 高磷的 T 为 22°C, $\Delta T = 50^\circ\text{C}$; 低磷的 T 为 5°C, $\Delta T = 33^\circ\text{C}$ 。

磷是弥散在基体中的, 它能俘获点缺陷, 形成一种较稳定的难以退火的复杂缺陷。辐照给它创造了有利条件, 在快中子轰击下, 钢中产生的主要缺陷就是点缺陷。这就使得磷能更容易地俘获点缺陷, 形成稳定的复杂缺陷, 阻碍了位错运动, 导致材料硬化, 脆性转变点升高。

五、结 语

最后应说明的是, 由于焊缝是分层多道焊接的, 工艺和成份波动较大。因此, 实验数据比较分散。上述结果尚需进一步实验, 加以补充和修正。

参 考 文 献

- [1] J. R. Hawthorne, Steels Symp. on Steels for reactor pressure circuits, London, England, p. 343-369.
- [2] L. E. Steele, NRL Report 5179, Naval Research Laboratory, 27, May, 1960.
- [3] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 1965, section III, p. 11.