

CNIC-01231

IAE-0180

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE
AND TECHNOLOGY REPORT

LT-21 铝合金堆内挂片腐蚀研究

STUDY ON CORROSION OF LT-21 ALUMINIUM
ALLOY SAMPLES HUNG IN REACTOR

(In Chinese)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01231 IAE-0180: LT-21 铝合金堆内挂片腐蚀研究/沙仁礼等著. —北京:原子能出版社, 1998. 2

ISBN 7-5022-1778-9

I. 中… II. 沙… III. 核技术-研究报告 中国 IV. TL

2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 25242 号

LT-21 铝合金堆内挂片腐蚀研究

沙仁礼等著

©原子能出版社, 1997

原子能出版社出版发行

责任编辑: 武洁

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 1/16·印张 1/2·字数 13 千字

1998 年 2 月北京第一版·1998 年 2 月北京第一次印刷

定价: 5.00 元



沙仁礼：中国原子能科学研究院副研究员。1964 年毕业于原苏联莫斯科门捷列夫化工学院辐射化学专业。
SHA Renli; Associate professor of China Institute of Atomic Energy. Graduated from USSR Moscow Mendeleev Chemical-Technology Institute in 1964, majoring in radiation chemistry.

CNIC-01231

IAE-0180

LT-21 铝合金堆内挂片腐蚀研究

沙仁礼 朱宝珍 刘景芳 金华晋 王玉林

(中国原子能科学研究院, 北京)

摘 要

试验研究了重水研究堆内壳用 LT-21 铝合金堆内挂片的辐照腐蚀性能。堆内重水维持正常水质标准, $[\text{Cl}^-] \leq 0.1 \times 10^{-6}$, $[\text{Cu}^{2+}] \leq 0.05 \times 10^{-6}$, 重水温度为 $5 \sim 90^\circ\text{C}$, 重水流速 $0.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 重水由氦气覆盖。挂片在堆内重水中暴露时间大致为 1, 2, 3, 4, 5 年, 中子注量分别为 0.94×10^{21} , 1.42×10^{21} , 1.96×10^{21} , 2.68×10^{21} , $3.21 \times 10^{21} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。LT-21 铝合金的均匀腐蚀速率 $\leq 1 \mu\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$, 点腐蚀轻微, 5 批样品的腐蚀氧化膜厚度分别为 3.1, 5.7, 5.5, 10.0, $12.5 \mu\text{m}$ 。

Study on Corrosion of LT-21 Aluminium Alloy Samples Hung in Reactor (In Chinese)

SHA Renli ZHU Baozhen LIU Jingfang JIN Huajin WANG Yulin
(China Institute of Atomic Energy, Beijing)

ABSTRACT

The corrosion performance of LT-21 aluminium alloy samples hung in HWRR (heavy water research reactor) is studied. Heavy water quality in reactor has been maintained according to water quality standards, in which $[Cl^-] \leq 0.1 \times 10^{-6}$, $[Cu^{2+}] \leq 0.05 \times 10^{-6}$. Temperature of the heavy water is $5 \sim 90^\circ C$. The flow velocity is $0.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Heavy water was covered by helium. Exposure time of the samples, which were divided in five batches, hung in HWRR are about 1, 2, 3, 4, 5 a, respectively. Neutron fluence of the samples are 0.94×10^{21} , 1.42×10^{21} , 1.96×10^{21} , 2.68×10^{21} , $3.21 \times 10^{21} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$, respectively. General corrosion rate of LT-21 aluminium alloy $\leq 1 \mu\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$. Pitting corrosion was slight. The values of oxide film thickness on sample surface for five batches are 3.1, 5.7, 5.5, 10.0, 12.5, respectively.

引言

我院 101 堆系重水研究堆, 其内壳材料为铝-镁-硅系铝合金。主要成分和国外 CAB-1 铝合金相当 (参见表 1)。

表 1 101 堆内壳铝合金 LT-21 及 CAB-1 铝合金成分

样品牌号	成分/%								余量
	Fe	Si	Mg	Cu	Ti	Zn	Cr	Mn	
LT 21	≤0.2	0.6/1.2	0.45/0.9	≤0.01	≤0.01	≤0.03	Ni: ≤0.03		Al
CAB-1	0.2	0.6/1.2	0.45/0.9	0.01	0.01	0.03		0.01	Al

101 重水研究堆内壳在使用寿期内和重水相接触, 重水温度在 5~90℃ 范围内波动。早期的试验研究表明, 在高纯水中绝大多数铝合金在 50℃ 以下发生的腐蚀主要是点腐蚀, 在 50~150℃ 范围内以均匀腐蚀为主^[1~5]。由此, 可初步推测 101 堆内壳的主要腐蚀形式是点腐蚀和均匀腐蚀。点腐蚀严重时会引起穿透, 从而发生重水泄漏, 因而具有更大的危险性。

101 堆内壳封闭在堆外壳的内部, 其间还有热屏蔽、生物屏蔽。反应堆一投入运行, 对堆内壳进行检验极为困难。为确保反应堆的安全运行, 除了对重水水质进行有效监督外, 还应作堆内挂片试验及定期检测分析。它不失为监督相近工况条件下堆内壳状态的一种有效的方法。为此, 在 101 堆内壳内安排了 5 组 LT-21 铝合金挂片, 进行堆内辐照腐蚀试验。暴露周期大致为 1, 2, 3, 4, 5 年。现将堆内壳 LT-21 铝合金堆内挂片辐照腐蚀试验研究工作及其结果叙述如下。

1 堆内挂片试验条件及检验研究方案

1.1 挂片试样材料及规格

LT-21 铝合金挂片试样材料与 101 堆内壳用材料为同一批料。样品规格为 40 mm×30 mm×4 mm。样品试验前经常规清洗、干燥等处理。

1.2 辐照架

辐照架用工业纯铝制作。上、下两端定位环与对称两支柱焊接, 上环中心有一横杆。铝合金样品用工业纯铝丝隔开, 分 2 排吊挂于辐照架支柱上 (见图 1)。辐照架经钝化处理。环内孔 (φ28) 为重水流道。

1.3 堆内辐照管道

辐照管道由 101 堆工艺管改制 (φ53×1.5, 长 5.3 m)。为使重水在管内流动, 在管壁上开 32 个孔 (φ6~10 mm), 下端有排水孔 1 个 (φ3 mm), 上部有通气孔 2 个 (φ4.1 mm)。

辐照管道内由下而上安放 5, 4, 3, 2, 1 号辐照架。辐照时间最短的置于最上端, 辐照时间最长的置于最下部。辐照管道置于 101 堆 17 号孔道位置。辐照到预定时间后, 样品架出堆, 经一定时间“冷却”后进行辐照后检验。

1.4 堆内辐照介质条件

1.4.1 水质条件

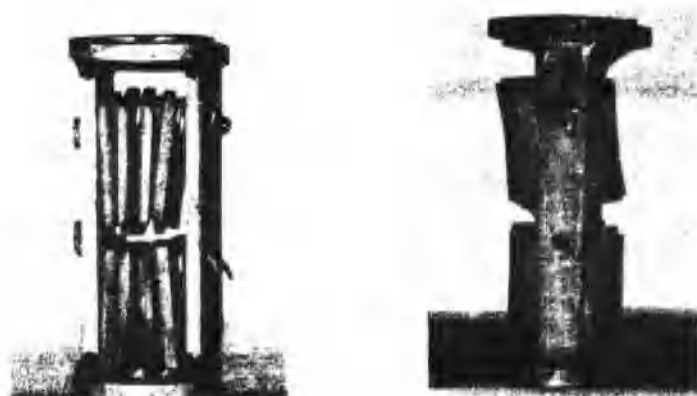


图1 LT-21 铝合金堆内挂片装置

LT-21 铝合金挂片试样处于 101 堆内壳重水介质中, 样品挂片试验期间的水质条件列于表 2。

表 2 LT-21 铝合金挂片试验期间水质条件^{*}

批 次	辐照延烧 时间/d	重水质量 分数/%	pH	电阻率 $\Omega \cdot \text{cm}$	成 分 / 10^{-8}					
					Cl ⁻	Fe	Pb	Cd	Cu	总固
1	0~475	98.75~98.795	9.90~6.60	$9.1 \times 10^4 \sim 2.2 \times 10^6$	$<0.1^{**}$	<1.25	<0.75	<0.625	除第 110 天 ^{***} <1.25 外, 其余 <0.05	39.36~289.5
2	0~774	98.76~98.795	9.90~7.67	同上	<0.1	同上	同上	同上	同上	7.37~289.5
3	0~1128	98.67~98.795	9.70~7.67	同上	<0.1	同上	同上	同上	同上	5.39~289.5
4	0~1535	98.67~98.795	9.54~7.67	同上	<0.1	同上	同上	$<0.625 \sim 5.8$	同上	同上
5	0~1845	98.66~98.795	9.54~7.67	同上	<0.1	同上	同上	$<0.625 \sim 5.8$	同上	2.30~289.5

* 挂片试验期间重水中氧含量未测, 此前 7 年测量氧含量为 $(0.21 \sim 5.15) \times 10^{-6}$, 依重水系统开盖次数及状况而变化。

** 当天补充重水 53 L。

*** 由于受离子选择电极检测方法的局限, 只能给出 $[\text{Cl}^-] < 0.1 \times 10^{-8}$ 的下限值, 新近建立离子色谱法测量 1996 年堆内重水中 Cl^- 含量为 $(10 \sim 20) \times 10^{-8}$ 。

1.4.2 重水温度

反应堆内壳重水温度随反应堆工况条件 (停堆、开堆、堆功率变化、重水循环泵工作与否等) 变化而变化, 温度在 $5 \sim 90^\circ\text{C}$ 之间, 呈较频繁的周期性变化。堆运行时的温度范围 $45 \sim 60^\circ\text{C}$ 。

1.4.3 重水压力

辐照管道中的重水压力在 0.22 MPa 左右。

1.4.4 重水流速

辐照管道内样品表面的重水流速, 按照堆内壳重水流率 ($\sim 460 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), 辐照管道开孔数量、位置和孔径所得计算值为 $0.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 和堆内壳重水流速 $0.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 相当^[8], 重水循环泵停止运行时辐照管内重水处于自然循环状态。

1.4.5 重水覆盖气体

重水极易被大气污染, 为确保堆安全运行, 必须保持重水水质稳定。因此, 重水系统

用纯氮气覆盖。

1.4.6 堆内辐照条件

101 堆 17 号辐照孔道中子注量率列于表 3

表 3 101 堆 17 号孔道中子注量率/ $\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kW}^{-1}$

中子能谱组别	热中子, ϕ_{th}	超热中子, ϕ_{epi}	快中子, ϕ_{f} $E \geq 2.95 \text{ MeV}$	快中子, ϕ_{f} $E \geq 1 \text{ MeV}$
中子注量率	0.62×10^{10}	0.2×10^{11}	0.44×10^8	1.41×10^8

根据堆运行工况计算得出不同批次挂片样品经受照射的中子注量, 参见表 4。

表 4 LT-21 铝合金挂片试样堆内辐照中子注量/ $\text{n} \cdot \text{cm}^{-2}$

挂片试验批次	ϕ_{th}	ϕ_{epi}	$\phi_{\text{f}}, E \geq 2.95 \text{ MeV}$	$\phi_{\text{f}}, E \geq 1 \text{ MeV}$
1	6.96×10^{20}	2.23×10^{20}	4.92×10^{18}	1.58×10^{19}
2	1.05×10^{21}	3.37×10^{20}	7.42×10^{18}	2.38×10^{19}
3	1.45×10^{21}	4.68×10^{21}	1.03×10^{19}	3.30×10^{19}
4	1.98×10^{21}	6.39×10^{20}	1.41×10^{19}	4.50×10^{19}
5	2.37×10^{21}	7.65×10^{20}	1.68×10^{19}	5.40×10^{19}

1.5 堆内辐照腐蚀后检验方法与步骤

鉴于辐照后辐照架和挂片的感生放射性强,, 建立了相应的防护屏蔽。检测步骤如下:

出堆后和“冷却”一定时间后的辐照架辐射强度测量—辐照架照相—从辐照架上拆下样品—取垢状粉样并作多道能谱分析—样品照相—挂片清洗—脱垢—称量—宏观检查—安装、调试带屏蔽显微镜及金相法测点坑深度、照相—机械探针法点坑深度测量—TC 203 型智能涂层测厚仪测腐蚀氧化膜厚度。

2 试验检测结果及讨论

2.1 辐照架出堆及“冷却”不同时间后的辐射强度

辐照架出堆后和“冷却”不同时间后的辐射强度分别列于表 5 和表 6。各批样品“冷却”不同时间后的辐射强度列于表 7。

表 5 不同批次辐照架出堆后的辐射强度

批 次	1	2	3~5
照射量率/ $\mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	2.06	2.06	≥ 5.16

表 6 辐照架“冷却”不同时间后的辐射强度

批 次	“冷却”时间/d	照射量率/ $\mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
1	3152	0.13~0.18
2	2488	0.15~0.39
3	2134	0.21~0.46
4	1717	0.36~0.46
5	1407	0.46~0.52

表 7 堆照 LT-21 铝合金挂片试样“冷却”不同时间后的辐射强度

批 次	冷却时间/d	照射量率/ $\mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	覆盖 20 mm 厚铅玻璃板后的 照射量率/ $\mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
1 (4 片)	3157	0.012	0.006
2 (4 片)	2493	0.012	0.006
3 (3 片)	2139	0.026	0.010
4 (3 片)	1722	0.052	0.015
5 (3 片)	1412	0.052	0.015

从辐照架及挂片样品上掉落下来的垢状物呈小块或粉状,较疏松,50 mg 左右的沉积物辐射强度均为 $100 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。根据 HPGc γ 谱仪辐射强度测量结果,表明来自重水系统钢结构部件腐蚀产物中的 ^{60}Co γ 谱特别强,把其他的 γ 谱都覆盖了。表明它是影响系统维护、维修的主要因素。

单纯的 LT-21 铝合金样品 (3~4 片) 的辐射强度接近整个样品架的十分之一。

2.2 辐照架外观

辐照架呈浅灰色,表面有薄层沉积物,参见图 1。

2.3 LT-21 铝合金样品外观

LT-21 铝合金样品已失去金属光泽,表面已氧化成浅灰色的氧化膜,并有不均匀的垢状沉积物。有的样品表面的沉积物按水流向呈水纹状。样品上孔周围、铝丝下方、样品上端面沉积物多,有的样品中部出现叶条状水垢,有的样品上端面上的水垢达 1.2 mm 左右,参见图 (2~6),因表面不平整、光线漫反射效果,色调不一致。有的样品表面有浅棕色锈斑,锈斑分布情况列于表 8。

表 8 LT-21 铝合金样品上锈斑分布情况

批次	1	2	3	4	5
锈斑数	其中一片有一锈斑	2-7、2-8 号背面各有一锈斑	3-7 正面有一锈斑	无	5-3 号正面有 3 锈斑

图 2 LT-21 铝合金 101 堆内辐照
腐蚀样品 (1 年)图 3 LT-21 铝合金 101 堆内辐照
腐蚀样品 (2 年)



图4 LT-21 铝合金 101 堆内辐照腐蚀样品 (3 年)



图5 LT-21 铝合金 101 堆内辐照腐蚀样品 (4 年)



图6 LT-21 铝合金 101 堆内辐照腐蚀样品 (5 年)

除垢后仅有 2-7, 2-8, 3-7 三个样品各有一锈斑, 其余锈斑消失, 未发现新蚀点。这可能是沉积物含铁质, 产生浅棕色锈斑带来的假象。上述有厚垢的区域, 除垢之后露出金属光泽基体。参见图 7。

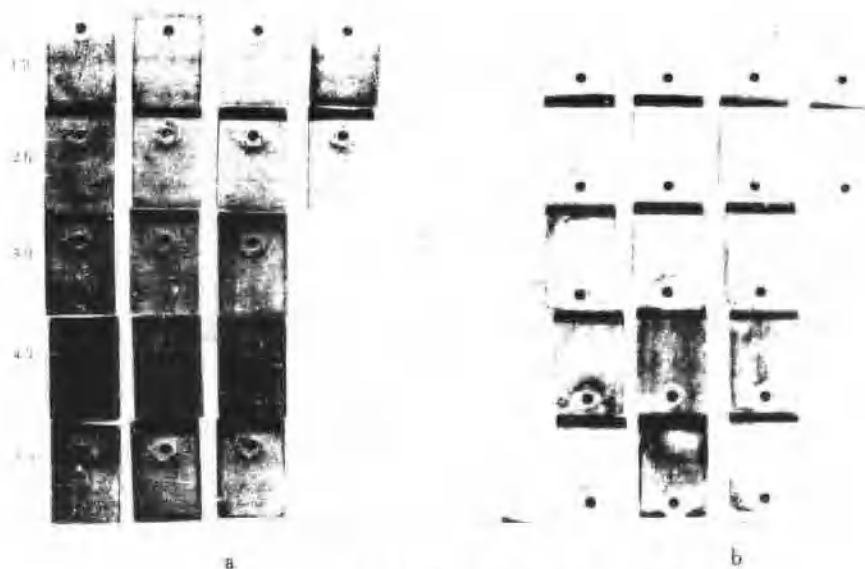


图7 LT-21 铝合金 101 堆内辐照腐蚀样品 (脱垢后)

a-正面 b-背面

2.4 LT-21 铝合金均匀腐蚀速率

根据样品原始质量、表面积和堆照后的样品质量,用增重法求出试验样品均匀腐蚀速率,参见表9和图8。

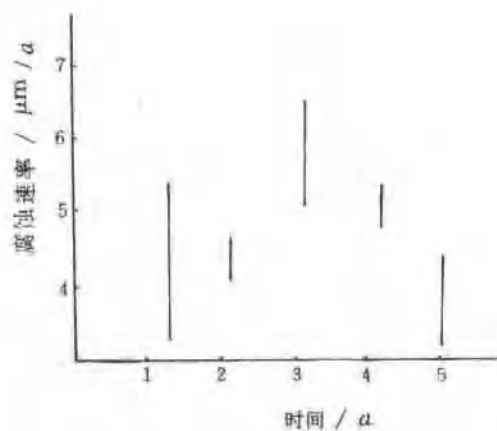


图8 LT-21 铝合金堆内辐照腐蚀均匀腐蚀速率与时间的关系
增重法均匀腐蚀计算公式为:

$$K = \Delta G \frac{2A}{M - 2A} \quad (1)$$

式中: K —— 金属损失量, g;

ΔG —— 腐蚀增重, g;

A —— 铝的相对原子质量, 26.97;

M —— 腐蚀产物 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)^[4] 的相对分子质量, 156; 对单水化合物 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), $M=119.94$ 。

根据铝合金的损失量和它的密度, 可求出失去铝合金的体积, 再除以表面积和时间可求出腐蚀深度和腐蚀速率。铝合金的密度为 $\rho(20^\circ\text{C}) = 2.702 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

从表 9 可以看出 LT-21 铝合金在堆内挂片试验条件下腐蚀速率极低, $< 0.001 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 按金属耐腐蚀标准, 属于 1 级, 完全耐蚀^[3]。并且长期 (4、5 年) 辐照腐蚀试验的均匀腐蚀速率呈下降趋势, 表明表面形成的氧化膜达到一定厚度后能明显起到减缓基体进一步氧化的作用。

该试验结果比相近条件下轻水中的腐蚀速率低得多, 这与以前的研究结果相一致。这可能由于重水系统覆盖氮气、氧含量少的缘故。

2.5 LT-21 铝合金点蚀深度检测

用带屏蔽的 XJB-1 金相显微镜观察样品表面状态和蚀孔 (图 9~13), 并测量了点坑深度, 测量结果参见表 10。

表 9 LT-21 铝合金挂片试样均匀腐蚀速率

样品编号	脱垢后样品质量增加值/g	样品表面积/ cm^2	辐照腐蚀时间/s	均匀腐蚀速率			
				$\mu\text{m}/\text{a}$	平均值 $\mu\text{m}/\text{a}$	$\text{mg}/(\text{dm}^2 \cdot \text{d})$	平均值 $\text{mg}/(\text{dm}^2 \cdot \text{d})$
1-5	0.00505	30.01	1.30	0.25	0.43	0.019	0.032
1-6	0.01006	29.92		0.51		0.038	
1-7	0.00560	30.05		0.28		0.021	
1-8	0.01370	30.16		0.68		0.050	
2-5	0.01344	30.74	2.12	0.41	0.41	0.030	0.031
2-6	0.01356	29.80		0.42		0.031	
2-7	0.00954	30.14		0.29		0.021	
2-8	0.01730	30.03		0.53		0.039	
3-5	0.02918	30.23	3.09	0.62	0.70	0.046	0.052
3-6	0.02811	29.91		0.60		0.044	
3-7	0.04197	30.07		0.89		0.66	
4-4	0.03910	30.03	4.20	0.54	0.61	0.040	0.045
4-5	0.03910	30.03		0.61		0.045	
4-6	0.04235	29.03		0.67		0.050	
5-1	0.03663	30.25	5.05	0.47	0.54	0.035	0.040
5-2	0.02810	29.98		0.36		0.027	
5-3	0.06178	30.17		0.79		0.059	

* LT-21 铝合金样品绝大部分时间处于 $60 \sim 70^\circ\text{C}$ 以下, 少部分时间处于 $70 \sim 90^\circ\text{C}$ 范围内, 在后一种情况下以形成铝单水化合物为主。由此假定单水氧化铝的质量分数占 20%, 这时 $K=0.59 \times \Delta G$, 相应腐蚀速率增加至 1.11 倍^[7]。

表 10 LT-21 铝合金样品上点蚀坑深度

样品编号	2-7	2-8	2-7
点蚀坑深度/ μm	3	66	57



图 9 LT-21 铝合金堆内辐照腐蚀挂片腐蚀形貌, 135×



图 10 LT-21 铝合金堆内辐照腐蚀挂片 2-7[#] 点蚀坑形貌, 135×



图 11 LT-21 铝合金堆内辐照腐蚀挂片 2-8[#] 点蚀坑形貌, 135×



图 12 LT-21 铝合金 2-7[#] 点蚀坑形貌, 225×, a-坑面, b-坑底



图 13 LT-21 铝合金 2-8° 点蚀坑形貌, 225×, a-坑面, b-坑中, c-坑底

2-7 样品上点蚀坑面积稍大, 深度很浅, 而 2-8, 3-7 号样品上点蚀深度较大, 检测结果表明点蚀深度比均匀腐蚀深度大得多, 但点蚀坑最深的也只有 66 μm , 并鉴于点蚀坑数量少, 而且不是出现在辐照腐蚀延续时间最长的样品上, 故其危害性不大。

2.6 LT-21 铝合金试样氧化膜厚度检测

以样品 4 角附近选对称的 4 点作测点, 用 TC-203 型智能涂层测厚仪测量了 LT-21 铝合金挂片试样表面氧化膜厚度, 参见表 11 和图 14。结果表明随辐照时间的增加, 氧化膜厚度近似成线性增加。

表 11 LT-21 铝合金挂片试样氧化膜厚度测量结果 μm

样品编号	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	平均值	各批样品平均值
1-5	3.0	3.0	3.2	3.2	3.1	3.1
1-6	3.7	3.7	5.0	3.1	3.9	
1-7	4.5	0.0	1.0	3.0	2.1	
1-8	4.3	1.0	3.0	5.0	3.3	
2-5	4.0	4.5	4.5	4.6	4.4	5.7
2-6	3.7	5.7	6.2	6.2	5.0	
2-7	6.2	3.4	6.5	6.7	5.7	
2-8	5.2	8.0	8.0	6.0	5.8*	
3-5	4.0	4.2	3.8	4.3	4.1	5.5
3-6	6.5	4.2	4.6	6.0	5.3	
3-7	6.3	5.0	8.6	8.3	7.1	
4-4	10.1	8.1	12.6	9.0	10.0	10.0
4-5	8.0	7.1	12.0	10.1	9.3	
4-6	14.8	9.7	12.4	7.2	8.2	
5-1	6.0	7.2	12.4	7.2	8.2	12.5
5-2	5.0	9.2	5.0	9.0	7.1	
5-3	25.2	23.6	16.6	23	22.1	

* 距中间部位有叶形垢, 较厚, 脱垢后露出不平整金属光泽叶形面, 此处膜厚度测量值为 0.1, 1.0, 2.0, 1.5 μm , 平均 1.1 μm

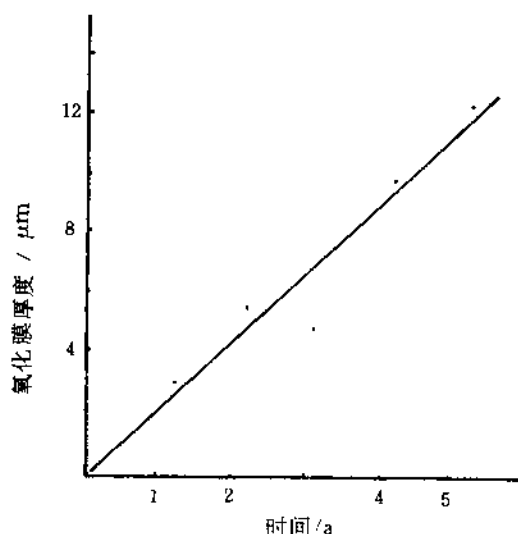


图 14 LT-21 铝合金堆内挂片氧化膜厚度与堆辐照时间的关系

从氧化膜厚度测量结果可以看出,氧化膜厚度具有很大的不均匀性。特别是样品中部垢厚,热传导性差,辐射转化的热,使样品的温度比重水高得多,加速了厚垢周围铝合金的氧化,而有厚垢的地方阻碍了氧的扩散和铝合金基体的氧化,脱垢后露出金属光泽¹⁸,该处的氧化膜很薄,只有 $\sim 1.1 \mu\text{m}$ 。在 90°C 以下温度水中铝合金经长期浸泡,氧化膜厚度也只有几个 μm ,而 LT-21 铝合金堆内挂片试样长期(4~5 年)试验后氧化膜厚度达到 $10 \mu\text{m}$ 以上,表明铝合金样品表面温度远高于 90°C 。通常认为辐照对铝合金氧化膜的保护性能无显著影响¹⁹。

3 结论

- (1) LT-21 铝合金在堆内工况条件下,均匀腐蚀不严重,可以认为是完全耐蚀的;
- (2) LT-21 铝合金在堆内工况条件下,点腐蚀轻微,危害性不大。
- (3) 堆内壳重水流速低,无冲刷腐蚀问题。
- (4) 从腐蚀状况而言,中短期内,101 重水研究堆堆内壳看不出会引发危及堆安全的蚀孔大泄漏危险。

参加并协助本项工作的还有杨芝凤、张淑卿、杨道良、许汉铭和堆工所 101 室化学组、技管组、大厅组、剂量组贾占礼、韩国锋、王文江、侯友苏、杨金明、张体新等同志。

参考文献

- 1 Boeck H, Hammer J. Optical Inspections of Research Reactor Tank and Tank Components. AIAU 88306, 1988, 179
- 2 Hang R M, Zydes F C. Corrosion of Aluminum in High Temperature Water II, KAPL-1741, 1957
- 3 陈鹤鸣,马春来,白新德.核反应堆材料腐蚀及其防护,北京:原子能出版社,1984,309
- 4 Draley J E. 1958 AEC(ONF, 15/1 Vol. 5 P113
- 5 许维钧,马春来,沙占礼.核工业中的腐蚀与防护,北京:化工出版社,1993,87-95

- 6 仲言. 重水反应堆, 原子能出版社, 1989. 42
- 7 沃伦依·贝里. 核工程中的腐蚀, 丛一译, 北京: 原子能出版社 1977. 135
- 8 ISO 8407: 1991 (E)
- 9 沃伦依·贝里. 核工程中的腐蚀, 丛一译 北京: 原子能出版社 1977. 154

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN 7-5022-1778-9



9 787502 217785 >