

CNIC-01206

NFE-0009

核元件定位格架钎焊的快速冷却工艺研究

王宝林 顾建华

(核工业宜宾核燃料元件厂)

摘 要

核元件定位格架钎焊时效后真空冷却生产周期长,为此,采用了在冷至 550 ℃, 600 ℃, 650 ℃充入 0.06, 0.08, 0.10, 0.12 MPa 的氩气快速冷却,结果证明,冷却时间由真空冷却的 15~16 h 缩短到 2.5~3 h,使钎焊时效生产周期由真空冷却的 33 h 缩短到 20 h。而定位格架的表面颜色、钎焊缝质量、外形尺寸、破断力和结合层厚度均达到钎焊技术要求。

Research on a Fast Cooling Process of the Spacer Grids for Nuclear Fuel Assembly after Soldering-Aging

WANG Baolin GU Jiangua
(Yibin nuclear fuel element plant, CNNC)

ABSTRACT

A fast cooling process of the spacer grids for nuclear fuel assembly after soldering-aging due to a long cycle of vacuum cooling is presented. In the process, the grids can be fast cooled down by filling with 0.06, 0.08, 0.10 and 0.12 MPa of argon into the furnace respectively at temperatures of 550 °C, 600 °C and 650 °C. As a result, the cooling time is reduced to 2.5~3 h from 15~16 h and the soldering-aging cycle is shortened to 20 h from 33 h. The grids completely meet with the requirements for soldering on surface color, welds quality, overall dimension, rupture stress and joint thickness.

引言

核燃料元件因科镍定位格架（以下简称定位格架）的钎焊时效工艺要求在时效结束后真空冷却至出炉温度，其时间长达 15~16 h，这不但严重影响生产率，还增大了设备返油污染格架的概率^[1,5]，对产品质量产生不利的影响。在国外，例如联邦德国的 RBU 公司格架的钎焊就采用快冷工艺^[2]。所谓快冷是指注入一定数量的惰性气体于冷却空间，以便改善冷却条件，提高冷却速率。

本研究是在满足定位格架钎焊技术要求的条件下，即满足格架外形尺寸、表面颜色、钎焊缝质量、破断力、结合层（含扩散区和界面区）厚度等要求，在时效后通入一定数量的惰性气体以达到快速冷却的目的。这对于缩短生产周期、提高产量、降低消耗、改善生产条件、提高产品质量都有重要意义。

1 试验

1.1 试验内容

- (1) 负载对冷却时间的影响。
- (2) 充气压力、温度对冷却时间的影响。
- (3) 充气快冷对格架外形尺寸，拉伸性能，金相组织的影响。
- (4) 气体纯度对格架表面颜色的影响。
- (5) 冷却水温、室温对冷却时间的影响。

1.2 试验装置

试验采用具有充气快冷性能的真空钎焊炉。试验装置如图 1 所示。

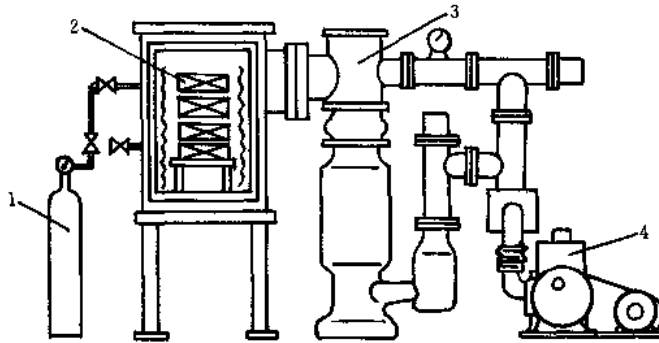


图 1 试验装置示意图

1—氩气；2—试样；3—扩散泵；4—机械泵。

1.3 试验方法

- (1) 试样：分三类，即内条带、试验格架与十字交叉试样。
- (2) 实验：氩气为冷却气体，实验工艺分为二类，一类是单时效工艺；另一类是钎焊+时效工艺。

单时效工艺使用的试样为内条带，将试样从室温升至时效温度后保温 1 h，分别随炉冷至 650 ℃、600 ℃、550 ℃后充氩气快冷。试验的目的主要是测量充氩温度、压力参数对冷却时间的影响以及氩气纯度对试样表面颜色的影响，冷却水温、室温对冷却时间的影响。

钎焊+时效工艺使用的试样为实验用定位格架和十字交叉试样。

试验工艺曲线如图 2 所示。试验的真空度为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ Pa；

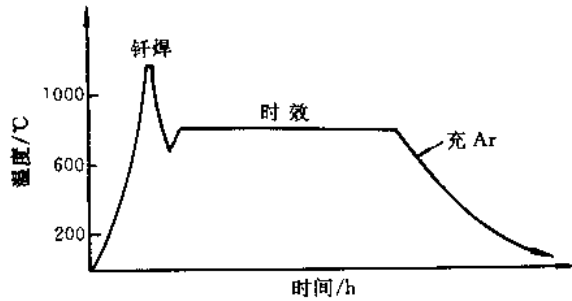


图 2 钎焊+时效工艺曲线示意图

钎焊+时效工艺试验的目的主要是测量在钎焊+时效工艺作用下，不同的充氩温度、充氩压力条件下，对试验格架外形尺寸的影响，以及对十字交叉试样拉伸破断力和金相组织、结合层厚度的影响。

2 结果与讨论

2.1 结果

(1) 满负载（格架 4、交叉试样 12）比空载冷却时间延长 16 min。

(2) 充氩压力变化不大（0.02 MPa）时，对冷却时间的影响不明显，充氩压力变化较大（0.06 MPa）时，冷却时间明显缩短 21 min。

(3) 提高充气温度冷却时间明显缩短，如从 550 ℃提高到 600 ℃后冷却时间缩短 18 min，提高到 650 ℃后冷却时间缩短 35 min。

(4) 冷却水温、室温变化对冷却时间的影响不明显（仅差 3 min）。

(5) 氩气纯度对试样表面颜色的影响：重庆钢厂产的纯度 99.99% 的氩气与西南化工研究院产的纯度 99.999% 的高纯氩气试验结果相同，试样表面均呈银白色。

(6) 充氩快冷对交叉试样性能的影响、试样的破断力及结合层厚度均达到钎焊技术要求。

(7) 充气快冷对格架外形尺寸的变化无影响。

2.2 讨论

2.2.1 充气快冷试验的理论基础

试验结果显示，充氩冷却较真空冷却缩短了 13 h（见图 3）

按照传热理论^[3]认为，高温时主要以辐射传热为主，低温时主要以对流传热为主，定位格架时效后则应以对流传热为主要传热方式。

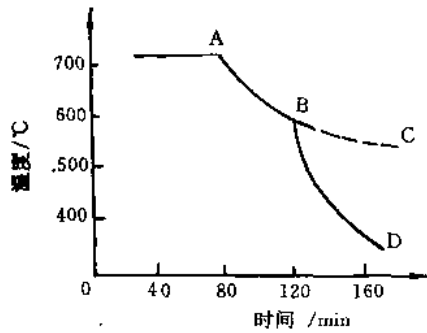


图3 充氩冷却曲线图 (炉号 S-11)

A——时效结束后开始降温点；B——充氩冷却温度点
B——D 充氩冷却曲线；B——C 真空冷却曲线。

气体的热传导按公式^[4]计算

$$Q = -k(T) A \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

$$k = \frac{1}{3} m n \bar{V} C_r \quad (2)$$

式中， Q ——热流量/W； k ——热导率/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ ；

A ——壁面积/ m^2 ； T ——温度/K；

$\frac{dT}{dx}$ ——温度梯度/ $K \cdot m^{-1}$ ； m ——分子质量/kg；

l ——平均自由程/m； n ——分子密度/ $个 \cdot m^{-3}$ ；

\bar{V} ——分子的平均速度/ $m \cdot s^{-1}$ ；

C_r ——质量热容/ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ；

由公式(1)可见，在其它参数不变的情况下提高热导率 k 即可以提高热流量。而公式(2)中在其它参数不变的情况下，提高分子密度 n 即可以提高热导率 k ，进而提高热流量。

在冷却空间充入氩气就是为了提高分子密度 n ，进而提高热导率 k ，则使热流量 Q 增大。参考文献[5]中也提到气体的热传导与压力的高低有关，在同一空间分子密度大压力高传热能力增强，则冷却时间缩短。

2.2.2 影响冷却时间的主要因素

影响冷却时间的因素有炉内负载、充氩压力、充氩温度以及冷却水温、室温。在诸因素中，较主要的是充氩的压力和温度二个参数。当温度一定，压力变化不大时，对冷却时间的影响不大。当压力一定时，温度的变化则对于冷却时间的影响较大。为提高冷却速率，在压力和温度两个参数中，提高温度参数则较容易提高冷却速率，因为根据设备结构，真空阀门性能不可能将压力提高很多。充气压力超过0.10 MPa时，设备处于高压状态（相当于压力容器条件），对安全性也要予以考虑。在为提高冷却速率的前提下，选用适当的较低的充气压力；适当地提高充气温度，例如从550℃提高到600℃（或650℃），同样可以达到提高冷却速率的目的。

至于冷却水温，室温的变化对冷却时间的影响则不是主要的。

2.2.3 格架外形尺寸变化与充氩冷却的关系

研究表明,格架钎焊时效后尺寸普遍缩小,这与参考文献[6,7]结果相一致。

定位格架钎焊时效过程中外形尺寸的变化主要决定于二个因素,第一是GH-169合金的性质,第二是格架条带的加工及格架装配的尺寸精度。

GH-169合金是一种镍基多元的时效硬化型高温合金^[8]。合金处于固溶状态时,各种合金元素在固溶体内的溶解度以及它们形成的化合物种类形状分布等随温度、应力状态、加工过程和热处理工艺的变化而变化。合金经退火及时效处理后,在基体内可析出不同类型尺寸的第二相,可能存在的第二相有体心立方晶格的 γ'' (和少量面心立方晶格的 γ' 相)、正交的 δ 相、Laves相及MX碳化物(或MX氮化物)等。对于特定的某一种热处理工艺讲,将产生某种主要的第二相。

定位格架经过钎焊时效处理后,在基体中主要析出的为体心方晶格的 γ'' 和少量的面心立方晶格的 γ' 相。析出第二相的过程也是有序化的过程, γ'' 相是有序化的 A_3B 型化合物,参考文献[6]报道,合金700℃时效, γ'' 相呈细小圆盘状共相在晶体内析出,与基体呈立方取向,其体积分数约为12%。由于 γ'' 与基体在C轴方向的错配度较大(约为2.7%),故 γ'' 相使基体膨胀。但 γ 基体晶胞自身由于原子半径较大的铌原子脱溶成 γ'' 相而点阵收缩0.2%。故GH-169合金格架外形尺寸收缩量应为上述二种效应的综合作用结果。与 γ'' 相同时析出的 γ' 相,因点阵常数与基体相近,不影响基体尺寸。

参考文献[8,9]表明,该合金的时效温度范围广,从600℃开始就有少量的 γ'' 相(和 γ' 相)析出,一直到760℃,由于 γ'' 相是属于共析扩散型析出,析出时间较长。试验证实,时间从1h到100h(甚至更长)都有第二相析出,720℃保温8h是析出第二相的峰值段,8~32h析出较慢,32~100h析出量越来越少,第二相的析出尺寸收缩。由于合金的金相组织、加工处理状况、钎焊时效中温度的不均匀性使得这种收缩也呈不均匀性。本文作者曾对格架条带的三弯弹簧在钎焊时效后高度变化研究^[10]中了解到,某些试样并不完全遵守上述的尺寸变化规律,出现弹簧高度在钎焊时效后变高的现象,这说明尺寸的变化是复杂的过程。又由于格架在装配中配合尺寸偏差(局部过紧)又加重了钎焊时效中变化的不均匀性,造成部分格架钎焊时效后的变形。

该试验是从550℃、600℃、650℃充入氩气冷却。在这个温度和较短的时间下,析出第二相的作用很微弱或已停止。充氩冷却加速了这个过程的结束,因此体积的变化并不存在,即不会增加变形量;而且,充入炉内的氩气使格架受到较均匀的多方向的气流冷却,因此也不会造成格架局部快冷面增大变形量。格架外形尺寸的变化主要是由于时效过程中析出第二相以及格架装配尺寸偏差二个因素造成的,与充氩冷却无关。

2.2.4 氩气纯度与表面颜色的关系

试验使用了二种纯度的氩气。从试验看,纯度为99.99%与99.999%的氩气其试验结果无区别。试样均呈光亮的银白色。但试验中也发现在试验件中,定位格架的颜色不如试验条带的颜色好,其原因是格架经过720℃保温8h的时效处理,在高真空(10^{-3} Pa)长时间的条件下炉内气氛(返油)污染了格架表面^[1,5]。而试验条带的颜色好,正是由于时效的作用时间短(1h或10min),减少了炉内气氛对条带污染的概率。

2.2.5 快冷与格架破断力、结合层厚度的关系

破断力、结合层厚度是衡量钎焊工艺质量的两个重要参数,与钎焊温度、时间有密切关系。格架的破断力、结合层厚度是通过随炉交叉试样性能的测量而确认的。在快冷试验的三炉交叉试样中其破断力、结合层厚度均可满足钎焊技术要求。

从金相照片图4和图5可见,快冷试样与真空冷试样的金相组织没有明显区别。这是因为在

充气温度下钎料早已固化，氩气只能影响钎焊缝的表面状态（例如颜色），而对其内部无影响。

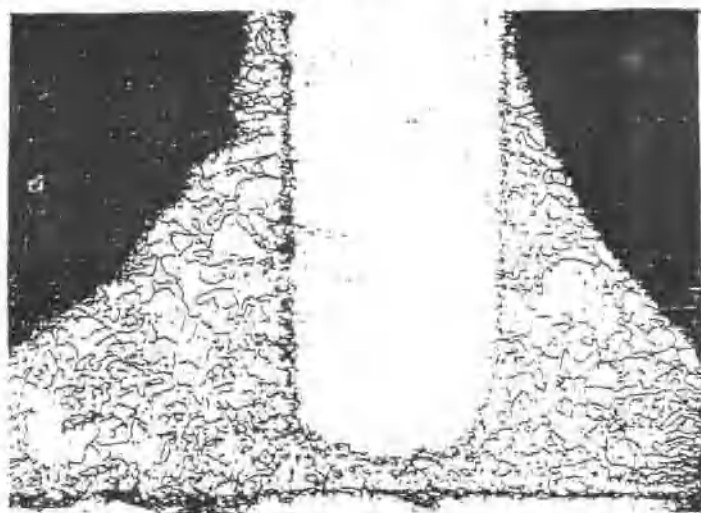


图4 快冷试样 S2-04×100

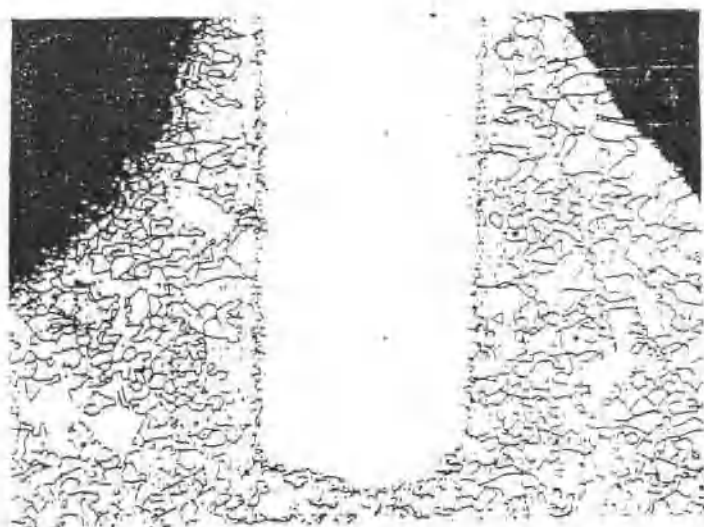


图5 快冷试样 S2-04×100

3 结论

- (1) 纯度为 99.99% 的氩气可以满足格架表面颜色的技术要求，可以用于格架钎焊快冷。
- (2) 充氩快冷对格架的外形尺寸、破断力、金相组织及结合层厚度均无影响。
- (3) 充氩快冷使格架钎焊时效的生产周期由 33 h 缩短到 20 h，对提高产量效果显著。
- (4) 充氩快冷减小了格架被污染的概率。对提高产品质量、降低成本、节约能源，改善生产

条件都有明显优点。

参 考 文 献

- 1 胡汉泉等. 真空物理与技术及其在电子器件中的应用. 上册. 第二章 清洁真空的获得. 北京: 国防工业出版社, 1982
- 2 任德芳等. 西德 RBU 燃料元件生产情况介绍, 格架制造部分, 1980. 12
- 3 薄春旭. 加热炉原理及热处理车间设备. 第二章 加热炉原理. 气体的热传导, 1956. 8
- 4 日本真空技术株式会社编, 卢永铭等译. 真空手册. 热计算的基础. 北京: 原子能出版社, 1986
- 5 孟照智编. 真空技术手册. 第一章 真空技术基础. 气体的迁移. 第二章 真空获得设备. 扩散泵. 哈尔滨: 黑龙江科技出版社, 1986
- 6 毛培德等. GH-169 合金格架片热处理后尺寸收缩问题的研究, 1979
- 7 夏成烈. 728 燃料组件定位格架点焊钎焊工艺介绍, 1984
- 8 陈景佩. 728 元件压紧弹簧热处理工艺试验报告, 1982
- 9 上钢五厂, 北京钢院. 728 工程元件棒定位格架用 GH-169 合金热处理制度的研究, 1979
- 10 王宝林. 条带的三弯弹簧钎焊时效后高度的变化对格架夹紧力的影响, 1983. 9