

# [12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 95194870.9

[45]授权公告日 2001年9月26日

[11]授权公告号 CN 1071797C

[22]申请日 1995.7.27

[21]申请号 95194870.9

[30]优先权

[32]1994.8.31 [33]US [31]08/296,933

[86]国际申请 PCT/US95/09455 1995.7.27

[87]国际公布 WO96/06956 英 1996.3.7

[85]进入国家阶段日期 1997.2.28

[73]专利权人 ABB 燃烧工程核力公司

地址 美国康涅狄格州

共同专利权人 ABB·原子有限公司

AB 桑德威克钢铁公司

[72]发明人 A·M·加德 P·鲁德林

M·迈克斯·林德贝克 H·云尼维克

E·R·布雷得利 C·M·奥伊肯

[56]参考文献

US4649023 1987. 3.10

审查员 王怀东

[74]专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

代理人 卢新华 罗才希

权利要求书1页 说明书9页 附图页数0页

[54]发明名称 含有钨和镍的锆合金

[57]摘要

一种锆合金,含有锡(Sn),含量范围是大于0.005重量%至小于1.0重量%,优选为下限大于0.1重量%至上限小于0.7重量%,最优选为下限大于0.3重量%至上限小于0.5重量%;铁(Fe),含量范围为大于0.05重量%至小于1.0重量%,优选为下限大于0.2重量%至上限小于0.5重量%,最优选为下限大于0.3重量%至上限小于0.4重量%;铬(Cr),含量范围为大于0.02重量%至小于1.0重量%,优选为下限大于0.05重量%而上限小于0.5重量%,最优选为下限大于0.1重量%至上限小于0.2重量%;硅,含量范围大于50至小于300百万分之一份(ppm),优选范围为大于70ppm至约200ppm;最优选范围为大于90ppm至约150ppm;钨(W),含量范围为大于0.01重量%至小于1.0重量%,优选为下限大于0.1重量%至上限小于0.7重量%,最优选为下限大于0.2重量%至上限小于0.5重量%;镍(Ni),含量范围为大于0.007重量%至小于0.3重

量%,优选为下限大于0.05重量%至上限小于约0.2重量%,最优选为下限大于0.08重量%至上限小于0.1重量%,平衡量的锆。

## 权 利 要 求 书

1. 一种用于轻水核芯结构部件和燃料包壳的锆合金，该合金由下列成分组成：大于 0.005 至小于 1.0 重量% 锡(Sn)、大于 0.05 至  
5 小于 1.0 重量% 铁(Fe)、大于 0.02 至小于 1.0 重量% 铬(Cr)、大于 50ppm 至小于 300ppm 硅、大于 0.01 至小于 1.0 重量% 钨(W)、大于 0.007 至小于 0.3 重量% 镍(Ni)以及平衡量锆和杂质。

2. 权利要求 1 的合金，其中所述的锡的含量为下限大于 0.1 重量%，而上限小于 0.7 重量%。

10 3. 权利要求 1 的合金，其中所述的锡的含量为下限大于 0.3 重量%，而上限小于 0.5 重量%。

4. 权利要求 1 的合金，其中所述的铁含量为下限大于 0.2 重量%，而上限小于 0.5 重量%。

15 5. 权利要求 1 的合金，其中所述的铁含量为下限大于 0.3 重量%，而上限小于 0.4 重量%。

6. 权利要求 1 的合金，其中所述的铬含量为下限大于 0.05 重量%，而上限小于 0.5 重量%。

7. 权利要求 1 的合金，其中所述的铬含量为下限大于 0.1 重量%，而上限小于 0.2 重量%。

20 8. 权利要求 1 的合金，其中所述的硅含量为大于 70ppm 至 200 ppm。

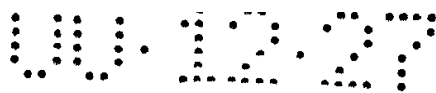
9. 权利要求 1 的合金，其中所述的硅含量为大于 90ppm 至 150 ppm。

25 10. 权利要求 1 的合金，其中所述的钨含量为下限大于 0.1 重量%，而上限小于 0.7 重量%。

11. 权利要求 1 的合金，其中所述的钨含量为下限大于 0.2 重量%，而上限小于 0.5 重量%。

12. 权利要求 1 的合金，其中所述的镍含量为下限大于 0.05 重量%，而上限小于 0.2 重量%。

30 13. 权利要求 1 的合金，其中所述的镍含量为下限大于 0.08 重量%，而上限小于 0.1 重量%。



# 说明书

## 含有钨和镍的锆合金

### 发明背景

5 本发明涉及用于轻水核反应堆(LWR)芯结构部件和燃料包壳的合金。更具体地,本发明涉及具有优异耐蚀性、机械性能和辐射后低的吸氢量的这种用途的锆合金。再具体地,本发明涉及含锡、铁、铬、钨和镍的锆合金,通过将其合金成分控制在特定范围内而使该合金具有改善的耐蚀性和辐射后的性能。

### 现有技术描述

10 锆合金用于核反应堆的燃料装配结构部件,例如用于燃料棒包壳、导管或套管、栅棒、仪表管等等,这是因为该合金具有低的中子有效截面、良好的抗高压/高温蒸汽和水的腐蚀性、良好的机械强度以及可加工性。锆合金,特别是公知的锆锡合金(Zircaloy)-2和锆锡合金-4那些,已经用于轻水反应堆(LWR)芯,因为它们具有相当小的对热中子的俘获有效截面。在US 4,649,023中提出,在这些锆合金中加入0.5-2.0重量% 铌和高至0.25重量% 第三种合金化元素,目的是为了改进该合金在反应堆芯应用中的耐蚀性,这是得到均匀分布的小于约800埃的细沉淀物的显微组织的部分措施。该第三种合金化元素例如是铁、铬、钼、钒、铜、镍和钨。

20 在US 4,675,153和US 4,664,831中,通过使用包括“锆-2.5w/% 铌”的锆基合金,获得了芯块-包壳相互反应(PCI)抗性。后一专利中称作“含约1.0-3.0w/% Nb的Zr-Nb合金”在这些专利中,含氧量“低于所述合金的约350ppm”。

25 US 4,648,912指出,通过用激光来快速扫描 $\alpha$ 锆合金体的表面,可改善该合金体的高温耐蚀性。所处理的合金包括锆-铌合金。

30 在授予本申请发明人的US 4,879,093中,公开了一种改进了辐射后韧性的锆合金。该合金具有稳定的显微组织,这可最小地造成合金韧性的损失,而合金的韧性是抗裂变气体释放以及安全处理废燃料所必需的。该合金在加压水反应堆(PWRs)和沸水反应堆(BWRs)两种情况下均保持合适的耐蚀性,这是因为它具有最佳的金属间沉淀物的平均颗粒尺寸。US 4,879,093中的合金是基于 $\alpha$ 相Zr-Sn-Nb或 $\alpha$ 相Zr-Sn-Mo合金,其特征列于表1中,该合金如果含有Nb,其测得的含量在高

至 0.6 重量% 范围内, 如果含有 Mo, 则其测得的含量在高至 0.1 重量% 范围内。该 Zr - Sn 体系公知为锆锡合金, 并且, 典型地, 例如锆锡合金 - 4 还含有 0.18 - 0.24 重量% Fe、0.07 - 0.13 重量% Cr、1000 - 1600ppm O、1.2 - 1.7 重量% Sn 及余量 Zr。

5 US 4,992,240 公开了另一种锆合金, 该合金含有 0.4 - 1.2 重量% Sn、0.2 - 0.4 重量% Fe、0.1 - 0.6 重量% Cr、不大于 0.5 重量% Nb、及平衡量的 Zr, 其中 Sn、Fe 和 Cr 的总量在 0.9 - 1.5 重量% 范围内, 依据该 US 4,992,240 专利的图 4, 氧含量为约 1770ppm - 1840ppm。显然铌是任选的, 并且没有说明硅。

10 US 3,303,025 公开了含有 0.25 - 1.5% 钨及同时含有铜(0.5 - 1.5%) 和铌(0.2 - 3.0%) 的锆合金。该四元合金在 500°C 和 700°C 高温蒸汽的短时(高至 2000 小时) 试验中具有优于锆锡合金 - 4 的耐蚀性。然而, 在 280°C 湿蒸汽中, 该四元合金具有低于锆锡合金 - 4 的耐蚀性。

15 UKAEA<sup>(1)</sup> 的研究指出,  $\alpha$  退火的 Zr - 0.3% W 合金在 600°C、101325Pa 蒸汽中的 2 天腐蚀试验后具有明显优于锆锡合金 - 2 的耐蚀性。该腐蚀试验后, 该含 0.3% W 的锆合金增重为  $119 \pm 8 \text{mg/dm}^2$ , 而锆锡合金 - 2 增重为  $439 \pm 14 \text{mg/dm}^2$ 。

20 在核工业中目前的趋势是使用较高的冷却剂温度以增加热效率, 以及使用较高的燃料放热燃耗以增加燃料利用率。较高的冷却剂温度和放热燃耗倾向于增加反应堆内的腐蚀以及锆合金的吸氢量。高水平的中子注量和同时造成的高水平吸氢量会降低锆合金的韧性。为了能满足这些所需的严酷条件, 因此需要改进锆合金的耐蚀性、减少吸氢量以及改进辐射后韧性。

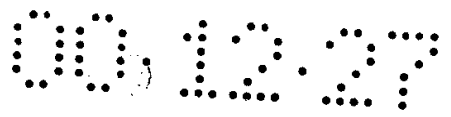
25 因此, 在该领域中一直存在的问题是研制具有优异的辐射后韧性、良好耐蚀性(特别是不依赖于其加工过程的耐蚀性)、减少的合金吸氢量、以及显著的固溶合金强度的锆合金。

另一个在该领域中一直普遍存在的问题是改进用于核反应堆中燃料装配结构部件的锆合金的耐蚀性和辐射后的韧性。目前对于为上目的而研制的锆合金都集中在 Zr - Sn - Nb 合金上。

30

### 优选实施方案的描述

因此, 本发明的目的是提供一种具有改善耐蚀性的锆合金。



本发明的另一目的是提供一种具有改善辐射后机械性能的锆合金。

本发明的又一目的是提供一种具有减小吸氢量的锆合金。

本发明的再一目的是提供一种具有含钨和镍的预定合金组成的锆合金，以改善耐蚀性和辐射后的机械性能。

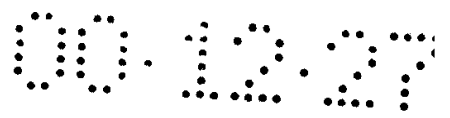
5 本发明的还一目的是提供一种不含特定的铌作为合金元素的具有预定合金组成的锆合金。

本发明基于在六种不同蒸压试验条件下对锆合金进行反应堆外的蒸压腐蚀试验。因为在反应堆内的耐蚀性与蒸压腐蚀增重数据之间，不存在广泛适用的且已校验过的相互关系，因而决定在六种不同蒸压试验条件下进行一系列蒸压腐蚀试验：360℃纯水、360℃含70ppm锂的水、10 360℃含200ppm锂的水、400℃蒸汽、415℃蒸汽和520℃蒸汽。目的是选出在这些多数(如果不是全部)蒸压试验条件下都具有合适的耐蚀性的合金。通过在基本锆合金(0.5% Sn - 0.4% Fe - 0.2% Cr - 余量 Zr)中添加不同含量的W、V、Ni而制得试验合金。为了与核工业中目前15 商用的锆合金相比，在该腐蚀试验中包括锆锡合金-2和锆锡合金-4试样。由于锆合金的耐蚀性强烈依赖于其制造过程，因而每种合金均用两种不同热加工过程制造。该制造过程由累加的退火参数( $\Sigma A_i$ )表示。

腐蚀试验后，测量试样的增重，这作为材料耐蚀性的标记。测量腐蚀试验后金属的含氢量以计算吸氢量( $\Delta H$ )。将这种测量结果均与锆锡合金-2和锆锡合金-4的测量结果相比，以确定新合金相对于锆锡合金-2和锆锡合金-4在耐蚀性方面的相对改善。与锆锡合金-2和锆锡合金-4相比，具有接近于本发明所要求保护的成分的合金在大多数蒸压试验条件下均表现出了明显改善的耐蚀性(见表1)。在少数情况(表120 中的400℃蒸汽、166天条件)下观察到稍微降低的是在预期的实验测量散布范围内。

25 另外，尽管在 $10^{-19}$ 小时的较低退火参数下可得到较大的益处，该合金在两种退火参数下均表现出了改善的耐蚀性。

进行统计分析，以确定腐蚀增重和吸氢量相关于不同合金成分参数和退火参数的回归方程的系数。对各个独立的参数的作用及各参数间的相互作用进行评价。具有高置信水平的负系数意味着该参数在降低增重或吸氢量方面具有统计学上显著有益的作用。正系数意味着存在降低耐蚀性的参数。当系数的置信水平小于95%时，则所观察的作用被视为是30



非显著的。结果列于表 2 中。认为在合金中加入钒有害于耐蚀性，这是基于在下述条件下具有大的正系数(见表 2)而得出的：400℃增重、415℃增重、(W\*V)交互作用在 360℃含 200ppm 锂的水试验中的吸氢量以及在 400℃和 520℃蒸汽试验中的增重、以及(V\*Ni)交互作用在 360℃含 200ppm 锂的水试验和 400℃蒸汽试验中的增重。

通过  
在表 2 中于 360℃含 200ppm 锂的水试验中增重、400℃蒸汽试验和 520℃蒸汽试验中具有大的负系数，证明了加入 W 和 Ni 的益处。

下面给出不同合金化元素的特定含量的选择理由，本发明的合金的成分列于表 3 中。

因此，本发明的合金含有锡(Sn)，含量范围是大于 0.005 重量% 至小于 1.0 重量%，优选为下限大于 0.1 重量% 至上限小于 0.7 重量%，最优选为下限大于 0.3 重量% 而上限小于 0.5 重量%。该合金还含有铁(Fe)，含量范围为大于 0.05 重量% 至小于 1.0 重量%，优选为下限大于 0.2 重量% 至上限小于 0.5 重量%，最优选为下限大于 0.3 重量% 至上限小于 0.4 重量%；铬(Cr)，含量范围为大于 0.02 重量% 至小于 1.0 重量%，优选为下限大于 0.05 重量% 而上限小于 0.5 重量%，最优选为下限大于 0.1 重量% 至上限小于 0.2 重量%；硅，含量范围大于 50 至小于 300 百万分之一份(ppm)，优选范围为大于 70ppm 至约 200ppm，最优选范围为大于 90ppm 至约 150ppm；钨(W)，含量范围为大于 0.01 重量% 至小于 1.0 重量%，优选为下限大于 0.1 重量% 至上限小于 0.7 重量%，最优选为下限大于 0.2 重量% 至上限小于 0.5 重量%；镍(Ni)，含量范围为大于 0.007 重量% 至小于 0.3 重量%，优选为下限大于 0.05 重量% 至上限小于约 0.2 重量%，最优选为下限大于 0.08 重量% 至上限小于 0.1 重量%，平衡量的钴。本发明合金的成分中没有确定的铌和钒。

#### 25 锡(Sn)

将锡含量降低到锆锡合金 - 4 的 1.2% 下限以下能改善其耐蚀性<sup>[2]</sup>。为此原因，本发明合金的锡含量选定为大于 0.005 重量% 至小于 1.0 重量% 范围内。但是，关于锡含量对 400℃锆合金热蠕变性影响的机械性能的趋势表明，降低锡含量会降低锆合金的蠕变抗性<sup>[3]</sup>。期望所选定的锡含量范围能使本发明的锆合金提供良好的耐蚀性与良好的蠕变抗性这种结合性能，以及加入钨和镍及铁(如下所述)可改善本发明合金的机械性能。优选地，锡含量范围的下限大于 0.1 重量% 而上限小于 0.7 重量%，最优选地为

下限大于0.3重量%而上限小于0.5重量%。

### 铁(Fe)

5 锆锡合金-2和锆-铁合金在360℃水和400℃(或更高)蒸汽中的耐蚀性均依赖于铁含量<sup>[4]</sup>。为获得在蒸汽和水环境中都良好的耐蚀性,选定铁含量范围为大于0.05重量%至1.0重量%,优选为下限大于0.2重量%至上限小于0.5重量%,最优选为下限大于0.3重量%至上限小于0.4重量%。选定上限是因为铁含量大于1.0重量%会降低可加工性。

### 铬(Cr)

10 加入铬主要是为了改善本发明合金的强度和蠕变抗性。该合金中铬含量范围是大于0.02重量%高至1.0重量%,优选为下限大于0.05重量%至上限小于0.5重量%,最优选为下限大于0重量%至上限小于0.2重量%。锆合金的耐蚀性公知地依赖于(Fe/Cr)比,并且该比值是2时可使该合金具有良好的耐蚀性。最优选的铬含量上限(0.2%)基于最优选的铁含量的上限(0.4%)。这些范围在改善合金的机械性能且不降低耐蚀性方面是有效的。关于在沸水反应堆中将锆锡合金-4辐射至大于30 Gwd/mtu  
15 燃烧后的耐蚀性的最新信息<sup>[5]</sup>说明了加入Cr的有益效果。在蒸后试样<sup>[5]</sup>中的吸氢量也说明了加入Cr的有益效果。

### 硅(Si)

20 硅的含量范围为大于50ppm至小于300ppm,优选为大于70至200ppm,最优选为大于90ppm至约150ppm。硅作为合金化元素加入是为了降低合金的吸氢量以及为了降低耐蚀性随合金的加工过程变化而变化的程度<sup>[2]</sup>。

### 钨(W)

25 钨的含量范围为大于0.01重量%高至1.0重量%,优选为下限大于0.1重量%至上限小于0.7重量%,最优选为下限大于0.2重量%至上限小于0.5重量%。加入在该范围内的钨是为了改善合金的耐蚀性和机械强度,以及降低吸氢量。

### 镍(Ni)

30 镍的含量范围为大于0.007重量%高至0.3重量%,优选为下限大于0.05重量%至上限小于0.2重量%,最优选为下限大于0.08重量%至上限小于0.1重量%,以增加该锆合金的高温耐蚀性。

与目前所提出的用于反应堆的含锡和铌的锆合金的成分不同,本发



明的合金成分中不含规定的铈

因此，通过选择成分，本发明所述的新合金获得了良好的耐蚀性、机械性能、以及降低的吸氢量。锆合金暴露于水反应堆环境中使显微组织受到辐射损害并产生氢化物析出。这些因素都降低了辐射后合金的韧性和耐蚀性。较高的合金化元素含量通常会改善锆合金的强度和蠕变抗性，但同时会降低耐蚀性。依据本发明，提出了一种具有最佳锡、铁、铬、硅、钨和镍含量的新锆合金，该合金具有良好的辐射后的机械性能和耐蚀性组合性能。

#### 参考文献

- 10 (1)Wanklyn, J.N., Demant, J.T., 和 Jones, D., “高温蒸汽对锆及其合金的腐蚀”, AERE - R3655, 原子能科学研究中心, Harwell, UK, 1961.
- (2)Eucken, C. M., Finden, P.T., Trapp - Pristching, S.和 Weidinger, H.G., “化学成分对锆基合金在蒸压试验中的均匀腐蚀性的影响”, 核工业中的锆第八届国际论文集, ASTM STP 1023, L.F.P. Van Swam 和 C.M. Eucken 编辑; 美国试验和材料学会, 费城, 1989, PP 113 - 127.
- 15 (3)McInteer, W.A. , Baty, D.L.和 Stein, K.O., “锡含量对锆锡合金 - 4 热蠕变性的影响”, 第八届国际核工业中的锆论文集, ASTM STP 1023, L.F.P. Van Swam 和 C.M. Eucken 编辑, 美国试验和材料学会, 费城, 1989, PP 621 - 640.
- 20 (4)Scott, D. B., “具有不同铁含量的锆锡合金 - 2 腐蚀性能的特点”, 锆特讯, WAPD - ZH - 24, P.11 (1960).
- (5)Garzarolli, F., Schumann, R., 和 Steinberg, E., “用于 BWR 燃料元件的最佳锆锡合金的腐蚀性”, 提交给第十届核工业中的锆国际论文集的论文, 将出版在 ASTM STP 1245 中, 由 A.M. Garde 和 E. R. Bradley 编辑, 1994.
- 25

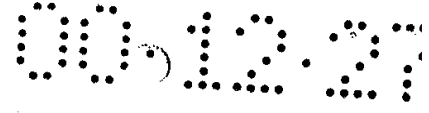


表 1 铅合金 (0.5 % Sn, 0.4 % Fe, 0.2 % Cr, 0.47 % W, 0.28 % V, 0.09 % Ni, 0.198 % O)

退火 参数 小时	腐蚀试验条件, 试验持续的天数	增重 mg/dm <sup>2</sup>	相对于铅锡合金 - 2 (2) 和 铅锡合金 - 4 (4) 的益处 (%)	Δ 氢含量 ppm	相对铅锡合金 - 2 (2) 和 铅锡合金 - 4 (4) 的吸氢量的益处 (%)
10 <sup>-19</sup>	360 °C 70 ppm Li, 水, 84 天	37	56 % (2), 69 % (4)	-	-
	360 °C 纯水, 302 天	- 65	3 % (2), 23 % (4)	-	-
	360 °C 纯水, 174 天	35.1	4 % (2), 31 % (4)	37	46 % (2), 7 %
	360 °C, 200 ppm Li 水, 42 天	35	97 % (2), 97 % (4)	112	- 25 % (2)**; - 23 % (4)**
	400 °C 蒸汽, 166 天	118.5	- 20 % (2)*; - 20 % (4)*	-	-
	400 °C 蒸汽, 96 天	66.5	- 18 % (2)*; - 18 % (4)*	106	44 % (2), - 17 % (4)**
	415 °C 蒸汽, 90 天	91.3	- 6 % (2) - 5 % (4)	-	-
	415 °C 蒸汽, 60 天	59.6	14 % (2), 17 % (4)	131	46 % (2), 38 % (4)
	520 °C 蒸汽, 24 小时	46.5	19 % (2), 17 % (4)	33 %	0.5 % (2), - 12 % (4)**
10 <sup>-17</sup>	360 °C 70 ppm Li 水, 84 天	49	42 % (2), 59 % (4)	-	-
	360 °C 纯水, 302 天	- 71	12 % (2), 18 % (4)	-	-
	360 °C 纯水, 174 天	38.6	26 % (2), 27 % (4)	45	25 % (2), (4)
	360 °C 200 ppm Li 水, 28 天	394	61 % (2), 68 % (4)	4	49 % (2), 50 % (4)
	400 °C 蒸汽, 166 天	117.2	- 15 % (2)*; - 19 % (4)*	-	-
	400 °C 蒸汽, 96 天	67.4	- 12 % (2)*; - 4 % (4)*	119	37 % (2), - 32 % (4)**
	415 °C 蒸汽, 150 天	166.4	- 19 % (2); - 30 % (4)*	-	-
	415 °C 蒸汽, 60 天	- 75.7	- 9 % (2), - 9 % (4)	1.8	31 % (2), 27 % (4)
	520 °C 蒸汽, 24 小时	46	36 % (2), 71 % (4)	31.5 %	30 % (2), 19 % (4)

\* 比铅锡合金更大的增重  
\*\* 比铅锡合金更大的吸氢量

表 2 回归方程系数, Cn 是腐蚀数据、增重和吸氧量的系数

$$\Delta W \text{ 或 } \Delta H = Co + C_1W + C_2(\%V) + C_3(\%Ni) + \dots + C_n(W*V)^n$$

合金成分	用于统计学评估的蒸汽腐蚀数据						
	360 °C, 纯水, 95 天, 增重	360 °C, 含 70 ppm 锂的水, 42 天, 增重	360 °C, 含 200 ppm 锂的水, 15 天, 增重	360 °C 含 200 ppm 锂的水, 15 天, 吸氢量	400 °C, 蒸汽 56 天, 增重	415 °C, 蒸汽 60 天, 增重	520 °C, 蒸汽 24 小时, 增重
W	5.47	- 198.66	- 1216(c)	1.11	- 0.71	6.37(c)	4.62
V	10.13	383.43	- 872	- 2.32	21.0(c)	4.77(b)	- 3.59
Ni	6.75	- 4310.47	- 7227(d)	6.16	- 94.9(d)	4.59(b)	- 113(d)
Σ Ai(a)	1.63	171.98	426	- 0.31	7.84(d)	0.67	7.69(d)
W*V	18.49	2539.33	- 2231	15.5(b)	65.8(b)	- 8.68	71(b)
W*Ni	- 84.04	- 2125.39	- 17700(b)	24.6	- 281(c)	- 111.1	- 390(c)
W*Σ Ai	- 1.94	73.87	594	- 0.76	- 7.59	4.03	- 3.86
V*Ni	214.36	22416.7	29000(b)	11.8	416(b)	- 50.3	643
V*Σ Ai	- 0.06	489.56	- 19.7	- 0.68	- 0.04	3.38	- 7.9
Ni*Σ Ai	- 9.26	- 2153.25	- 3790(b)	- 14.3(c)	- 49.7	- 3.45	- 58.4

(a) Σ Ai=累加的退火参数

(b) =95 % 置信水平

(c) =99 % 置信水平

(d) =99.9 % 置信水平

未注明的系数=认为在统计学上是不明显的, 因为置信水平小于 95 %

表 3

含有钨和镍的改性锆合金的优选实施方案

	<u>合适范围</u>	<u>优选范围</u>	<u>最优选范围</u>
Sn(重量%)	大于 0.005 至小于 1.0	大于 0.1 至小于 0.7	大于 0.3 至小于 0.5
Fe(重量%)	大于 0.05 至小于 1.0	大于 0.2 至小于 0.5	大于 0.3 至小于 0.4
Cr(重量%)	大于 0.02 至小于 1.0	大于 0.05 至小于 0.5	大于 0.1 至小于 0.2
Si(ppm)	大于 50 至小于 300	大于 70 至小于 200	大于 90 至小于 150
W(重量%)	大于 0.01 至小于 1.0	大于 0.1 至小于 0.7	大于 0.2 至小于 0.5
Ni(重量%)	大于 0.007 至小于 0.3	大于 0.05 至小于 0.2	大于 0.08 至小于 0.1
Zr	平衡量	平衡量	平衡量

5

10