



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102575321 B

(45) 授权公告日 2014. 10. 15

(21) 申请号 201080040548. 9

(22) 申请日 2010. 09. 14

(30) 优先权数据

2009-212090 2009. 09. 14 JP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2012. 03. 13

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2010/065839 2010. 09. 14

(87) PCT国际申请的公布数据

W02011/030905 JA 2011. 03. 17

(73) 专利权人 公立大学法人大阪府立大学

地址 日本大阪府堺市中区学园町

(72) 发明人 金野泰幸 高杉隆幸

(74) 专利代理机构 北京丰宏知识产权代理有限公司

公司 11372

代理人 吴大建 刘华联

(51) Int. Cl.

C22C 19/03 (2006. 01)

C22C 1/00 (2006. 01)

(56) 对比文件

JP 特开平 4-268037 A, 1992. 09. 24,

JP 特开平 4-268037 A, 1992. 09. 24,

JP 特开平 5-320793 A, 1993. 12. 03,

CN 1500153 A, 2004. 05. 26,

T. TAKASUGI et al.. The effect of Nb addition on microstructure and mechanical properties of Ni₃(Si, Ti) alloy. 《JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE》. 2001, 第 36 卷

审查员 吴静

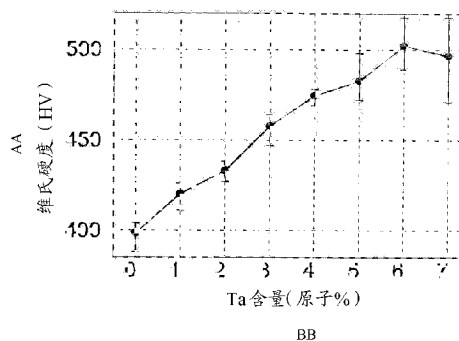
权利要求书1页 说明书15页 附图11页

(54) 发明名称

添加 Ta 的 Ni₃(Si, Ti) 基金属间化合物

(57) 摘要

本发明提供了一种具有优良的硬度(强度)特性的结构材料。本发明提供了一种 Ni₃(Si, Ti) 基金属间化合物, 其特征在于, 含有相对于具有总共 100 原子%组成的金属间化合物重量为 25-500 重量 ppm 的 B, 并且具有由 L1₂相构成的微观结构或者由 L1₂相和含有 Ni 与 Ta 的第二相分散物构成的微观结构, 所述组成由 10.0-12.0 原子%的 Si、大于或等于 1.5 原子%但小于 7.5 原子%的 Ti、大于 2.0 原子%但小于或等于 8.0 原子%的 Ta 以及除了杂质外由 Ni 形成的平衡量来构成。



AA 维氏硬度(HV)

BB Ta 含量 (原子%)

1. 一种 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物, 其特征在于, 含有相对于具有总共 100 原子 % 组成的金属间化合物重量为 25-500 重量 ppm 的 B, 并且具有由 L1_2 相构成的单相微观结构, 所述组成由 10.0-12.0 原子 % 的 Si、4.5-6.5 原子 % 的 Ti、3.0-5.0 原子 % 的 Ta 以及除了杂质外由 Ni 形成的平衡量来构成, 并且所述 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物在从室温到 800°C 的温度范围中具有 410-520 的维氏硬度。

2. 根据权利要求 1 所述的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物, 其特征在于, 含有相对于具有总共 100 原子 % 组成的金属间化合物重量为 25-100 重量 ppm 的 B, 所述组成由 10.0-12.0 原子 % 的 Si、总共 9.0-11.5 原子 % 的 Ti 和 Ta, 以及除了杂质外由 Ni 形成的平衡量来构成。

3. 根据权利要求 1 或 2 所述的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物, 其特征在于, 具有在 300g 的载荷下测量的 410-520 的维氏硬度。

4. 根据权利要求 1 或 2 所述的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物, 其特征在于, 含有相对于具有总共 100 原子 % 组成的金属间化合物重量为 25-500 重量 ppm 的 B, 所述组成由总共 19.0-21.5 原子 % 的 Si、Ti 和 Ta, 以及除了杂质外由 Ni 形成的平衡量来构成。

添加 Ta 的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物

技术领域

[0001] 本发明涉及一种添加 Ta 的镍金属间化合物,更具体地涉及一种基于 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 组成的金属间化合物(在下文中称为“ $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物”)。

背景技术

[0002] 作为镍金属间化合物的 Ni_3Si 金属间化合物具有诸如高温强度、耐腐蚀性和抗氧化性的优良特性。但是, Ni_3Si 金属间化合物易于发生晶间断裂,因此期望得到能允许在室温下更易于塑性加工的金属间化合物。为此,已经开展了为改善 Ni_3Si 金属间化合物的研发。例如,作为镍金属间化合物的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物被认为是具有可加工性、尤其是具有在室温下的延展性的金属间化合物(例如参见非专利文献 1 和 2)

[0003] 作为这种 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物,例如除了 Ni、Si、Ti 和 C 之外还包含 Hf 和 Zr 中的一种或两种的金属间化合物作为铸造镍金属间化合物是已知的,并且已知该金属间化合物具有如同钟表侧面材料等一样的良好的可铸造性(适合于压铸法和失蜡法)(例如参见专利文献 1)。

[0004] 此外,包含 Ni、Si、Ti、Cu、Ta 和 B 的金属间化合物被认为是具有如结构材料般完全令人满意的延展性和可加工性以及优良的耐腐蚀性的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基合金材料(例如参见专利文献 2)。由于添加了 Ta 和 Cu 的组合物,该金属间化合物可确保令人满意的延展性,以便可用于硫酸精炼厂等的结构材料。

[0005] 相关技术文献

[0006] 专利文献

[0007] 专利文献 1:日本未经审查的专利公开 No. HEI 5(1993)-320793

[0008] 专利文献 2:日本未经审查的专利公开 No. HEI 5(1993)-320794

[0009] 专利文献 3:日本未经审查的专利公开 No. HEI 4(1992)-268037

[0010] 专利文献 4:日本未经审查的专利公开 No. HEI 6(1994)-33174

[0011] 专利文献 5:日本未经审查的专利公开 No. HEI 4(1992)-246144

[0012] 非专利文献

[0013] 非专利文献 1:T.Takasugi et al., Journal of Materials Science 26, pp. 1173-1178(1991)

[0014] 非专利文献 2:T.Nakamura et al., Materials Science and Engineering A 383(2004) 259-270

发明内容

[0015] 本发明所要解决的问题

[0016] 但是,当用作结构材料时,期望这些镍金属间化合物在机械和化学特性上有进一步的增强。当通过塑性加工和精密铸造来生产由镍金属间化合物构成的结构时,例如期望有包括延展性在内的可加工性的增强。此外,当镍金属间化合物用于处理酸的装置时,化学

特性的保持也是所期望的。因此,具有充分的化学特性和机械特性(例如延展性)的镍金属间化合物是所期望的。此外,在于高温中使用的机器零件的结构材料的情况中,具有比上述 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物进一步增强的硬度(强度)特性、同时保持与上述 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物相当的延展性的材料是所期望的。另外,在摩擦部件的结构材料的情况中,具有优良耐磨性的材料是所期望的。

[0017] 鉴于上述情况,本发明已实现提供了一种具有充分的化学特性和机械特性的镍金属间化合物。本发明还提供了一种具有优良的硬度(强度)特性的结构材料,并进一步提供了一种具有优良的耐磨性的结构材料。

[0018] 解决问题的手段

[0019] 本发明提供了一种 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物,其特征在于,含有相对于具有总共 100 原子%组成的金属间化合物重量为 25-500 重量 ppm 的 B,并且具有由 L1_2 相构成的微观结构或者由 L1_2 相和含有 Ni 与 Ta 的第二相分散物(second phase dispersion)构成的微观结构,所述组成由 10.0-12.0 原子%的 Si、大于或等于 1.5 原子%但小于 7.5 原子%的 Ti、大于 2.0 原子%但小于或等于 8.0 原子%的 Ta 以及除了杂质外由 Ni 形成的平衡量来构成。

[0020] 本发明的效果

[0021] 鉴于在 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 中 Ti 是抗氧化性退化的一项因素,本发明的发明人开创性地添加了高熔点的金属元素以代替 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 中的 Ti,并对该想法进行了深入的研究。结果,本发明的发明人发现,除了 Ni、Si、Ti 和 B 之外还含有 Ta 的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物具有优于由 Ni、Si 和 Ti 构成的金属间化合物的硬度(强度),从而实现了本发明。本发明的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物由于具有优良的硬度(强度)而可适合用于诸如机器零件的结构材料。

[0022] 在下文中将阐述本发明的实施方案。在以下描述中给出的结构仅仅是示例性的,而本发明的范围不限于此。在本说明书中,“从 A 到 B”意指数值 A 和 B 包含在该范围内。

附图说明

[0023] 图 1 是实施例样品 2 的 SEM 照片。

[0024] 图 2 显示了实施例样品 2 的 X 射线衍射谱图。上者是作为对比实施例样品的例子的含 Hf 样品(参照样品)的 X 射线衍射谱图,而下者是实施例样品 2 的 X 射线衍射谱图。

[0025] 图 3 显示了根据 EPMA 的实施例样品 2 的元素分布图。

[0026] 图 4 是显示了在证明实验 1 中的维氏硬度试验的结果、即维氏硬度和 Ta 含量之间的关系图。

[0027] 图 5 显示了对比实施例样品和实施例样品的 SEM 照片。

[0028] 图 6 显示了对比实施例样品和实施例样品 1-7 的 X 射线衍射谱图。

[0029] 图 7 是实施例样品 7 的放大的 X 射线衍射谱图的图。

[0030] 图 8 显示了根据 EPMA 的实施例样品 7 的元素分布图。

[0031] 图 9 是显示了在证明实验 2 中的维氏硬度试验的结果的图,即显示了维氏硬度和 Ta 含量之间的关系图。

[0032] 图 10 是显示了维氏硬度和晶格常数相对于 Ta 含量的关系的图。

[0033] 图 11 是显示了在高温下对比实施例样品与实施例样品 2、4 和 7 的维氏硬度的变化的图。

[0034] 图 12 是显示了样品的抗拉强度、0.2% 试验应力和延伸率相对于 Ta 含量的关系的图。

[0035] 图 13 显示了在拉伸试验之后对比实施例样品与实施例样品 5 和 7 的断裂面的照片。

[0036] 图 14 是显示了因抗氧化性试验引起的对比实施例样品与实施例样品 2、4 和 7 的时间和重量增量之间的关系的图。

[0037] 图 15 是用于说明销盘磨耗试验的概念图。

[0038] 图 16 是显示了对比实施例样品与实施例样品 2、4 和 7 的磨耗比的图,其中对比实施例样品的磨耗比是 1。

具体实施方式

[0039] 根据一个方面,本发明的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物的特征在于,含有具有总共 100 原子%组成的金属间化合物和相对于金属间化合物重量为 25-500 重量 ppm 的 B,所述组成由作为主要成分的 Ni、7.5-12.5 原子%的 Si、1.5-10.5 原子%的 Ti 和 1.0-10.0 原子%的 Ta 构成。

[0040] 根据本发明,提供了具有优良的硬度(强度)的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物。

[0041] 在本发明的一个实施方案中,除了本发明的结构之外, $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物在从室温到 800°C 的温度范围内可具有 410-520 的维氏硬度。在此,维氏硬度是在 300g、500g 或 1kg 的载荷下测量的。

[0042] 在本发明的一个实施方案中, $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物可含有具有总共 100 原子%组成的金属间化合物和相对金属间化合物重量为 25-100 重量 ppm 的 B,所述组成由作为主要成分的 Ni、10.0-12.0 原子%的 Si、1.5-9.5 原子%的 Ti 和 1.0-9.0 原子%的 Ta 构成。备选的是, $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物可含有具有总共 100 原子%组成的金属间化合物和相对金属间化合物重量为 25-100 重量 ppm 的 B,所述组成由作为主要成分的 Ni、10.0-12.0 原子%的 Si、2.5-8.5 原子%的 Ti 和 1.0-7.0 原子%的 Ta 构成。

[0043] 在本发明的一个实施方案中, $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物可含有具有总共 100 原子%组成的金属间化合物和相对金属间化合物重量为 25-100 重量 ppm 的 B,所述组成由作为主要成分的 Ni、10.0-12.0 原子%的 Si、2.5-6.5 原子%的 Ti 和 3.0-7.0 原子%的 Ta 构成。

[0044] 另外,在本发明的实施方案中, $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物可含有具有总共 100 原子%组成的金属间化合物和相对金属间化合物重量为 25-100 重量 ppm 的 B,所述组成由作为主要成分的 Ni、10.0-12.0 原子%的 Si,以及总共 9.0-11.5 原子%的 Ti 和 Ta 构成。

[0045] 根据另一个方面,本发明的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物的特征在于,含有具有总共 100 原子%组成的金属间化合物和相对金属间化合物重量为 25-500 重量 ppm 的 B,并且具有由 L1_2 相构成的微观结构或由 L1_2 相和含有 Ni 与 Ta 的第二相分散物构成的微观结构,所述组成由 10.0-12.0 原子%的 Si、大于或等于 1.5 原子%但小于 7.5 原子%的 Ti、大于 2.0 原子%但小于或等于 8.0 原子%的 Ta 以及除了杂质外由 Ni 形成的平衡量来构成。

[0046] 根据本发明,提供了具有耐磨性和优良的硬度(强度)的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物。

[0047] 本发明可以是用于摩擦部件的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物,该 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物含有具有总共 100 原子%组成的金属间化合物和相对金属间化合物重量为 25-500 重量 ppm 的 B,并且具有由 L1_2 相构成的微观结构或由 L1_2 相和含有 Ni 与 Ta 的第二相分散物构成的微观结构,所述组成由 10.0-12.0 原子%的 Si、大于或等于 1.5 原子%但小于 7.5 原子%的 Ti、大于 2.0 原子%但小于或等于 8.0 原子%的 Ta 以及除了杂质外由 Ni 形成的平衡量来构成。此外,本发明可以是具有上述组成和微观结构的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物作为摩擦部件材料(或耐磨金属材料)的应用。此外,本发明可以通过熔炼和铸造具有上述组成的材料来形成摩擦部件的方法。备选的是,本发明可以用通过铸造获得的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物来形成摩擦部件的方法。例如,通过切割 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物的铸件来形成摩擦部件。

[0048] 在本发明的一个实施方案中, $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物可含有具有总共 100 原子%组成的金属间化合物和相对金属间化合物重量为 25-100 重量 ppm 的 B,所述组成由 10.0-12.0 原子%的 Si、1.5-5.5 原子%的 Ti、4.0-8.0 原子%的 Ta 以及除了杂质外由 Ni 形成的平衡量来构成。备选的是, $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物可含有具有总共 100 原子%组成的金属间化合物和相对金属间化合物重量为 25-100 重量 ppm 的 B,所述组成由 10.0-12.0 原子%的 Si、2.5-5.5 原子%的 Ti、4.0-7.0 原子%的 Ta 以及除了杂质外由 Ni 形成的平衡量来构成。

[0049] 根据这些实施方案,提供了一种具有增强的硬度和增强的耐磨性的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物。

[0050] 在本发明的一个实施方案中, $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物可含有具有总共 100 原子%组成的金属间化合物和相对金属间化合物重量为 25-100 重量 ppm 的 B,并且具有由 L1_2 相构成的微观结构或由 L1_2 相和含有 Ni 与 Ta 的第二相分散物构成的微观结构,所述组成由 10.0-12.0 原子%的 Si、2.5-6.5 原子%的 Ti、3.0-7.0 原子%的 Ta 以及除了杂质外由 Ni 形成的平衡量来构成。备选的是, $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物可含有具有总共 100 原子%组成的金属间化合物和相对金属间化合物重量为 25-100 重量 ppm 的 B,所述组成由 10.0-12.0 原子%的 Si、总共 9.0-11.5 原子%的 Ti 和 Ta 以及除了杂质外由 Ni 形成的平衡量来构成。此外,当在 300g、500g 或 1kg 的载荷下测量时, $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物可具有 410-520 的维氏硬度。在此情况中,维氏硬度的测量可在室温(大约 25°C)下进行。

[0051] 根据这些实施方案,提供了一种具有增强的硬度的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物。

[0052] 根据另外一个方面,本发明的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物的特征在于,含有具有总共 100 原子%组成的金属间化合物和相对金属间化合物重量为 25-500 重量 ppm 的 B,并且具有由 L1_2 相构成的微观结构或由 L1_2 相和含有 Ni 与 Ta 的第二相分散物构成的微观结构,所述组成由 10.0-12.0 原子%的 Si、大于或等于 1.5 原子%但小于 7.5 原子%的 Ti、大于 2.0 原子%但小于或等于 8.0 原子%的 Ta 以及除了杂质外由 Ni 形成的平衡量来构成,其中, Ta 的最大含量是 6.0 原子%。

[0053] 根据本发明,提供了一种具有优良的延展性或抗氧化特性的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物。

[0054] 在本发明的一个实施方案中, $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物可含有具有总共 100 原子%组成的金属间化合物和相对于金属间化合物重量为 25-500 重量 ppm 的 B, 其中所述组成由总共 19.0-21.5 原子%的 Si、Ti 和 Ta, 以及除了杂质外由 Ni 形成的平衡量来构成。

[0055] 根据这样的实施方案, Ni 的含量大约是 78.5-81.0 原子%, 以形成基本上仅由 L_{12} 相构成的微观结构或基本上仅由 L_{12} 相和含有 Ni 与 Ta 的第二相分散物构成的微观结构。因此, 耐磨性和延展性或抗氧化特性以及硬度是优良的。

[0056] 在下文中, 将详细阐述这些实施方案中的每一种元素。在本说明书中, “从 A 到 B” 意指数值 A 和 B 包含在该范围中, 除非另有声明。

[0057] Ni 的含量例如为 78.5-81.0 原子%, 并且优选 78.5-80.5 原子%。Ni 含量的具体例子包括 78.5、79.0、79.5、80.0、80.5 和 81.0 原子%。Ni 的含量可处于在此举例的任何两个数值之间。

[0058] Si 的含量为 7.5-12.5 原子%, 并且优选 10.0-12.0 原子%。Si 含量的具体例子包括 7.5、8.0、8.5、9.0、9.5、10.0、10.5、11.0、11.5、12.0 和 12.5 原子%。Si 的含量可处于在此举例的任何两个数值之间。

[0059] Ti 的含量为 1.5-10.5 原子%, 并且优选 1.5-9.5 原子%。更优选地, Ti 的含量为 2.5-6.5 原子%。Ti 含量的具体例子包括 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0、5.5、6.0、6.5、7.0、7.5、8.0、8.5、9.0、9.5、10.0 和 10.5 原子%。Ti 的含量可处于在此举例的任何两个数值之间。

[0060] 就硬度和耐磨性而言, Ti 的含量优选为大于或等于 1.5 原子%但小于 7.5 原子%, 更优选为 1.5-5.5 原子%, 并且还更优选为 2.5-5.5 原子%。在这些范围中的 Ti 含量提高了硬度和耐磨性。

[0061] Ta 的含量为 1.0-10.0 原子%, 并且优选 1.0-9.0 原子%。更优选地, Ta 的含量为 3.0-7.0 原子%。Ta 含量的具体例子包括 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0、5.5、6.0、6.5、7.0、7.5、8.0、8.5、9.0、9.5 和 10.0 原子%。Ta 的含量可处于在此举例的任何两个数值之间。

[0062] 就硬度和耐磨性而言, Ta 的含量优选为大于 2.0 原子%但小于或等于 8.0 原子%, 更优选为 4.0-8.0 原子%, 并且还更优选为 4.0-7.0 原子%。在这些范围中的 Ta 含量提高了硬度和耐磨性。

[0063] 此外, Ti 和 Ta 的总含量可为 9.0-11.5 原子%。例如, Ti 和 Ta 的总含量为 9.0、9.5、10.0、10.5、11.0 或 11.5 原子%。Ti 和 Ta 的含量可处于在此举例的任何两个数值之间。

[0064] 此外, Si、Ti 和 Ta 的总含量为 19.0-21.5 原子%, 并且更优选为 19.5-21.5 原子%。

[0065] 可以适当地调整每一种元素的含量, 以使 Ni、Si、Ti 和 Ta 的总含量为 100 原子%。

[0066] B 的含量为 25-500 重量 ppm, 并且优选 25-100 重量 ppm。B 含量的具体例子包括 25、40、50、60、75、100、150、200、300、400 和 500 重量 ppm。B 的含量可处于在此举例的任何两个数值之间。

[0067] 根据本发明的一个实施方案, 金属间化合物的特定组成例如可通过向表 1-3 所示的组成中添加上述含量的 B 而获得。

[0068] 表 1

[0069]

Ni 原子%	Si 原子%	Ti 原子%	Ta 原子%
78.5	10.5	7.5	3.5
78.5	10.5	6.0	5.0
78.5	10.5	4.5	6.5
78.5	11.5	9.0	1.0
78.5	11.5	8.0	2.0
78.5	11.5	7.0	3.0
78.5	11.5	6.0	4.0
78.5	11.5	5.0	5.0
78.5	11.5	4.0	6.0
78.5	11.5	3.0	7.0
78.5	12.5	7.5	1.5
78.5	12.5	6.0	3.0
78.5	12.5	4.5	4.5

[0070] 表 2

[0071]

Ni 原子%	Si 原子%	Ti 原子%	Ta 原子%
79.5	9.5	7.5	3.5
79.5	9.5	6.0	5.0
79.5	9.5	4.5	6.5
79.5	11.0	8.5	1.0
79.5	11.0	7.5	2.0
79.5	11.0	6.5	3.0
79.5	11.0	5.5	4.0
79.5	11.0	4.5	5.0
79.5	11.0	3.5	6.0
79.5	11.0	2.5	7.0
79.5	11.5	7.0	2.0
79.5	11.5	6.0	3.0
79.5	11.5	5.5	3.5

[0072] 表 3

[0073]

Ni 原子%	Si 原子%	Ti 原子%	Ta 原子%
81.0	8.0	7.5	3.5
81.0	8.0	6.0	5.0
81.0	8.0	7.5	3.5
81.0	9.5	8.5	1.0
81.0	9.5	7.5	2.0
81.0	9.5	6.5	3.0

[0074]

81.0	9.5	5.5	4.0
81.0	9.5	4.5	5.0
81.0	9.5	3.5	6.0
81.0	9.5	2.5	7.0
81.0	10.0	7.5	1.5
81.0	10.0	6.5	2.5
81.0	10.0	5.5	3.5

[0075] 根据本实施方案的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物可基本上由 Ni、Si、Ti、B 和 Ta 元素构成,或者含有除了这些元素之外的杂质元素。例如, $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物可基本上仅由 Ni、Si、Ti、B 和 Ta 元素构成,并含有不可避免的杂质作为杂质元素。

[0076] 根据本发明实施方案的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物可通过加热来熔炼在实施方案中提到的比例的 Ni、Si、Ti 和 Ta 金属,然后通过冷却来铸造所得到的熔融金属而得到。可对通过凝固得到的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物进行均质化热处理。该均质化热处理使得元素免于偏析,因此微观结构是均匀的。

[0077] 此外,根据该实施方案的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物当在 300g 的载荷下测量时可具有 410–520 的维氏硬度。根据本发明的实施方案,可获得具有如此维氏硬度的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物。

[0078] 接下来将阐述效果证明实验。

[0079] [证明实验 1]

[0080] (制备金属间化合物)

[0081] (1) 铸锭样品制备步骤

[0082] 表 4 显示了在证明实验 1 中制备的 7 种金属间化合物的组成和为了对比而制备的金属间化合物的组成。如表 4 所示,这些金属间化合物的组成确定成使得在证明实验 1 中 Ti 和 Ta 的总含量是恒定的。在此,为了对比而制备的金属间化合物是在专利文献 1 中公开的金属间化合物。

[0083] 表 4

[0084]

	Ni 原子%	Si 原子%	Ti 原子%	Ta 原子%	B wt ppm	备注: 样品名 简称
对比实施例样品	79.5	11.0	9.5	-	50	未合金化的或 0 Ta
实施例样品 1	79.5	11.0	8.5	1.0	50	1 Ta
实施例样品 2	79.5	11.0	7.5	2.0	50	2 Ta
实施例样品 3	79.5	11.0	6.5	3.0	50	3 Ta
实施例样品 4	79.5	11.0	5.5	4.0	50	4 Ta
实施例样品 5	79.5	11.0	4.5	5.0	50	5 Ta
实施例样品 6	79.5	11.0	3.5	6.0	50	6 Ta
实施例样品 7	79.5	11.0	2.5	7.0	50	7 Ta

[0085] 首先,称量各金属(每种金属的纯度为 99.9 重量%或以上)和 B 以形成如表 4 所示的 8 种组成。接着,将所称量的金属和 B 在电弧熔炼炉中熔炼,然后铸造以制备均具有约 130g 重量的铸锭。抽空电弧熔炼炉的熔炼腔室,然后用惰性气体(氩气)取代电弧熔炼炉中的大气。用非消耗的钨电极来作为熔炼炉的电极,用水冷式铜炉来作为模子。

[0086] (2) 均质化热处理步骤

[0087] 接着,进行均质化热处理,其中使每一个铸锭保持在 1050℃的真空下 48 小时以进行均质化。如上所述,样品被制备出来了。

[0088] 含有 Ta 的样品是本发明的实施例,在下文中,每一个这种样品称为带有代表 Ta 含量的数字的“实施例样品”,例如当 Ta 含量为 2 原子%时称为“实施例样品 2”。另一方面,不含 Ta 的样品称为“对比实施例样品”。

[0089] 接下来将阐述评价方法和评价结果。

[0090] (1) 微观结构观测

[0091] 首先,获取如上述所制备的实施例样品的微观结构的 SEM 照片。其中一张照片示于图 1 中。图 1 是实施例样品 2 的 SEM 照片。

[0092] 图 1 揭示了,实施例样品 2 具有由粒径为几百微米的晶粒所构成的单相微观结构。实施例样品 2 的维氏硬度为 434HV。

[0093] 接下来对各实施例样品进行 X 射线测量,以鉴定微观结构中的构成相。图 2 显示了测量结果。图 2 显示了实施例样品 2 的 X 射线衍射谱图。作为参照,同时显示了 $\text{Ni}_{77.5}\text{Si}_{11.0}\text{Ti}_{9.5}\text{Hf}_{2.0}+50\text{wt ppm}$ 的 B(除了 B 之外用原子%表示;在下文中称为“含 Hf 样品”)的 X 射线衍射谱图。上者是含 Hf 样品的 X 射线衍射谱图,下者是实施例样品 2 的 X 射线衍射谱图。图中的点代表已知的材料 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ (对比实施例样品)、 Ni_3Hf 和 Ni_5Hf 的谱图的峰值位置。圆形点代表 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 谱图的峰值位置,三角形点代表 Ni_3Hf 谱图的峰值位置,而矩形点代表 Ni_5Hf 谱图的峰值位置。此外,在此提供的含 Hf 样品通过与在实施例样品中相同的方法来制备。

[0094] 图 2 揭示了,实施例样品 2 的 X 射线衍射谱图与 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 谱图在峰值位置上一

致。由于实施例样品 2 具有单相微观结构,该结果使得实施例样品 2 的构成相被鉴定为 $L1_2$ 相。

[0095] 含 Hf 样品的谱图与 Ni_3Hf 和 Ni_5Hf 以及 $Ni_3(Si, Ti)$ 的谱图在峰值位置上一致。不同于实施例样品 2,在含 Hf 样品中分散有 Ni_3Hf 和 Ni_5Hf 相。

[0096] 另外,对各实施例样品进行 EPMA 以作微观结构分析。图 3 显示了分析结果。图 3 显示了根据 EPMA 的实施例样品 2 的元素分布图。在图 3 中,左上图是 SEM 照片,右上图是 Ni 的分布图,中间左图是 Si 的分布图,中间右图是 Ti 的分布图,左下图是 Ta 的分布图,而右下图是 B 的分布图。

[0097] 图 3 显示了,在包括 Ni 分布图的所有元素分布图中,组成在整个微观结构中是均匀的。在 EPMA 中,进行了点分析,发现该组成基本上和所称量的一样,如表 5 所示。

[0098] 表 5

[0099]

	Ni 原子%	Si 原子%	Ti 原子%	Ta 原子%	B 原子%
实施例样品 2	78.9	11.6	7.7	1.8	0.0

[0100] (2) 维氏硬度试验

[0101] 接下来对各样品进行维氏硬度试验。在维氏硬度试验中,在室温中将正四棱锥体金刚石压头压入到各样品中。在试验中,载荷大体上是 300g,保持时间是 20 秒。图 4 显示了试验结果。图 4 是显示了维氏硬度和 Ta 含量之间的关系的图。横轴代表 Ta 的含量,而测量结果的最左边点对应于对比实施例样品,而测量结果的其他点对应于实施例样品。

[0102] 图 4 表明了,各实施例样品都具有比对比实施例样品更大的维氏硬度。其表明了,向对比实施例样品的 $Ni_3(Si, Ti)$ 中添加 Ta 增大了样品的硬度,并且维氏硬度的值随着 Ta 含量的增大而增大。

[0103] 如上所述的证明实验 1 证明了,实施例样品具有优于对比实施例样品的硬度(强度)特性。

[0104] [证明实验 2]

[0105] 另外,以如在证明实验 1 中相同的方式制备具有如证明实验 1 中相同组成的样品(如表 4 所示的相同组成),并对其进行(1)微观结构观测,(2)室温维氏硬度试验,(3)高温维氏硬度试验,(4)室温拉伸试验,(5)抗氧化性试验和(6)磨损试验。

[0106] (1) 微观结构观测

[0107] 首先,获取所制备的各实施例样品的微观结构的 SEM 照片。在图 5 中示出了一些照片。图 5 显示了对比实施例样品和实施例样品的 SEM 照片,其中(1)是对比实施例样品的 SEM 照片,(2)是实施例样品 5 的 SEM 照片,(3)是实施例样品 6 的 SEM 照片,而(4)是实施例样品 7 的 SEM 照片。此外在图 5 中,(5)是实施例样品 7 的第二相分散物的放大的 SEM 照片。

[0108] 图 5 揭示了,对比实施例样品和实施例样品 5 具有如证明实验 1 中的图 1 所示情况中的单相微观结构。这些样品和其他样品的观测揭示了,当 Ta 的含量为 5.0 原子%或更少时,Ta 构成了固溶体而形成单相微观结构。

[0109] 图 5 还揭示了,在实施例样品 6 和 7 中,次相分散在主相的微观结构中,所述主相是母相(母体)。也就是说,其揭示了实施例样品 6 和 7 均包含主相和次相,并且次相分散在主相中。当 Ta 的含量为 6.0 原子%时(实施例样品 6),可观察到少量片状的第二相分散物(关于其形状可参见图 5(5))。另外,当 Ta 的含量为 7.0 原子%时(实施例样品 7),可观察到第二相分散物的体积分数(第二相分散物在微观结构中的比例)增加的现象。还可以观察到, $L1_2$ 相的晶体粒径会因第二相分散物的影响(如果有的话)而稍有减小。

[0110] 接下来对各实施例样品进行 X 射线测量,以鉴定微观结构中的构成相。图 6 和 7 显示了测量结果。图 6 显示了对比实施例样品和实施例样品 1-7 的 X 射线衍射谱图。在图 6 中,倒三角点代表作为已知材料的 $Ni_3(Si, Ti)$ 的谱图的峰值位置(此材料由 $L1_2$ 相构成),其上的数值是衍射晶面的面指数。另外,图 7 是实施例样品 7 的放大的 X 射线衍射谱图,针对图 7 的测量是与图 6 分开来进行的,以便鉴定实施例样品 7 的相。如在图 6 的情况那样,在图 7 中倒三角点代表 $Ni_3(Si, Ti)$ 谱图的峰值位置。此外,圆形点代表了 Ni_3Ta 谱图的峰值位置。

[0111] 图 6 揭示了样品的 X 射线衍射谱图与 $Ni_3(Si, Ti)$ 谱图在峰值位置上一致,表明了样品均由 $L1_2$ 相构成。鉴于这些结果和上述 SEM 观测的结果(图 5),揭示了对比实施例样品和实施例样品 2-5 的微观结构的单相是 $L1_2$ 相,而实施例样品 6 和 7 的母相(占据次相中的空隙的主相)也是 $L1_2$ 相。

[0112] 另外,图 7 揭示了实施例样品 7 的 X 射线衍射谱图与 Ni_3Ta 谱图和 $Ni_3(Si, Ti)$ 谱图在峰值位置上一致。此结果表明了,实施例样品 7 由 $L1_2$ 相(主相)和 Ni_3Ta 次相(含有 Ni 和 Ta 的相)构成。结果,在图 5 中观察到的次相被鉴定为 Ni_3Ta 。

[0113] 在测量结果中,在除了 $Ni_3(Si, Ti)$ 和 Ni_3Ta 谱图中的峰值位置之外的其他任何位置处未观察到清楚的峰值,这表明了实施例样品 7 基本上仅由 $L1_2$ 相和 Ni_3Ta 次相构成。

[0114] 接下来对对比实施例样品和各实施例样品进行 EPMA。图 8 显示了分析结果。图 8 显示了根据 EPMA 的实施例样品 7 的元素分布图。在图 8 中,(1) 是 SEM 照片(左上图),(2) 是 Ni 的分布图(中上图),(3) 是 Si 的分布图(右上图),(4) 是 Ti 的分布图(中下图),(5) 是 Ta 的分布图(右下图)。

[0115] 如图 8 中的(1)所清楚地显示,主相和次相包括在 EPMA 所瞄准的区域中。然而图 8 中的图像揭示了,相之间每一种元素的量是不同的。例如, Ni、Si 和 Ta 的含量在两相之间是不同的,但 Ti 的含量并没有如此不同。

[0116] 另外,除了实施例样品 7 外,也对其他样品进行 EPMA,其中在母相(主相)上进行点分析。表 6 显示了分析结果。

[0117] 表 6

[0118]

	Ni 原子%	Si 原子%	Ti 原子%	Ta 原子%
对比实施例样品	79.56	10.96	9.28	-
实施例样品 1	79.46	11.16	8.46	0.92
实施例样品 2	79.58	11.10	7.36	1.96
实施例样品 3	79.91	11.24	5.99	2.86
实施例样品 4	79.52	10.92	5.58	3.98
实施例样品 5	79.27	11.57	4.35	4.81
实施例样品 6	79.95	11.49	2.95	5.60
实施例样品 7	79.67	12.07	2.54	5.72

[0119] 表 6 显示了, 实施例样品 6 和 7 的母相 (主相) 中的 Ta 含量是 5.6-5.7 原子%, 表明了母相 (主相) 中的 Ta 含量的上限是 5-6 原子%。此结果和图 5 揭示了, 在 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 合金中 Ta 的固溶极限是 5-6 原子%。

[0120] (2) 室温维氏硬度试验

[0121] 接下来, 以与证明实验 1 中相同的方式对各样品进行维氏硬度试验。在维氏硬度试验中, 载荷是 1kg, 保持时间是 20 秒 (室温约为 25°C)。图 9 显示了试验结果。图 9 是显示了证明实验 2 中的维氏硬度试验的结果的图, 即显示了维氏硬度和 Ta 含量之间的关系的图。相应的坐标轴如证明试验 1 中所定义。

[0122] 图 9 表明了, 维氏硬度的值基本上随着 Ta 含量的增大而增大, 直到 Ta 含量超过 6.0 原子%, 一旦 Ta 含量超过 6.0 原子%, 维氏硬度值几乎不增大, 而基本上是恒定的。虽然表 6 所示的 EPMA 的点分析结果揭示了当 Ta 含量超出固溶极限时母相中的 Ta 含量基本上是恒定的, 然而此维氏硬度试验的结果是可考虑到的, 因为母相中基本上恒定的 Ta 含量阻止了固溶强化的进一步发生。

[0123] 此外, 还研究了维氏硬度和晶格常数之间的相关性。表 7 和图 10 显示了该结果。表 7 显示了各样品的晶格常数, 而图 10 是显示了维氏硬度和晶格常数相对于 Ta 含量的关系的图。在表 7 和图 10 中显示的晶格常数是 L_{12} 相的晶体晶格的晶格常数, 其是从图 6 所示的 X 射线测量结果 (对比实施例样品和各实施例样品的 X 射线谱图) 中计算得到。

[0124] 表 7

[0125]

样品 (简称)		晶格常数
对比实施例样品	0Ta	0.3558
实施例样品 1	1 Ta	0.3560
实施例样品 2	2 Ta	0.3561
实施例样品 3	3 Ta	0.3561
实施例样品 4	4 Ta	0.3563
实施例样品 5	5 Ta	0.3564
实施例样品 6	6 Ta	0.3567
实施例样品 7	7 Ta	0.3570

[0126] * 单位 :nm

[0127] 表 7 和图 10 揭示了,晶格常数趋向于随着维氏硬度的增大而增大。具体地说,由于包含在 $L1_2$ 相中的 Ta 作为固溶体引起晶格应变,而 Ta 的固溶强化增大了硬度,因此上述情况是可以考虑到的。

[0128] (3) 高温维氏硬度试验

[0129] 接下来,在高温 (300℃、500℃、600℃和 800℃) 下对各样品进行维氏硬度试验。在维氏硬度试验中,载荷为 1kg,保持时间为 20 秒,而温度在还原气氛 ($Ar+ \text{约 } 10\% \text{的 } H_2$) 中以每分钟 10℃上升。图 11 显示了试验的结果,以及上述室温维氏硬度试验的结果。图 11 是显示了在高温下对比实施例样品与实施例样品 2、4 和 7 的维氏硬度的改变的图。在图 11 中,(1) 代表对比实施例样品的维氏硬度,(2) 代表实施例样品 2 的维氏硬度,(3) 代表实施例样品 4 的维氏硬度,而 (4) 代表实施例样品 7 的维氏硬度。

[0130] 图 11 揭示了,在所有的温度范围中,实施例样品 2、4 和 7 均对比实施例样品更硬。此结果表明了,向 $Ni_3(Si, Ti)$ 合金中添加 Ta 可增强在所有温度范围中合金的硬度。

[0131] 具体地说,实施例样品 2 在 800℃下具有约 410HV 的维氏硬度,而实施例样品 7 在 300℃下具有约 520HV 的维氏硬度,即,这些样品在从室温到上述高温的温度范围中具有从约 410HV 到约 520HV 的维氏硬度。

[0132] 图 11 还揭示了,所有合金的硬度显示出相反的温度依赖性。也就是说,这些合金具有随温度的上升而非典型性增大的强度特性。典型地说,合金的维氏硬度值随着温度的上升而减小。相反,实施例样品具有和对比实施例一样好的具体特性。

[0133] 另外,关于 800℃下的软化量的对比揭示了,实施例样品 7 比实施例样品 2 和 4 具有更大的软化量。此结果表明了, $L1_2$ 单相微观结构具有优于拥有两相的微观结构 (两相微观结构) 的高温硬度特性。

[0134] (4) 室温拉伸试验

[0135] 接下来对各样品进行拉伸试验。拉伸试验使用具有 $10 \times 2 \times 1 \text{mm}^3$ 的规格尺寸的试样,在 $1.66 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 的应变速率下在室温下在真空中进行。图 12 显示了试验结果。图 12 是显示了样品的抗拉强度、0.2% 试验应力和延伸率相对于 Ta 含量的关系的图。在图 12 中,横坐标代表各样品的 Ta 含量 (原子%),左纵坐标代表抗拉强度或 0.2% 试验应力 (MPa),

而右纵坐标代表延伸率(%)。

[0136] 图 12 表明了,实施例样品 1-7 在抗拉强度和 0.2% 试验应力方面优于对比实施例样品。此结果表明了,向 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 合金中添加 Ta 可增强合金的抗拉强度和 0.2% 试验应力。向合金中添加 Ta 可使抗拉强度和 0.2% 试验应力最大增强约 200MPa。

[0137] 图 12 还表明了,对比实施例样品和实施例样品 1-6 均保持约 30% 的延伸率。即使与传统的金属间化合物、例如在专利文献 2(日本未经审查的专利公开号 HEI 5(1993)-320794) 中公开的具有 1-6% 或 12-24% 的延伸率的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 合金相比,其也揭示了这些合金具有如机器零件的结构材料般足够的延展性。另一方面,其表明了与实施例样品 1-6 相比,实施例样品 7 的 0.2% 试验应力增大,但抗拉强度和延伸率减小。

[0138] 结果揭示了,(1) 向 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 合金中添加 Ta 稍微减小了合金的延伸率,但能保留大约为 30% 的延伸率,和 (2) 达到 7 原子% 的 Ta 含量减小了抗拉强度和延伸率。

[0139] 在拉伸试验之后,对各样品进行断裂面观测。图 13 显示了观测结果。图 13 显示了拉伸试验后对比实施例样品与实施例样品 5 和 7 的断裂面的照片,其中 (1) 显示了对比实施例样品的断裂面,(2) 显示了实施例样品 5 的断裂面,而 (3) 显示了实施例样品 7 的断裂面。

[0140] 图 13 表明了,对比实施例样品具有带凹形图案的可延展的断裂面,而实施例样品 5 也具有带凹形图案的断裂面,但其中的凹处比较浅。图 13 还表明了,实施例样品 7 有许多带有在特定晶面处被破坏的脆弱断裂面的区域。该观测揭示了,向 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 合金中添加 Ta 改变了断裂形态,但在保持延伸率的同时增强了抗拉强度。其还揭示了,已达到 7 原子% 的 Ta 含量进一步改变了断裂形态,并减小了抗拉强度。由于第二相分散物的影响,这是可以考虑到的。

[0141] (5) 抗氧化性试验

[0142] 接下来对各样品进行抗氧化性试验。抗氧化性试验是通过 TG-DTA(热重-差热分析)来进行。具体地说,在各样品暴露于 900℃ 的大气中时测量其每单位表面积的质量增量。图 14 显示了试验结果。

[0143] 图 14 是显示了因抗氧化性试验产生的对比实施例样品与实施例样品 2、4 和 7 的时间和质量增量之间的关系图,即显示了对比实施例样品、实施例样品 2、实施例样品 4 和实施例样品 7 的抗氧化性试验的结果。

[0144] 图 14 表明了,实施例样品 2 和 4 具有对比实施例样品更小的因氧化而产生的质量增量。当时间超过 1000 分钟时,质量增量按实施例样品 4、实施例样品 2、对比实施例样品和实施例样品 7 的顺序增大。鉴于实施例样品 2 和 4 具有单相微观结构的事实,其表明了当向 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 合金中添加 Ta 以形成单相微观结构时,抗氧化性得以增强。

[0145] (6) 磨耗试验

[0146] 接下来对各样品进行磨耗试验。在证明实验 2 中的磨耗试验是销盘磨耗试验,其方法在图 15 中说明。图 15 是说明销盘磨耗试验的概念图。

[0147] 如图 15 所示,销盘磨耗试验是用于评估销的耐磨性,其中将待评估的销 2 置于盘 1 上,向销 2 的一端施加载荷,而销 2 的另外一端设置成与盘 1 的滑动表面接触,然后旋转盘 1。盘用硬质合金(G5)制得,而销 2 通过将各样品形成为圆柱体形状而获得。具体地说,将具有 15mm 的高度(图 15 中的 H)和 5mm 的直径(图 15 中的 D)的圆柱体销 2 放置在盘上

距离中心 15mm 处（图 15 中的 X）以进行试验。销盘磨耗试验在 100N 的载荷下，在 300rpm 的旋转频率和经过 1413.7m 的总滑行距离，在室温（约 25℃）的大气中进行 30 分钟。该试验是干磨耗试验，不使用润滑油。耐磨性根据在总滑行距离之后销的质量损失和体积损失的量来评估。表 8 显示了试验结果。

[0148] 表 8 显示了在磨耗试验中各样品的磨耗质量损失、磨耗体积损失率和磨耗比。在表 8 中，磨耗质量损失指的是由于磨耗试验引起的销的质量损失量，而磨耗体积损失率指的是相对于滑行距离而言的销的体积损失量（销的每单位距离的体积损失量）。此外，磨耗比指的是代表相对于对比实施例样品而言各样品的更好或更差的耐磨性的比率（指标），其中对比实施例样品为 1。

[0149] 表 8

[0150]

样品	磨耗质量损失 单位: g	磨耗体积损失率 单位: $10^{-3}\text{mm}^3/\text{m}$	磨耗比（相对于为 1 的 对比实施例样品）
对比实施例样品	0.11208	9.88	1.00
实施例样品 2	0.10771	9.17	1.08
实施例样品 4	0.07878	6.35	1.56
实施例样品 7	0.07804	5.94	1.66

[0151] 此外，图 16 显示了表 8 中的磨耗比的结果。图 16 是显示了各样品的磨耗比的图。在此，磨耗比是表 8 所示的各样品的体积损失率除以对比实施例样品的体积损失率所得到的值的倒数，并且较大的磨耗比意味着较好的耐磨性。

[0152] 图 16 表明了，向 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 合金中添加 Ta 可增强合金在室温中的耐磨性。尤其是，当 Ta 含量为 4 原子%或更多时，合金的耐磨性可显著增强。虽然合金在室温中的耐磨性被认为在很大程度上依赖于硬度，然而图 16 显示的结果表明了，在大于 2 原子%至小于或等于 4 原子%的 Ta 含量范围内，耐磨性的改变是明显的。

[0153] 如上所述的证明实验 2 已证明了，实施例样品具有优于对比实施例样品的硬度（强度）特性，如同证明实验 1 中的情况一样。证明实验 2 还证明了，实施例样品即使在高温中也具有优于对比实施例样品的硬度（强度），并且尤其当拥有单相微观结构时具有增强的抗拉强度和抗氧化性特性。进一步证明的是，当 Ta 含量大于 2 原子%时，耐磨性更好。

[0154] 工业应用性

[0155] 本发明可提供一种适用于摩擦部件的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物，这是因为 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物在常温下具有优良的硬度，并且具有优良的耐磨性。本发明还可提供一种具有如机械结构般优良特性的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物，这是因为本发明的 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物保持了不亚于或优于传统 $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物的延展性。

[0156] 此外， $\text{Ni}_3(\text{Si}, \text{Ti})$ 基金属间化合物由于其不仅在常温下、而且在高温下能够保持优良的硬度而对高温机器零件的材料十分有用，并且由于具有优良的抗氧化性特性而在氧化的高温环境中更加有用。

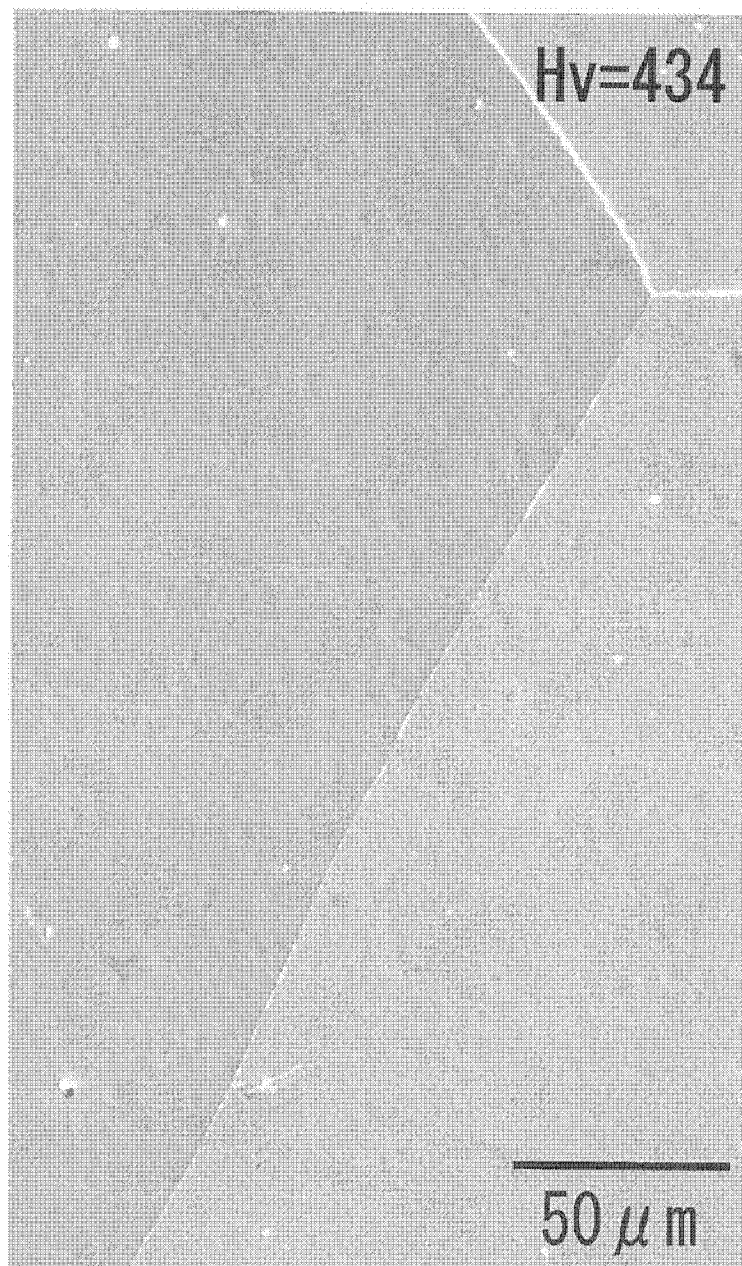


图 1

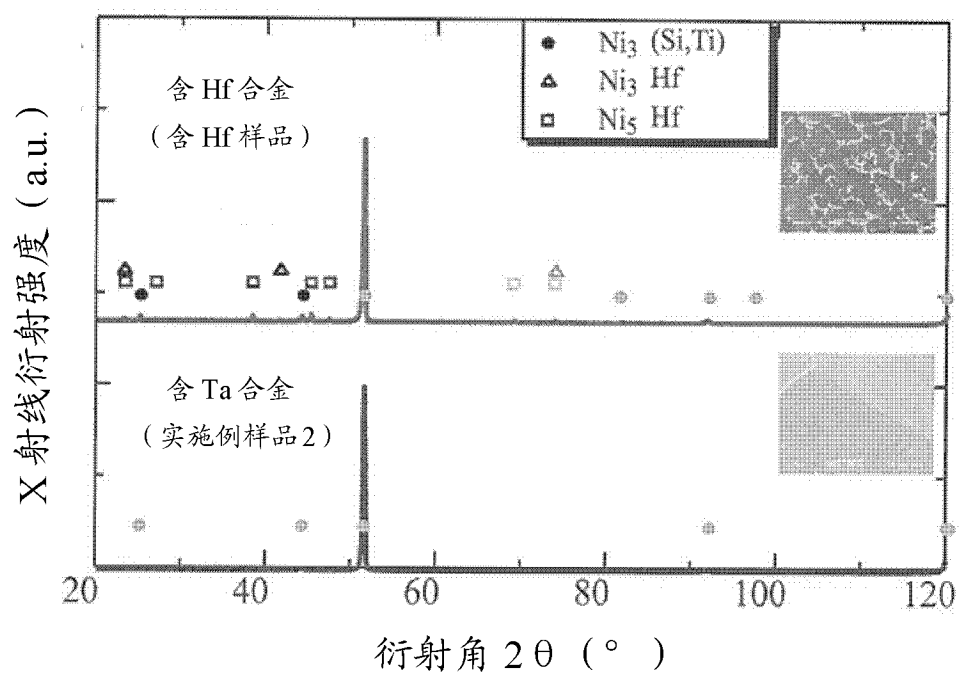


图 2

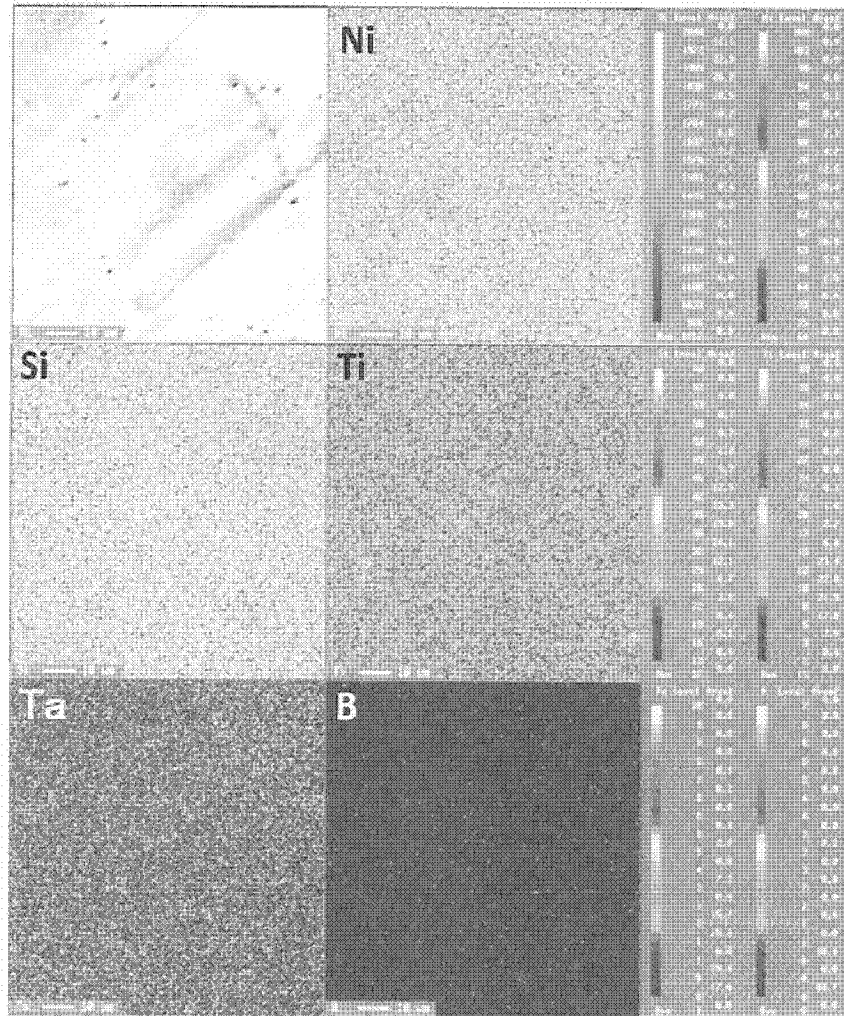


图 3

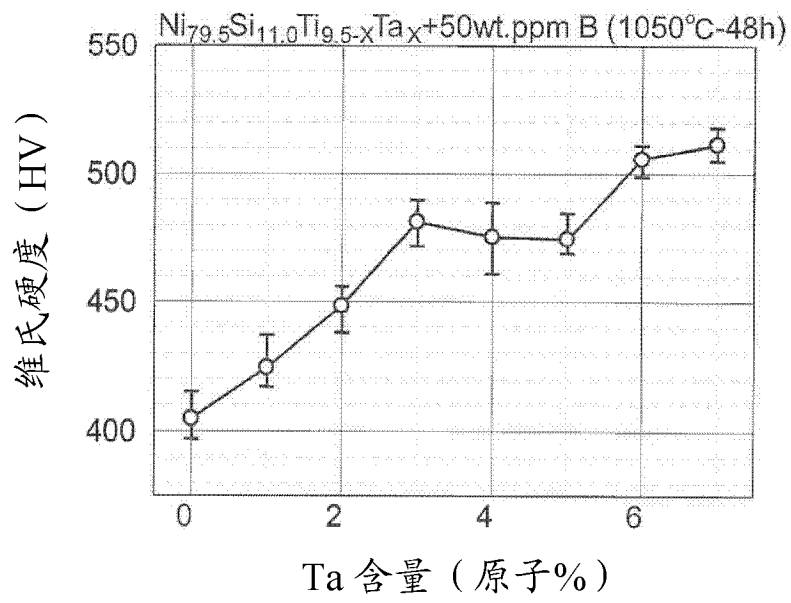


图 4

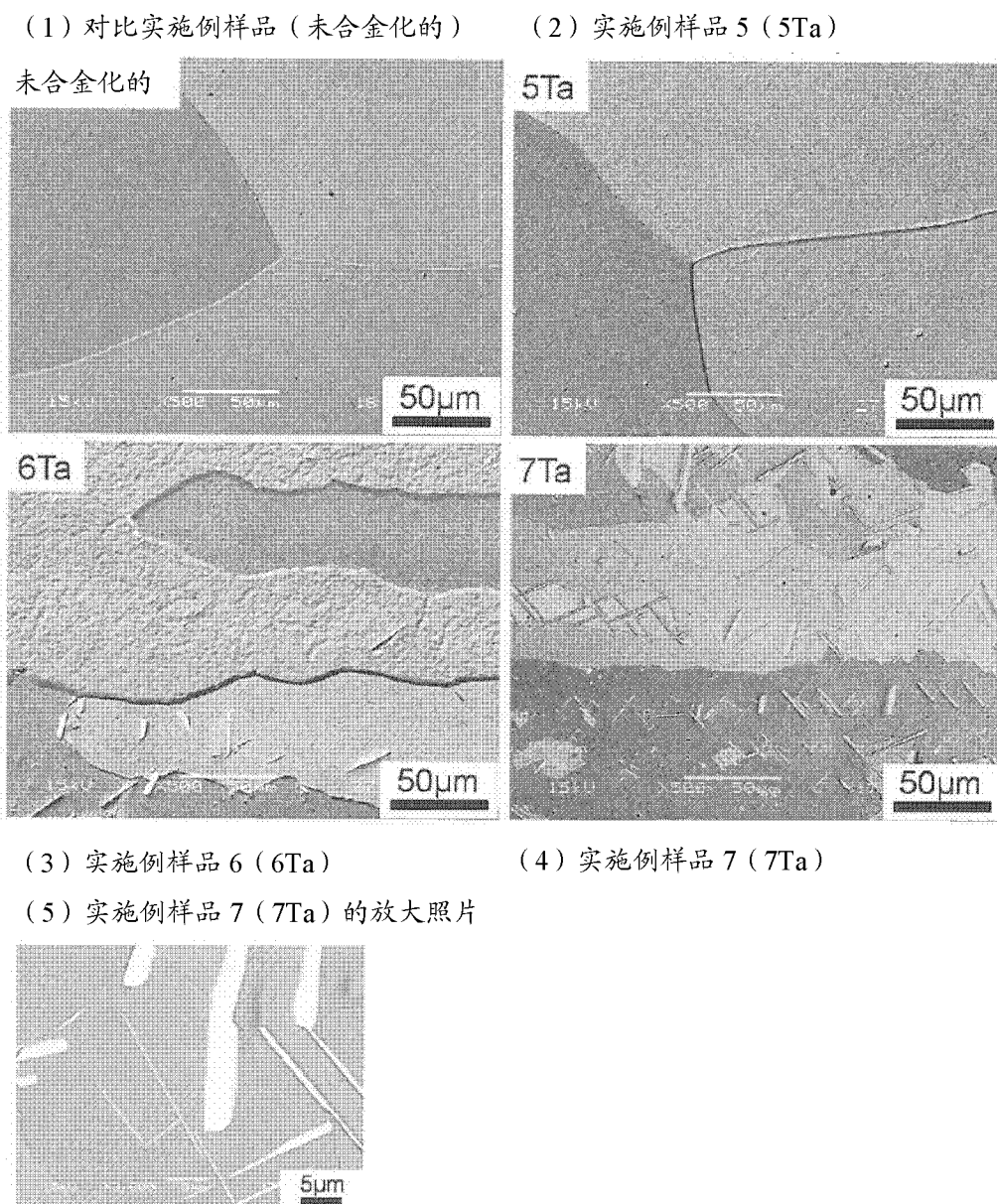


图 5

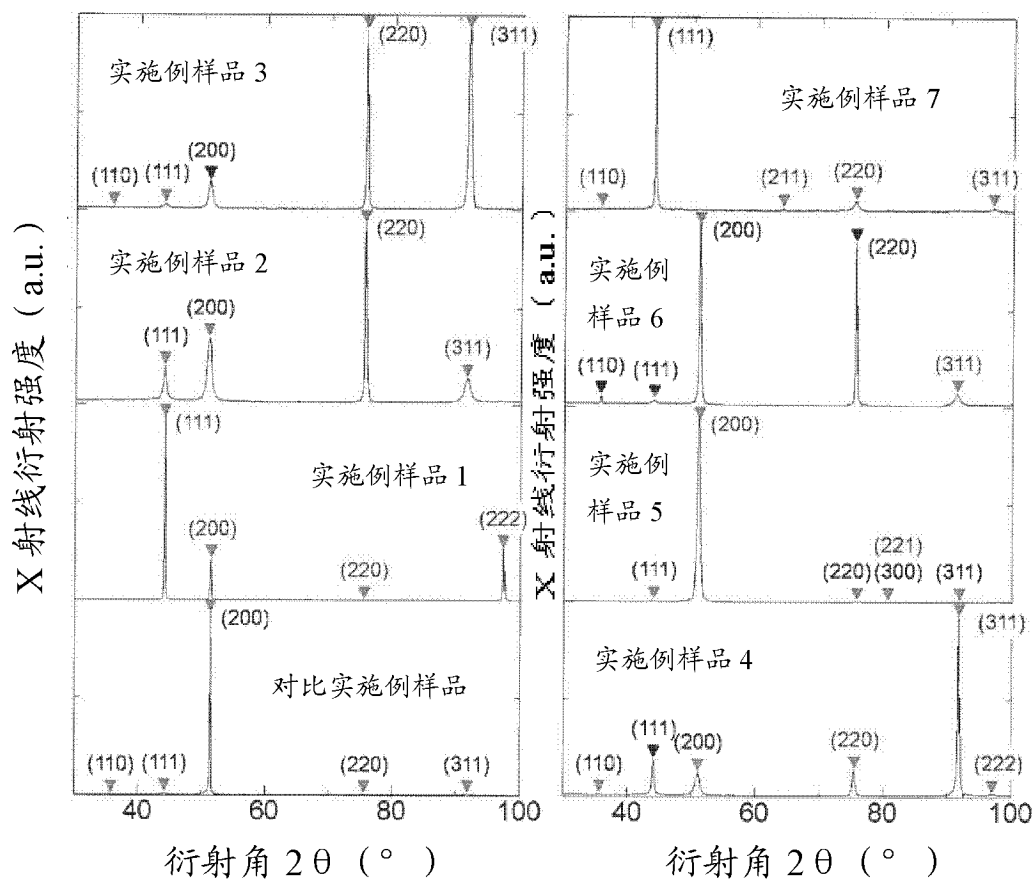


图 6

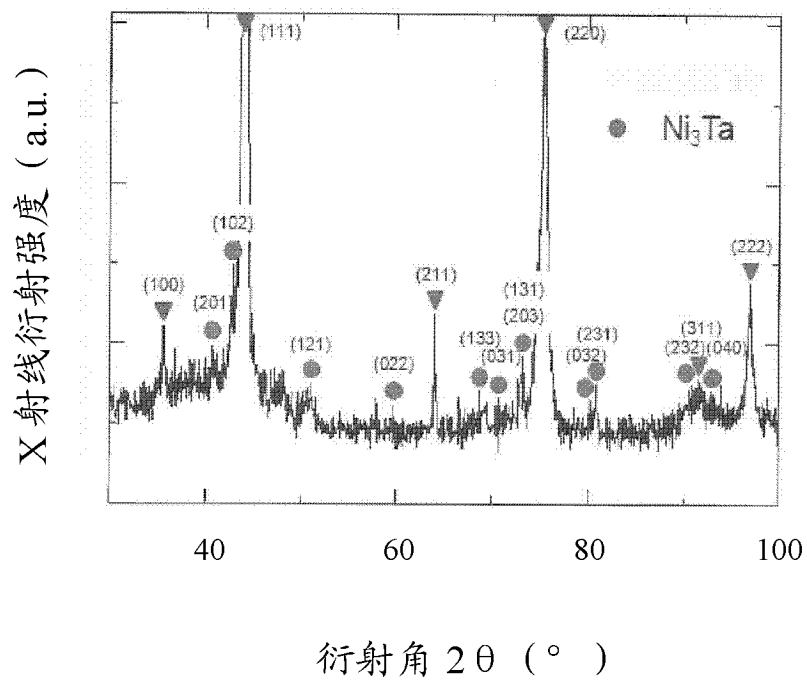


图 7

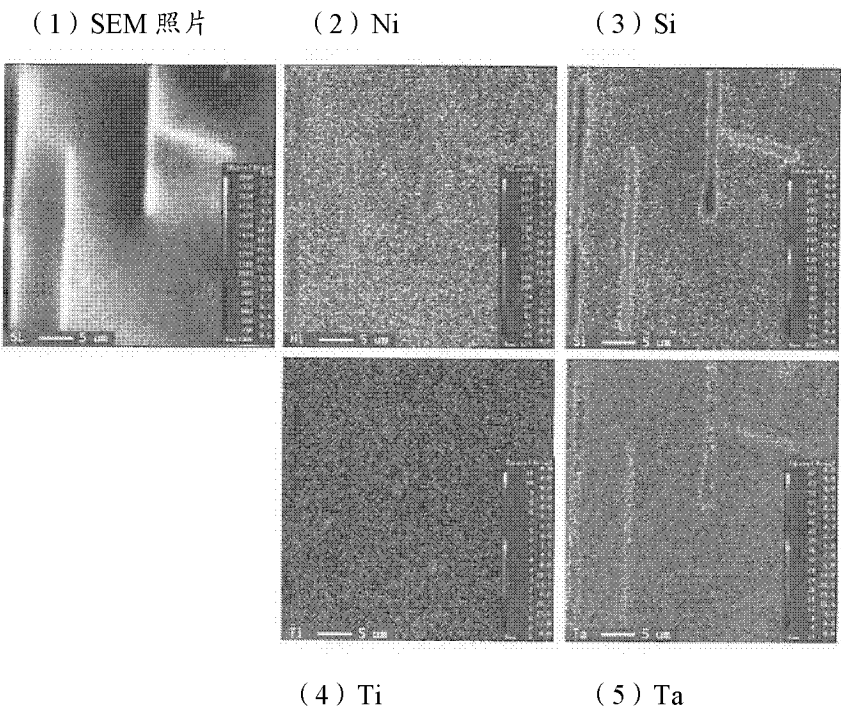


图 8

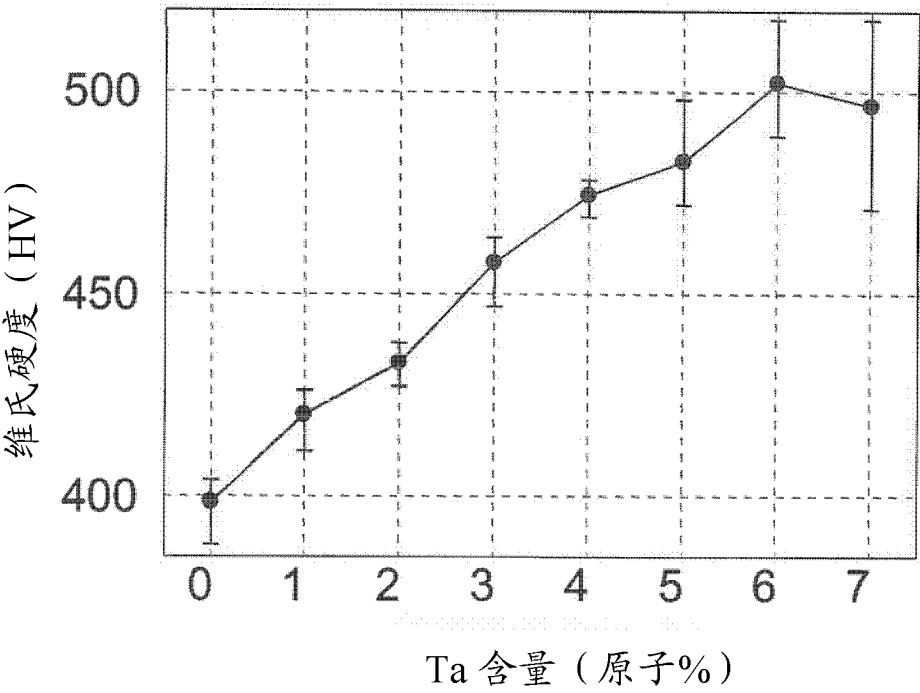


图 9

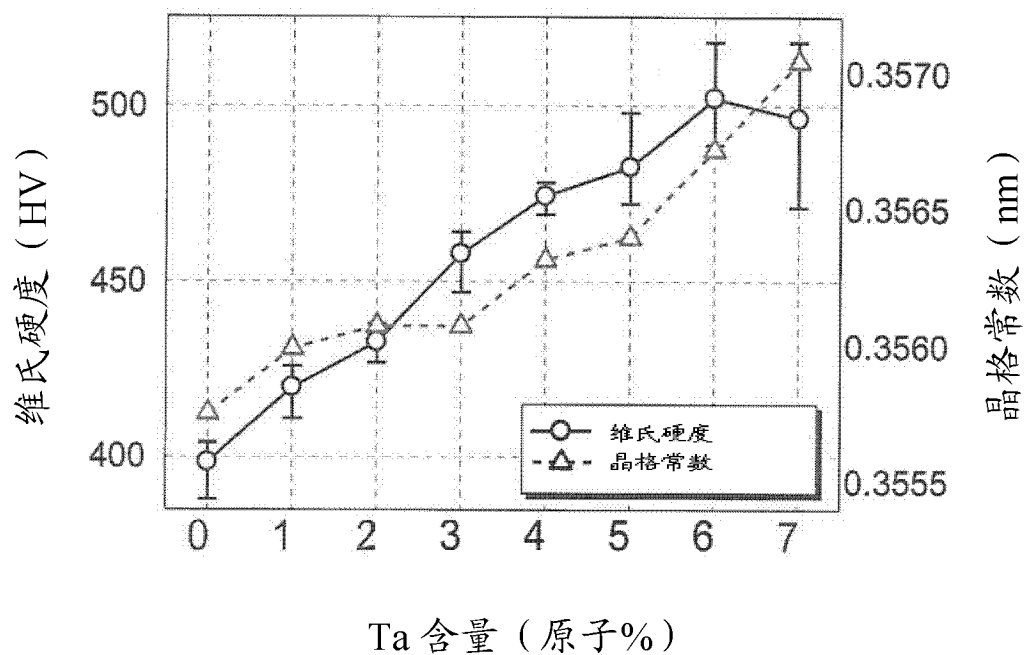


图 10

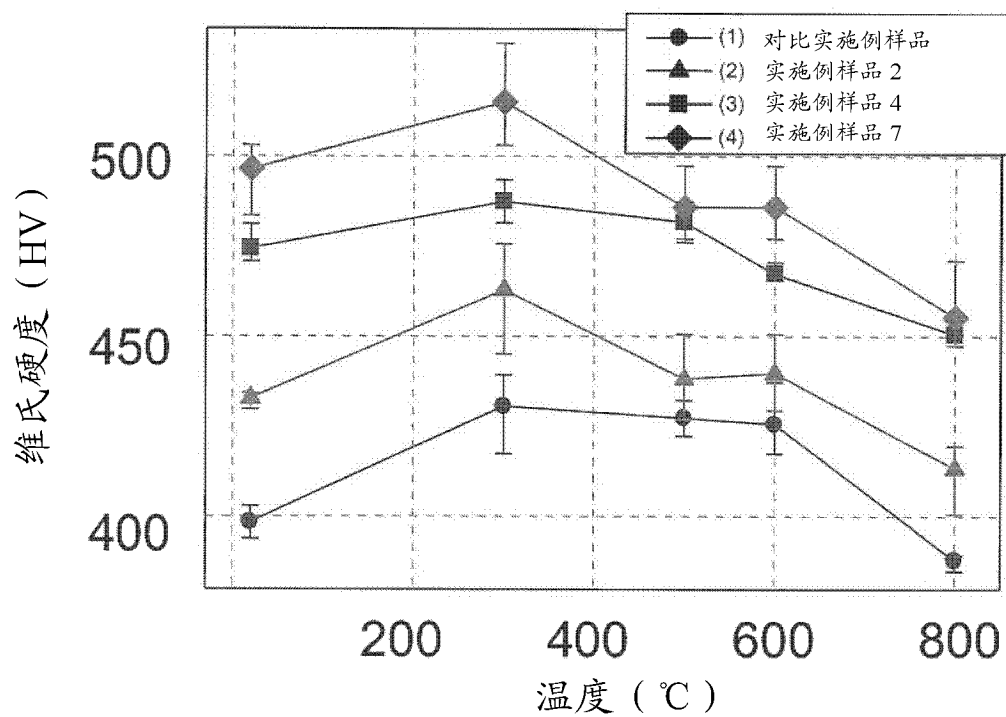


图 11

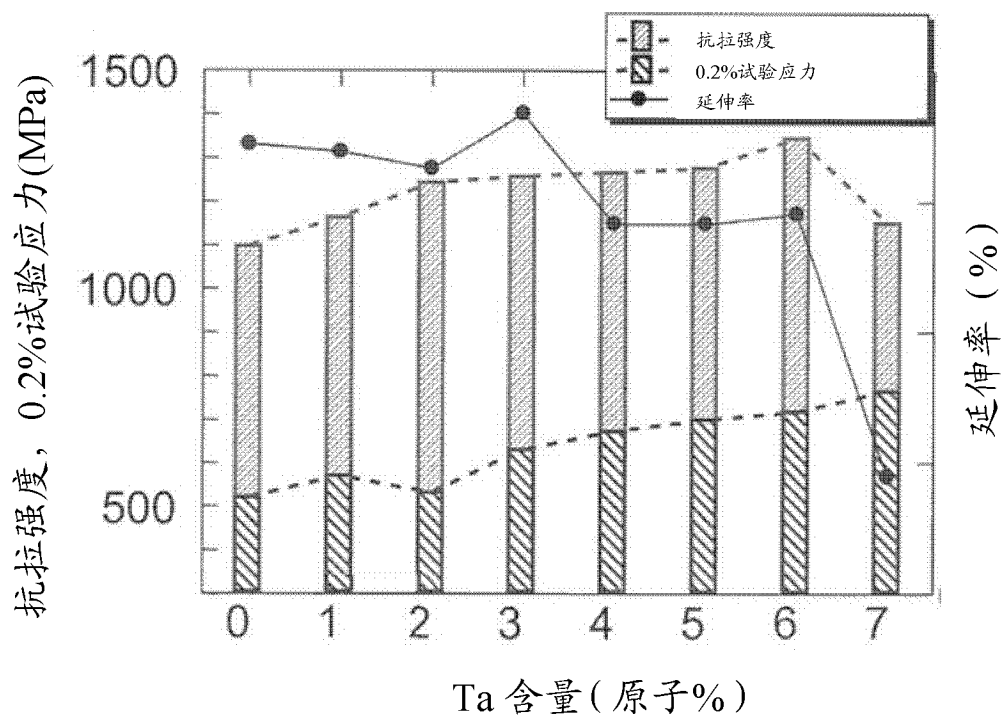
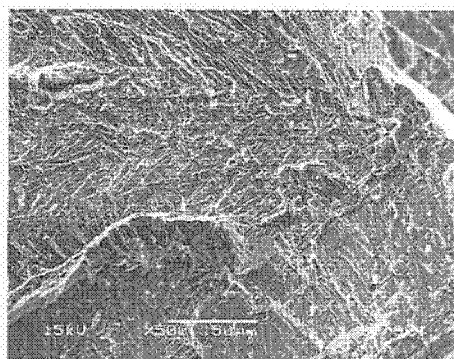
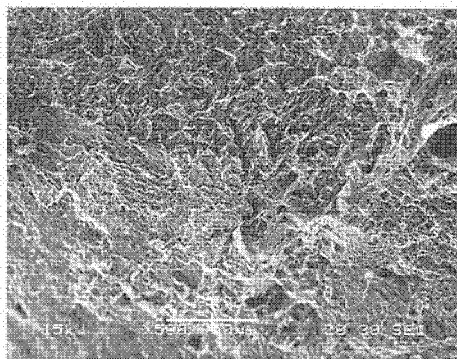


图 12

(1) 对比实施例样品 (未合金化的)

(2) 实施例样品 5 (5Ta)



(3) 实施例样品 7 (7Ta)

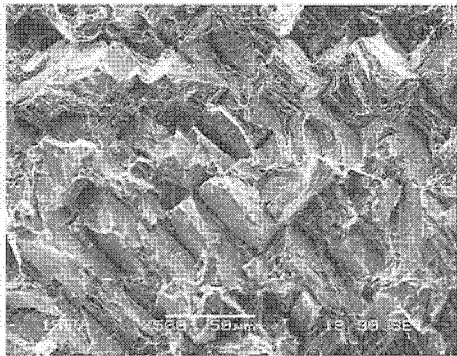


图 13

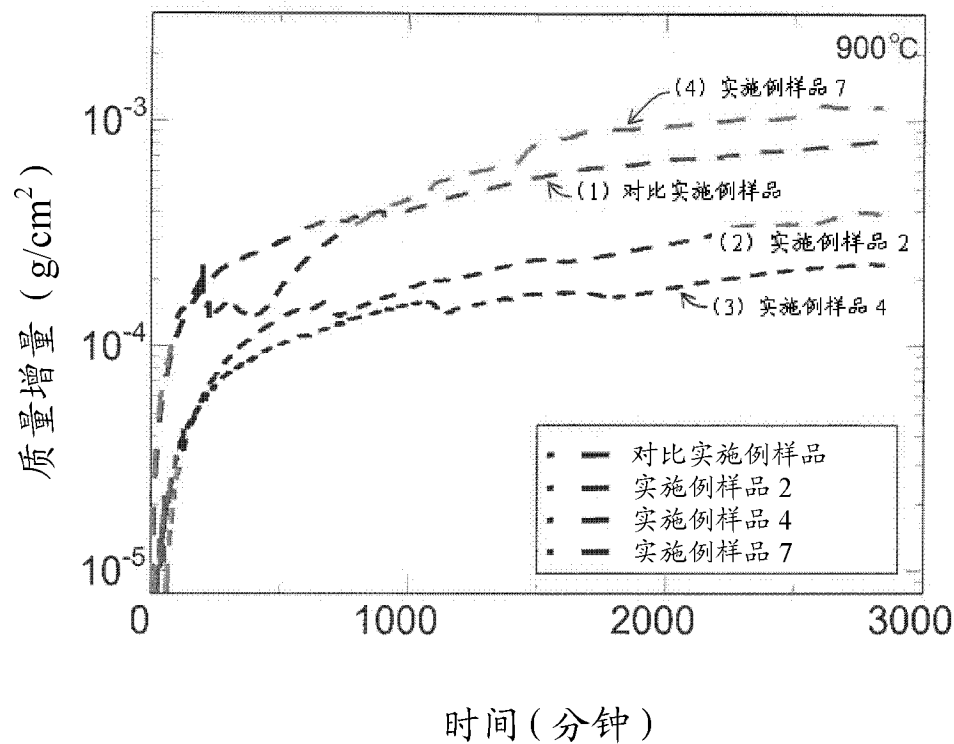


图 14

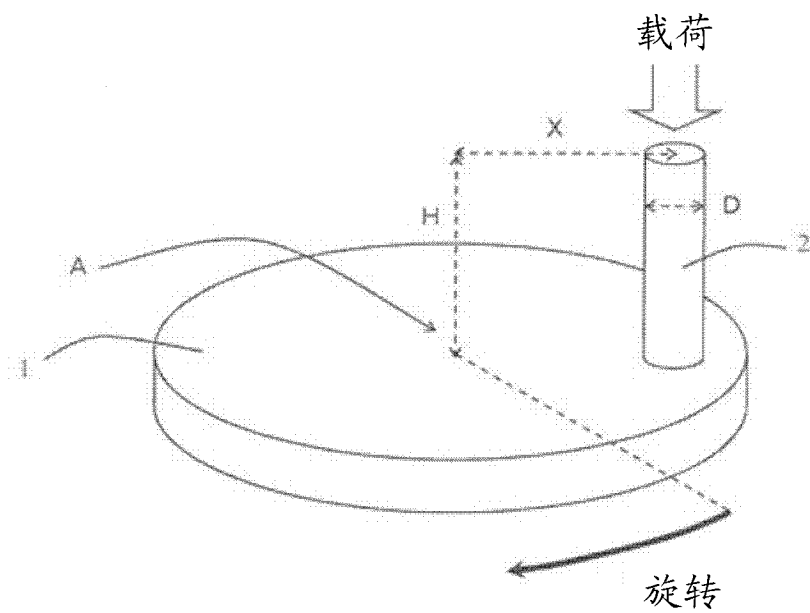


图 15

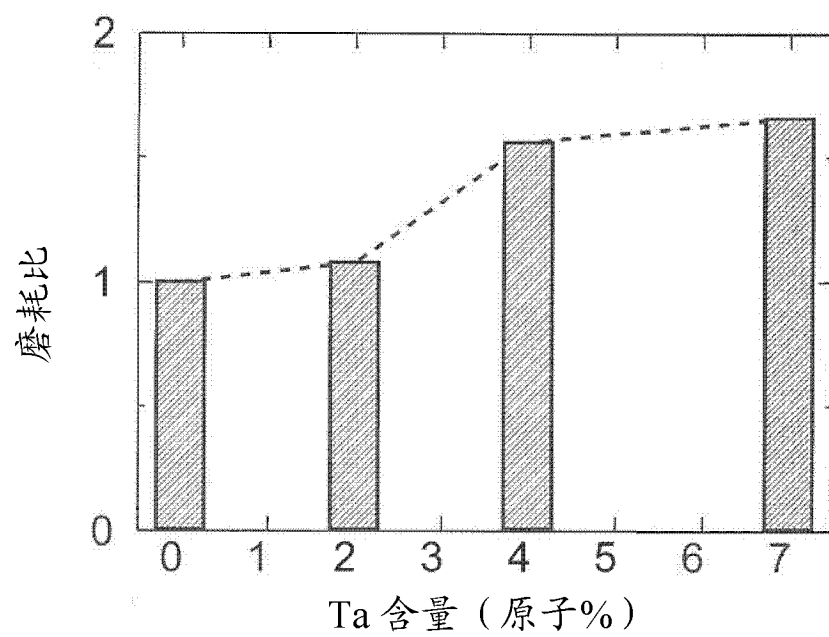


图 16