



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103233174 B

(45) 授权公告日 2015.06.10

(21) 申请号 201310150983.2

EP 1087029 A2, 2001.03.28, 全文.

(22) 申请日 2013.04.26

US 6325766 B1, 2001.12.04, 全文.

(73) 专利权人 中国科学院金属研究所

Ke Yang 等. Nickel-free austenitic stainless steels for medical applications. 《Science and Technology Advanced Materials》. 2010, 第 11 卷全文.

地址 110015 辽宁省沈阳市沈河区文化路 72 号

(72) 发明人 任伊宾 王青川 邵传伟 肖克沈 杨柯

Yibin Ren 等. In vitro study of platelet adhesion on medical nickel-free stainless steel surface. 《Materials Letters》. 2005, 第 59 卷全文.

(74) 专利代理机构 沈阳晨创科技专利代理有限公司 21001

杨化娟等. 含 La 医用 316L 不锈钢在生理盐水中的腐蚀行为. 《中国腐蚀与防护学报》. 2006, 第 26 卷 (第 5 期),

代理人 张晨

审查员 龚道良

(51) Int. Cl.

C22C 38/38(2006.01)

C22C 30/00(2006.01)

C22C 38/58(2006.01)

G21D 8/00(2006.01)

A61F 2/82(2013.01)

(56) 对比文件

CN 1351674 A, 2002.05.29,

CN 1519387 A, 2004.08.11,

CN 101077425 A, 2007.11.28,

权利要求书1页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

一种血管支架用高氮奥氏体不锈钢及其应用

(57) 摘要

本发明提供了一种血管支架用高氮奥氏体不锈钢材料,所述不锈钢其化学成分组成及重量百分比为:Cr:16~20%,Mn:12~20%,Mo:1~3%,Cu:0.5~2%,Ni≤0.05%,N:0.7~1.2%,W:0.5~8%,RE:0.05-0.5%,C≤0.08%,Si:0.3~4%,S≤0.010%,P≤0.02%,Fe:余量;其中RE为稀土元素。本发明高氮不锈钢主要用于血管支架的加工,通过加铜、氮和稀土元素提高不锈钢的血液相容性,通过加入钨合金提高不锈钢的密度,该不锈钢具有在X射线下优良的可视性,同时不含潜在毒性镍元素,还可用于外科植入物、医疗器械、食品餐饮器械、首饰及其它与人体经常接触的不锈钢产品方面,也可应用于化工、环保等领域。

CN 103233174 B

1. 一种血管支架用高氮奥氏体不锈钢,其特征在于:所述不锈钢其化学成分组成及重量百分比为:铬 Cr:16 ~ 20%, 锰 Mn:12 ~ 20%, 钼 Mo:1 ~ 3%, 铜 Cu:1.02 ~ 2%, 镍 Ni ≤ 0.05%, 氮 N:0.7 ~ 1.2%, 钨 W:2.2 ~ 8%, RE:0.05-0.5%, 碳 C ≤ 0.08%, 硅 Si:1.25 ~ 4%, 硫 S ≤ 0.010%, 磷 P ≤ 0.02%, 铁 Fe:余量;其中 RE 为稀土元素。

2. 按照权利要求 1 所述血管支架用高氮奥氏体不锈钢,其特征在于:铬 Cr:16 ~ 18%, 锰 Mn:14 ~ 16%, 钼 Mo:1 ~ 2%, 铜 Cu:1.02 ~ 1.5%, 镍 Ni ≤ 0.05%, 氮 N:0.8 ~ 1.0%, 钨 W:2.2 ~ 4%, RE:0.05-0.2%, 碳 C ≤ 0.03%, 硅 Si:1.25 ~ 2%, 硫 S ≤ 0.010%, 磷 P ≤ 0.02%, 铁 Fe:余量。

3. 按照权利要求 1 或 2 所述血管支架用高氮奥氏体不锈钢,其特征在于:稀土 RE 中镧含量 ≥ 90wt%。

4. 按照权利要求 1 或 2 所述血管支架用高氮奥氏体不锈钢,其特征在于:所述不锈钢表面钝化层含有铬、硅、铜和氮元素,在不锈钢微量腐蚀过程中通过其相应离子或化合物改善血管硬化状态,恢复血管弹性。

5. 一种如权利要求 1 或 2 所述血管支架用高氮奥氏体不锈钢的制备方法,其特征在于,所述不锈钢的热加工及热处理工艺为:

热加工:钢锭于 1050 ~ 1200℃ 均匀化处理 2 ~ 4 小时,开坯,分多火锻造成棒材和初轧坯料,终锻温度不低于 950℃;

热处理:根据不锈钢样品大小,在 1100 ~ 1200℃ 固溶处理 0.5 ~ 4 小时,使铬、铜、氮以及硅的化合物或夹杂充分固溶;

在固溶处理后,对不锈钢进行时效弥散处理和低温预钝化处理:在 450 ~ 600℃ 时效强化 0.5 ~ 4 小时;在 50 ~ 100℃ 大气环境下保温预钝化处理 0.5 ~ 5 小时。

6. 按照权利要求 5 所述血管支架用高氮奥氏体不锈钢的制备方法,其特征在于:所述高氮奥氏体不锈钢采用加压感应炉冶炼或其它加压熔炼设备冶炼,保护气氛中氮气压力为 0.2MPa-1MPa,合金中的氮元素通过粒状高氮合金方式加入,高氮合金中氮含量不低于 5%,所述高氮合金为 FeCrN、CrN、MnN、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 之一或多种。

7. 一种如权利要求 1 所述血管支架用高氮奥氏体不锈钢在制备外科植入物、医疗器械方面的应用。

8. 按照权利要求 7 所述血管支架用高氮奥氏体不锈钢在制备外科植入物、医疗器械方面的应用,其特征在于,所述外科植入物为血管支架。

9. 一种如权利要求 1 所述血管支架用高氮奥氏体不锈钢在食品餐饮器械、首饰、化工、环保领域的应用。

## 一种血管支架用高氮奥氏体不锈钢及其应用

### 技术领域

[0001] 本发明属于合金领域,特别提供一种血管支架用高氮奥氏体不锈钢。

### 背景技术

[0002] 动脉粥样硬化是近年来威胁人类健康的常见疾病,冠状动脉内支架手术是冠状动脉粥样硬化性心脏病患者血运重建的一种非常重要的方法。如今冠状动脉支架术后再狭窄的问题随着药物洗脱支架(drug-eluting stents, DES)的出现得到很大程度的改善,但是药物洗脱支架由于血管内皮化不全或延迟导致的中远期支架内血栓有可能再次增加支架内再狭窄的发生几率。目前普遍认为,血管支架内再狭窄主要是血管内膜受到支架的机械刺激后诱导平滑肌细胞的迁移和过度增殖所致。虽然药物洗脱支架借助药物改善和推迟了内膜增生,降低了术后再狭窄率,但是支架表面药物释放后支架网格对内皮组织的机械刺激持续存在,而且残留的高分子材料以及来自支架金属自身腐蚀溶出的金属离子(如镍、锰、钼等)可能会加强这种刺激。因此降低或减少支架对内膜组织的刺激一直是支架制造厂商和临床医生关心的重要问题。因此发展新型支架用材料,减少或去除其中对内膜组织有刺激或过敏等副作用的金属元素,同时添加有益血管组织的合金化元素来提高其生物相容性,能够从根本上降低支架材料对血管内膜组织的刺激。目前采用高强度的合金或不锈钢加工的精细网丝的支架已经在临床获得应用,并表现出优良的性能,网丝尺寸平均在 $70\ \mu\text{m}$ ,但是细网丝支架带来的问题就是支架在 X 射线下的可视性较差,所以提高支架材料的密度至关重要。

[0003] 医用高氮无镍不锈钢经过了近 20 年的研究与发展,目前已经有 2 种外科植入用高氮无镍奥氏体不锈钢列入美国 ASTM 材料标准中(ASTM F2229-02, F2581-07),并开始应用于临床,主要是骨科领域。在国内中国科学院金属研究所率先开展了氮强化奥氏体无镍不锈钢的研究,授权专利是“一种医用植入奥氏体不锈钢材料”(专利号:03110896.2),所保护的医用无镍奥氏体不锈钢氮含量在 $0.4\% \sim 0.7\%$ (质量含量),但是其奥氏体稳定性较差,而且其密度仅 $7.7\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,加工成细网丝支架后的可视性较差。因此特别针对血管支架加工使用的高密度高强度的高氮奥氏体不锈钢的研发势在必行。

### 发明内容

[0004] 针对以上问题,本发明提供了一种具有优良的血液相容性和 X 射线下良好可视性的血管支架用高氮奥氏体不锈钢材料,该材料在现有高氮无镍不锈钢的基础上添加对血管组织有益的稀土 RE 元素、硅元素、铜元素和氮元素来提高不锈钢的血液相容性,同时添加高密度钨元素提高不锈钢的密度来增加不锈钢在 X 射线下的可视性,且不含毒性镍元素。

[0005] 本发明具体提供了一种血管支架用高氮奥氏体不锈钢,其特征在于:所述不锈钢其化学成分组成及重量百分比为:铬 Cr : $16 \sim 20\%$ , 锰 Mn : $12 \sim 20\%$ , 钼 Mo : $1 \sim 3\%$ , 铜 Cu : $0.5 \sim 2\%$ , 镍 Ni  $\leq 0.05\%$ , 氮 N : $0.7 \sim 1.2\%$ , 钨 W : $0.5 \sim 8\%$ , RE : $0.05 \sim 0.5\%$ , 碳 C  $\leq 0.08\%$ , 硅 Si : $0.3 \sim 4\%$ , 硫 S  $\leq 0.010\%$ , 磷 P  $\leq 0.02\%$ , 铁 Fe :余量;其中 RE 为稀土元素。优选为

铬 Cr :16 ~ 18%, 锰 Mn :14 ~ 16%, 钼 Mo :1 ~ 2%, 铜 Cu :0.75 ~ 1.5%, 镍 Ni  $\leq$  0.05%, 氮 N :0.8 ~ 1.0%, 钨 W :2 ~ 4%, RE :0.05-0.2%, 碳 C  $\leq$  0.03%, 硅 Si :0.5 ~ 2%, 硫 S  $\leq$  0.010%, 磷 P  $\leq$  0.02%, 铁 Fe :余量。

[0006] 本发明所提供的无镍高氮奥氏体不锈钢中,为了避免镍元素的潜在致敏和致癌等危害,考虑到冶金原料中镍的残余含量,本发明高氮奥氏体不锈钢中控制镍 Ni  $\leq$  0.05%。

[0007] 本发明所提供的无镍高氮奥氏体不锈钢,为了保证优良的力学性能和耐蚀性能,特别是冷加工性能,严格控制合金中的碳含量,本发明高氮奥氏体不锈钢中碳含量最好控制在 C  $\leq$  0.08%。

[0008] 本发明所提供的高氮奥氏体不锈钢含有氮元素,首先氮是稳定奥氏体组织的合金元素,氮的奥氏体化能力大约是镍的 20-30 倍。为保证钢的单一稳定奥氏体结构、优良的力学性能和高的耐蚀性,氮含量应控制在 0.7% 以上,其次合金中的氮元素在人体内是宏量元素,而且腐蚀过程形成的  $\text{NH}_4^+$  或  $\text{NH}_3$ , 少量的  $\text{NH}_3$  或  $\text{NH}_4^+$  可以水解形成局部弱碱性环境而提高其生物相容性和血液相容性。根据化学反应  $3\text{NO} + 2\text{NH}_3 \leftrightarrow 5\text{N} + 3\text{H}_2\text{O}$ , 氮原子和水反应除了生成  $\text{NH}_3$  外,还可以生成 NO, 而 NO 与心血管疾病关系密切,NO 可促进血管舒张,防止动脉粥样斑块和硬化的形成和发展,NO 也可抑制血小板的活化和聚集,被称为内源性血小板聚集和粘附抑制物,其作用机制与扩血管作用相似。本发明中较高的氮含量有助于不锈钢表面钝化层在缓慢腐蚀过程中,形成 NO 或  $\text{NH}_3$  等氮化物改善植入物部位的生物相容性。但是合金中过多的氮影响合金的冷热加工性能,因此考虑到冶金学因素及对冷加工性及冷成形性能的影响,本发明高氮奥氏体不锈钢中氮含量控制在 0.7 ~ 1.2%。

[0009] 本发明所提供的高氮奥氏体不锈钢含有铬元素,在生物医学上,铬是一种必需的微量元素。三价铬是人体必需的,具有重要的营养作用,胰岛素发挥作用时需要铬参加。铬参与调节脂肪和胆固醇的代谢,微量的铬可以预防动脉硬化,恢复血管壁弹性。同时铬是高氮不锈钢具有耐蚀性最主要的合金元素,在氧化介质中,铬能使合金表面上迅速生成氧化铬(例如  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) 的钝化膜,提高不锈钢的耐蚀性。由于铬是不锈钢中主要的耐蚀元素,而且也提高合金中氮的溶解度,考虑到铬是铁素体形成元素,本发明高氮奥氏体不锈钢中铬含量控制在 16 ~ 20%。

[0010] 本发明所提供的高氮奥氏体不锈钢含有锰元素,首先合金中的锰是人体必需的微量元素,锰在动植物及人体内均有重要的作用,是酶的辅因子,可促进维生素合成,锰参与蛋白质的合成代谢,还能激活 DNA 聚合酶等。Mn 离子还可以通过与 Ni 离子竞争靶细胞(如自然杀伤细胞 NK) 上的受体,抑制致敏 Ni 离子的吸收,从而改变镍离子所致的亚细胞破坏等。其次合金中的锰元素是奥氏体形成元素,具有强烈稳定高氮不锈钢奥氏体基体的作用。在本发明不锈钢中锰元素另一重要的作用是增加钢中氮的溶解度,考虑到合金中的氮含量,本发明高氮奥氏体不锈钢中锰含量控制在 12 ~ 20%。

[0011] 本发明所提供的高氮奥氏体不锈钢含有钼元素,首先作为外科植入用合金,钢中的钼同时也是一种重要的人体必需微量元素,钼元素对人体的心血管具有特殊的保护作用。其次钼加入高氮不锈钢中主要用来提高钢的耐蚀性特别是耐点蚀及缝隙腐蚀等性能。考虑到钼是铁素体形成元素,本发明高氮奥氏体不锈钢中钼含量控制在 1 ~ 3%。

[0012] 本发明所提供的高氮奥氏体不锈钢含有铜元素,首先铜是较弱的奥氏体化元素,还适当提高耐蚀性。其次铜是一种重要的人体必需微量元素,铜是构成通栏蛋白的重要成

分,参与铁的代谢和抗氧化。而且铜对心血管系统有重要的作用,铜对心脏和动脉中主要结缔组织的形成是必不可少的,铜是使心脏和动脉壁富有弹性的纤维物质和弹性硬蛋白形成酶的组成部分。同时铜离子还有一定的广谱抗菌功能,少量的铜元素还可以提高不锈钢的耐蚀性和冷成型性能,铜在含镍奥氏体不锈钢中可以和镍形成固溶体而存在,但是在高氮无镍不锈钢中缺乏和铜形成固溶体的合金元素,铜的溶解度有限,严重影响其热加工性能,考虑到高氮无镍不锈钢中铜含量若高于 2% 就会明显影响钢的可锻性,所以本发明高氮奥氏体不锈钢中铜含量控制在 0.5 ~ 2%。

[0013] 本发明所提供的高氮奥氏体不锈钢含有稀土元素,首先稀土在不锈钢的冶炼中可以起到净化钢液,减少和改变夹杂物的形状等作用。其次稀土也是一种重要的微量元素,稀土已广泛用于治疗烧伤、炎症、皮肤病和血栓病等方面,稀土元素表现出抗凝血,消炎杀菌和抗动脉硬化等优势。为了减少混合稀土对本发明不锈钢的不明影响,本发明高氮不锈钢中稀土元素以镧元素为主( $\geq 90\%$ ),考虑到大量稀土元素影响不锈钢的力学性能,本发明高氮奥氏体不锈钢中稀土含量控制在 0.05 ~ 0.5%。

[0014] 本发明所提供的高氮奥氏体不锈钢含有钨元素,钨在不锈钢中也是铁素体形成元素,其作用和 Mo 类似,可以提高不锈钢的耐蚀性能,本发明中钨的加入主要是为了提高不锈钢的密度,从而提高不锈钢在 X 射线下的可视性,有利于血管支架细网丝化加工后的可视操作。虽然加入钨可以提高不锈钢密度为其加入百分含量的 10 倍,即加入 6% 钨含量可以将不锈钢密度提高到  $8.4\text{g}/\text{cm}^3$  左右,但是考虑到过多的钨含量影响不锈钢的力学性能,本发明高氮奥氏体不锈钢中钨含量控制在 0.5 ~ 8%。

[0015] 在本发明所提供的高氮奥氏体不锈钢中,硅也是一种有益的微量元素,尤其对心血管有保护作用,可缓解动脉硬化,恢复血管弹性。含硅药物早已用于临床,而硅在不锈钢中通常作为杂质,部分降低不锈钢的耐蚀性能。在本发明中硅加入不锈钢中,通过本发明提出的固溶处理、时效弥散处理和低温预钝化处理工艺,使硅在不锈钢表面形成富氮富硅表面层,通过不锈钢微量腐蚀过程中生产的含氮和含硅物质来缓解动脉硬化,恢复血管弹性。考虑到硅元素可促使铁素体的形成以及降低耐蚀性,因此本发明高氮奥氏体不锈钢中硅含量控制在 0.3 ~ 4%。

[0016] 硫和磷在本发明高氮不锈钢被视为有害杂质,因此本发明钴基合金中控制硫含量应低于 0.01%,控制磷含量在 0.02% 以下。

[0017] 本发明所述不锈钢表面钝化层含有铬、硅、铜和氮等合金元素,在不锈钢微量腐蚀过程中通过其相应离子或化合物改善血管硬化状态,恢复血管弹性。

[0018] 本发明还提供了上述高氮不锈钢的制备方法,所述不锈钢的热加工及热处理工艺为:

[0019] 热加工:钢锭于  $1050 \sim 1200^\circ\text{C}$  均匀化处理 2 ~ 4 小时,开坯,分多火锻造成棒材和初轧坯料,终锻温度不低于  $950^\circ\text{C}$ 。

[0020] 热处理:根据不锈钢样品大小,在  $1100 \sim 1200^\circ\text{C}$  固溶处理 0.5 ~ 4 小时,空冷或水冷至室温,使铬、铜、氮以及硅的化合物或夹杂充分固溶,所得显微组织为单相奥氏体。

[0021] 在固溶处理后,还可对不锈钢进行时效弥散处理和低温预钝化处理:

[0022] 时效弥散处理:在  $450 \sim 600^\circ\text{C}$  时效强化 0.5 ~ 4 小时,使铬、铜、氮以及硅的化合物或其它组成相均匀弥散分布在不锈钢内部。

[0023] 低温预钝化处理：在 50 ~ 100℃ 大气环境下保温预钝化处理 0.5 ~ 5 小时，使不锈钢表面形成含有铬、硅、铜、氮等元素的钝化膜层。

[0024] 本发明高氮奥氏体不锈钢采用加压感应炉冶炼或加压电渣重熔等其它加压熔炼设备冶炼，保护气氛中氮气压力为 0.2MPa-1MPa，合金中的氮通过粒状高氮合金（如 FeCrN、CrN、MnN、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 之一种或多种）的方式加入，高氮合金中氮含量不低于 5%。

[0025] 为了使本发明血管支架用无镍奥氏体不锈钢中有益的合金元素能够作用于植入部位的组织，改善血管的弹性，降低支架的再狭窄，本发明不锈钢必须实施特定的热处理，使其中有益的铬、铜、氮以及硅元素均匀弥散分布在不锈钢表面，通过后期不可避免的缓慢腐蚀释放的离子或化合物来作用机体组织。

[0026] 本发明优势：

[0027] 本发明高氮奥氏体医用不锈钢相对传统血管支架材料，首先完全抛弃了有致敏、诱发血栓形成和致癌作用的毒性镍元素。其次不锈钢中对血管系统有益的铬元素、铜元素、硅元素、稀土元素和氮元素，通过特定的热处理使其均匀分布在不锈钢表面，利用不锈钢不可避免的微量腐蚀产生的铬离子、铜离子、含硅物质和氮的各种化合物及离子等，来改善和优化不锈钢支架植入部位血管的弹性，提高支架在血管系统中的生物相容性，降低再狭窄率。最后不锈钢中加入了钨元素来提高不锈钢的密度，增加其在 X 射线下的可视性，保证了本发明高氮不锈钢加工制作的超细微心脑血管支架具有良好的可视性，因此本发明高氮奥氏体不锈钢作为血管支架材料具有极大的优势。

[0028] 应用范围：

[0029] 本发明高氮奥氏体不锈钢除了用于制备血管支架外，还可用于骨科、牙科等外科植入领域，还可以用于医疗器械、食品餐饮器械、首饰及其它与人体经常接触的不锈钢产品方面，也可应用于化工、环保等领域。

## 附图说明

[0030] 图 1 优选 5 号不锈钢 1100℃ 固溶处理 1 小时的金相照片；

[0031] 图 2 对比不锈钢 1100℃ 固溶处理 1 小时的金相照片（图中可见铁素体）；

[0032] 图 3 对比不锈钢和优选不锈钢 5-1 号在 Hank's 模拟体液中的阳极极化曲线。

## 具体实施方式

[0033] 根据本发明高氮不锈钢所设定的化学成分范围，采用 50 公斤加压感应炉冶炼 5 炉钢（分别编号 1-5 号）及对比不锈钢各 20 公斤，其具体化学成分如表 1 所示。保护氮气压力分别为 0.5MPa, 0.6MPa, 1MPa 和 0.8MPa, 0.7MPa，氮化合金是含氮量为 6%（wt%）的 MnN，这 6 炉钢分别被浇注成  $\phi 100 \times 350$  钢锭各一个，按以下加工及热处理工艺规范进行加工。

[0034] 锻造工艺为：合金锭在 1150℃ ± 15℃ 均匀化热处理 2 小时开坯，分三火锻造成初轧坯料，终锻温度为 950℃。

[0035] 热轧工艺为：初轧坯料在 1150℃ ± 15℃ 温度保温 2 小时后开轧，经多道次轧制成性能测试板材，本实施例用板厚均为 11mm 厚。

[0036] 热处理工艺是：测试板材沿垂直于加工方向取样，切割成 11mm × 11mm 的测试方料，在 1100℃ ± 5℃ 固溶处理（1 ± 0.1）小时，空冷或水冷至室温。其中第 5 号合金为优选合

金成分，实施过程中分成 5-1 号和 5-2 号，其中 5-1 号仅按照以上热处理工艺制备，对 5-2 号合金在此基础上在 500℃均匀化时效处理 2 小时，使不锈钢中铬、铜、氮以及硅元素均匀弥散分布在不锈钢表面，并在 70℃大气环境下进行保温预钝化处理 5 小时。测试合金及对比合金的化学成分见表 1。所有力学测试试样均沿垂直于轧制方向取样，测得的力学性能如表 2 所示。

[0037] 表 1 真空感应炉冶炼的高氮钢的化学成分

[0038]

不锈钢	C	Cr	Mn	N	Mo	Cu	Ni	W	La	Si	S	P	Fe
对比不锈钢	0.26	18.50	15.30	0.62	2.64	--	0.07	--	--	0.06	0.005	0.01	余量
1	0.019	16.9	17.03	0.75	1.08	1.14	0.01	2.2	0.3	0.52	0.0081	0.014	余量
2	0.023	18.28	14.13	0.87	1.65	0.98	0.02	5.4	0.1	1.25	0.0096	0.017	余量
3	0.017	18.54	18.96	1.04	2.24	1.86	0.02	3.05	0.05	3.29	0.0074	0.009	余量
4	0.021	19.24	15.66	0.93	2.81	1.52	0.04	4.2	0.11	2.23	0.008	0.012	余量
5	0.024	18.03	15.22	0.85	2.12	1.02	0.05	3.1	0.08	1.31	0.009	0.011	余量

[0039] 表 2 真空感应炉冶炼的高氮钢的力学性能

[0040]

炉号	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	抗拉强度 $\sigma_b$ (MPa)	延伸率 $\delta_5$ (%)	截面收缩率 $\psi$ (%)	密度 $g/cm^3$
对比合金	537	884	52	71	7.71
1	582	1009	51	51	8.02
2	653	1021	40	55	8.32
3	688	1066	42	47	8.11
4	676	1045	41	45	8.23
5-1	618	1022	52	50	8.10
5-2	668	1062	48	46	8.10

[0041] 由实施例测试结果可知，本发明高氮无镍不锈钢提高不锈钢中得氮含量，并添加钨元素，相比原来的高氮无镍不锈钢，强度均明显提高，均保持在 1000MPa 以上，而且密度也均达到 8.0g/cm<sup>3</sup>以上。本发明优选的第 5 号合金合理控制氮含量和钨含量，通过时效强化和低温预钝化处理工艺，相比 1-4 号不锈钢，具有较高的强度和合适的密度，同时还具有较高的塑韧性。特别是 5 号优选不锈钢相比对比不锈钢优势更加明显，不仅奥氏体组织更加稳定，而且耐蚀性能相对对比不锈钢显著提高，特别是耐点蚀性能。见图 1-3。同时比较 5 号优选不锈钢 500℃均匀化时效处理前后的力学性能可以知道，均匀化时效处理可以适当提高本发明不锈钢的强度，而不明显降低塑韧性(见表 2)。

[0042] 上述实施例只为说明本发明的技术构思及特点，其目的在于让熟悉此项技术的人士能够了解本发明的内容并据以实施，并不能以此限制本发明的保护范围。凡根据本发明

---

精神实质所作的等效变化或修饰,都应涵盖在本发明的保护范围之内。

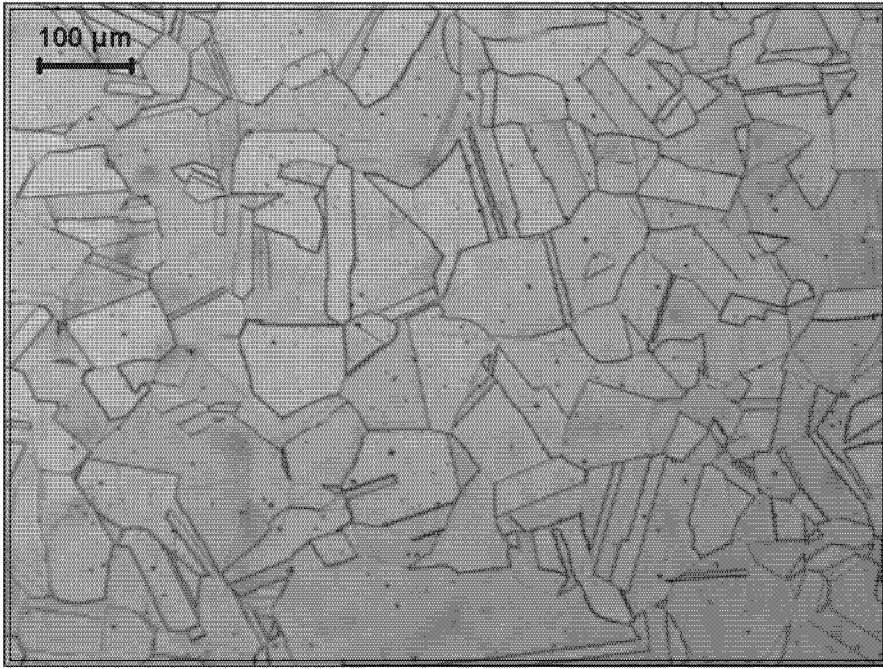


图 1

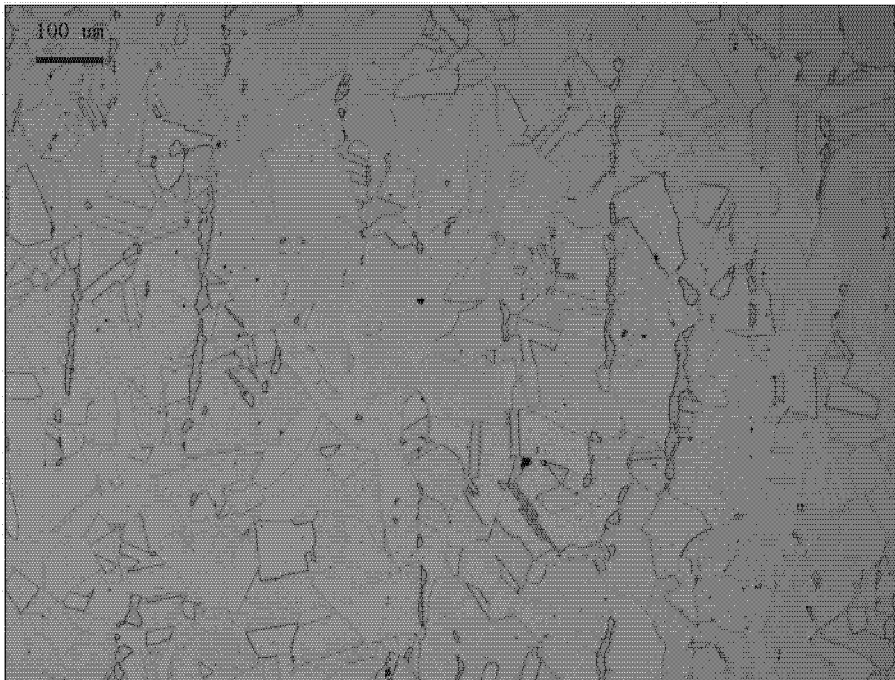


图 2

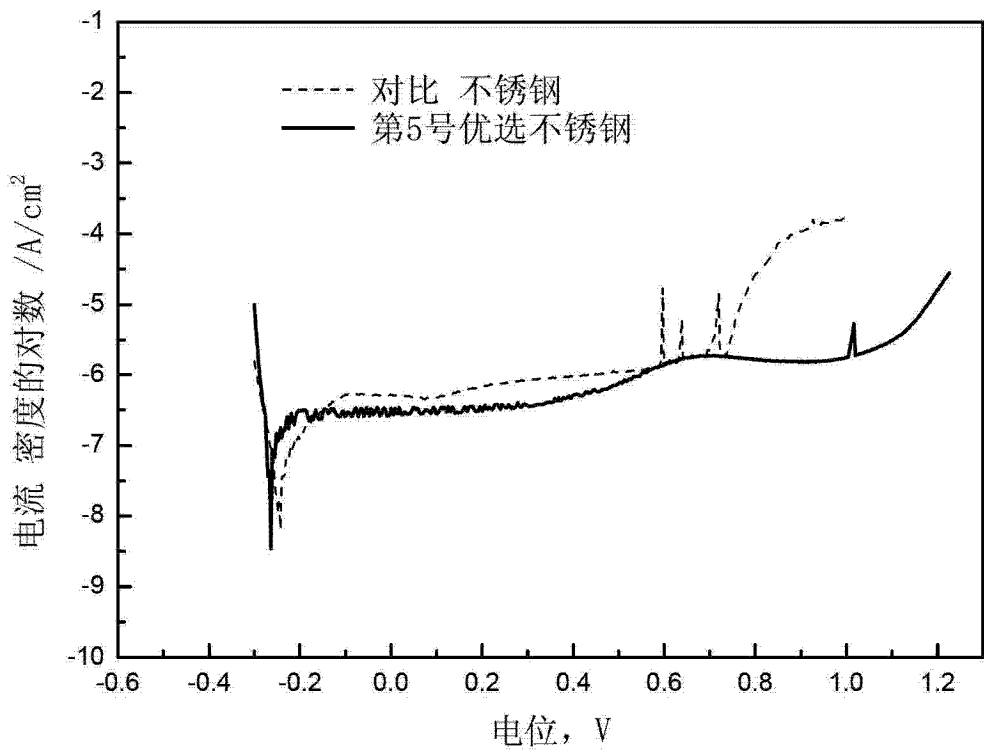


图 3