



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110760733 B

(45) 授权公告日 2021.07.27

(21) 申请号 201911184889.2

B22D 18/06 (2006.01)

(22) 申请日 2019.11.27

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 108642363 A, 2018.10.12

申请公布号 CN 110760733 A

KR 20180097909 A, 2018.09.03

(43) 申请公布日 2020.02.07

Ming-Hung Tsai et.al.Morphology,

(73) 专利权人 中国科学院深圳先进技术研究院

structure and composition of precipitates in Al_{0.3}CoCrCu_{0.5}FeNi high-entropy alloy.

地址 518055 广东省深圳市南山区深圳大

《Intermetallics》.2012,

学城学苑大道1068号

Ming-Hung Tsai et.al.Morphology,

(72) 发明人 赵颖 石芸竹 梁涛 刘玉芝

structure and composition of precipitates in Al_{0.3}CoCrCu_{0.5}FeNi high-entropy alloy.

(74) 专利代理机构 广州三环专利商标代理有限

《Intermetallics》.2012,

公司 44202

审查员 郭婷

代理人 郝传鑫 熊永强

(51) Int.Cl.

G22C 30/02 (2006.01)

G22C 1/02 (2006.01)

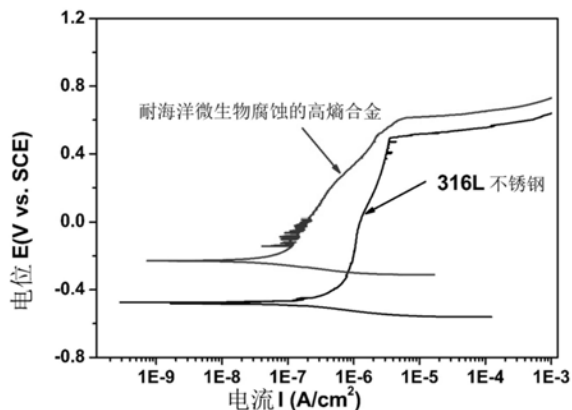
权利要求书1页 说明书7页 附图3页

(54) 发明名称

一种耐海洋微生物腐蚀的高熵合金及其制备方法和应用

(57) 摘要

本发明提供了一种耐海洋微生物腐蚀的高熵合金,所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的化学通式为Al_{0.1}CoCrFeNiCu_x,其中,x为Cu的摩尔分数,0.3≤x≤0.5。该耐海洋微生物腐蚀的高熵合金既具有很强的耐腐蚀性,又具有突出的抗菌性能,能够有效抵御海洋微生物的腐蚀。本发明还提供了耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的制备方法和应用。



1. 一种耐海洋微生物腐蚀的高熵合金,其特征在于,所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的化学通式为 $Al_{0.1}CoCrFeNiCu_x$,其中,x为Cu的摩尔分数, $0.3 \leq x \leq 0.48$ 。

2. 如权利要求1所述的耐海洋微生物腐蚀的高熵合金,其特征在于,所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的晶体结构为面心立方结构。

3. 如权利要求1所述的耐海洋微生物腐蚀的高熵合金,其特征在于,所述化学通式中, $0.45 \leq x \leq 0.48$ 。

4. 如权利要求1所述的耐海洋微生物腐蚀的高熵合金,其特征在于,所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的抗菌率达到90%以上。

5. 一种耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的制备方法,其特征在于,包括:

(1) 将Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu的金属单质原料经表面预处理后,按摩尔分数比0.1:1:1:1:1:x加入到熔炼设备中,其中 $0.3 \leq x \leq 0.48$;

(2) 先在惰性气氛下使所述金属单质原料熔化成合金液,经冷却后得到合金锭,并将所述合金锭翻转四次以上;

(3) 重复所述步骤(2)至少两次,待所述金属单质原料熔炼均匀后,定模成型,获得耐海洋微生物腐蚀的高熵合金。

6. 如权利要求5所述的制备方法,其特征在于,所述Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu的金属单质原料按熔点从小到大的顺序依次堆放入所述熔炼设备中;所述Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu的金属单质原料的纯度均大于99.9%。

7. 如权利要求5所述的制备方法,其特征在于,所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的晶体结构为面心立方结构。

8. 如权利要求5所述的制备方法,其特征在于,所述熔炼设备为非自耗真空电弧炉;所述熔炼设备熔炼所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金之前,先熔炼金属钛以去除所述熔炼设备中的杂质。

9. 如权利要求1-4任意一项所述的耐海洋微生物腐蚀的高熵合金或权利要求5-8任意一项所述制备方法制得的耐海洋微生物腐蚀的高熵合金在海洋工程装备中的应用。

一种耐海洋微生物腐蚀的高熵合金及其制备方法和应用

技术领域

[0001] 本发明涉及金属合金材料技术领域,具体涉及一种耐海洋微生物腐蚀的高熵合金及其制备方法和应用。

背景技术

[0002] 海洋腐蚀是海洋工程面临的重大难题,据统计,每年海洋腐蚀损失约为0.8万亿美元,占到全球腐蚀总量(2.4万亿美元)的1/3。目前,海水管道、泵阀、换热器等关键结构件多采用合金钢、不锈钢、镍基耐蚀合金等传统合金材料,通过在表面形成一层致密的氧化膜/钝化膜,从而保护合金免于侵蚀性离子(如海水中的氯离子)的腐蚀。然而,海洋金属材料除了面临海洋盐雾、海水电离、化学物质的腐蚀之外,还面临着严重的海洋微生物腐蚀(MIC)。在海洋环境中,微生物附着于材料表面后形成不均匀的生物膜,通过自身代谢活动加速金属构件的腐蚀,造成材料失效。据统计,与海洋微生物腐蚀有关材料破坏占到涉海材料总量的70%-80%。因此,开发一种耐海洋微生物腐蚀的合金具有重要意义。

发明内容

[0003] 有鉴于此,本发明提供了一种耐海洋微生物腐蚀的高熵合金及其制备方法和应用,该耐海洋微生物腐蚀的高熵合金既具有很强的耐腐蚀性,又具有突出的抗菌性能,能够有效抵御海洋微生物的腐蚀。

[0004] 第一方面,本发明提供了一种耐海洋微生物腐蚀的高熵合金,所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的化学通式为 $Al_{0.1}CoCrFeNiCu_x$,其中,x为Cu的摩尔分数, $0.3 \leq x \leq 0.5$ 。

[0005] 本发明一实施方式中,所述化学通式中,所述x的范围为 $0.45 \leq x \leq 0.5$ 。另一实施方式中,所述x的范围为 $0.3 \leq x \leq 0.4$ 。例如,x可以但不限于为0.3,或为0.32,或为0.35,或为0.38,或为0.4,或为0.42,或为0.45,或为0.48,或为0.5。

[0006] 进一步地,可选地,所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的化学通式为 $Al_{0.1}CoCrFeNiCu_{0.5}$ 。

[0007] 本发明所述化学通式下的所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金能够明显的抑制微生物在其表面的生长,具有出色的抗海洋微生物腐蚀性能。

[0008] 可选地,所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的晶体结构为面心立方结构。所述晶体结构的耐海洋微生物腐蚀的高熵合金在具有较高强度的同时,还具有较高的延伸力,韧性强。

[0009] 可选地,所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金中的Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu的纯度均大于99.9%。

[0010] 可选地,所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的抗菌率达到90%以上。本发明所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金可以有效抑制海洋微生物的腐蚀,其中,所述海洋微生物可以但不限于包括铜绿假单胞菌。

[0011] 进一步地,可选地,所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的抗菌率达到95%以上。

- [0012] 第二方面,本发明还提供了一种耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的制备方法,包括:
- [0013] (1) 将Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu的金属单质原料经表面预处理后,按摩尔分数比0.1:1:1:1:1:x加入到熔炼设备中,其中 $0.3 \leq x \leq 0.5$;
- [0014] (2) 先在惰性气氛下使所述金属单质原料熔化成合金液,经冷却后得到合金锭,并将所述合金锭翻转四次以上;
- [0015] (3) 重复所述步骤(2)至少两次,待所述金属单质原料熔炼均匀后,定模成型,获得耐海洋微生物腐蚀的高熵合金。
- [0016] 可选地,所述Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu的金属单质原料按熔点从小到大的顺序依次堆放入所述熔炼设备中。一实施方式中,Al和Cu放在底部,Co、Fe和Ni放在中间,Cr放在顶部。
- [0017] 可选地,所述Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu的金属单质原料的纯度均大于99.9%。
- [0018] 进一步地,可选地,所述Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu的金属单质原料的纯度均大于99.99%。
- [0019] 可选地,所述表面预处理过程包括:去除所述Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu的金属单质原料表面氧化皮,然后进行超声清洗和干燥。其中,所述超声清洗过程可以但不限于在无水乙醇中进行。
- [0020] 可选地,所述熔炼设备为非自耗真空电弧炉;所述熔炼设备熔炼所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金之前,先熔炼金属钛以去除所述熔炼设备中的杂质。通过先熔炼金属钛,可以有效吸去熔炼设备内含游离的氧、氮等杂质。
- [0021] 可选地,可以通过对所述熔炼设备进行至少一次的抽真空过程,以实现所述步骤(2)中的所述惰性气氛。每次所述抽真空过程包括先对所述熔炼设备进行抽真空,然后通入惰性气体;其中,所述惰性气体包括氩气。
- [0022] 本发明一实施方式中,对所述熔炼设备进行抽真空,当真空度达到 5×10^{-3} Pa后,向所述熔炼设备充如约半个大气压的氩气;然后再次一次进行重复该过程,以使所述熔炼过程在氩气等惰性气氛下进行。
- [0023] 可选地,所述步骤(2)中,所述使所述金属单质原料熔化成合金液后,对所述合金液进行恒温搅拌。例如,当使用非自耗真空电弧炉进行熔炼时,调节电弧电流加热熔化所述金属单质原料形成合金液,然后电弧保持时间在60-120s,冷却,得到合金锭。通过该恒温搅拌过程,可以使所述金属单质原料更好地混合均匀。
- [0024] 本发明中,所述步骤(2)中,熔炼温度可以但不限于高于最高熔点的金属单质原料的400-500℃。可选地,所述熔炼温度可以但不限于为2000-2400℃。
- [0025] 可选地,所述步骤(3)中,所述定模成型过程可以通过真空吸铸设备将所述金属单质原料熔炼均匀后的合金吸铸至模具内成型。通过所述真空吸铸设备,有效防止所述合金在冷却成型过程中被杂质污染。
- [0026] 可选地,根据所需产品的尺寸形状,可将所述合金吸铸至不同尺寸或形状的模具内。可选地,所述模具可以但不限于为水冷铜模。
- [0027] 可选地,所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的晶体结构为面心立方结构。
- [0028] 本发明一实施方式中,将合金吸铸进入水冷铜模中,获得直径(Φ)为10mm的耐海洋微生物腐蚀的高熵合金圆柱状样品。
- [0029] 第三方面,本发明还提供了一种包含本发明第一方面所述的耐海洋微生物腐蚀的

高熵合金或本发明第二方面所述制备方法制得的耐海洋微生物腐蚀的高熵合金在海洋工程装备中的应用。一实施方式中,所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金可以但不限于用于与海水直接接触的部件。由于所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金具有强的耐海洋微生物腐蚀性能,因此当用于设备外壳等部件时,可以有效防护设备,延长设备的使用年限。

[0030] 可选地,海洋工程装备可以但不限于包括海水管道、泵阀、换热器或支架。所述海洋工程装备还可以为其他海洋水下设备。

[0031] 本发明有益效果包括以下几个方面:

[0032] (1) 本发明所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金为包含Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu的六元合金,化学通式为 $Al_{0.1}CoCrFeNiCu_x$,其中 $0.3 \leq x \leq 0.5$,其晶体结构为面心立方结构,该高熵合金材料保持了材料良好的耐蚀性能,且具有优异的耐海洋微生物腐蚀性能。

[0033] (2) 本发明所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的制备方法,工艺简单,易实现产业化生产,制得的高熵合金材料中各金属单质原料混合均匀,具有优异的耐海洋微生物腐蚀性能;同时,本发明所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金采用普通纯金属单质原料熔炼得到,制备成本低,能够防护设备在海洋环境下腐蚀,在海洋工程结构部件上具有很好的应用前景。

[0034] 本发明的优点将会在下面的说明书中部分阐明,一部分根据说明书是显而易见的,或者可以通过本发明实施例的实施而获知。

附图说明

[0035] 为更清楚地阐述本发明的内容,下面结合附图与具体实施例来对其进行详细说明。

[0036] 图1为本发明一实施例提供的耐海洋微生物腐蚀的高熵合金制备方法的工艺流程图;

[0037] 图2为本发明一实施例提供的耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的材料表征图,其中,图2中(a)为X射线衍射图谱;图2中(b)为二次电子显微镜图。

[0038] 图3为本发明一实施例提供的不同合金与铜绿假单胞菌共培养24小时后的平板涂布结果数据图;其中,图3中(a)为316L不锈钢,图3中(b)为Al-Co-Cr-Fe-Ni高熵合金,图3中(c)为耐海洋微生物腐蚀的高熵合金,图3中(d)为抗菌率柱状图;

[0039] 图4为本发明一实施例提供的耐海洋微生物腐蚀的高熵合金与316L不锈钢的电化学动电位极化曲线。

具体实施方式

[0040] 以下所述是本发明实施例的优选实施方式,应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明实施例原理的前提下,还可以做出若干改进和润饰,这些改进和润饰也视为本发明实施例的保护范围。

[0041] 下面分多个实施例对本发明实施例进行进一步的说明。其中,本发明实施例不限于以下的具体实施例。在不变主权利的范围,可以适当的进行变更实施。

[0042] 若无特别说明,本发明实施例所采用的原料及其它化学试剂皆为市售商品。

[0043] 参见图1,本发明一实施例提供了一种耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的制备方法,

包括：

[0044] S10、将Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu的金属单质原料经表面预处理后，按摩尔分数比0.1:1:1:1:1:x加入到熔炼设备中，其中 $0.3 \leq x \leq 0.5$ ；

[0045] S20、先在惰性气氛下使所述金属单质原料熔化成合金液，经冷却后得到合金锭，并将所述合金锭翻转四次以上；

[0046] S30、重复所述步骤S20至少两次，待所述金属单质原料熔炼均匀后，定模成型，获得耐海洋微生物腐蚀的高熵合金。

[0047] 其中，所述步骤S10中，所述表面预处理过程包括：去除所述Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu的金属单质原料表面氧化皮，然后进行超声清洗和干燥。其中，可以但不限于使用砂纸或砂轮机去除所述金属单质原料的表面氧化皮。可选地，所述超声清洗过程可以但不限于在无水乙醇中进行。

[0048] 可选地，所述熔炼设备为非自耗真空电弧炉；所述熔炼设备熔炼所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金之前，先熔炼金属钛以去除所述熔炼设备中的杂质。通过先熔炼金属钛，可以有效吸去熔炼设备内含游离的氧、氮等杂质。

[0049] 所述步骤S20中，可以通过对所述熔炼设备进行至少一次的抽真空过程，以实现所述惰性气氛。每次所述抽真空过程包括先对所述熔炼设备进行抽真空，然后通入惰性气体；其中，所述惰性气体包括氩气。

[0050] 本发明一实施方式中，对所述熔炼设备进行抽真空，当真空度达到 5×10^{-3} Pa后，向所述熔炼设备充如约半个大气压的氩气；然后再次一次进行重复该过程，以使所述熔炼过程在氩气等惰性气氛下进行。

[0051] 所述步骤S20中，所述使所述金属单质原料熔化成合金液后，对所述合金液进行恒温搅拌。例如，当使用非自耗真空电弧炉进行熔炼时，调节电弧电流加热熔化所述金属单质原料形成合金液，然后电弧保持在60-120s，冷却，得到合金锭。通过该恒温搅拌过程，可以使所述金属单质原料更好地混合均匀。

[0052] 所述步骤S20中，熔炼温度可以但不限于高于最高熔点的金属单质原料的400-500℃。可选地，所述熔炼温度可以但不限于为2000-2400℃。

[0053] 所述步骤S30中，所述定模成型过程可以通过真空吸铸设备将所述金属单质原料熔炼均匀后的合金吸铸至模具内成型。通过所述真空吸铸设备，有效防止所述合金在冷却成型过程中被杂质污染。例如所述高熵合金与空气中的氧或氮反应等。

[0054] 可选地，根据所需产品的尺寸形状，可将所述合金吸铸至不同尺寸或形状的模具内。可选地，所述模具可以但不限于为水冷铜模。

[0055] 本发明实施方式中提供的所述制备方法制得的所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的晶体结构为面心立方结构。

[0056] 下面分多个实施例对本发明实施例进行进一步的说明。

[0057] 实施例1

[0058] 一种耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的制备方法，包括：

[0059] 采用的合金冶炼原料为高纯($\geq 99.9\%$)的Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu单质原料，使用砂纸去除原料Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu的表面氧化皮，并用工业乙醇超声波振荡清洗，待干燥后；将去皮和清洗后Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu单质原料，按照表达式 $Al_{0.1}CoCrFeNiCu_{0.5}$ 的摩尔比例

进行精确的称量配比,然后添加至非自耗真空电弧炉内,供熔炼合金使用;

[0060] 将原料按熔点高低顺序堆放在非自耗真空电弧炉里进行熔炼,Al和Cu放在底部,Co、Fe和Ni放在中间,Cr熔点最高,放在顶部。然后进行抽真空,当真空度达到 5×10^{-3} Pa后,向炉腔充氩气至半个大气压;接着再抽一遍真空至 5×10^{-3} Pa,再向炉腔充氩气至半个大气压,开始熔炼合金;熔炼合金之前先熔炼钛锭,待钛锭熔炼完成后。将Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu合金熔化后,电弧保持时间在60-120秒,待合金块冷却后将其翻转,如此重复至少4次以上;然后,反复上述熔炼合金过程两次,使合金充分熔炼均匀后。

[0061] 使用真空吸铸设备,将合金吸铸进入水冷铜模中,获得 $\Phi 10$ mm的耐海洋微生物腐蚀的高熵合金圆柱状样品,其中,制备得到高熵合金的晶体结构为面心立方结构。

[0062] 实施例2

[0063] 一种耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的制备方法,包括:

[0064] 采用的合金冶炼原料为高纯($\geq 99.95\%$)的Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu单质原料,使用砂轮机去除原料Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu的表面氧化皮,并用工业乙醇超声波振荡清洗,待干燥后;将去皮和清洗后Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu单质原料,按照表达式 $Al_{0.1}CoCrFeNiCu_{0.4}$ 的摩尔比例进行精确的称量配比,然后添加至非自耗真空电弧炉内,供熔炼合金使用;

[0065] 将原料按熔点高低顺序堆放在非自耗真空电弧炉里进行熔炼,Al和Cu放在底部,Co、Fe和Ni放在中间,Cr熔点最高,放在顶部。然后进行抽真空,当真空度达到 5×10^{-3} Pa后,向炉腔充氩气至半个大气压;接着再抽一遍真空至 5×10^{-3} Pa,再向炉腔充氩气至半个大气压,开始熔炼合金;熔炼合金之前先熔炼钛锭,待钛锭熔炼完成后。将Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu合金熔化后,电弧保持时间在60-120秒,待合金块冷却后将其翻转,如此重复至少4次以上;然后,反复上述熔炼合金过程两次,使合金充分熔炼均匀后。

[0066] 使用真空吸铸设备,将合金吸铸进入水冷铜模中,获得 $\Phi 10$ mm的耐海洋微生物腐蚀的高熵合金圆柱状样品,其中,制备得到高熵合金的晶体结构为面心立方结构。

[0067] 实施例3

[0068] 一种耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的制备方法,包括:

[0069] 采用的合金冶炼原料为高纯($\geq 99.9\%$)的Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu单质原料,使用砂轮机去除原料Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu的表面氧化皮,并用工业乙醇超声波振荡清洗,待干燥后;将去皮和清洗后Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu单质原料,按照表达式 $Al_{0.1}CoCrFeNiCu_{0.3}$ 的摩尔比例进行精确的称量配比,然后添加至非自耗真空电弧炉内,供熔炼合金使用;

[0070] 将原料按熔点高低顺序堆放在非自耗真空电弧炉里进行熔炼,Al和Cu放在底部,Co、Fe和Ni放在中间,Cr熔点最高,放在顶部。然后进行抽真空,当真空度达到 5×10^{-3} Pa后,向炉腔充氩气至半个大气压;接着再抽一遍真空至 5×10^{-3} Pa,再向炉腔充氩气至半个大气压,开始熔炼合金;熔炼合金之前先熔炼钛锭,待钛锭熔炼完成后。将Al、Co、Cr、Fe、Ni和Cu合金熔化后,电弧保持时间在60-120秒,待合金块冷却后将其翻转,如此重复至少4次以上;然后,反复上述熔炼合金过程两次,使合金充分熔炼均匀后。

[0071] 使用真空吸铸设备,将合金吸铸进入水冷铜模中,获得 $\Phi 10$ mm的耐海洋微生物腐蚀的高熵合金圆柱状样品,其中,制备得到高熵合金的晶体结构为面心立方结构。

[0072] 效果实施例

[0073] (1)耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的材料表征

[0074] 对实施例1所述制备方法制得耐海洋微生物腐蚀的高熵合金进行X射线衍射(XRD),并进行扫描电子显微镜成像,检测结果参见图2。

[0075] 如图2中(a)所示,本发明制得的耐海洋微生物腐蚀的高熵合金,其XRD出峰位置与理论的元素出峰位置基本重合,未有杂峰出现,同时,该XRD出峰位置也可以证明本发明实施例1制得的到高熵合金为面心立方晶体结构。如图2中(b)所示的二次电子显微镜图片中,可以看出,其表面十分干净,质地均一,表明微观结构为单一的固溶体结构。

[0076] (2)耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的抑菌性能测定

[0077] 按照“JIS Z 2801-2000《抗菌加工制品—抗菌性试验方法和抗菌效果》、GB/T 2591-2003《抗菌塑料抗菌性能实验方法和抗菌效果》”等标准规定,进行了耐海洋微生物腐蚀的高熵合金(实验组)、316L不锈钢(Stainless Steel)(对照组1)和Al-Co-Cr-Fe-Ni高熵合金(对照组2)分别对海洋中存在的典型细菌(铜绿假单胞菌)的抗菌性能检测,其中:杀菌率(%)=[(对照组活菌数-实验组活菌数)/对照组活菌数]×100,结果参见图3。

[0078] 其中,对照组活菌数是指在对照组1或对照组2与铜绿假单胞菌共培养后的活菌数,实验组为耐海洋微生物腐蚀的高熵合金与铜绿假单胞菌共培养后的活菌数;所述Al-Co-Cr-Fe-Ni高熵合金中的各元素的摩尔比为Al:Co:Cr:Fe:Ni=0.1:1:1:1:1。

[0079] 图3中(a)为316L不锈钢与铜绿假单胞菌共培养24小时后的平板涂布结果(对照组1),图3中(b)为Al-Co-Cr-Fe-Ni高熵合金与铜绿假单胞菌共培养24小时后的平板涂布结果(对照组2),图3中(c)为本发明耐海洋微生物腐蚀的高熵合金A与铜绿假单胞菌共培养24小时后的平板涂布结果(实验组)。从平板上的菌落数目可以看出,本发明所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金具有很高的抑制铜绿假单胞菌生长的能力;而常规的316L不锈钢和常规的Al-Co-Cr-Fe-Ni高熵合金抑制铜绿假单胞菌生长的能力差。进一步参见图3中(d)根据平板涂布结果计算得出的抗菌率柱状图。结果可知,以316L不锈钢作为对照组1,和Al-Co-Cr-Fe-Ni高熵合金为对照组2,本发明中耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的实验组A的抗菌率达到99%以上,表现了优异的抗菌性能。

[0080] 因此,与常规高熵合金和不锈钢材料相比,本发明所提供的含耐海洋微生物腐蚀的高熵合金具有更优异的抗菌性能。

[0081] (3)耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的耐腐蚀性能测定

[0082] 分别测定与铜绿假单胞菌共培养24小时后的耐海洋微生物腐蚀的高熵合金和316L不锈钢样品的电化动电位极化曲线,电位是相对于饱和甘汞电极(vs.SCE)的电极电势,结果参见图4。从图中的极化曲线中电位与电流之间的关系可以看出,本发明耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的腐蚀电位约-0.2V,而316L不锈钢的腐蚀电位约-0.45V;并且所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的点蚀电位要高于316L的点蚀电位;因此,通过对比可知,本发明耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的耐均匀腐蚀以及局部腐蚀性能均优于316L不锈钢,体现了本发明所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金具有优异的抗微生物腐蚀性能。

[0083] 本发明实施方式中所述耐海洋微生物腐蚀的高熵合金的各元素的摩尔分数比为Al:Co:Cr:Fe:Ni:Cu=0.1:1:1:1:1:x,0.3≤x≤0.5;该配比范围内的所述高熵合金一方面可以能够明显的抑制微生物在其表面的生长,具有出色的抗海洋微生物腐蚀性能,另一方面所述高熵合金的稳定性能也得到加强,且晶体结构为面心立方结构。例如,当Cu的摩尔分数低于配比范围时,其抗菌率较差;当Cu的摩尔分数高于配比范围时,所述高熵合金的容易

产生第二相析出,选择性腐蚀强,造成材料的耐腐蚀性能下降。

[0084] 以上所述实施例仅表达了本发明的几种实施方式,其描述较为具体和详细,但不能因此而理解为对本发明专利范围的限制。应当指出的是,对于本领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明构思的前提下,还可以做出若干变形和改进,这些都属于本发明的保护范围。因此,本发明专利的保护范围应以所附权利要求为准。

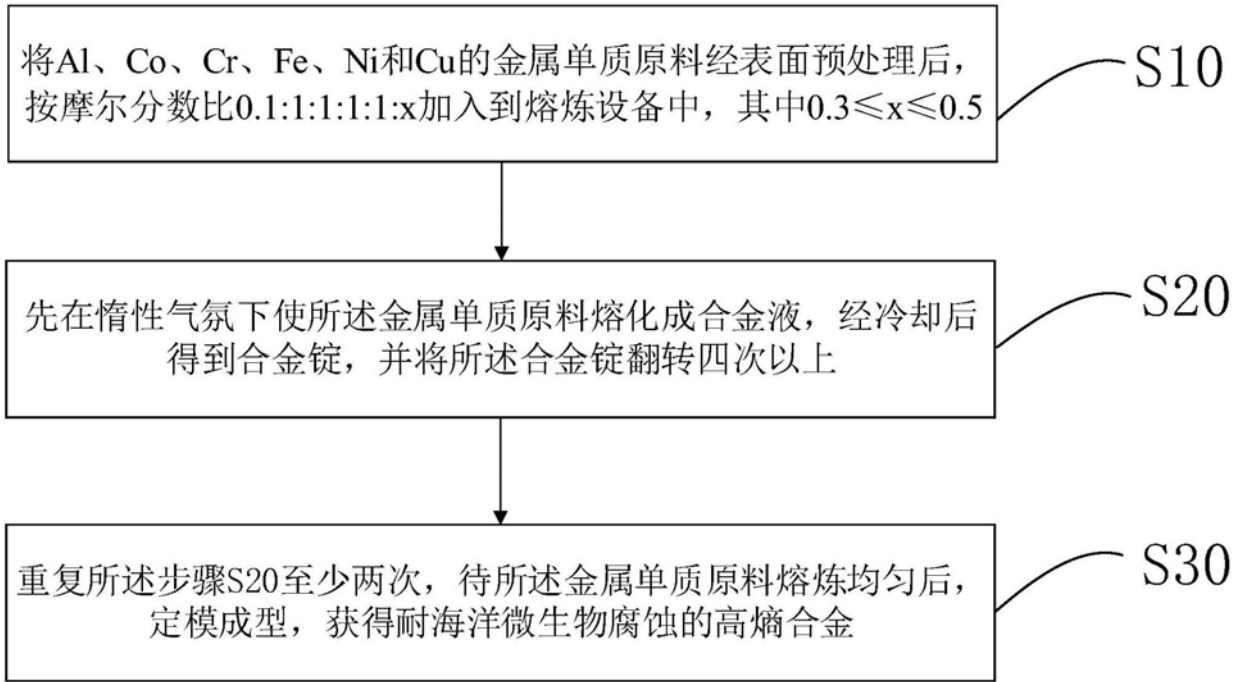


图1

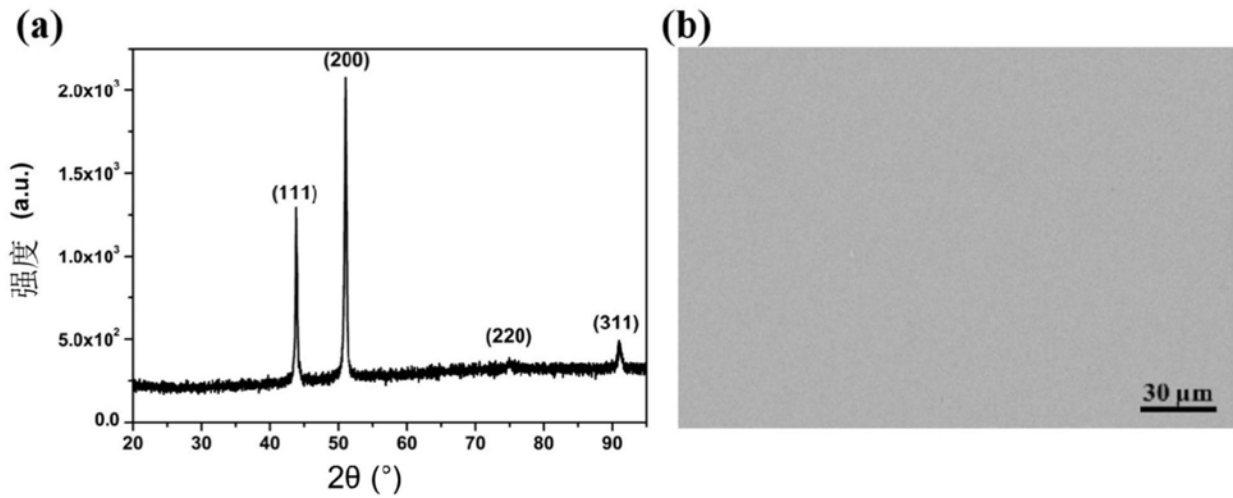


图2

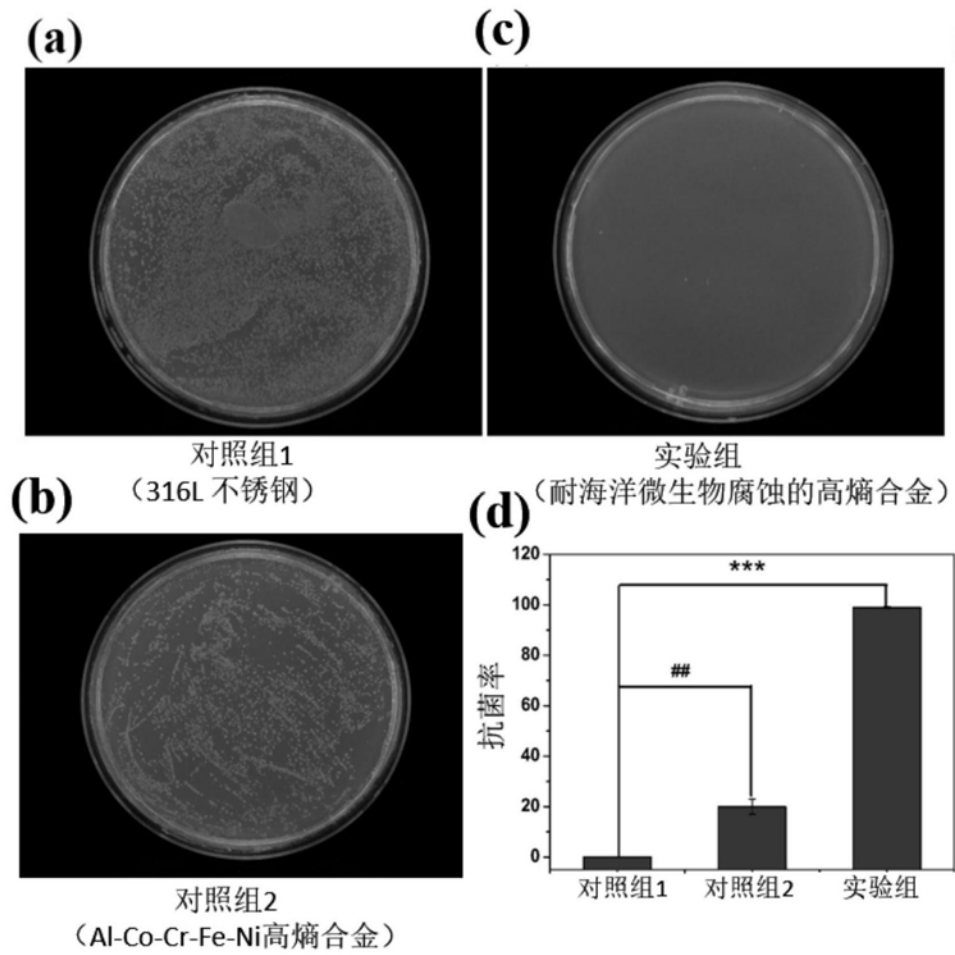


图3

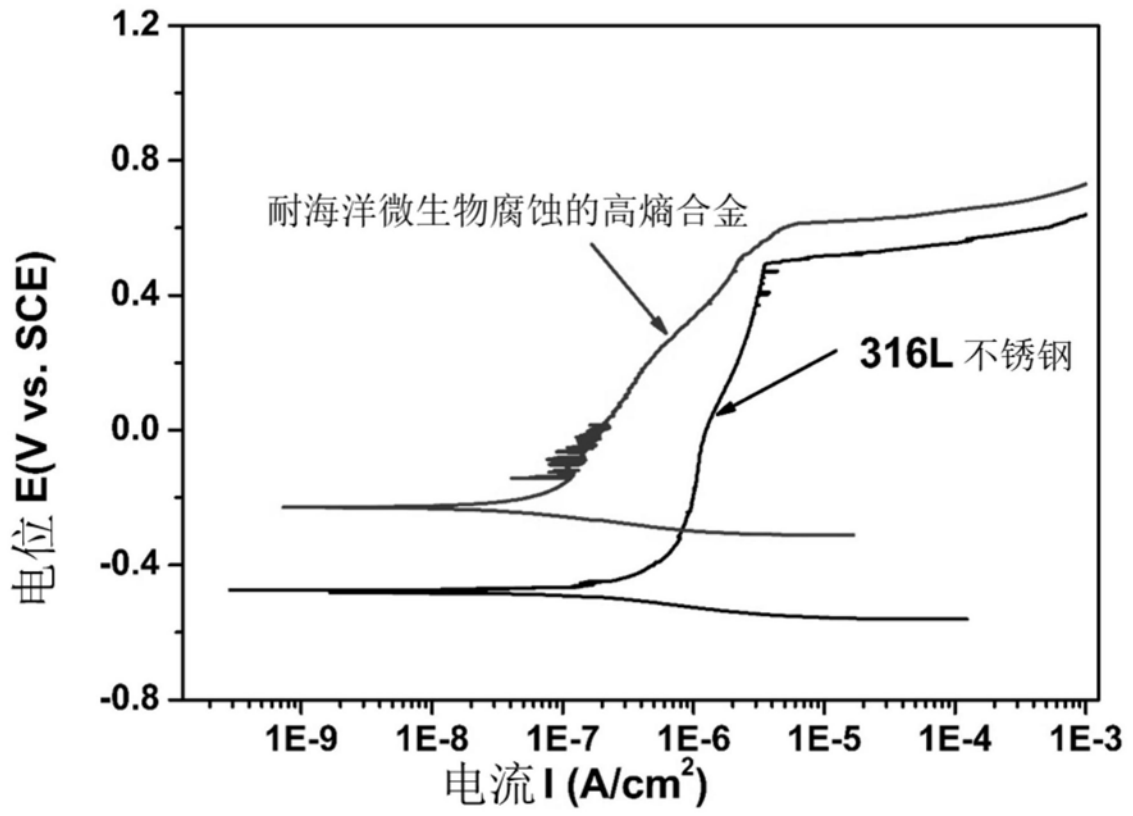


图4