



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113661276 B

(45) 授权公告日 2024. 07. 26

(21) 申请号 202080025570.X

(22) 申请日 2020.03.24

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 113661276 A

(43) 申请公布日 2021.11.16

(30) 优先权数据
2019901205 2019.04.09 AU

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2021.09.28

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/AU2020/050280 2020.03.24

(87) PCT国际申请的公布数据
W02020/206492 EN 2020.10.15

(73) 专利权人 3DM生物医学私人有限公司
地址 澳大利亚新南威尔士州

(72) 发明人 D·克洛尔

(74) 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司 31100
专利代理师 亓云 顾嘉运

(51) Int.Cl.
C25F 3/16 (2006.01)
C25F 7/00 (2006.01)

(56) 对比文件
US 2014018244 A1, 2014.01.16
US 2002169516 A1, 2002.11.14
US 2011303553 A1, 2011.12.15
US 2019345628 A1, 2019.11.14

审查员 刘晓洋

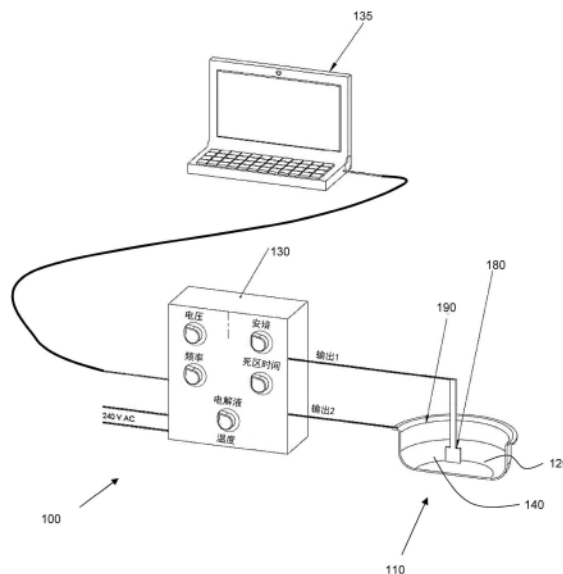
权利要求书2页 说明书30页 附图9页

(54) 发明名称

电抛光方法

(57) 摘要

一种用于对制造的金属制品进行电抛光的方法,该方法包括:将该金属制品与电抛光电解液接触;以及通过施加所施加的电流体制,在电抛光电解液中对金属制品进行电抛光,所施加的电流体制包括:至少一种电抛光体制,该电抛光体制包括至少 $2A/cm^2$ 的电流密度和具有频率从2Hz至300kHz的成形波形的电压、至少为0V的最小电压、以及在0.5至500V之间的最大电压。



1. 一种用于对制造的金属制品进行电抛光的方法,所述方法包括:
将所述金属制品与电抛光电解液接触;以及
通过施加所施加的电流体制,在所述电抛光电解液中对所述金属制品进行电抛光,所施加的电流体制包括:
至少两种电抛光体制,每种电抛光体制包括至少 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度和具有频率从 2Hz 至 300kHz 的成形波形的电压、至少为 0V 的最小电压、以及在 0.5 至 500V 之间的最大电压,
其中所述电抛光步骤包括施加所施加的电流体制,所施加的电流体制包括:
初始脉冲,包括至少 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度和包括频率为从 20 至 300kHz 的成形波形的电压,最小电压为至少 0V ,而最大电压为 50 至 500V 之间,并且施加达至少为 1 秒的历时;接着是
至少两种电抛光体制,其包括至少 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度和包括频率为从 2Hz 至 300kHz 的成形波形电流的电压,最小电压至少为 0V ,而最大电压在 0.5 至 500V 之间,并且其中与前一电抛光体制相比,每种电抛光体制的频率和/或最大电压被改变,
并且其中以下至少一种与前一电抛光体制相比发生变化:每种电抛光体制的频率、电流密度、或最大电压。
2. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,在电流密度为 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 至 $200\text{A}/\text{cm}^2$ 下执行每种电抛光体制。
3. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,每种相继电抛光体制具有以下中的至少一者:比先前的电抛光体制较低的最大电压或较低的电流密度。
4. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,电抛光步骤包括至少4种电抛光体制。
5. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,每种电抛光体制被施加达 1 至 30 秒的历时。
6. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述电抛光步骤包括至少一种冷却制度,其包括在至少一种电抛光体制之后降低所述电流密度。
7. 如权利要求6所述的方法,其特征在于,所述电流密度被降低至前一电抛光体制的所述电流密度的 0.5 或更少。
8. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述初始脉冲具有 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 至 $200\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度。
9. 如权利要求3所述的方法,其特征在于,所述初始脉冲的电压大于所述相继电抛光体制中每一种的电压。
10. 如权利要求3所述的方法,其特征在于,所述初始脉冲的电流密度大于所述相继电抛光体制中每一种的电流密度。
11. 如权利要求3所述的方法,其特征在于,所述初始脉冲的交流电压的所施加频率不同于所述相继电抛光体制中每一种的所施加频率。
12. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述初始脉冲被施加达 2 至 10 秒的历时。
13. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,每种相继电抛光体制具有不同的频率。
14. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述成形波形包括方波、正弦波、脉冲、或其组合之一。
15. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述成形波形电流包括脉冲宽度调制(PWM)波形,或方波脉冲。
16. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述成形波形电流具有从 10 至 300kHz 的频

率。

17. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述波形包括在所述最大电压和为以下中的至少一者的最小电压之间的变化:

- 大于所述最大电压的80%;或者
- 大于1V。

18. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述波形包括在所述最大电压和为以下中的至少一者的最小电压之间的变化:

- 大于所述最大电压的80%;或者
- 大于5V。

19. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述金属制品包括含铬金属合金、钛、钛合金、镍合金、铝或铝合金之一。

20. 如权利要求19所述的方法,其特征在于,所述含铬金属合金选自:铁铬合金、镍铬、镍铬合金、钴铬合金或钴铬钼合金。

21. 如权利要求19所述的方法,其特征在于,所述含铬金属合金包括钴铬合金或镍铬合金。

22. 如权利要求19所述的方法,其特征在于,所述含铬金属合金包括不锈钢或铬镍铁合金。

23. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述电抛光电解液包括 H_3PO_4 。

24. 如权利要求23所述的方法,其特征在于,所述电抛光电解液包括磷酸(H_3PO_4)与硫酸(H_2SO_4)、盐酸(HCl)或其组合,以及水或 C_1 - C_4 醇中的一种的组合。

25. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述电抛光电解液包含磷酸(H_3PO_4)与水或 C_1 - C_4 醇之一的组合。

26. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述电解液的pH从1.0至7.0。

27. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述电抛光电解液被保持在-25至200°C的温度。

28. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述金属制品的所述初始平均表面粗糙度(Ra)大于 $2\mu m$ 。

29. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述金属制品的所述初始平均表面粗糙度(Ra)小于 $400\mu m$ 。

30. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述金属制品的所述最终平均表面粗糙度(Ra)小于 $2\mu m$ 。

31. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,材料去除速率从1至 $50\mu m$ /分。

32. 如权利要求1到31中任一项所述的方法,其特征在于,所述电抛光电解液包含在电抛光池中。

33. 如权利要求1到31中任一项所述的方法,其特征在于,所述电抛光电解液作为流体流被施加到所述金属制品的表面上。

电抛光方法

[0001] 优先权交叉参考

[0002] 本发明要求于2019年4月9日在澳大利亚专利局提交的第2019901205号澳大利亚临时专利申请的公约优先权,其内容应被理解为通过本引用纳入本说明书。

技术领域

[0003] 本发明一般涉及一种用于使制造的金属制品的表面平滑的电抛光方法。本发明尤其适用于额外 (additively) 制造 (3D打印) 的金属合金,并且尤其是具有保护性氧化物层的金属和金属合金 (诸如含铬合金、钛和钛合金、镍合金,诸如镍钛诺,以及铝和铝合金) 的表面精加工,并且下文将方便地公开与该示例性应用相关的本发明。然而,应当领会,本发明并不特别限于额外制造 (3D打印) 的金属和金属合金产品,并且可被应用于由多种制造方法生产的各种各样的金属制品 (金属和金属合金),该金属制品需要进行电抛光以使该金属制品的表面光滑。

[0004] 发明背景

[0005] 以下对本发明背景的讨论旨在促进对本发明的理解。然而,应当领会的是,讨论并不是承认或认可所提及的任何材料已经在本申请的优先权日期公开、已知或部分公知。

[0006] 额外制造通常提供具有广泛表面粗糙度或表面光洁度的制品,通常平均表面粗糙度Ra值高于 $2\mu\text{m}$,通常高于 $5\mu\text{m}$ (宏光洁度),以及通常为8至 $20\mu\text{m}$ 的Ra值。此类额外制造的部件需要被抛光或以其他方式加工,以将其初始表面粗糙度减小至特定应用所需的可接受值。

[0007] 诸如拍打 (lap)、研磨和抛光之类的机械方法可将制品的初始平均表面粗糙度减小至微光洁度水平 (通常为 $0.01 < \text{Ra} < 2.00\mu\text{m}$)。这些方法是耗时且通常是手动的,这使得容易出错且成本非常高。当前使用人工劳力进行抛光的时间通常超过一小时。此外,这些方法在用于复杂形状的组件时可能具有均匀性限制。另外,如果初始表面粗糙度较高,则需要多次研磨/抛光步骤以达成所需的最终表面粗糙度。

[0008] 电抛光是一种替代抛光技术,其适用于通过传统方法难以抛光的金属组件的精加工和抛光。电抛光使用直流电和导电电解液以从金属表面去除颗粒。现有技术的基本稳定的电压下使用直流电流,或添加相对较小 (小于直流电压的20%) 的交流分量。基于金属组件的表面积,去除速率 (电流) 通常在 0.25 至 $0.50\text{A}/\text{cm}^2$ 之间。在30至60分钟的处理时间内,表面粗糙度的减小通常从 $1.5\mu\text{m}$ 至 $0.7\mu\text{m}$ Ra。在电抛光电流强度通常范围从 10 至 $200\text{mA}/\text{cm}^2$ 的情况下,材料去除速度可能较慢。由于减小速度慢,并且颗粒去除速率小,因此该工艺需要至少一种其他手动抛光或交替抛光工艺,以在电抛光可行之前使部件达到可接受的表面。用于减小化学抛光时间的预处理工艺的示例包括CNC加工、翻滚、振动系统、热处理、喷丸硬化、砂磨、喷砂或激光重熔。后处理可能同样需要手动机械抛光。

[0009] 传统的电抛光也通常使用包括氢氟酸、硝酸、硫酸和磷酸的高浓度酸溶液的组合。此类电解质不环保,并且可能具有处置问题。

[0010] 然而,已经开发了用于抛光额外制造表面的电抛光系统。美国专利公开

US20190345628A1中有一个示例,该公开教导了一种用于借助于提供至少一个阳极脉冲的重复脉冲序列来电化学抛光钢、镍基合金、铝合金、镁合金或钛合金制成的产品的3D打印表面的方法,该阳极脉冲的电流强度在时间曲线上持续上升,直至规定值。可使用更高频率的微脉冲,其在第一个阳极脉冲之后被脉冲暂停和/或至少一个阴极脉冲打断。电抛光体制(regime)的平均电流密度优选为 $0.005\text{A}/\text{cm}^2$ 至 $0.3\text{A}/\text{cm}^2$,脉冲的脉冲长度为 0.0005 秒至 5 秒,频率为 0.2Hz 至 2kHz 。

[0011] 虽然提供了合理的电抛光结果,但US20190345628A1的系统不在电压-电流曲线上的超钝化(trans-passive)范围之外工作,以避免无源或抛光膜层及其特性的完全击穿,这会导致潜在的条纹、气体产生问题、热问题等。

[0012] 因此,希望提供一种替代的或改进的金属制品,优选为粗糙的金属制品,并且尤其是具有保护性氧化物层的金属制品(金属或金属合金)(诸如,含铬金属合金)的精加工和/或抛光方法。

发明内容

[0013] 本发明提供了一种可被应用于具有保护性氧化物层的金属制品(金属或金属合金),诸如铝、铝合金、钛、钛合金、镍合金(诸如镍钛合金)和含铬金属合金(诸如不锈钢和铬镍铁合金)的电抛光技术。电抛光技术可被应用于具有粗糙表面的金属制品,并以比传统电抛光方法更快的方式实现表面粗糙度的极好减小。

[0014] 本发明的第一方面提供了一种用于对制造出的金属制品进行电抛光的方法,该方法包括:

[0015] 将金属制品与电抛光电解液接触;以及

[0016] 通过施加所施加的电流体制,在电抛光电解液中对金属制品进行电抛光,所施加的电流体制包括:至少一种电抛光体制,该电抛光体制包括至少 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度和具有频率从 2Hz 至 300kHz 的成形波形的电压、至少为 0V 的最小电压、以及在 0.5 至 500V 之间的最大电压。

[0017] 本发明提供了一种电抛光方法,该方法能够快速抛光所得表面光洁度,在电抛光后无异构纹理和/或显示出相当低的平均表面粗糙度值。本发明的电抛光方法使用 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 或更大的高电流密度以快速去除材料。本发明的电抛光方法还使用成形波形电压,该波形电压将递送至被处理对象的电压(和电流)从大致或者接近零伏、或在该体制处理期间提供给对象的最低电压,改变为在该体制期间提供给对象的全电压(在 0.5V 至 500V 的范围中)。波形以 2Hz 至 300kHz 的范围中的频率被递送。这种电流密度和电压波形能够以很快的速率从金属制品的一个或多个处理表面去除大量材料。

[0018] 与现有技术的工艺不同,本发明不避免在电压-电流曲线上的超钝化范围之外操作。在本发明中,选择电流密度和电压以在工艺开始时将无源层(在超钝化范围内形成)清除(blast away)。使用受控频率、电压、电流、温度和化学特性,本发明能够处理因在标准可接受的电压-电流限制之外操作而导致的所有问题。

[0019] 虽然可以使用单一施加的电流体制,但当在电抛光期间至少使用两种电流体制时,可获得更好的结果。在这些实施例中,本发明的方法包括至少两种电抛光体制,并且更优选至少三种电抛光体制,每种电抛光体制包括至少 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度和具有频率从 2Hz

至300kHz的成形波形的电压、至少为0V的最小电压、以及在0.5至500V之间最大电压,并且其中频率、电流密度(电流)、或者每种电抛光体制的最大电压中的至少一个与前一电抛光体制相比被改变。

[0020] 发明人已经意识到,长时间施加高电抛光电流可能会在表面中留下凹痕和条纹。因此,具有两个或多种电抛光体制的施加电流体制被用于帮助实现精细抛光。通过使用两个或更多种电抛光体制并改变,例如,与先前的电抛光体制相比,步进(增加或降低)频率、电流密度(电流)或最大电压中的一者或多者,来增强所施加的电流体制的效果。虽然不希望局限于任何一种理论,但发明人认为,在体制开始时,材料去除速率很高。在不到一分钟的时间内,在被处理材料的表面上形成扩散层。扩散层似乎以与绝缘体或电阻负载类似的方式来作用。该扩散层显著减小了材料去除的速度,并且如果其不被去除,则工艺速度显著降低。改变最大电压、电流密度(电流)和频率,以干扰围绕被电抛光的部件的扩散层,并重新建立材料去除的高速。改进后的速度仍能保持结果,该结果优选地能够使粗糙表面($>2\mu\text{m Ra}$,通常 $>5\mu\text{m Ra}$)在小于10分钟、优选小于5分钟、通常小于2分钟以及在某些情况下小于1分钟内达到低于 $2\mu\text{m Ra}$ 的表面粗糙度。

[0021] 本发明使用频率、电压和/或电流密度的变化(通常是步进变化)来打乱快速形成的扩散层,该扩散层在任何给定参数集(频率、电压、电流密度)上短时间后与部件相邻形成。然而,应领会,本发明可使用频率、电压、电流/电流密度、温度和化学来管理所有变量,并允许以均匀方式从金属制品表面剥离(电抛光)粒子。

[0022] 与电解液的其余部分相比,扩散层非常密集。扩散层减缓了电子和元素粒子通过可被描述为在金属制品周围一层中的“电解液和金属粒子的浓汤”的转移。通过改变参数(频率、电压、电流密度),金属制品周围的密集层不断被新电解液取代,并且在每一步开始时的高电流脉冲产生额外的强烈气体,这也有助于将扩散层从其毗邻金属制品的位置处移除。

[0023] 在每种电抛光体制之间,改变最大电压、电流密度(电流)或频率中的至少一者。在大多数情况下,与前一电抛光体制相比,这包括将最大电压、电流密度(电流)或频率中的一者或多者步进增加或降低。

[0024] 电抛光体制还优选地设计为以逐渐降低的强度对金属制品进行电抛光,以实现精细光洁度。因此,每个连续的电抛光体制优选地具有以下中的至少一者:与先前的电抛光体制相比,通常较低的最大电压或通常较低的电流密度(即,在向下趋势模式中总体较低,尽管个体体制可能与该模式不同,并且具有较高的分量)。

[0025] 电压和电流被施加于不同最大电压/电流水平和不同频率的电抛光体制。应当领会,所使用的电压确定电流流动,并且可以被视为一个变量。电压/电流确定去除的材料量。在使用多种电抛光体制的情况下,初始电抛光体制具有较高的最大电压(因此具有较高的电流/电流密度),以快速去除大量材料。这会很快将非常粗糙的材料中的表面粗糙度减小到中等光滑的粗糙度。在随后的电抛光体制中,可以减小最大电压/电流密度以获得越来越精细的结果。因此,最佳的表面精加工工艺是一系列电抛光体制,最初较高,但随后降低最大电压/电流,用于越来越平滑和精细的光洁度。在各实施例,高电压/电流通常具有大于 $5\text{A}/\text{cm}^2$ 、优选大于 $7\text{A}/\text{cm}^2$ 、更优选大于 $10\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度。应领会,相应的电压取决于电解液的导电性。

[0026] 在非常高的电流密度 ($>10\text{A}/\text{cm}^2$) 下,从金属制品的表面去除的颗粒/材料非常迅速、具有侵略性和易变性,通常会使得金属制品的金属表面出现轻微的凹痕或不均匀(或在导致条纹的低频上)。与先前的电抛光方法相比,本发明使用高电流密度来去除块状材料。然后,可以通过缓慢步进地降低电流以使产品具有光滑均匀的表面,从而优选地增强电抛光工艺,如下面详细描述。

[0027] 在电抛光步骤中可以使用任意数量的电抛光体制。在一些实施例中,电抛光步骤包括至少3种电抛光体制,优选至少4种电抛光体制,更优选至少10种电抛光体制,并且甚至更优选至少20种电抛光体制。在一些实施例中,电抛光步骤包括超过40种电抛光体制。在其他实施例中,电抛光步骤包括3至10种电抛光体制。在各实施例中,电抛光步骤包括3至6种电抛光体制。每个连续的电抛光体制优选地以与先前的电抛光体制不同的频率来施加。然而,应领会,在某些情况下,一种或多种连续的电抛光体制可以与先前的电抛光体制相同的频率来施加。

[0028] 本发明的电抛光方法是快速的(至少比传统的电抛光方法快五至十倍),在小于10分钟、优选地小于5分钟、更优选地小于2分钟且在一些实施例中不超过1分钟的时间内,将平均表面粗糙度减小到小于 $2\mu\text{m}$ 的Ra。本发明的抛光方法提供了一种均匀的抛光,它是精确且可缩放的。这种电抛光处理对工程制造过程可能非常有意义,在工程制造过程中,所得的制品具有非常粗糙和不均匀的表面纹理(诸如,3D打印组件、粗糙喷砂表面、非常粗糙的烧结部件)。

[0029] 所有电抛光体制的总历时优选小于10分钟,且更优选小于5分钟。在一些实施例中,所有电抛光体制的总历时优选小于3分钟,更优选小于2分钟,并且更为优选不大于60秒。为了实现这一点,每种电抛光体制可被施加达1至30秒、优选1至20秒、更优选1至15秒的历时。在一些实施例中,每种电抛光体制可被施加达2至30秒、优选2至20秒、更优选2至15秒的历时。。

[0030] 所施加的电流体制被施加达有效地降低金属制品的粗糙度的时段。已预先确定的电压/电流(电流密度)和频率的施加的电流体制范围对于要被抛光的部件和材料是最佳的。

[0031] 合适的DC或脉冲电源(电压或电流控制)被用于对两个电极(即阴极和阳极/金属物品)进行极化。施加的电流和相关联的电流密度影响材料去除速率,并且因此影响金属制品的电抛光速度。电流至少为 0.1A 。相关联的电流密度至少为 $2\text{A}/\text{cm}^2$,优选至少为 $1.0\text{A}/\text{cm}^2$,更优选至少为 $5\text{A}/\text{cm}^2$ 。在一些实施例中,电流密度为 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 至 $200\text{A}/\text{cm}^2$,优选 20 至 $50\text{A}/\text{cm}^2$ 。在一些实施例中,电流密度大于 $22\text{A}/\text{cm}^2$,优选大于 $25\text{A}/\text{cm}^2$ 。在一些实施例中,电流密度为 $25\text{A}/\text{cm}^2$ 至 $200\text{A}/\text{cm}^2$,优选 25 至 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 。在一些实施例中,电流密度为 $30\text{A}/\text{cm}^2$ 至 $200\text{A}/\text{cm}^2$,优选 30 至 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 。

[0032] 电流可以是仅DC、仅AC、方波脉冲DC、正弦脉冲DC或其混合物。在使用脉冲DC波形的情况下,应领会,所施加的电流波形不是典型的AC波形,并且不是精确的DC波形。波形可被特征化为交流或脉冲DC方波的方波电流。在一些实施例中,与峰值或所施加的电流相位相比,脉冲DC方波具有更长的零电流相位。在许多实施例中,电流包括DC电流。

[0033] 电压的成形波形可以是方波、正弦、脉冲或其组合之一。在一些实施例中,成形波形电流包括脉冲宽度调制(PWM)波形,优选方波脉冲,优选具有可变死区时间。在一些实施

例中,方波脉冲具有可变的死区时间。在一些实施例中,与峰值或所施加电压相位相比,脉冲方波具有更长的零电流相位。

[0034] 具有保护性氧化层,诸如钛和铝的材料,通过使用更高的频率以更快的速度和更低的最大电压击穿。电流的频率最好在每种体制下变化,以帮助击穿被电抛光的金属制品表面的扩散屏障。频率可以从2Hz至300kHz(在某些情况下甚至更高)变化。在一些实施例中,频率可以从200Hz至300kHz,优选在2kHz至300kHz之间变化。在一些实施例中,频率可以从2Hz至200kHz,优选在2Hz至150kHz之间变化。在一些实施例中,频率可以从2kHz至200kHz,优选在2kHz至150kHz之间变化。在一些实施例中,频率从10kHz至300kHz,优选从10kHz至200kHz,更优选从10kHz至150kHz变化。在一些实施例中,频率为从10kHz至100kHz。在其他实施例中,频率为从20至300kHz,优选20至100kHz之间,更优选从20至90kHz,且更优选从40至80kHz。选择准确频率以适合金属制品的特定成分和所需的表面粗糙度。

[0035] 在各实施例中,波形包括为以下至少一者的在最大电压和最小电压之间的变化:大于最大电压的80%;或大于1V,优选大于2V,更优选大于3V。在一些实施例中,波形包括为以下至少一者的最大电压和最小电压之间的变化:

[0036] 大于最大电压的80%;或者

[0037] 大于2V。

[0038] 在一些实施例中,波形包括为以下至少一者的最大电压和最小电压之间的变化:大于最大电压的80%;或大于1V、优选大于5V、更优选大于10V、更为优选大于20V、更为优选大于30V。在一些实施例中,波形包括为以下至少一者的最大电压和最小电压之间的变化:

[0039] 大于最大电压的80%;或者

[0040] 大于40V。

[0041] 每种电抛光体制中使用的最大电压在0.5和500V之间。在大多数实施例中,最大电压在1V和200V之间,优选5V和150V之间,更优选10V和100V之间。在特定实施例中,电压在10至75V之间。最小电压低于最大电压且至少为0V。在一些实施例中,最小电压在0至150V之间,优选在0至100V之间,更优选在0至50V之间。在一些实施例中,最小电压在0至20V之间,优选在0和10V之间。在各实施例中,最小电压是接近0V的电压(对于特定电源尽可能接近),即基本上为0V或约0V。

[0042] 在连续电抛光体制之间改变电流密度的情况下,与前一电抛光体制相比,可以改变电流密度,最好是步进增加或降低。在实施例中,电流密度的变化通常至少为 $1\text{A}/\text{cm}^2$,优选至少为 $2\text{A}/\text{cm}^2$,更优选从 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 至 $200\text{A}/\text{cm}^2$ 。在一些实施例中,电流密度在1至 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 之间变化,更优选在1至 $50\text{A}/\text{cm}^2$ 之间变化。

[0043] 电抛光步骤可包括一种或多种电抛光体制之后的一种或多种冷却体制。在各实施例中,电抛光步骤包括至少一种冷却体制,其包括在至少一种电抛光体制之后降低电流密度。冷却体制可能仅跟随一种电抛光体制、多种电抛光体制,或在某些情况下跟随每种电抛光体制。在降低电流密度的情况下,优选地将其降低至前一电抛光体制的电流密度的至多一半,更优选地,降低至前一电抛光体制的电流密度的至多四分之一。降低的电流密度可为前一电抛光体制的电流密度的0.5或更小、0.4或更小、0.3或更小、0.2或更小、或者甚至0.1或更小。在一些实施例中,电流密度降低至接近或等于零电流密度。冷却体制可施加于任何合适的时间帧。在一些实施例中,每种冷却体制被施加达至少为0.5秒,更优选至少为1秒的

历时。在各实施例中,冷却体制被施加达1至10秒,优选1至5秒。与前一电抛光体制相比,冷却体制具有降低的电流密度,并且因此降低的电流,以允许金属制品和阴极冷却。这在某些实施例中可能是有利的,例如在非浸入式方法(见下文)中,其中金属制品被连接到电源的正极端子,由此成为阳极,并且阴极包括适合的导电电极,例如导电刷,被连接到电源的负极端子。在这些实施例中,冷却时间旨在冷却金属工件,尽管冷却刷电极也有好处。

[0044] 本发明的示范性实施例包括在电抛光体制之前的初始脉冲。在这些实施例中,电抛光步骤包括施加所施加的电流体制,所施加的电流体制包括:

[0045] 初始脉冲,包括至少 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度和包括频率为从20至300kHz的成形波形的电压,最小电压为至少0V,而最大电压为50至500V之间,施加达至少为1秒的历时;接着是至少一种电抛光体制,其包括至少 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度和包括频率为从2Hz至300kHz的成形波形的电压,最小电压至少为0V,而最大电压在0.5至500V之间。

[0046] 通过最初使用高电流密度对部件进行喷砂,本发明立即去除保护金属制品免受攻击的钝化/抛光膜层。在这种状态下,金属制品极易受到化学和大气的侵蚀。本发明使用频率、电压、电流、温度和化学来管理所有变量,并允许以均匀方式从金属制品表面剥离颗粒。

[0047] 在优选实施例中,电抛光步骤包括施加所施加的电流体制,其包括:

[0048] 初始脉冲,包括至少 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度和包括频率为从20至300kHz的成形波形的电压,最小电压为至少0V,而最大电压为50至500V之间,施加达至少为1秒的历时;接着是至少两种电抛光体制,其包括至少 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度和包括频率为从2Hz至300kHz的成形波形的电压,最小电压至少为0V,而最大电压在0.5至500V之间,其中与前一电抛光体制相比,每种电抛光体制的频率和/或最大电压改变。

[0049] 在一些实施例中,初始脉冲的电流密度大于 $5\text{A}/\text{cm}^2$,优选大于 $7\text{A}/\text{cm}^2$,更优选大于 $10\text{A}/\text{cm}^2$ 。

[0050] 虽然不希望被限于任何一种理论,发明人认为,初始脉冲去除金属制品上的任何部分粘合材料,而随后的一系列电抛光体制(或多种体制)对金属制品进行电抛光,从而产生优选均匀、光滑和有光泽的电抛光表面。在某些情况下,初始高电流/电压脉冲融化或以其他方式切断部分粘合材料和基材之间的附着点。电抛光优选要求表面清洁且一般无污染物。因此,初始脉冲有利地去除金属制品表面的碎屑。对于3D打印的制品,这些碎片可以作为3D打印过程中的人工制品呈现。这有利于减少工作表面上可能出现的微凸(峰),这些微凸(峰)在电抛光期间溶解得比“微谷”中的材料快得多。

[0051] 初始脉冲旨在提供大的最大电压和电流,其能够去除附着在金属制品上或以其他方式部分粘合在金属制品上的任何碎屑。脉冲旨在被施加达短时间帧(即秒)。在这方面,初始脉冲被施加达1至20秒、优选2至15秒、更优选2至10秒、并且更优选2至5秒之间的短时间帧/历时。此外,初始脉冲的最大电压优选地大于每个连续电抛光体制的最大电压。类似地,初始脉冲的电流密度优选地大于每个连续电抛光体制的电流密度。在各实施例中,初始脉冲具有至少 $1.0\text{A}/\text{cm}^2$ 、更优选至少 $5\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度。在一些实施例中,初始脉冲具有 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 至 $200\text{A}/\text{cm}^2$ 、优选20至 $50\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度。在一些实施例中,初始脉冲具有大于 $22\text{A}/\text{cm}^2$ 、优选大于 $25\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度。此外,优选的是,初始脉冲的交流电压的所施加的频率不同于每种连续电抛光体制的所施加的频率。在一些实施例中,初始脉冲的交流电压的所施加的频率小于每种连续电抛光体制的所施加的频率。在一些实施例中,初始脉冲的交流电

压的所施加的频率大于每种连续电抛光体制的所施加的频率。

[0052] 初始脉冲的频率可以从20Hz至300kHz(在某些情况下甚至更高)变化。在一些实施例中,频率可以在200Hz至300kHz之间,优选2kHz至300kHz之间变化。在各实施例中,频率为从20kHz至150kHz。在一些实施例中,频率为从20kHz至100kHz。在其他实施例中,频率从30kHz至100kHz,优选从30kHz至90kHz之间,更优选从40kHz至80kHz变化。

[0053] 每个初始脉冲中使用的最大电压在50和500V之间。在大多数实施例中,最大电压在50V和200V之间,优选50V和150V之间,更优选50V和100V之间。

[0054] 因此,本发明的各实施例的可以提供一种用于对制造的金属制品进行电抛光的方法,该方法包括:

[0055] 将金属制品与电抛光电解液接触;以及

[0056] 在电抛光电解液中对金属制品进行电抛光,

[0057] 其中电抛光步骤包括施加所施加的电流体制,其包括:

[0058] 初始脉冲,包括至少 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度和包括频率为从20至300kHz的成形波形的电压,最小电压为至少0V,而最大电压为50至500V之间,施加达至少为1秒的历时;接着是至少两种电抛光体制,其包括至少 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度和包括频率为从2Hz至300kHz的成形波形的电压,最小电压至少为0V,而最大电压在0.5至500V之间,被施加达至少1秒的历时,其中与前一电抛光体制相比,每种电抛光体制的频率和/或最大电压改变。

[0059] 在特定实施例中,电抛光步骤包括施加所施加的电流体制,其特征在于,初始脉冲,包括频率为从30至50kHz的成形波形的电压,最大电压为60至700V之间,优选为65V,施加达3至7秒的历时,优选为5秒;接着是至少两种电抛光体制,其包括频率为从50Hz至70kHz(优选为63Hz)的成形波形的电压,最大电压在10至60V之间,施加达5至30秒的历时,其中连续电抛光体制具有比前一电抛光体制更低的最大电压。

[0060] 本发明的电抛光方法特别适用于对包括具有保护性氧化物涂层的金属或金属合金的金属制品进行电抛光。这些金属或金属合金的示例包括含铬金属合金、钛、钛合金、镍合金,(诸如,镍钛合金)、铝或铝合金中的一种。

[0061] 在一些实施例中,金属制品由含铬金属合金制成。此类材料具有铬氧化物保护层。应领会,含铬金属合金是包括铬作为合金成分中的主要或主要合金元素的金属合金。包括铬的各种金属合金落入该群组。示例性的示例包括选自铁铬合金、镍铬(镍铬合金(chrome))、镍铬合金、钴铬合金或钴铬钼合金的金属合金。在一些实施例中,含铬合金包括铁铬合金,例如不锈钢。

[0062] 在一些实施例中,含铬合金包括镍铬合金,例如铬镍铁合金。在特定实施例中,含铬金属合金包括钴铬合金。在一些实施例中,Co-Cr合金进一步包括钼和镍合金元素。Co-Cr合金可包括其他微量合金元素(小于1wt%),诸如Mn、Ni、Fe、C、Ti、S、P、N和W。然而,应领会,本发明可与由铝或铝基合金、钛和钛基合金制成的其他金属制品连用。

[0063] 电抛光电解液可以是任何合适的导电液体。在优选形式中,电抛光电解液包括 H_3PO_4 。该电抛光电解液优选地包括在基于水或 C_1 - C_4 醇的溶液中包含磷酸的溶液。电抛光电解液可包含磷酸(H_3PO_4)溶液作为唯一组分酸,或其他化学品(例如其他酸)组合的溶液。例如,电抛光电解液的实施例可包括磷酸与一种或多种硫酸(H_2SO_4)、盐酸(HCl)的组合,以及与水或 C_1 - C_4 醇中的一种或多种的组合。在一种形式中,电解溶液包括85%的磷酸水溶液。

然而,该组合物取决于离子含量和其他变量,包括电抛光电解液的电压、电流和温度。

[0064] 在示例性实施例中,电抛光电解液是食品级(安全)电解液槽。可以使用任何合适的导电液体。在各实施例中,电抛光电解液包含磷酸与水或C₁-C₄醇之一的组合。在各实施例中,电抛光电解液包含磷酸水溶液。

[0065] 电解液中酸、尤其是磷酸的溶液浓度可从1%至90%(即100ml水中1g至90g化合物),优选从10%至90%变化。溶液浓度取决于待处理金属制品的类型(例如不锈钢、钴铬合金、镍铬合金等)和电解处理时间。在一个实施例中,使用85%磷酸溶液。

[0066] 电抛光电解液的pH值可在1和14之间,这具体取决于其组成。在一些实施例中,在本发明的电抛光方法期间,电抛光电解液的pH值优选在1.0至7.0之间,更优选在1.0至3.0之间。在一个实施例中,电抛光电解液的pH值约为1.5。

[0067] 电抛光电解液温度应保持在从-25至200°C、优选从0至150°C、更优选从50至100°C、并且更为优选从60至90°C。再者,电抛光电解液的温度取决于电抛光电解液的成分。例如,当你得到高达85%的磷酸溶液时,电抛光电解液是粘性的。因此,电抛光电解液的温度越高,电解液的工作越好。导电性在较低浓度处更好,但所得金属制品的光泽较差。还应领会,电流密度取决于温度,并基于电抛光电解液的浓度和组成以及因此基于温度而变化。

[0068] 为了保持处理温度范围,通常需要冷却方法。金属制品可通过各种方法冷却,包括但不限于散热器、气流或液体流冷却。电抛光电解液优选通过电解液流入或流经热交换器而保持在50至100°C、更优选60至90°C之间的温度。在一些实施例中,可使用导向电抛光电解液的对流冷却手段,诸如风扇。然而,在优选实施例中,热交换器可被浸入到电抛光电解液中。例如,在小规模(实验室或开发规模)中,这可能包括水/冰水槽,其中浸入含有电极和电抛光电解液的烧杯。在大规模(即商业/工业过程)中,这可能包括电抛光电解液的再循环以及借助于合适的冷却/热交换单元对其进行冷却。另外,一个或多个过滤器可被用于收集来自电抛光电解液的金属/金属氧化物碎屑。

[0069] 可能需要进行电抛光后化学清洗,以去除合金表面上方的任何松散材料化合物,以允许自然钝化层围绕金属合金重新形成。

[0070] 该过程可包括任何数量的过程自动化步骤。例如,在一些实施例中,在电抛光方法期间,可使用自动(机器人)臂来控制工件在槽中的位置和移动。在一些实施例中,一个或多个机器人臂可被用于在电抛光方法期间保持部件和/或电极(例如用于非浸入式电抛光的刷子或垫)两者。

[0071] 本发明的电抛光方法可应用于具有任何特定表面粗糙度的金属制品,例如,小于2 μm的Ra或甚至小于1 μm的Ra可以使用本发明的电抛光方法作为具有粗糙表面的金属制品(例如Ra大于2 μm或甚至5 μm)进行同等的电抛光。在特定实施例中,本发明的电抛光方法可用于降低粗糙金属制品(其由具有大于2 μm的初始平均表面粗糙度(Ra)到小于2 μm Ra表面粗糙度的区域来表征)的平均表面粗糙度。金属制品或其相关部件的初始粗糙度(Ra)大于2 μm,优选大于5 μm(Ra是粗糙度的算术平均值),并且在某些情况下大于10 μm的Ra。在大多数实施例中,基本上所有金属制品具有大于2 μm的初始平均表面粗糙度(Ra)。然而,应当领会,在一些实施例中,只有金属制品的一部分具有需要处理的该粗糙度值。还应领会,本发明的方法适合于同时应用于浸入电解液中的一个或多个制造金属制品。制造的金属制品的初始粗糙度(Ra)通常也小于400 μm,更优选小于300 μm,最优选小于200 μm。

[0072] 制造的金属制品的初始粗糙度可以通过以下方法中的任何一种来制造的结果：砂型铸造、熔模铸造、添加剂制造、金属切割（锯切、成型、钻孔、铣削、车削）、热轧、锻造、火焰切割。然而，应当领会，该列表不是限制性的，并且本发明的方法可以应用于各种制造方法。合适的制造技术的列表以及这些技术通常产生的Ra粗糙度水平如下：

[0073] 添加剂制造，Ra=10至50 μm 。

[0074] 砂型铸造，Ra=10至900 μm 。

[0075] 熔模铸造，Ra=2至10 μm 。

[0076] 金属切割（锯切、成型、钻孔、铣削、车削），Ra=2至25 μm 。

[0077] 热轧，Ra=10至25 μm 。

[0078] 锻造，Ra=3至12 μm 。

[0079] 火焰切割，Ra=12至25 μm 。

[0080] 电抛光的目的是使所得的表面光洁度没有异构的纹理和/或显示出比其初始表面粗糙度值低得多的表面粗糙度值。

[0081] 量化表面粗糙度的合适计量方法包括表面触针轮廓术（Ra和Rz参数根据它从轮廓（线）导出）和3D光学表面轮廓术（Ra和Rz参数根据它从表面积导出）。

[0082] 本发明中要处理的适合的制造金属制品可包括含铬金属合金。如先前所指示的，这些合金包括铁铬合金，诸如不锈钢、镍铬（镍铬合金）及其合金、钴铬合金、钴铬钼合金。在优选实施例中，制造的金属制品包括钴铬合金。

[0083] 该金属制品提供电抛光电路的阳极。还需要阴极来完成电路。适用于阴极的金属材料包括不锈钢、铅、铜或具有良好导电性和耐腐蚀性的任何其他金属或导电材料。在一些实施例中，阴极包括碳基材料，例如碳纤维基材料。在一些实施例中，阴极是电解槽/容器，其中至少一个阳极金属制品（即待处理的粗糙部件）被浸入到电抛光电解质溶液（电解溶液）中。在其他实施例中，阴极包括浸入到电抛光电解液中的单独导电材料制品。阴极表面优选比阳极表面面积（即金属制品表面面积）大2至20倍，并且更优选大5至10倍。

[0084] 应领会，通过本发明的方法处理的金属制品以及装置的尺寸（部件尺寸）可缩放为所施加的电流体制，并可使用可并联运行多个逆变器电源组以实现期望的输出电流/电流密度的控制系统来应用。因此，本发明的方法同样适用于完成高尔夫球大小的部件，从10Ra的起始表面粗糙度到小于2Ra（在某些情况下小于0.5Ra，在一些实施例中小于0.05Ra，并且甚至小于0.02Ra），并且还有一部分是汽车大小的，通过按比例放大电解池、含有电抛光电解液和用于施加所施加的电流体制的逆变器的电解液储存器或电解液槽的大小。

[0085] 本发明的电抛光方法可以在传统的电抛光池中进行，其中金属制品被浸入在电抛光电解液中，或者在非浸入式技术中进行，例如施加刷涂的电抛光技术。

[0086] 在一些实施例中，电抛光电解液包含在电抛光池中。在这些实施例中，将金属制品浸入在电解液中，并且在电解液和容纳电抛光电解液的置物器/容器的范围内进行电抛光。在这种类型的常规电抛光中，金属制品连接到电源的正极端子，由此在电解液槽中成为阳极。将包含适当金属（通常为板状）的阴极浸入电解液槽中，并连接到电源的负极端子，从而成为离子传导的阴极。在浸入式电抛光或表面精整中，本发明方法中使用的电流密度大于2A/cm²，优选大于1A/cm²，更优选大于5A/cm²。

[0087] 在其他实施例中，电抛光作为流体流施加于金属制品表面。这种电抛光技术称为

非浸入式电抛光技术,并且通常涉及将电抛光电解液流施加到金属制品的表面,以及将导电电极浸入到电抛光电解液中并在表面上移动以电抛光导电电极周围的表面。此类电抛光技术可使用导电刷、海绵、垫或将电解流体或流体状材料施加于金属制品的任何设备或材料。

[0088] 在非浸入式方法中,金属制品被连接到电源的正极端子,由此成为阳极。阴极,包括连接到电源的负极端子的适当导电电极。导电电极被配置为与金属制品的表面的所选部分接合。因此,本发明的方法还包括以下步骤:

[0089] 将金属制品的表面与导电电极接触。

[0090] 在一些实施例中,导电电极包括碳纤维刷。然而,可以使用任何合适的导体(例如铜等)。在使用中,电解液被供给(通常从储存器泵送)到金属制品表面的所选部分,以浸入部分阴极和金属制品的表面,并且因此在金属制品的表面上形成电抛光池。可以提供冷却液来冷却电抛光区域。专利公开第W02009/105802、AU2013242795A1和AU2017204328A1号中教导了电抛光技术的示例,其内容应被认为通过本参考纳入本说明书。

[0091] 在非浸入式电抛光或表面精整中,本发明方法中使用的电流密度大于 $5\text{A}/\text{cm}^2$,优选大于 $10\text{A}/\text{cm}^2$,更优选大于 $20\text{A}/\text{cm}^2$,更为优选地大于 $22\text{A}/\text{cm}^2$,并且更为优选地大于 $25\text{A}/\text{cm}^2$ 。在一些实施例中,电流密度可大于 $50\text{A}/\text{cm}^2$,优选大于 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 。在各实施例中,电流密度可大于 $120\text{A}/\text{cm}^2$,优选大于 $150\text{A}/\text{cm}^2$ 。

[0092] 本发明的方法可处理金属制品以:

[0093] 改善表面硬度。

[0094] 控制和预定粒子体积去除。

[0095] 改善耐腐蚀性。

[0096] 降低表面粗糙度。

[0097] 发展表面光泽度。

[0098] 部分去除结合材料。

[0099] 去除污染。

[0100] 提供强的钝化层结合。

[0101] 选择性地抛光区域且忽略金属制品的其他区域。

[0102] 用标签等来标记或蚀刻金属制品。

[0103] 应领会,根据当体制,应领会本发明的电抛光方法的实施例可以在金属制品的电抛光表面中留下一些凹坑,这表明这样的表面可能不是医疗级的。然而,这种电抛光产品仍然可被用于许多应用,例如喷气发动机部件。其他实施例可以实现比 0.02Ra 更平滑的结果,使得这些产品适合于医疗级应用。

[0104] 附图的简要说明

[0105] 现在将参考附图的图来描述本发明,附图解说了本发明的特定优选实施例,其中:

[0106] 图1提供了用于运行根据本发明的第一实施例的电抛光方法的电抛光装置的示意图。

[0107] 图2提供了用于运行根据本发明的第二实施例的电抛光方法的电抛光装置的示意图。

[0108] 图3示出了(A)根据3D打印工艺形成的;且(B)在施加根据本发明的一个实施例运

行的电抛光之后的显微镜图像(钴铬合金试片的表面放大10倍)。

[0109] 图4示出了(A)根据3D打印工艺(在电抛光之前)形成的;且(B)在施加根据本发明的一个实施例运行的电抛光之后的显微镜图像(不锈钢合金试片的表面放大15倍)。

[0110] 图5示出了(A)(在电抛光之前)形成的;且(B)在施加根据本发明的一个实施例运行的电抛光之后的显微镜图像(激光切割铝试片的表面放大10倍)。

[0111] 图6示出了(A)根据3D打印工艺(在电抛光之前)形成的;且(B)在施加根据本发明的一个实施例运行的电抛光之后;以及(C)在(底部)电抛光之前和在(顶部)电抛光之后比较铬镍铁合金试片的照片的显微镜图像(镍铁合金试片的表面放大10倍)。

[0112] 图7解说了具有碳纤维电极刷的非浸入式电抛光装置,该装置用于运行根据本发明的第三实施例的电抛光方法。

[0113] 图8示出了(A)根据3D打印工艺(在电抛光之前)形成的;且(B)在施加根据本发明的一个实施例运行的电抛光之后的显微镜图像(不锈钢合金试片的表面放大20倍)。

[0114] 图9示出了(A)根据3D打印工艺(在电抛光之前)形成的;且(B)在施加根据本发明的一个实施例运行的电抛光之后的钛试片的表面的显微镜图像(放大20倍)。

[0115] 详细描述

[0116] 本发明提供了一种电抛光方法,该方法提供了一种快速、优质、安全和定量的精加工方法,用于制造的金属制品,尤其是由具有保护性氧化物涂层的金属和金属合金制成的金属制品。电抛光方法可用于的金属和金属合金的示例包括铬基金属合金,诸如不锈钢、镍铬(镍铬合金)、镍铬合金、钴铬合金、钴铬钼合金,以及钛、钛合金、镍合金,诸如镍钛诺、铝或铝合金。

[0117] 具有保护氧化物涂层的金属和金属合金的电抛光可能很困难,因为氧化物涂层会抑制正常的电抛光过程。例如,铬基金属合金具有保护氧化铬层,铝和铝基合金具有保护氧化铝外层,而钛和钛基合金具有保护氧化钛外层。本发明的方法有助于克服电抛光这些材料时该层的有害影响。

[0118] 本发明还涉及改善通过工程生产方法(诸如,3D打印(添加剂制造)、火焰切割、切割、粗喷砂等)生产的制造的金属制品的表面光洁度。本发明特别适用于添加剂制造,因为这会产生粗糙的光洁度,并且本发明可以处理通过这种制造方法产生的各种几何形状。

[0119] 在3D打印金属时,表面总是粗糙的,通常平均粗糙度为8-20(Ra)。对于大多数工业应用(包括喷气发动机)和医疗级应用(如植入物),印刷品必须经过抛光才能使用。抛光的常规精加工方法是耗时且通常是手动的,这使得容易出错且成本非常高。当前使用人工进行抛光的时间通常超过一小时。

[0120] 本发明的电抛光方法可在10分钟内(在某些情况下,在3分钟内)产生从典型粗糙度8至20 μm Ra至2 μm Ra粗糙度的光滑光洁度。本发明的电抛光方法能够快速抛光并降低这些类型和其他类型的金属制品的平均表面粗糙度,以产生优选无异构纹理和/或显示较低的平均表面粗糙度值的表面光洁度。

[0121] 图1中解说了适用于实施本发明的电抛光方法的典型电抛光装置100的示意图。解说的电抛光装置100包括电解池110,该电解池110具有配置成容纳电抛光电解液140的电解液储存器120。电抛光装置100还包括逆变器电源130,其能够以短脉冲提供期望的电流波形(DC、DC脉冲或变频AC)。逆变器电源130由计算机控制器135控制。

[0122] 金属制品180电连接到逆变器电源130的正极端子,而逆变器电源130的负极端子连接到阴极190,阴极190还包括含有电解液140的容器。应当领会,在其他实施例中,阴极190可以是单独的导电制品。合适的导电材料包括碳基材料,诸如石墨、石墨烯、碳纤维等,用于阴极190的金属/金属材料包括不锈钢、铅、铜或表现出良好导电性和耐腐蚀性的任何其他材料。金属制品180悬浮在电解液140中的储存器120中,形成与电抛光电解液140的完整电路。

[0123] 尽管未示出,但电抛光装置110还可包括混合设备,例如,用于搅拌/混合电抛光电解液140并确保电解液140均匀分布在金属制品180和阴极190周围的混合转子。

[0124] 计算机控制的逆变器电源130用于在金属制品180和阴极190之间施加电流和电压差。计算机135运行一程序,该程序使逆变器130(电源)逐步通过所施加的电流体制,所施加的电流体制包括一范围的电压/电流和频率,这些电压/电流和频率已被预先确定为对特定金属制品180和待抛光材料而言是最佳的。

[0125] 图2中解说了适用于实施本发明的电抛光方法的电抛光装置200的替换示意图。解说的电抛光装置200还包括电解池210,电解池210具有包括配置成容纳电抛光电解液240的玻璃容器(或其他合适的材料)的电解液储存器220,和能够递送短脉冲形式的所需电流波形(DC、DC脉冲或变频AC)的逆变器电源230。逆变器电源230由计算机控制器235控制。

[0126] 金属制品280电连接到逆变器电源230的正极端子,而逆变器电源230的负极端子连接到阴极290,在该情形中,阴极290包括也浸入到电解液240中的所选金属制品。同样,阴极290的合适金属材料包括不锈钢、铅、铜或具有良好导电性和耐腐蚀的任何其他金属或导电材料。金属制品280悬浮在电解液240中的储存器220中,形成与电抛光电解液240的完整电路。电抛光装置200的这种形式包括可任选混合转子,用于搅拌/混合电抛光电解液240并确保电解液240均匀分布在金属制品280和阴极290周围。

[0127] 使用电抛光装置100或200的电抛光电解液140、240,在 -25°C 至 200°C 范围中的温度处,且优选 0 至 150°C 的温度处进行电抛光。在各实施例中,电抛光电解液140、240保持在约 50°C 至 100°C 、优选 60°C 至 90°C 的温度下。电抛光装置100、200还可包括组合温度探头/加热和冷却单元(未解说),其可附连至计算机控制器135、235或单独的控制单元(未解说)以监测和控制电抛光电解液140、240的温度。

[0128] 在每个实施例中,计算机控制的功率逆变器130、230被用于在金属制品180、280和阴极190、290之间施加电流和电压差。计算机135、235运行一程序,该程序使逆变器电源130、230(电源)逐步通过所施加的电流体制,所施加的电流体制包括一范围的电压/电流和频率,这些电压/电流和频率已被预先确定为对特定金属制品180、280和待抛光材料(金属或金属合金)而言是最佳的。

[0129] 所施加的电流体制大致包括以下步骤:

[0130] 可任选初始脉冲,其包括至少 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度和具有频率为 20 至 300kHz 的成形波形的电压、至少 0V (优选接近 0V)的最小电压和 50 至 500V 之间的最大电压,施加达至少 1s 的历时,然后:

[0131] 至少一种电抛光体制,该电抛光体制包括至少 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度和具有频率从 2Hz 至 300kHz 的成形波形的电压、至少为 0V 的最小电压(优选接近 0V)、以及在 0.5 至 500V 之间的最大电压。每种电抛光体制通常施加达至少 1s 、优选至少 2s 的历时。在使用两种或两种

以上的电抛光体制的情况下,与前一电抛光体制相比,每种电抛光体制的频率和/或最大电压发生变化。

[0132] 虽然不希望局限于任何一种理论,但发明人认为,在体制开始时,材料去除速率很高。在不到一分钟的时间内,在被处理材料的表面上快速形成扩散层。扩散层似乎以与绝缘体或电阻负载类似的方式来作用。该扩散层显著减小了材料去除的速度,如果其不被去除,则工艺速度显著降低。频率、电流密度(电流)或电压中的至少一者的变化破坏扩散层并重新建立材料去除的高速。电流密度(电流)变化、电压变化或频率变化的高速率会维持扩散层破坏的高速率,并且因此允许工艺维持极高的材料去除速率。

[0133] 出于上述原因,电流(电流密度)变化通常(但不一定)是电流减少。频率变化可以是增加或减少。波形频率的变化对于破坏扩散层至关重要,因为它只需要在不同体制之间改变频率。它可能增加或减少。

[0134] 因此,电流(电流密度)变化和频率变化(频率增加或减少)的高速率允许快得多的表面精加工过程。当电流或波形频率变化速率较高时,整体表面的精加工速度的增加大约快十倍。

[0135] 可任选初始脉冲可被用于提供大的最大电压和电流密度,其能够去除金属制品180上任何松散附连/或部分粘合的材料。脉冲旨在被施加达较短时间。另外,初始脉冲的最大电压和电流密度优选地大于至少一种电抛光体制中的每一种的最大电压和电流密度。

[0136] 应注意,可能使用单个电抛光体制,然而,多种电抛光体制将实现改进的表面光洁度。电抛光体制优选地被设计成以降低的强度逐渐对金属制品180、280进行电抛光。虽然可以使用单个电抛光体制,但是典型的是具有至少两种电抛光体制,每个连续的电抛光体制优选地具有通常是前面的电抛光体制的最大电压和电流密度。在这方面,与在向下趋势模式中整体较低相关,最大电压和电流密度通常较低。应当领会,各种电抛光体制可以根据该模式变化并且具有更高的分量。在使用多种电抛光体制的情况下,初始电抛光体制优选地具有较高的最大电压/电流以快速去除大量材料。这会很快将非常粗糙的材料中的表面粗糙度减小到中等光滑的粗糙度。最大电压/电流可在随后的体制中降低以获得越来越精细的结果。因此,最佳的表面精加工工艺是一系列体制,最初较高,但随后降低电压/电流,用于越来越平滑和精细的光洁度。

[0137] 每个连续的电抛光体制优选地以与先前的电抛光体制不同的频率来施加。然而,应领会,在某些情况下,一种或多种连续的电抛光体制可以与先前的电抛光体制相同的频率来施加。

[0138] 每个电抛光体制之后可任选地是冷却体制,其中电流密度与先前的电抛光体制的电流密度相比更低。降低的电流密度可为前一电抛光体制的电流密度的0.5或更小、0.4或更小、0.3或更小、0.2或更小、或者甚至0.1或更小。在一些实施例,电流密度降低至零(或接近零)电流密度/所施加的电流。冷却状态可能仅跟随一种电抛光体制、多种电抛光体制,或在某些情况下跟随每种电抛光体制。冷却体制可施加于任何合适的时间帧,例如0.5至5秒。与前一电抛光体制相比,冷却体制具有降低的电流密度,并且因此降低的电流被施加,以允许金属制品和阴极冷却。

[0139] 电压的成形波形可以是方波、正弦、脉冲或其组合之一。在一些实施例,成形波形电流包括脉冲宽度调制(PWM)波形,优选方波脉冲,优选具有可变死区时间。应领会,尽管

方波波形被用于先前的示例中,但其他波形也可等同地使用。

[0140] 所有电抛光体制的总历时优选小于10分钟,且更优选小于5分钟,并且如果可能,小于2分钟。然而,总时间通常取决于材料类型和其他条件。为了实现这一点,每种电抛光体制可被施加达10至60秒、优选10至30秒、更优选10至20秒、更为优选10至15秒的历时。

[0141] 精确施加的电流体制是针对每种特定的金属或合金组成和配置定制的。

[0142] 如上所述,发明人认为在使用时,初始高脉冲电流/电流密度去除部分粘合材料。这对于电抛光是有利的,因为工作表面上的微凸体(峰)溶解比“微谷”中的材料快得多。这种选择性溶解是峰和谷的电位不同值的结果。阳极连接的金属物品的正电荷集中在一些峰值中,其中电流密度高于致使这些峰值的选择性溶解和表面的平滑的平均。因此,去除任何部分粘合材料有助于形成光滑表面。

[0143] 选择一种或多种电抛光体制的频率、电流(电流密度)和电压变化(步进)的序列,以对部件进行电抛光,从而使抛光表面均匀、光滑、有光泽。应领会,由于初始表面的性质,本发明的电抛光方法可以留下一些凹坑。然而,选择电抛光体制以改善加工速度,使粗糙表面($\sim 10\text{Ra}$)在60秒或更短时间内降至 2Ra 以下的表面粗糙度。预期去除速率(电流)随反馈数据波动,但预计去除速率将高达 $1.0\mu\text{m}/\text{分}$ 至 $50\mu\text{m}/\text{分}$,最好为 2 至 $30\mu\text{m}/\text{分}$ 。

[0144] 对于给定的电抛光电解液,从金属制品中去除的金属量与施加的电流量和时间成比例。其他因素,诸如金属制品的几何形状,会影响电流的分布,并且因此对局部区域中去除的金属量有重要影响。

[0145] 电抛光电解液140、240优选地包含基于磷酸(H_3PO_4)的溶液,通常为85%浓度,用 C_1 至 C_4 醇的水稀释。然而,电抛光电解液140、240可包括其它组分。例如,在一些实施例中,电抛光电解液140、240包括磷酸(H_3PO_4)与硫酸(H_2SO_4)、盐酸(HCl)或其组合,以及水或 C_1 - C_4 醇中的一种的组合。其他电抛光电解质组合物也是可能的。

[0146] 多个金属制品180、280(部件)可被放置在同一电解池110、210中,从而允许本发明的方法是可缩放的和成本高效的。部件尺寸(金属制品180的尺寸)也是可缩放的,因为控制系统可以并联运行多个逆变器电源组以实现合需的输出电流。本发明的方法和系统同样可被配置为将高尔夫球大小的部件从 10Ra 的起始表面粗糙度电抛光到小于 2Ra ,并通过按比例放大电解液储存器120、220(槽)和逆变器电源130、230,将汽车大小的部件电抛光。

[0147] 上述电抛光方法被教导为在传统电抛光池中进行,其中金属制品被浸入到电抛光电解液中,或在非浸入式技术(例如刷涂电抛光技术)中进行。

[0148] 在其他实施例(未解说)中,电抛光作为流体流施加到金属制品的表面上。这种电抛光技术称为非浸入式电抛光技术,并且通常涉及将电抛光电解液流施加到金属制品的表面,以及将导电电极浸入到电抛光电解液中并在表面上移动以电抛光导电电极周围的表面。

[0149] 在非浸入式方法中,金属制品被连接到电源的正极端子,由此成为阳极。包括适当导电电极的阴极被连接到电源的负极端子。导电电极被配置为与金属制品的表面的所选部分接合。在一些实施例中,导电电极包括碳纤维刷。然而,可以使用任何合适的导体(例如,诸如铜等的金属)。在使用中,电解液从储存器泵送给金属制品表面的所选部分,以浸入部分阴极和金属制品的表面,并且因此在金属制品的表面上形成电抛光池。可以提供冷却液来冷却电抛光区域。再者,专利公开第W02009/105802、AU2013242795A1和AU2017204328A1

号中教导了电抛光技术的示例,其内容应被认为通过本参考纳入本说明书。

[0150] 本发明的电抛光方法已经被开发以对金属制品,尤其是具有保护性氧化物涂层的那些金属和金属合金进行电抛光。电抛光方法可用于的金属和金属合金的示例包括铬基金属合金,诸如不锈钢、镍铬(镍铬合金)、镍铬合金、钴铬合金、钴铬钼合金,以及钛、钛合金、镍合金,诸如镍钛诺、铝或铝合金。

[0151] 可使用本发明方法进行电抛光的含铬金属合金的一个示例为钴铬合金。与不锈钢一样,外表面上存在足够的铬含量会钝化表面。钴铬合金具有极好的机械性能,诸如强度和韧性、铸造性、耐腐蚀性和耐磨性。特别地,钴铬合金具有极好的耐磨性,因此它们被用于人工关节的滑动部件。

[0152] 钴铬合金在铬和钴含量上名义上相等,从而产生在钴铬相图中间的合金。钴铬和钴铬合金通常具有六方密排(HCP)晶体结构,其中铬和钴占据在另一晶体作为替代缺陷的位置。在一些实施例中,钴铬合金进一步包括钼和镍合金元素。钴铬镍合金由于其高耐腐蚀性,也是永久性植入物的良好选择。这些进一步的合金元素产生其他替代缺陷,从而强化了合金并降低了铸造合金形式的加工能力。钴铬合金可包括其他微量合金元素(小于1wt%),诸如Mn、Ni、Fe、C、Ti、S、P、N和W。表1提供了可使用本发明的方法进行电抛光的生物相容钴铬复合的非限制性示例。

[0153] 表1—钴铬复合物的示例

	F75	F799	F90	F562
[0154] 钴	59.9%–69.5	58%–59%	45%–56.2%	29–38.8
	%			
铬	27%–30%	26%–30%	19%–21%	19–21%
钼	5%–7%	5%–7%	–	9%–10.5%
锰	最大 1%	最大 1%	1%–2%	最大 0.15%
镍	最大 1%	最大 1%	9%–11%	33%–37%
[0155] 铁	最大 0.75%	最大 1.5%	最大 3%	最大 1%
硅	最大 1%	最大 1%	最大 0.4%	最大 0.15%
碳	最大 0.25%	最大 0.35%	标称 0.1%	–
其他		氮: 最大 0/25%	磷: 最大 0.04%	锡: 最大 1% 硫: 最大 0.01%
W	–	–	14%–16%	–

[0156] 在其他实施例中,本发明的电抛光方法可被用于电抛光由镍铬合金(例如铬镍铁合金)形成的金属制品。铬镍铁合金是一种奥氏体镍铬基高温合金族。铬镍铁合金是一种耐氧化腐蚀的材料,非常适合在承受压力和热量的极端环境中使用。当加热时,铬镍铁合金形成厚、稳定的钝化氧化层,其保护表面免受进一步的攻击。

[0157] 铬镍铁合金的成分差异很大,但都主要是镍,铬是第二元素。

[0158] 表2—铬镍铁合金复合物的示例

L 类型	元素、重量比 (%)														
	锡	铬	铁	钼	铌 和 钽	钴	锰	铜	铝	钛	硅	碳	硫	磷	硼
[0159] 600	≥72.	14.0-1	6.0-1				≤1.	≤0.			≤0.	≤0.15	≤0.0		
	0	7.0	0.0				0	5			5		15		
617	44.2	20.0-2	≤3.0	8.0-10		10.0	≤0.	≤0.	0.8-1	≤0.6	≤0.	0.05-0.	≤0.0	≤0.0	≤0.0
	-61.	4.0		.0		-15.	5	5	.5		5	15	15	15	06
	0					0									
625	≥58.	20.0-2	≤5.0	8.0-10	3.15-4.15	≤1.0	≤0.		≤0.4	≤0.4	≤0.	≤0.1	≤0.0	≤0.0	
	0	3.0		.0			5				5		15	15	
690	≥58	27-31	7-11				≤0.	≤0.			≤0.	≤0.05	≤0.0		
							50	50			50		15		
[0160] 核 心 等 级 690	≥58	28-31	7-11			≤0.1	≤0.	≤0.			≤0.	≤0.04	≤0.0		
						0	50	50			50		15		
718	50.0	17.0-2	提醒	2.8-3.	4.75-5.5	≤1.0	≤0.	≤0.	0.2-0	0.65-1.	≤0.	≤0.08	≤0.0	≤0.0	≤0.0
	-55.	1.0		3			35	3	.8	15	35		15	15	06
	0														
X-750	≥70.	14.0-1	5.0-9.		0.7-1.2	≤1.0	≤1.	≤0.	0.4-1	2.25-2.	≤0.	≤0.08	≤0.0		
	0	7.0	0			0	5	.0	75		5		1		

[0161] 使用本发明的电抛光方法抛光的3D打印制品在工业中起到重要作用。不锈钢和铝涉及通用目的的制造。铬镍铁合金被用于喷气发动机。铬钴被用于牙科和钛应用于生物医疗。

[0162] 除了上述优点外,还应领会,根据本发明的电抛光在金属制品中产生许多有利变化,包括但不限于以下中的一种或多种:

- [0163] 发亮
- [0164] 毛刺去除
- [0165] 氧化物和暗锈去除
- [0166] 表面轮廓的减小
- [0167] 表面闭塞的去除
- [0168] 增加的耐腐蚀性
- [0169] 后续涂敷中改善的粘附
- [0170] 定向(绘制)线的去除
- [0171] 锐边、锐弯和角的半径
- [0172] 降低的表面摩擦

[0173] 应力消除的表面。

[0174] 示例

[0175] 示例1—钴铬合金

[0176] 粗糙表面 (8至13 μm Ra) 3D打印钴铬合金试片 (表面积为3.2 cm^2 、平均Ra为9.973 μm 的钴铬“MP1”)被放置在形成电解液储存器并提供阴极的不锈钢碗中。碗中含有一电解液槽,其中含有85%的 H_3PO_4 水溶液。整个电抛光装置遵循图1中示出的总体示意图。钴铬试片被放置在槽的中心,与碗侧面和底部的距离相等。然后,将专门用于改变峰值电压、峰值电流、电压频率、电流频率、电压波形、电流波形的计算机控制电源逆变器的正极端子连接到浸入到电解液槽中的钴铬试片和不锈钢碗阴极。冷却风扇对准电解液槽以对电解液进行冷却,以将其中的温度保持在60至90 $^{\circ}\text{C}$ 之间。

[0177] 然后,使用计算机控制的功率逆变器将功率体制(如下表3所示)施加于该槽。计算机运行一程序,该程序使逆变器(电源)步进通过一范围的电压/电流(电流密度)和频率,这些电压/电流和频率已预先被确定对于部件和待抛光材料是最佳的。电压波形为方波,最小电压接近零,而最大电压如表中所示。

[0178] 表3:脉冲电流体制

[0179]

体制	时间 (s)	频率 (kHz)	脉冲DC电压 (V)	电流 (A)
1 (脉冲)	5	40	65	75
2	15	63	50	52
3	10	63	40	39
4	15	63	28	29
5	15	63	18	19

[0180] 如表3中所示,电流以最大、可管理的极限开始,以从试片表面移除部分粘合材料。然后经由计算机程序对频率和电压以及电流进行步进,并且这破坏了试片周围的扩散层。朝着过程结束,经由计算机程序步进降低电流,以达到最佳的最终效果。目标表面粗糙度平均值为2微米或更小,因此开发了可满足该目标的一时间长度的计划。

[0181] 记录每个程序时间、频率、电压和电流。

[0182] 以微米测量每种材料的表面粗糙度平均 (Ra),并在浸入前后计算该平均。平均Ra经由待处理表面的10次单独线扫描获得。然后将前处理平均与后处理平均表面粗糙度 (Ra) 进行比较,后者以微米为单位进行测量。

[0183] 改进的速度仍能保持在60秒中使粗糙表面 ($\sim 10\mu\text{m}$ Ra) 降至2 μm Ra以下的结果。预期去除速率(电流)随反馈数据波动。

[0184] 图3中示出了电抛光运行的结果,其中示出了之前(图3A)和之后(图3B)的显微镜图像。表面光洁度的相对变化使用Starrett sr100表面粗糙度仪从样品正面和背面的随机位置进行的10线扫描以及从该数据导出的平均来确定。表4中给出了这些测量的结果:

[0185] 表4:电抛光之前和之后的粗糙度测量

样品号	抛光前 Ra(μm)	抛光后 Ra(μm)
1	8.65	1.45
2	10.35	2.52
3	11.27	0.90
4	9.43	2.79
[0186] 5	10.23	1.87
6	8.92	1.42
7	8.59	0.66
8	10.75	1.22
9	12.23	1.40
10	9.26	0.80
[0187] 平均 Ra (μm)	9.97	1.50

[0188] 这些给出以下结果：

[0189] 精加工前： $Ra=9.97\mu\text{m}$ 。

[0190] 精加工后： $Ra=1.50\mu\text{m}$ 基于10线扫描。最好结果为 $0.656\mu\text{m}$ 最差结果为 $2.793\mu\text{m}$ (坑 (crater))。

[0191] 这些表明平均表面粗糙度在60秒中从初始粗糙表面 ($\sim 10\mu\text{m}$ Ra) 降至 $2\mu\text{m}$ Ra表面粗糙度以下。可以看出,图3A中解说的尖锐区域被侵蚀掉,在图3B中示出的样品中留下一个基本平坦、无缺陷的表面。此外,图3B示出电抛光过程在材料表面留下了一些坑。因此,产生的表面光洁度不是医疗级,但仍可用于许多其他应用,例如喷气发动机部件、航空航天应用或类似应用。

[0192] 示例2—不锈钢

[0193] 粗糙表面 (12至 $18\mu\text{m}$ Ra) 不锈钢试片 (表面积为 3.2cm^2 、平均Ra为 $15.62\mu\text{m}$ 的不锈钢“SS17”)被放置在形成电解液储存器的玻璃碗中。碗中含有一电解液槽,其中含有85%的 H_3PO_4 水溶液。整个电抛光装置遵循图2中示出的总体示意图,其使用基于不锈钢的阴极。不锈钢试片被放置在远离阴极的槽的中心。然后,将专门用于改变峰值电压、峰值电流、电压频率、电流频率、电压波形、电流波形的计算机控制电源逆变器的正极端子连接到浸入到电解液槽中的不锈钢试片。冷却风扇对准电解液槽以对电解液进行冷却,以将其中的温度保持在60至 90°C 之间。

[0194] 然后,使用计算机控制的功率逆变器将功率体制(如下表5所示)施加于该槽。计算机运行一程序,该程序使逆变器(电源)逐步通过一范围的电压/电流(电流密度)和频率,这些电压/电流和频率已被预先确定对于部件和待抛光材料是最佳的。频率范围为100至100000赫兹(Hz);电压从0至100伏(v),而电流从0至50安培。该程序总共运行了296秒,并且

包括53种不同的体制。电压波形为方波,最小电压接近零,而最大电压如表5中所示。

[0195] 表5:脉冲电流体制

体制	时间 (s)	频率 (Hz)	脉冲 DC 电压 (V)	电流(A)
1 (脉冲)	10	100	50	50
2	5	22K	15	15
3	2	100K	27	28
4	5	60K	0	0
5	2	100K	20	23
6	5	22K	18	24
7	2	100K	26	24
8	5	60K	30	35
9	2	100K	100	0
10	5	84K	26	29
11	2	100K	25	30
12	5	22K	24	27
13	2	100K	23	25
14	5	22K	16	22
15	2	100K	23	29
16	5	84K	19	26
17	2	100K	18	24
18	5	22K	15	19
19	2	100K	20	29
20	5	60K	15	23
21	2	100K	20	28
22	5	84K	15	24
23	2	100K	19	26
24	5	22K	15	24
25	2	100K	18	23

[0196]

[0197]

26	5	84K	10	15
27	2	100K	15	22
28	5	100K	12	17
29	10	22K	16	16
30	5	100K	26	24
31	10	60K	16	19
32	5	100K	22	25
33	10	84K	20	23
34	5	100K	19	22
35	10	22K	17	24
36	5	100K	12	17
37	5	60K	11	13
38	10	100K	12	14
39	10	84K	12	13
40	10	100K	12	15
41	10	84K	16	16
42	5	100K	26	24
44	10	22K	16	19
45	5	100K	22	25
46	10	60K	20	23
47	5	100K	19	22
48	10	84K	17	24
49	5	100K	12	17
50	5	22K	11	13
51	10	100K	12	14
52	10	60K	12	13
53	10	100K	12	15

[0198] 频率、电压和电流的变化是精加工速度和质量的关键。改进的速度仍能保持在不到300秒的时间内使粗糙表面($\sim 10\mu\text{m Ra}$)降至 $2\mu\text{m Ra}$ 的表面粗糙度以下的结果。

[0199] 图4中示出了电抛光运行的结果,其中示出了之前(图4A)和之后(图4B)的显微镜

图像。表面光洁度的相对变化使用时间RTD 300表面粗糙度仪从样品正面和背面的随机位置进行的10线扫描以及从该数据导出的平均来确定。表6中给出了这些测量的结果：

[0200] 表6:电抛光之前和之后的粗糙度测量

样品号	抛光前Ra (μm)	抛光后Ra (μm)
1	17.17	1.80
2	17.31	1.74
3	13.63	1.78
4	12.40	2.17
5	17.74	2.15
6	16.58	2.17
7	15.29	1.80
8	15.14	2.16
9	14.71	2.17
10	16.18	1.67
平均Ra (μm)	15.62	1.96

[0202] 这些给出以下结果：

[0203] 精加工前:Ra=15.62 μm 。

[0204] 精加工后:Ra=1.96 μm 基于10线扫描。最好结果为1.67 μm ,最差结果为2.17 μm 。

[0205] 这些表明平均表面粗糙度在小于300秒中从初始粗糙表面($\sim 10\mu\text{m}$ Ra)降至2 μm Ra表面粗糙度以下。电抛光SS17创生了对样品非常光滑且精细的光洁度。高而粗糙的部分被拿走了,而孔洞没有。

[0206] 示例3—激光器切割铝

[0207] 粗糙表面(5至8 μm Ra)激光器切割铝试片(表面积为3.2 cm^2 、平均Ra为6.40 μm 的5005级铝“A1 5”)被放置在形成电解液储存器的玻璃碗中。碗中含有一电解液槽,其中含有85%的 H_3PO_4 水溶液。整个电抛光装置遵循图2中示出的总体示意图,其使用不锈钢阴极。铝试片被放置在远离阴极的槽的中心。然后,将专门用于改变峰值电压、峰值电流、电压频率、电流频率、电压波形、电流波形的计算机控制电源逆变器的正极端子连接到浸入到电解液槽中的铝试片。电解液在40 $^{\circ}\text{C}$ 开始。冷却风扇对准电解液槽以对电解液进行冷却,以将其中的温度保持在60至90 $^{\circ}\text{C}$ 之间。

[0208] 然后,使用计算机控制的功率逆变器将功率体制(如下表7所示)施加于该槽。计算机运行一程序,该程序使逆变器(电源)逐步通过一范围的电压/电流(电流密度)和频率,这些电压/电流和频率已被预先确定对于部件和待抛光材料是最佳的。存在12种体制,总时间为130秒(s)。频率范围为22000至100000Hz;电压从26至49V,而电流为6至24A。电压波形为方波,最小电压接近零,而最大电压如表中所示。

[0209] 表7:电流体制

体制	时间 (s)	频率 (Hz)	脉冲 DC 电压 (V)	电流(A)
[0210] 1	15	60K	49	24
2	15	84K	46	20
3	10	60K	44	20
4	10	22K	27	14
5	10	84K	40	14
6	10	22K	27	13
[0211] 7	10	60K	35	14
8	10	22K	32	13
9	10	100K	34	9
10	10	60K	26	8
11	10	22K	26	10
12	10	100K	29	6

[0212] 再者,频率、电压和电流的变化是精加工速度和质量的关键。

[0213] 图5中示出了电抛光运行的结果,其中示出了之前(图5A)和之后(图5B)的显微镜图像。表面光洁度的相对变化使用时间RTD 300表面粗糙度仪从样品正面和背面的随机位置进行的十行扫描以及从该数据导出的平均来确定。表8中给出了这些测量的结果:

[0214] 表8:电抛光之前和之后的粗糙度测量

样品号	抛光前Ra (μm)	抛光后Ra (μm)
1	5.77	1.38
2	7.83	1.85
3	6.90	1.17
4	7.47	1.56
5	5.58	1.45
6	6.04	1.81
7	6.00	1.72
8	5.68	1.83
9	5.58	2.54
10	7.19	1.68
平均Ra (μm)	6.40	1.70

[0216] 这些给出以下结果:

[0217] 精加工前:Ra=6.40 μm 。

[0218] 精加工后:Ra=1.70 μm 基于10线扫描。

[0219] 再者,电抛光创生了对样品非常光滑且精细的光洁度。

[0220] 示例4—铬镍铁合金

[0221] 粗糙表面(4至7 μm Ra) 3D打印铬镍铁合金试片(表面积为3.2 cm^2 , 平均Ra为5.65 μm 的铬镍铁合金“铬镍铁合金2”)被放置在形成电解液储存器的玻璃碗中。碗中含有一电解液槽,其中含有85%的 H_3PO_4 水溶液。整个电抛光装置遵循图2中示出的总体示意图,其使用不锈钢阴极。铬镍铁合金试片被放置在远离阴极的槽的中心。然后,将专门用于改变峰值电压、峰值电流、电压频率、电流频率、电压波形、电流波形的计算机控制电源逆变器的正极端子连接到浸入到电解液槽中的铬镍铁合金试片。冷却风扇对准电解液槽以对电解液进行冷却,以将其中的温度保持在60至90 $^{\circ}\text{C}$ 之间。

[0222] 然后,使用计算机控制的功率逆变器将功率体制(如下表9所示)施加于该槽。计算机运行一程序,该程序使逆变器(电源)逐步通过一范围的电压/电流(电流密度)和频率,这些电压/电流和频率已被预先确定对于部件和待抛光材料是最佳的。存在16种程序,总时间为235秒。频率范围为22至100kHz;电压从8至31V,而电流为6至35A。电压波形为方波,最小电压接近零,而最大电压如表中所示。

[0223] 表9:脉冲电流体制

体制	时间 (s)	频率 (Hz)	脉冲 DC 电压 (V)	电流(A)
[0224] 1	10	60	31	35
2	15	84	30	30
3	15	60	30	30
4	15	84	26	28
[0225] 5	15	100	23	26
6	15	60	26	24
7	15	84	20	23
8	15	22	19	22
9	15	22	17	20
10	15	100	14	13
11	15	22	17	15
12	15	100	8	7
13	15	22	15	14
14	15	22	14	12
15	15	60	10	8
16	15	100	8	6

[0226] 再者,频率、电压和电流的变化是精加工速度和质量的关键。

[0227] 图6中示出了电抛光运行的结果,其中示出了之前(图6A)和之后(图6B)的显微镜图像。表面光洁度的相对变化使用时间RTD 300表面粗糙度仪从样品正面和背面的随机位

置进行的十行扫描以及从该数据导出的平均来确定。表10中给出了这些测量的结果：

[0228] 表10:电抛光之前和之后的粗糙度测量

样品号	抛光前 Ra (μm)	抛光后 Ra (μm)
1	4.56	2.29
2	5.76	1.78
3	4.16	1.92
4	7.27	1.76
5	5.79	1.72
6	6.71	1.77
7	4.74	1.82
8	4.64	1.94
9	6.38	2.1
10	6.48	1.64
平均 Ra (μm)	5.65	1.87

[0231] 这些给出以下结果：

[0232] 精加工前:Ra=5.65 μm 。

[0233] 精加工后:Ra=1.87 μm 基于10线扫描。

[0234] 再者,电抛光创生了对样品非常光滑且精细的光洁度。

[0235] 示例5—铬镍铁合金试片—非浸入式电抛光

[0236] 粗糙表面(4至7 μm Ra)3D打印铬镍铁合金试片(表面积为3.2 cm^3 ,平均Ra为5.65 μm 的铬镍铁合金“铬镍铁合金试片3”)被保持在电连接夹具中。值得注意的是,示例中抛光的实际面积为1 cm^2 ,因为只有一个大的侧面,并且没有边缘被刷子抛光(在非浸入式示例中,抛光面积仅为与刷子接触的面积)。然后,使用改进的非浸入式电抛光装置(可从EASYkleen Pty Ltd,澳大利亚新南威尔士州莫鲁亚雪莱路43号,2537获得的模型EASYkleen Easy Feeder(图7中的300)、使用用于电抛光的碳纤维刷阴极对铬镍铁合金试片3进行电抛光。铬镍铁合金试片通过夹具被连接到电源,以形成电抛光电路的阳极。

[0237] 通过刷子提供85%的 H_3PO_4 水溶液电解液,并将其施加于铬镍铁合金试片进行电抛光。与前面的示例一样,电源被修改(未解说)以被连接到计算机控制的功率逆变器,该逆变器专门用于改变峰值电压、峰值电流、电压频率、电流频率、电压波形、电流波形,然后连接到铬镍铁合金试片。

[0238] 然后,使用计算机控制的功率逆变器将功率体制(如下表11所规定的)施加于该碳纤维刷阴极。计算机运行一程序,该程序使逆变器(电源)逐步通过一范围的电压/电流(电流密度)和频率,这些电压/电流和频率已被预先确定对于部件和待抛光材料是最佳的。存

在16种程序,总时间为235秒。频率范围为22至100kHz;电压从8至31V,而电流为6至35A。电压波形为方波,最小电压接近零,而最大电压如表中所示。

[0239] 表11:脉冲电流体制

[0240]

体制	时间 (s)	频率 (Hz)	脉冲DC电压 (V)	电流 (A)
1	5	60	12	44
2	10	60	9	40
3	10	84	8	38
4	10	22	8	37
5	10	60	8	39
6	10	84	6	38
7	10	22	7	39
8	10	100	6	28
9	10	22	7	30
10	10	60	6	32
11	10	84	4	18
12	10	100	4	18
合计	115			

[0241] 再者,频率、电压和电流的变化是精加工速度和质量的关键。

[0242] 表12中给出了电抛光运行的结果:

[0243] 表12:电抛光之前和之后的粗糙度测量

[0244]

样品号	抛光前Ra (μm)	抛光后Ra (μm)
1	5.48	1.62
2	4.46	1.45
3	5.26	1.95
4	6.49	2.03
5	4.47	1.28
6	5.01	2.01
7	5.73	1.34
8	3.97	0.96
9	5.67	1.8
10	3.72	2.11
平均Ra (μm)	5.65	1.87

[0245] 这些给出以下结果:

[0246] 精加工前:Ra=5.65 μm 。

[0247] 精加工后:Ra=1.87 μm 基于10线扫描。

[0248] 再者,电抛光创生了对样品非常光滑且精细的光洁度。并且,这些结果类似于示例4中详述的浸入式方法。

[0249] 示例6—不锈钢—非浸入式电抛光

[0250] 粗糙表面 (13.95 μm Ra) 3D打印不锈钢试片 (表面积为3.2 cm^2 , 平均Ra为13.95 μm 的“SS5”) 被保持在电连接夹具中。值得注意的是, 示例中抛光的实际面积为1 cm^2 , 因为只有一个大的侧面, 并且没有边缘被刷子抛光 (在非浸入式示例中, 抛光面积仅为与刷子接触的面积)。然后, 使用改进的非浸入式电抛光装置 (可从EASYkleen Pty Ltd, 澳大利亚新南威尔士州莫鲁亚雪莱路43号, 2537获得的模型EASYkleen Easy Feeder (图7中的300)、使用用于电抛光的碳纤维刷阴极对不锈钢试片进行电抛光。不锈钢试片通过夹具被连接到电源, 以形成电抛光电路的阳极。

[0251] 通过刷子提供85%的 H_3PO_4 水溶液电解液, 并将其施加于不锈钢试片进行电抛光。与前面的示例一样, 电源被修改 (未解说) 以被连接到计算机控制的功率逆变器, 该逆变器专门用于改变峰值电压、峰值电流、电压频率、电流频率、电压波形、电流波形, 然后连接到不锈钢试片。

[0252] 然后, 使用计算机控制的功率逆变器将功率体制 (如下表12所规定的) 施加于该碳纤维刷阴极。计算机运行一程序, 该程序使逆变器 (电源) 逐步通过一范围的电压/电流 (电流密度) 和频率, 这些电压/电流和频率已被预先确定对于部件和待抛光材料是最佳的。存在29种程序, 总时间为74秒 (60秒为电抛光时间)。频率范围为20至200kHz; 电压从4至20V, 而电流为30至80A。电压波形为方波, 最小电压接近零, 而最大电压如表中所示。

[0253] 表12: 脉冲电流体制

[0254]

体制	时间 (s)	频率 (kHz)	脉冲 DC 电压(V)	电流(A)	占空比%
1	4	20	20	80	20
2	1	20	冷却	0	20
3	4	60	12	40	30
4	1	60	冷却	0	30
5	4	40	7.1	50	20
6	1	40	冷却	0	20
7	4	100	5.6	57	20
8	1	10	冷却	0	20
9	4	80	6	40	20
10	1	80	冷却	0	20
11	4	100	5	35	20
12	1	100	冷却	0	20
13	4	120	5.5	50	20
14	1	120	冷却	0	20
15	4	160	5.4	40	20
16	1	160	冷却	0	20
17	4	80	3.6	32	10
18	1	80	冷却	0	10
19	4	140	4.5	45	20
20	1	140	冷却	0	20
21	4	120	4	35	20
22	1	120	冷却	0	20
23	4	180	4.3	37	20
24	1	180	冷却	0	20
25	4	200	4.5	30	20

[0255]	26	1	200	冷却	0	20
	27	4	120	4	35	20
	28	1	120	冷却	0	20
	29	4	160	4	30	20

[0256] 频率、电压和电流的变化是精加工速度和质量的关键。在这种特殊的碳纤维刷阴极运行中,在每个电抛光体制之间施加零电流的冷却步骤,以允许金属件冷却。冷却时间旨在冷却金属件,尽管冷却刷电极也有一点好处。此关闭时间有助于这种形式的电抛光装置的有效性。如结果所示,在四次连续运行中施加表12中的功率体制,以实现最终的表面粗糙度。

[0257] 表面光洁度的相对变化使用时间RTD 300表面粗糙度仪从样品抛光侧的随机位置进行的十行扫描以及从该数据导出的平均来确定。表13中给出了这些测量的结果:

[0258] 表13:电抛光之前和之后的粗糙度测量

[0259]	体制 4a (60 秒)	SS 试片 5 Ra (μm)
	抛光前	13.95
	第一次运行	7.56
	第二次运行	4.35
	第三次运行	2.88
	第四次运行	1.22

[0260] 这些表明平均表面粗糙度从初始粗糙表面 (13.95 μm Ra) 降至2 μm Ra表面以下。试片SS5的电抛光创生了对样品非常光滑且精细的精加工。

[0261] 示例7—钛—非浸入式电抛光

[0262] 将粗糙表面 (~10.28 μm Ra) 3D打印钛试片 (表面积为3.2 cm^2 , 平均Ra为10.28 μm 的“Ti-AMS”) 保持在电连接夹具中。值得注意的是,示例中抛光的实际面积为1 cm^2 , 因为只有一个大的侧面, 并且没有边缘被刷子抛光 (在非浸入式示例中, 抛光面积仅为与刷子接触的面积)。然后, 使用改进的非浸入式电抛光装置 (可从EASYkleen Pty Ltd, 澳大利亚新南威尔士州莫鲁亚雪莱路43号, 2537获得的模型EASYkleen Easy Feeder (图7中的300)、使用用于电抛光的碳纤维刷阴极对钛试片进行电抛光。钛试片通过夹具被连接到电源, 以形成电抛光电路的阳极。

[0263] 通过刷子提供85%的 H_3PO_4 水溶液电解液, 并将其施加于钛试片进行电抛光。与前面的示例一样, 电源被修改 (未解说) 以被连接到计算机控制的功率逆变器, 该逆变器专门用于改变峰值电压、峰值电流、电压频率、电流频率、电压波形、电流波形, 然后连接到钛试片。

[0264] 然后, 使用计算机控制的功率逆变器将功率体制 (如下表14所规定的) 施加于该碳

纤维刷阴极。计算机运行一程序,该程序使逆变器(电源)逐步通过一范围的电压/电流(电流密度)和频率,这些电压/电流和频率已被预先确定对于部件和待抛光材料是最佳的。共有23个程序(体制2至24),总时间为93秒(其中60秒为电抛光)。频率范围为20至200kHz;电压从8至11V,而电流为30至60A。电压波形为方波,最小电压接近零,而最大电压如表中所示。

[0265] 表14:脉冲电流体制

[0266]

体制	时间(s)	频率(kHz)	脉冲DC电压(V)	(A)	占空比(%)
2	5	100	9.5	60	25
3	3	60	冷却	0	30
4	5	60	9	58	30
5	3	20	冷却	0	20
6	5	20	10	55	20
7	3	120	冷却	0	25
8	5	120	11	45	25
9	3	20	冷却	0	10
10	5	20	10	50	10
11	3	80	冷却	0	20
12	5	80	9.5	53	20
13	3	60	冷却	0	15
14	5	60	8	50	15
15	3	140	冷却	0	25
16	5	140	11	38	25
17	3	200	冷却	0	25
18	5	200	9	30	25
19	3	160	冷却	0	25
20	5	160	9	37	25
21	3	180	冷却	0	25
22	5	180	9	30	25
23	3	40	冷却	0	25
24	5	40	8.5	45	25

[0267] 频率、电压和电流的变化是精加工速度和质量的关键。在这种特殊的碳纤维刷阴极运行中,在每个电抛光体制之间施加零电流的冷却步骤,以冷却金属件,尽管冷却刷电极中也有一点好处。此关闭时间有助于这种形式的电抛光装置的有效性。如结果所示,在四次连续运行中施加表14中的功率体制,以实现最终的表面粗糙度。

[0268] 表面光洁度的相对变化使用时间RTD 300表面粗糙度仪从样品抛光侧的随机位置进行的十行扫描以及从该数据导出的平均来确定。表15中给出了这些测量的结果:

[0269] 表15:电抛光之前和之后的粗糙度测量

体制 8a (60 秒)	钛 AMS 试片 Ra (μm)
抛光前	10.28
[0270] 第一次运行	8.39
第二次运行	7.15
第三次运行	5.91
第四次运行	4.15

[0271] 这些表明平均表面粗糙度从初始粗糙表面 (10.28 μm Ra) 降至 4.15 μm Ra 表面。电抛光 Ti AMS 对样品的平滑光洁度。

[0272] 结语

[0273] 上述每个示例的结果表明,通常通过大电流、高频和步进电源系统来增强快速电抛光 3D 打印制品。这使 3D 打印制品有光滑的光洁度。需要进一步研究以细化参数。

[0274] 总体而言,结果表明,在适用的情况下,可以使用超高电流去除部分粘合材料,在某些情况下,通过熔化或以其他方式切断部分粘合材料与基材之间的附着点。高压/电流可被用于快速去除材料,但长时间施加会在表面留下凹痕和条纹。理想的程序运行超高电流,然后是高电流密度。然后电流密度降低,以实现精细精加工。部件周围的扩散层受到频率和电压的步进(升高或降低)的干扰。一个电压在短时间帧内(以秒为单位)运行良好(通常小于 15 秒),并且随后该过程变慢。

[0275] 具有强氧化层,诸如钛和铝的材料,通过使用更高的频率以更快的速度和更低的电压分解。

[0276] 本领域技术人员将领会,本文所述的发明容易受到除具体描述之外的变化和修改。应理解,本发明包括落入本发明精神和范围内的所有此类变化和修改。

[0277] 如果在本说明书(包括权利要求书)中使用术语“包括”、“包括”、“包含”或“包含”,则应将其解释为规定所述特征、整数、步骤或组件的存在,但不排除存在一个或多个其他特征、整数、步骤、组件或其组。

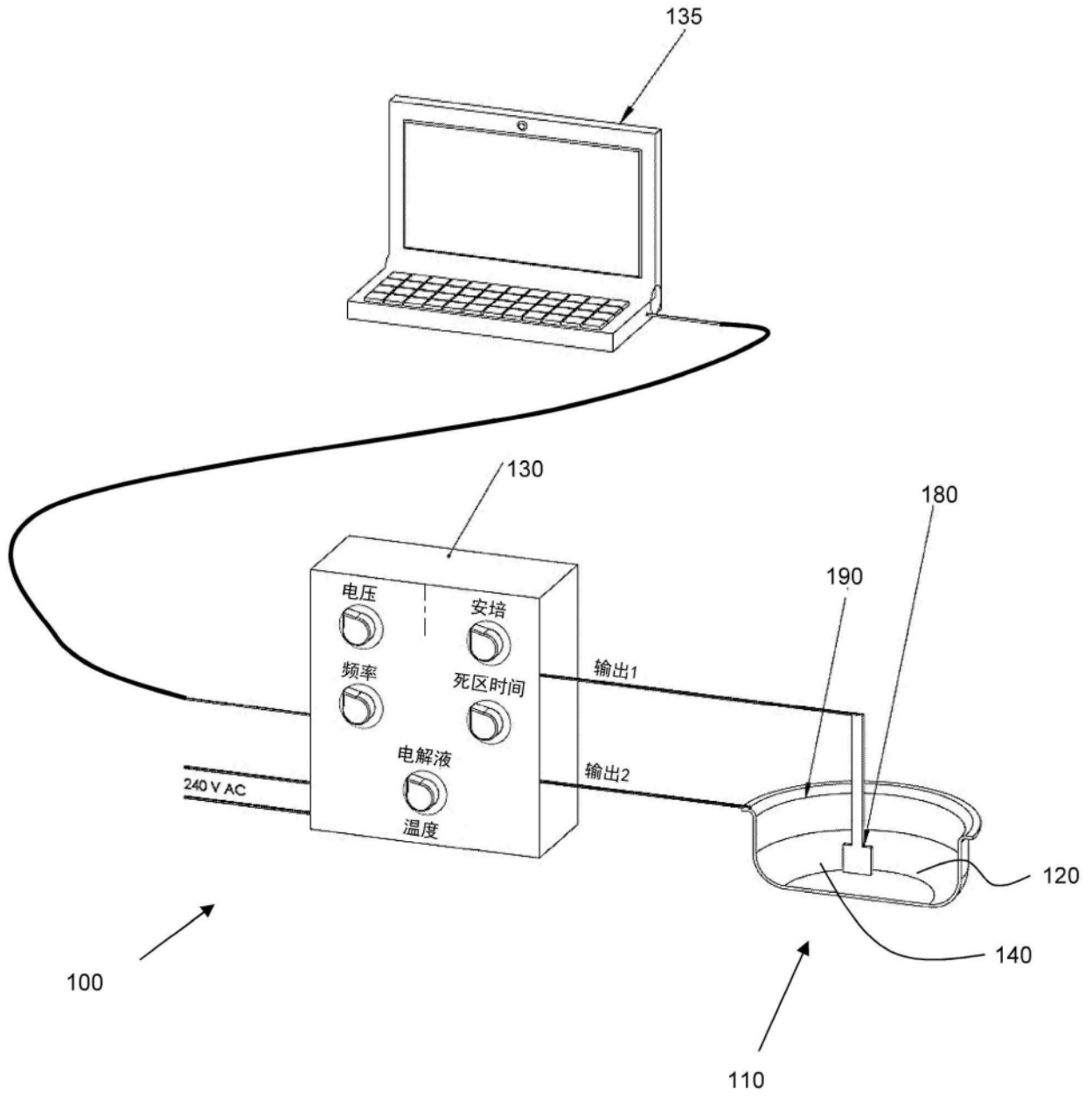


图1

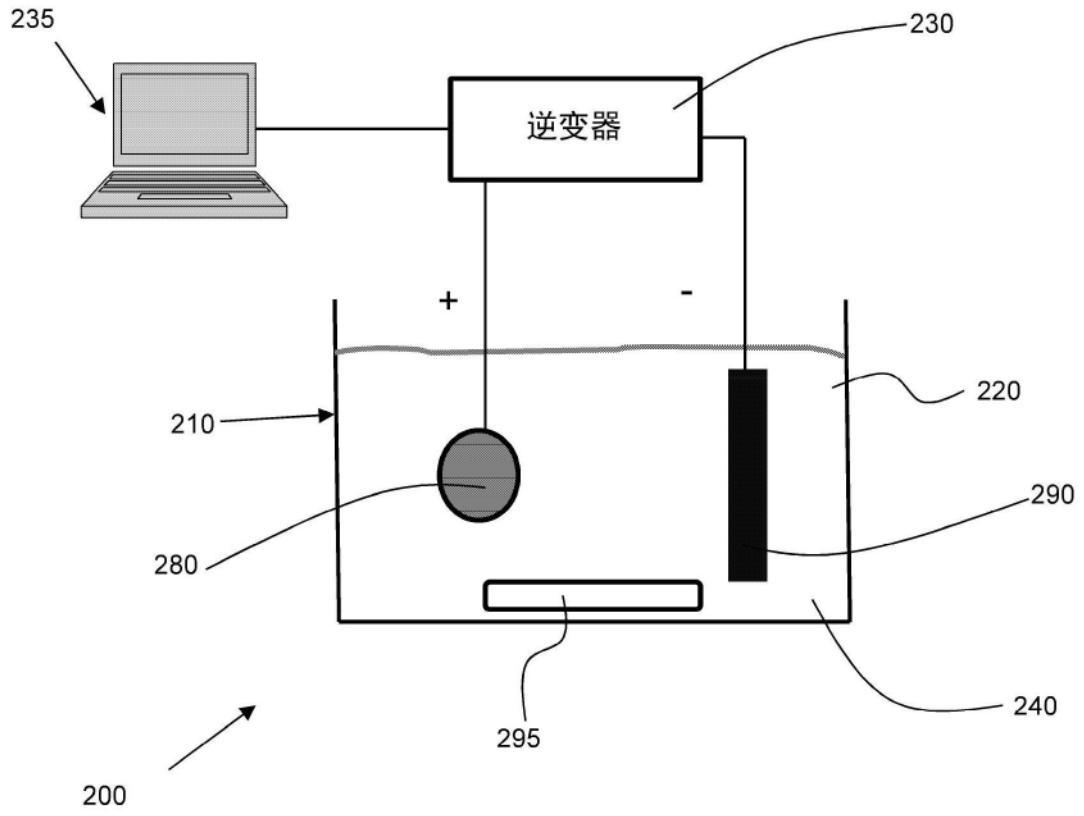
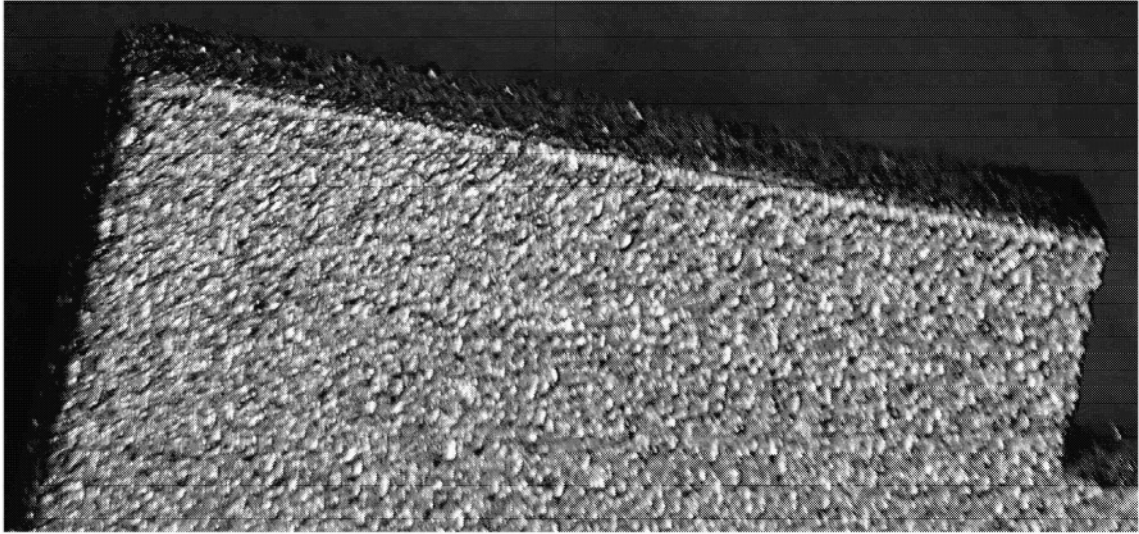


图2

(A)



(B)

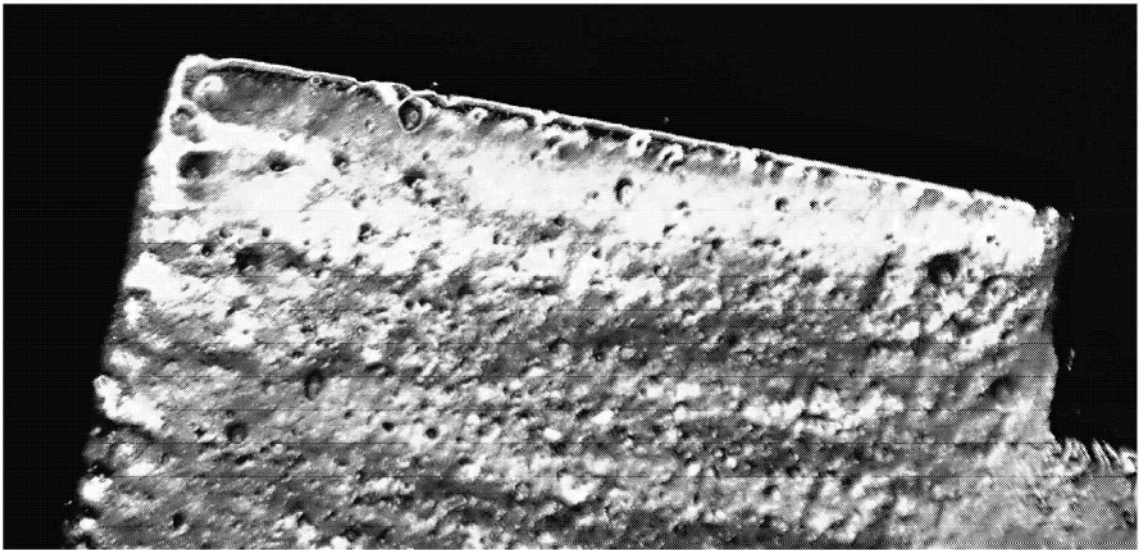
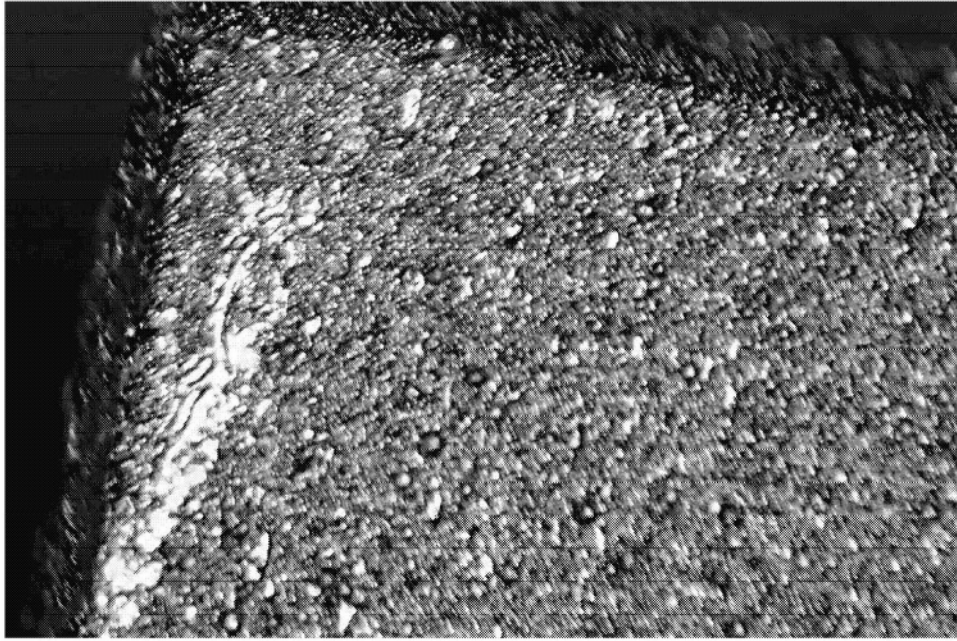


图3

(A)



(B)

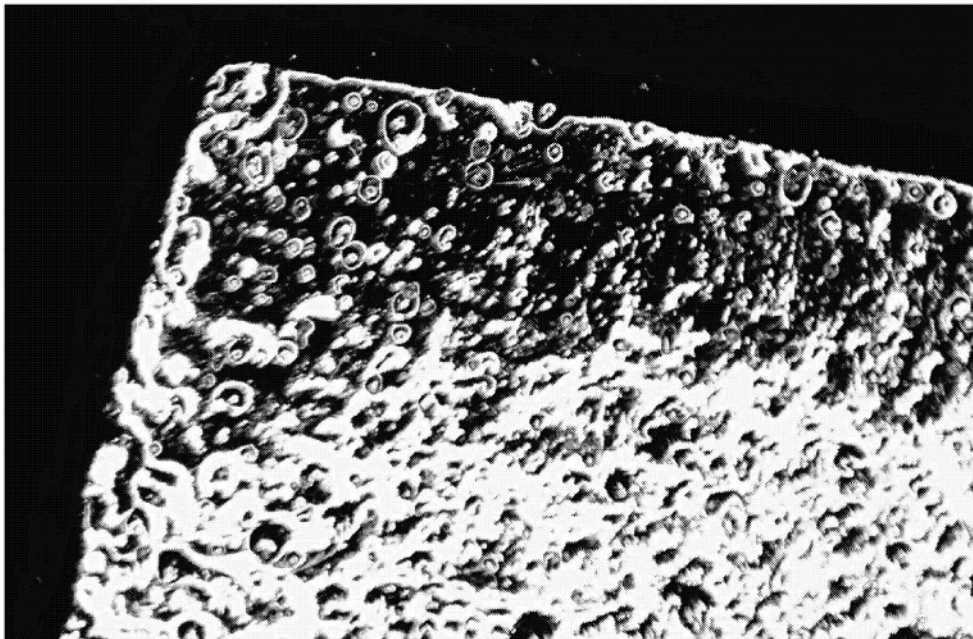
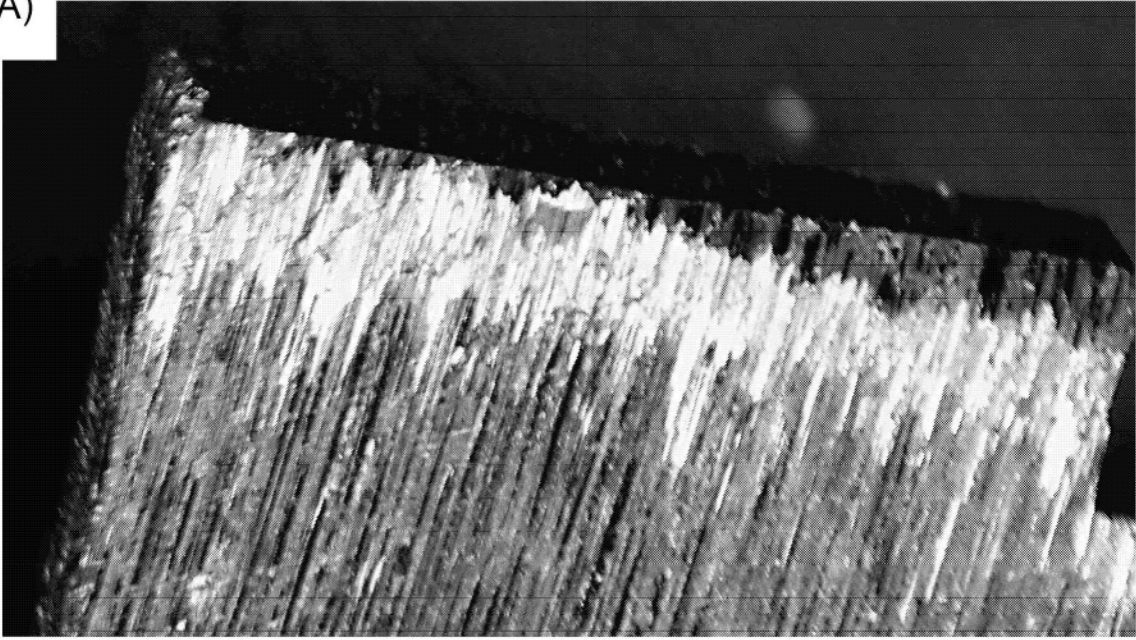


图4

(A)



(B)

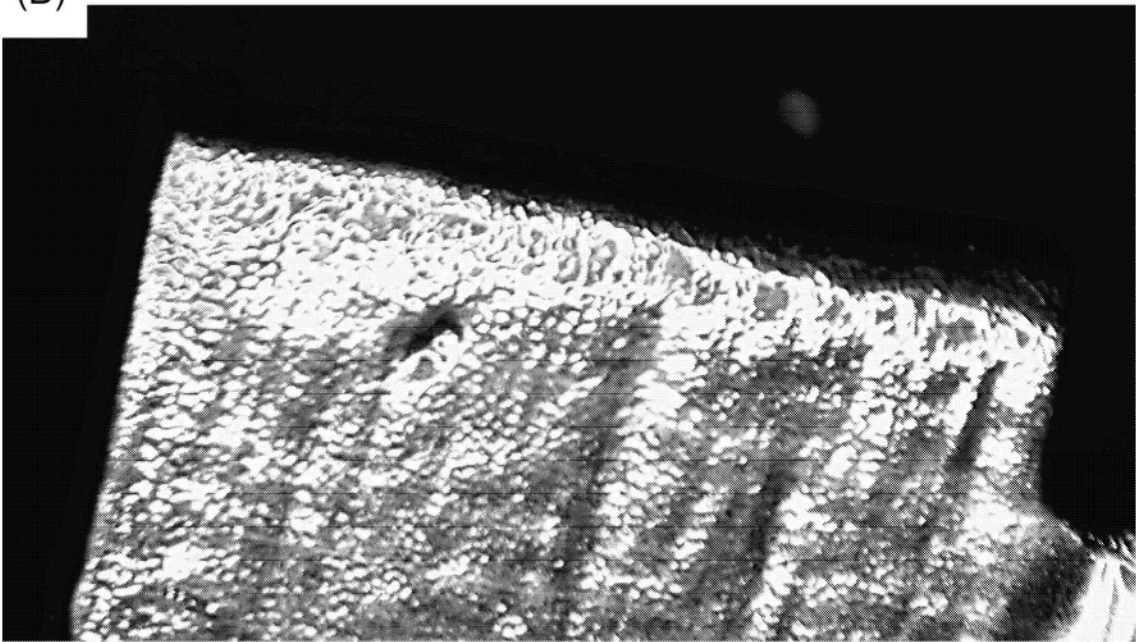


图5

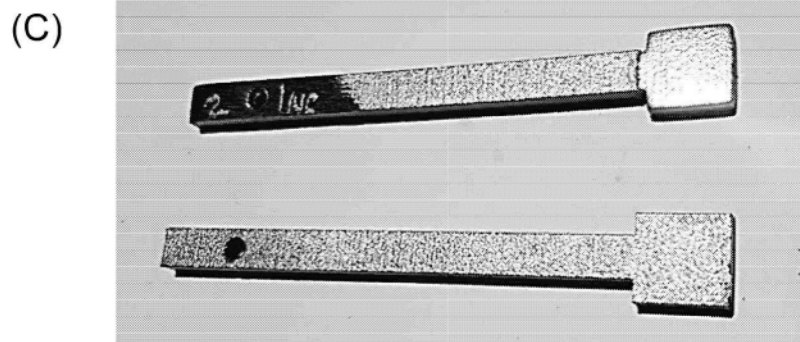
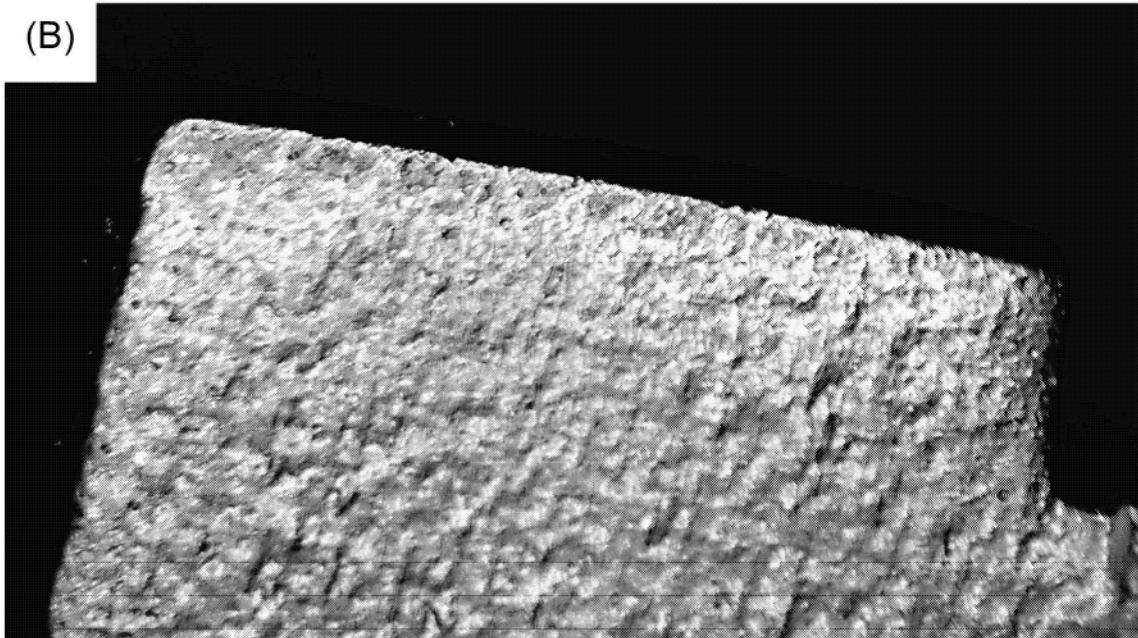
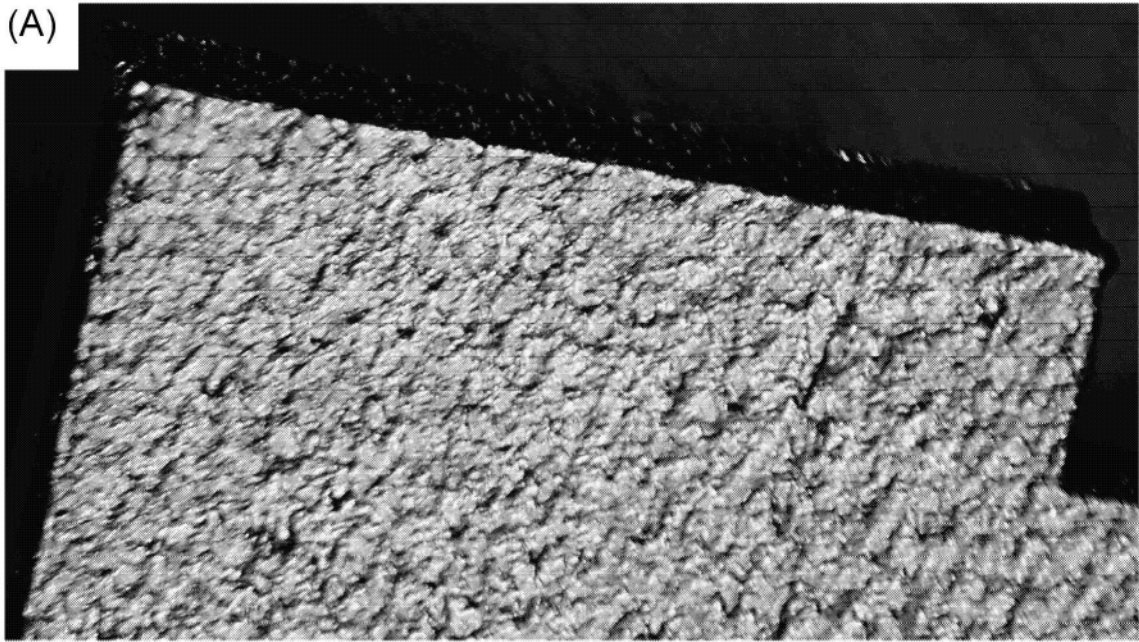


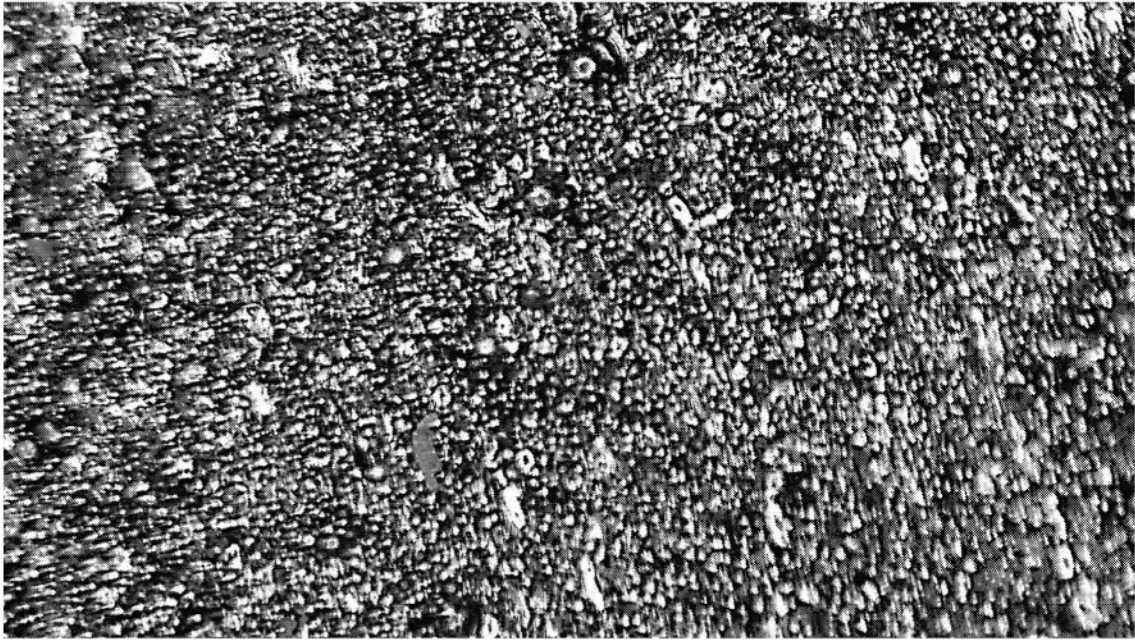
图6



300 ↗

图7

(A)



(B)

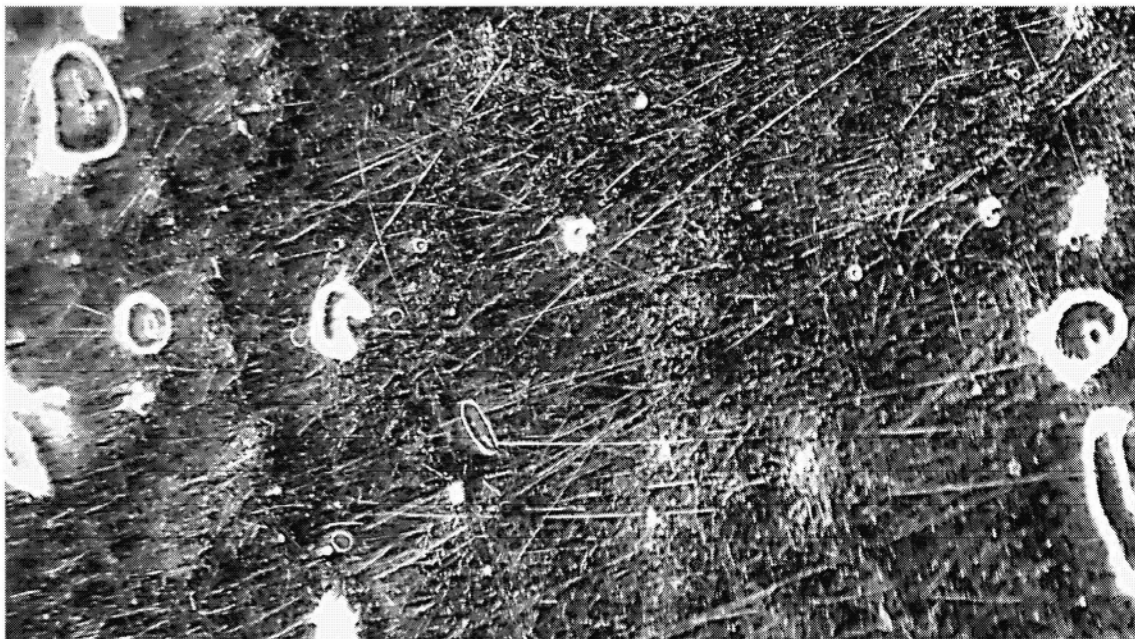
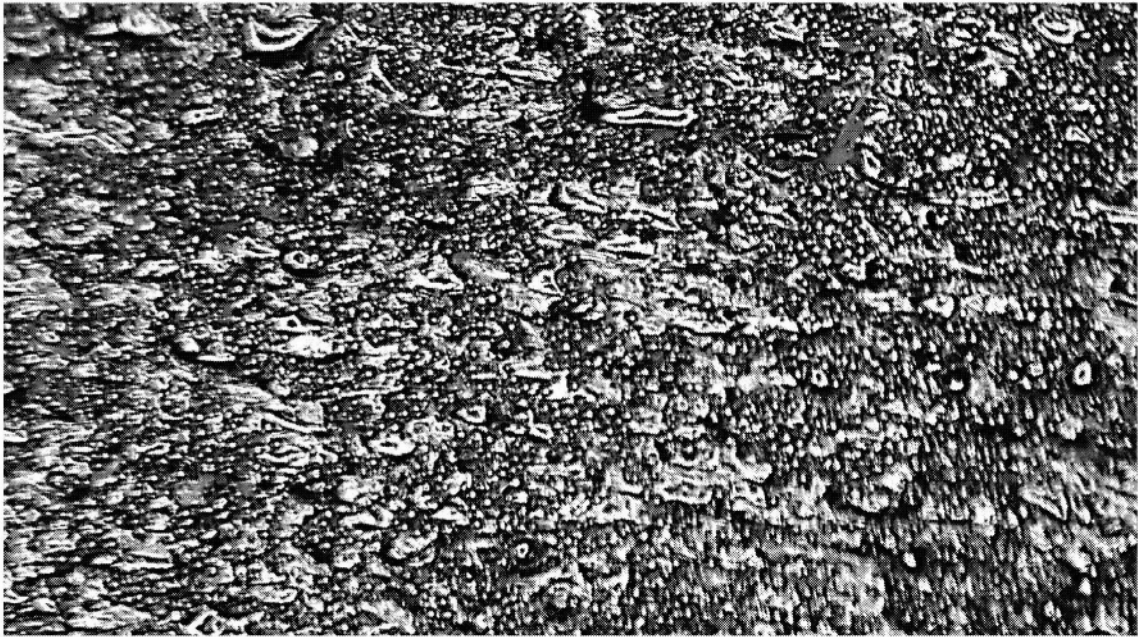


图8

(A)



(B)

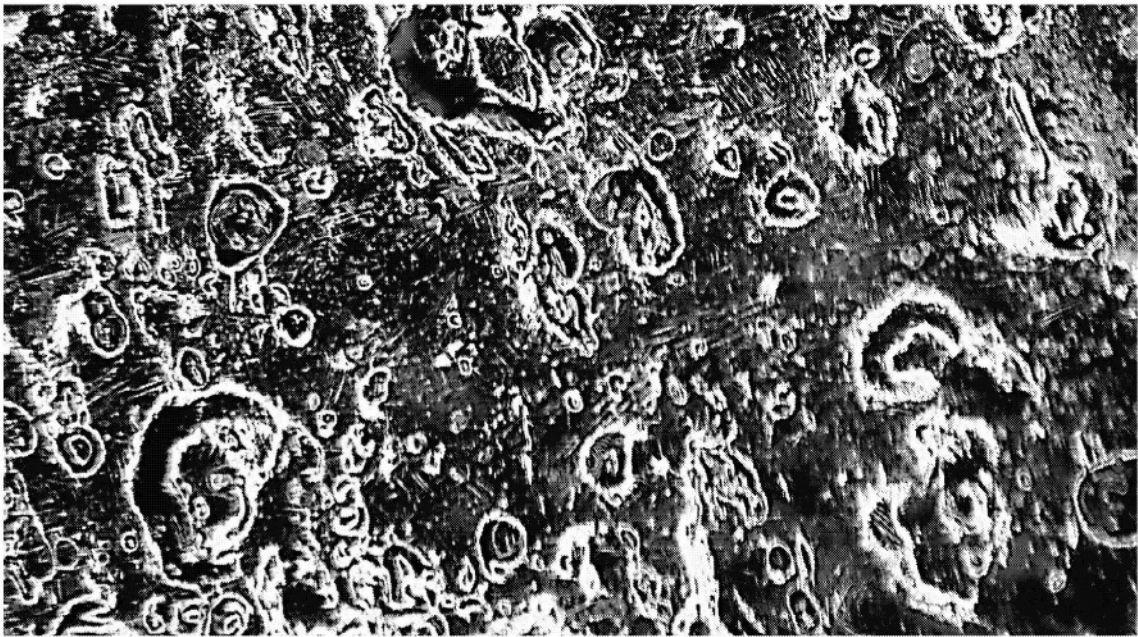


图9