(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103255420 B
(45)授权公告日 2018.09.07

(21)申请号 201310048797.8

(22)申请日 2013.02.07

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 103255420 A

(43)申请公布日 2013.08.21

(30)优先权数据
13/396908 2012.02.15 US

(73)专利权人 通用电气公司
地址 美国纽约州

(72)发明人 B.P.布莱 J.S.詹森 魏斌 周幼东

(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001
代理人 肖日松 严志军

(51)Int.Cl.
C23F 4/00(2006.01)
C22F 1/18(2006.01)

(56)对比文件
US 5746846 A,1998.05.05,
US 2009325468 A1,2009.12.31,
P.H. Shipway et al..Characteristics of the surface of a titanium alloy following milling with abrasive waterjets.《Wear》.2004,第258卷123-132.
P.H. Shipway et al..Characteristics of the surface of a titanium alloy following milling with abrasive waterjets.《Wear》.2004,第258卷123-132.

审查员 李淑娟

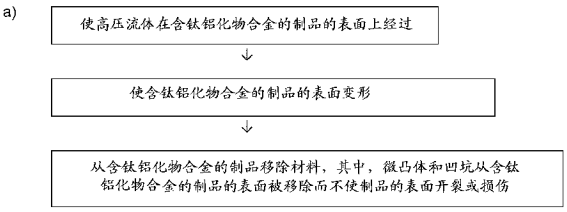
权利要求书3页 说明书13页 附图7页

(54)发明名称

带有改善的表面光洁度的钛铝化物制品

(57)摘要

本发明涉及带有改善的表面光洁度的钛铝化物制品，提供了具有改善的表面光洁度的含钛制品和用于例如通过移除余料而改变含钛制品的表面的方法。一种示例方法包括：使高压流体以高线性速度经过诸如涡轮叶片的含钛铝化物合金的制品的表面；使含钛铝化物合金的制品的表面变形；以及从含钛铝化物合金的制品的表面移除材料。虽然本发明的方面可以在制造高性能涡轮叶片中使用，但本文公开的方法可应用于处理难以获得改善的表面光洁度的任何含钛制品。



CN 103255420 B

1.一种用于从含钛铝化物合金的制品移除材料的方法，包括：

提供含钛铝化物合金的制品，所述钛铝化物合金包括γ钛铝化物基相和α2(Ti_3Al)相；

使高压流体经过所述含钛铝化物合金的制品的表面；

使所述含钛铝化物合金的制品的表面变形；以及

从所述含钛铝化物合金的制品移除材料，其中，微凸体和凹坑从所述含钛铝化物合金的制品的表面被移除而不使所述制品的表面开裂或损伤。

2.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述流体与颗粒介质一起或同时经过所述制品的表面，并且其中，所述流体还包括在从50微米至400微米的范围内的颗粒。

3.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，高压流体从其离开的喷嘴的运动选自由旋转、平移、振荡或它们的组合组成的组。

4.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述流体选自由水、油、乙二醇、乙醇或它们的组合组成的组。

5.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，在所述流体经过所述制品的表面之前，在从50微米至400微米的范围内的颗粒悬浮在所述流体中，并且其中，所述流体的固体负荷按质量流计为10％至40％或者2000克每升到5000克每升。

6.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述流体以5英寸每分钟至1000英寸每分钟的高线性速度在所述含钛铝化物合金的制品的表面上经过。

7.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，在所述流体经过所述含钛铝化物合金的制品的表面之后，所述制品的表面在从所述制品的表面垂直进入所述制品中的小于100微米的深度内变形。

8.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述含钛铝化物合金的制品包括含钛铝化物合金的涡轮叶片。

9.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述制品的表面的粗糙度降低至少50％。

10.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述流体还包括氧化铝、石榴石、二氧化硅、碳化硅、碳化硼、金刚石、碳化钨以及它们的合成物的颗粒。

11.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述移除步骤包括将所述制品的表面的粗糙度降低大于50微英寸的平均粗糙度。

12.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，处理后的所述制品的表面的粗糙度小于两微米。

13.一种用于改变含钛铝化物合金的制品的表面的方法，包括：

使所述含钛铝化物合金的制品在结构上稳定化，所述钛铝化物合金包括γ钛铝化物基相和α2(Ti_3Al)相；

使高压流体以高线性速度经过所述稳定化的钛铝化物合金制品的表面；以及

使所述钛铝化物合金的γ钛铝化物基相和α2(Ti_3Al)相变形，其中，材料从所述含钛铝化物合金的制品的表面被移除，且由此改变所述制品的表面而不使所述制品的表面开裂或损伤。

14.根据权利要求13所述的方法，其特征在于，所述高压流体与在从50微米至400微米的范围内的颗粒介质一起或同时经过所述制品的表面。

15.根据权利要求13所述的方法，其特征在于，所述流体以5英寸每分钟至1000英寸每

分钟在所述含钛铝化物合金的制品的表面上经过。

16.根据权利要求13所述的方法，其特征在于，在所述高压流体经过所述含钛铝化物合金的制品的表面之后，所述制品的表面在从所述制品的表面垂直进入所述制品中的小于100微米的深度内变形。

17.根据权利要求13所述的方法，其特征在于，所述含钛铝化物合金的制品包括含钛铝化物合金的涡轮叶片。

18.根据权利要求13所述的方法，其特征在于，所述制品的表面的粗糙度降低至少50％。

19.根据权利要求13所述的方法，其特征在于，所述高压流体还包括氧化铝、石榴石、二氧化硅、碳化硅、碳化硼、金刚石、碳化钨以及它们的合成物的颗粒。

20.根据权利要求13所述的方法，其特征在于，所述流体选自由水、油、乙二醇、乙醇或它们的组合组成的组。

21.根据权利要求14所述的方法，其特征在于，在所述流体经过所述制品的表面之前，在从50微米至400微米的范围内的颗粒悬浮在所述流体中，并且其中，所述流体的固体负荷按质量流计为10％至40％或者2000克每升到5000克每升。

22.根据权利要求13所述的方法，其特征在于，在处理后，平均粗糙度的值降低到1/3至1/6。

23.根据权利要求13所述的方法，其特征在于，处理后的所述制品的表面的粗糙度小于两微米。

24.一种根据权利要求1中所述的方法制成的含钛铝化物合金的制品。

25.一种用于加工含钛铝化物合金的制品的表面的方法，所述方法包括：

提供含钛铝化物合金的制品，所述钛铝化物合金包括γ钛铝化物基相和α2(Ti_3Al)相；

使高压流体经过所述含钛铝化物合金的制品的表面；

使所述含钛铝化物合金的制品的表面变形；以及

从所述含钛铝化物合金的制品的表面移除材料而不使所述制品的表面开裂或损伤。

26.根据权利要求25所述的方法，其特征在于，所述高压流体与在从50微米至400微米的范围内的颗粒介质一起或同时经过所述制品的表面。

27.根据权利要求25所述的方法，其特征在于，所述流体以50英寸每分钟至1000英寸每分钟的高线性速度在所述含钛铝化物合金的制品的表面上经过。

28.根据权利要求25所述的方法，其特征在于，在所述高压流体经过所述含钛铝化物合金的制品的表面之后，所述制品的表面在从所述制品的表面垂直进入所述制品中的小于100微米的深度内变形。

29.根据权利要求25所述的方法，其特征在于，所述含钛铝化物合金的制品包括含钛铝化物合金的涡轮叶片。

30.根据权利要求25所述的方法，其特征在于，所述高压流体还包括氧化铝、石榴石、二氧化硅、碳化硅、碳化硼、金刚石、碳化钨以及它们的合成物的颗粒。

31.根据权利要求25所述的方法，其特征在于，在所述流体经过所述制品的表面之前，在从50微米至400微米的范围内的颗粒悬浮在所述流体中，并且其中，所述流体的固体负荷为2000克每升到5000克每升。

32.一种用于从含钛铝化物的涡轮叶片的凸形表面移除多余材料的方法，所述方法包括：提供含钛铝化物合金的涡轮叶片，所述钛铝化物合金包括γ钛铝化物基相和α2(Ti_3Al)相；使高压流体经过所述含钛铝化物的涡轮叶片的凸形表面；以及从所述含钛铝化物的涡轮叶片的凸形表面移除0.025mm至5.0mm的多余材料而不使所述涡轮叶片的表面开裂或损伤。

带有改善的表面光洁度的钛铝化物制品

技术领域

[0001] 本发明涉及带有改善的表面光洁度的钛铝化物(titanium aluminide)制品。

背景技术

[0002] 现代燃气涡轮，尤其是飞机发动机，必须满足关于可靠性、重量、功率、经济性和操作使用寿命的最高要求。在飞机发动机的开发中，材料选择、对新合适材料的探索、以及对新制备方法的探索等在符合标准和满足要求方面起重要作用。

[0003] 用于飞机发动机或其它燃气涡轮的材料包括钛合金、镍合金(也称为超合金)和高强度钢。钛合金通常用于压缩机部件，镍合金适用于飞机发动机的热部件，而高强度钢用于例如压缩机外壳和涡轮外壳。高负载或高应力燃气涡轮构件，例如用于压缩机的构件，通常是锻造部件。另一方面，用于涡轮的构件通常体现为熔模铸造部件。

[0004] 由于金属对诸如氧、氮和碳的元素的高亲合力，因而通常难以在常规熔模模具中熔模铸造钛和钛合金以及类似的活性金属并实现良好结果。在高温下，钛及其合金可与模具表面涂层起反应。熔融合金与模具之间的任何反应都将导致由气泡引起的成品铸件的较差表面光洁度。在某些情况下，气泡影响成品铸件的化学性质、微观结构和性质。

[0005] 一旦通过铸造、加工或锻造而制备出成品构件，便通常需要在其可用于最终应用之前进一步改善表面光洁度。构件表面上的微凸体(asperity)和凹坑可降低涡轮叶片应用中的空气动力学性能，并且增加在旋转或往复运动部件应用中的磨损/摩擦。

[0006] 在钛铝化物涡轮叶片的情况下，铸造翼型件可在楔形件、翼型件或护罩中具有被铸造/锻造得尺寸过大的区域。为了将这些薄坯区域加工至最终大小，通常使用机械加工(例如铣削或磨削)或非机械加工(例如电化学加工)。然而，在任一种情况下，工具加工和人工的成本都较高，并且导致制造延迟。

[0007] 此外，包括钛铝化物铸造制品的合金的有限延展性和对开裂的敏感性可妨碍使用常规磨削和抛光技术对铸造制品表面光洁度的改善。因此，需要一种用于在航天应用中使用的具有改善的表面光洁度的金属间化合物基制品以及用于制造这种制品的关联方法。

发明内容

[0008] 本公开的一方面是一种用于从含钛铝化物合金的制品移除材料的方法。该方法包括：提供含钛铝化物合金的制品；使高压流体经过所述含钛铝化物合金的制品的表面；使含钛铝化物合金的制品的表面变形；以及从含钛铝化物合金的制品移除材料。在一方面，该方法供以从含钛铝化物合金的制品的表面移除微凸体和凹坑而不使制品的表面开裂或损伤。在一方面，本公开是一种根据以上叙述的方法制成的含钛铝化物合金的制品。

[0009] 在另一方面，本公开是一种用于从含钛铝化物的涡轮叶片的凸形表面移除多余材料的方法，所述方法包括：提供含钛铝化物合金的涡轮叶片；使高压流体经过所述含钛铝化物的涡轮叶片的凸形表面；以及从含钛铝化物的涡轮叶片的凸形表面移除约0.025mm至约5.0mm的多余材料。

[0010] 在一个实施例中，高压流体与钛铝化物微观结构接触。在另一实施例中，高压流体从其离开的喷嘴的运动选自由旋转、平移、振荡或它们的组合组成的组。在一个示例中，高压流体以约5英寸每分钟至约100英寸每分钟在含钛铝化物合金的制品的表面上经过。在一个示例中，流体包括水、油、乙二醇、醇或它们的组合。在一个示例中，在流体经过制品的表面之前，在从约50微米至约400微米的范围内的颗粒悬浮在流体中，并且流体的固体负荷按质量流计为约10%至40%。在一个实施例中，流体与在从约50微米至约400微米的范围内的颗粒介质一起或同时经过制品的表面。在另一示例中，流体与颗粒介质一起或同时经过制品的表面，其中，流体还包括在从约50微米至约400微米的范围内的颗粒。在一个实施例中，流体在使流体经过制品的表面之前可被加热至室温以上。

[0011] 变形步骤可以例如包括使钛铝化物合金塑性变形。在一个实施例中，在高压流体经过含钛铝化物合金的制品的表面之后，制品的表面在从制品表面垂直进入制品中的小于约100微米的深度内变形。在相关实施例中，该深度小于约10微米。

[0012] 在一个示例中，钛铝化物合金包括γ TiAl基相和α2(Ti_3Al)相。通过实践当前教导的方法，制品表面的粗糙度可降低至少约50%。在另一实施例中，通过实践当前教导的方法，制品表面的粗糙度降低至少约25%。

[0013] 在一个实施例中，含钛铝化物合金的制品的表面具有大于约100Ra的初始粗糙度，并且其中，制品表面的粗糙度降低到至少约50Ra。在另一实施例中，制品表面的粗糙度降低到至少20Ra。在一个实施例中，高压流体包括至少5英寸每分钟的流体的高线性速度。在一个实施例中，高线性速度包括50英寸每分钟。在另一实施例中，高线性速度包括至少100英寸每分钟。在又一实施例中，高线性速度包括至少1000英寸每分钟。在一特定实施例中，高压流体以约50英寸每分钟至约1000英寸每分钟的速度经过含钛铝化物的合金的表面。

[0014] 在一个实施例中，含钛铝化物合金的制品包括含钛铝化物合金的发动机。在另一实施例中，含钛铝化物合金的制品包括含钛铝化物合金的涡轮。在一个实施例中，含钛铝化物合金的制品包括含钛铝化物合金的涡轮叶片。在一个实施例中，该制品为在叶片的工作表面的至少一部分上具有小于约20微英寸的平均粗糙度(Ra)的涡轮发动机叶片。

[0015] 在一个示例中，高压流体还包括氧化铝、石榴石、二氧化硅、碳化硅、碳化硼、金刚石、碳化钨以及它们的合成物的颗粒。在一个示例中，高压流体与在从约50微米至约400微米的范围内的颗粒介质一起或同时经过制品的表面。在另一示例中，高压流体与在从约20微米至约200微米的范围内的颗粒介质一起或同时经过制品的表面。在另一实施例中，这些颗粒为从约50微米至约150微米。

[0016] 在一个实施例中，制品表面的粗糙度降低至少约25%。在另一实施例中，制品表面的粗糙度降低至少约50%。在一个实施例中，表面具有大于约100Ra的初始粗糙度，并且其中，制品表面的粗糙度在处理后降低至约50Ra或更小。在一个实施例中，制品表面的粗糙度在处理后降低至20Ra或更小。即，改善包括将制品表面的粗糙度降低至约20Ra或更小。在另一实施例中，改善包括将制品表面的粗糙度降低大于约50Ra。在一个实施例中，在处理后，Ra值降低到约1/3至约1/6倍。在一特定示例中，处理后的制品表面的粗糙度小于约两微米。在另一实施例中，处理后的制品表面的粗糙度小于约1微米。

[0017] 稳定化步骤在一个示例中包括将所述含钛铝化物合金的制品固定、附连和结合到结构中的一个或多个。使高压流体和/或含诸如石榴石的介质的小颗粒经过制品的表面可

包括使高压的流体和/或介质与钛铝化物微观结构的相相互作用。

[0018] 本公开的另一方面是一种用于改变含钛铝化物合金的制品的表面的方法，包括：使含钛铝化物合金的制品在结构上稳定化；使流体以高线性速度经过所述稳定化的钛铝化物合金制品的表面；以及使钛铝化物合金的γ钛铝化物基相和α2(Ti_3Al)相两者变形，其中，材料从含钛铝化物合金的制品的表面被移除，且由此改变制品的表面。在一方面，本公开是一种根据以上叙述的方法制成的含钛铝化物合金的制品。

[0019] 在另一方面，本公开是一种用于加工含钛铝化物合金的制品的表面的方法，所述方法包括：提供含钛铝化物合金的制品；使高压流体经过所述含钛铝化物合金的制品的表面；使含钛铝化物合金的制品的表面变形；以及从含钛铝化物合金的制品的表面移除材料。

[0020] 在另一方面，本公开是一种用于从含钛铝化物合金的制品移除多余材料的方法，包括：提供含钛铝化物合金的制品；使高压流体经过所述含钛铝化物合金的制品的表面；使含钛铝化物合金的制品的表面变形；以及从制品移除多余材料，其中，将微凸体和凹坑从含钛铝化物合金的制品的表面移除而不使制品的表面开裂或损伤。

附图说明

[0021] 当参考附图阅读以下详细描述时，所提出制品和方法的这些和其它的特征、方面和优点将变得更好理解，在所有附图中相似的标记表示相似的部件，并且在附图中：

[0022] 图1示出根据一个实施例的相对于翼型件定位的流体射流喷嘴的示意性透视图。在该示例中，喷嘴定位成使得流体射流与诸如翼型件的制品的凸面侧相互作用，从而从制品的凸面侧移除多余材料。

[0023] 图2示出根据一个实施例在高压流体射流处理之前和之后的图1中制品的轮廓的示意性透视图。

[0024] 图3示出一图，该图示出磨料水射流喷嘴相对于被加工的叶片表面的配置的一个示例。图1至图3示出用于从铸造钛铝化物叶片的后缘移除0.004″的方案。

[0025] 图4是描绘用于执行磨料水射流加工的云图案的空间-时间积分的示意图。

[0026] 图5示出磨料水射流加工的叶片的图像，示出了区域1(原样(as-received))、区域2(使用示例1制备)和区域3(使用示例3制备)。

[0027] 图6示出磨料水射流加工的叶片的图像，示出了区域1(原样)、区域2(使用示例1制备)和区域3(使用示例3制备)的叶片表面和后部。

[0028] 图7是磨料水射流加工的叶片的图像，示出了叶片后部区域1(原样)、区域2(使用示例1制备)和区域3(使用示例3制备)。在区域3中可看到对材料移除的不可接受控制。

[0029] 图8a和图8b示出根据本公开的某些方面用于从含钛铝化物合金的制品的表面移除材料并改善该表面的流程图。

具体实施方式

[0030] 本公开大体上涉及具有改善的表面光洁度的含钛和钛合金的制品、以及用于改善这种制品上的表面光洁度的方法。在一个示例中，本公开涉及具有改善的表面光洁度的、表现出优异性质的涡轮叶片及其制备方法。

[0031] 常规的燃气和蒸汽涡轮叶片设计通常具有完全由金属或复合物制成的翼型件部

分。全金属叶片，包括昂贵的宽弦中空叶片，在重量上更重，从而导致更低的燃料性能且要求更牢固的叶片附连。在燃气涡轮飞行应用中，在热气体通道中操作的燃气涡轮叶片暴露于燃气涡轮中的其中一些最高温度。各种设计方案一直努力增加叶片在热气体通道中的寿命和性能。如本文所用，术语“涡轮叶片”是指蒸汽涡轮叶片和燃气涡轮叶片。

[0032] 目前的应用公开了，诸如涡轮叶片的钛铝化物构件的表面的高剪切速率局部变形可提供表面光洁度的显著改善并改善性能。一个方面是提供带有改善的表面光洁度的金属间化合物基制品，例如钛铝化物基制品。在一个实施例中，铸造的钛铝化物基制品经受高剪切速率表面处理，以将表面光洁度改善至小于20微英寸(Ra)的粗糙度。这种新的表面处理改善了表面光洁度且在构件的表面中不引入任何额外的损伤或裂缝。

[0033] 在一个示例中，高速率局部剪切变形作用于从表面到构件中小于约100微米的深度内。在一个实施例中，高速率局部剪切变形作用于从表面到构件中小于约10微米的深度内。这种从制品移除余料的方法是新的和有用的，而且不同于为抛光表面所采取的步骤。在一个示例中，为了从制品表面移除材料，使用了高压流体，其中流体在制品的表面上经过。在另一示例中，高压流体与包括大小在从约50微米至400微米的范围内的颗粒的介质一起使用，其中，流体和颗粒混合物在制品的表面上经过。该方法的一个优点在于，它不需要高刚性或重型工具来支撑部件，如为用于铣削的情况。

[0034] 表面粗糙度通常简称为粗糙度，是对表面纹理的量度。它由实际表面与它们的计算平均值的高低偏差来量化。如果这些偏差较大，则表面粗糙；如果它们较小，则表面平滑。粗糙度通常被视为测量表面的高频率、短波长分量。粗糙度在确定真实物体将如何与其环境相互作用方面起重要作用。例如，粗糙表面通常比平滑表面更快地磨损且具有更高的摩擦系数。

[0035] 裂纹(flaw)、波纹(waviness)、粗糙度和花纹方向(lay)总体上为构成表面纹理的性质。裂纹是工件表面的形貌的非故意、意外和不想要的中断。裂纹通常是孤立的特征，例如毛刺、擦伤和划痕，以及类似特征。粗糙度是指高频率(或短波长)的表面纹理中的形貌不规则性，在最细分辨率下评估对工件表面的评估。波纹是指在表面纹理中具有比工件表面的粗糙度更长的波长或更低的频率的形貌不规则性。波纹可能源自例如制造期间机器或工件的振动或挠曲、工具震颤等。

[0036] 术语抛光导致工件表面粗糙度的降低。花纹方向是表面纹理的图案或表面纹理的分量的主要方向。粗糙度和波纹在特定工件表面上可具有不同图案和不同花纹方向。

[0037] 本申请的发明人提供了一种金属间化合物基制品，例如钛铝化物基制品，其表面拥有改善的性质，例如降低的粗糙度和提高的机械完整性。在一方面，所提出技术包括从含钛铝化物合金的制品移除材料。该方法包括：提供含钛铝化物合金的制品；使高压流体在所述含钛铝化物合金的制品的表面上经过；使含钛铝化物合金的制品的表面变形；以及从含钛铝化物合金的制品移除材料。通过实践该方法，微凸体和凹坑从含钛铝化物合金的制品的表面被移除，而不使制品的表面开裂或损伤。在一个实施例中，移除包括移除表面粗糙度和从制品移除多余材料。在一方面，本公开是一种根据以上叙述的方法制成的含钛铝化物合金的制品。

[0038] 钛合金具有高的相对强度和优异的耐腐蚀性，并且已主要用于航天、深海勘探、化工厂等的领域。钛合金的一个示例是钛铝化物。钛铝化物合金通常包括钛铝化物合金的γ

钛铝化物基相和α2(Ti_3Al)相。

[0039] 根据一种技术的变形步骤包括使钛铝化物合金塑性变形;由于钛铝化物合金的塑性变形,合金中的相中的至少一个永久地或不可逆地变形。钛铝化物合金的这种变形通过使高压流体在制品的表面上经过从而导致流体与钛铝化物微观结构的相互作用来实现。流体以高线性速度在构件表面上经过,并且所得高剪切速率产生局部表面变形。在一个实施例中,在流体在制品的表面上经过之前,包括诸如氧化铝或石榴石的颗粒的磨料介质悬浮在流体中。带有或不带颗粒的混合物的冲击提供了移除微凸体而不使表面开裂或损伤所需的剪切。

[0040] 根据一个示例的磨料介质选自氧化铝、石榴石、二氧化硅、碳化硅、碳化硼、金刚石、碳化钨以及它们的合成物中的至少一个。磨料介质也可以是流体的磨料射流。在某些实施例中,流体是流体的磨料高压射流,并且还包括氧化铝、石榴石、二氧化硅、碳化硅、碳化硼、金刚石、碳化钨以及它们的合成物中的至少一个。在一个示例中,流体包括水。在某些实施例中,磨料越硬,抛光操作越快且效率越高。磨料介质的重复使用允许更硬但更昂贵的磨料的经济使用,结果导致抛光和加工操作的效率的提高,以在需要时增加抛光速率。例如,氧化铝或碳化硅可在使用石榴石的抛光操作中被取代。

[0041] 磨料水射流抛光结合4个或5个轴线操纵能力提供了快速、高效且低成本的方式来修改铸造构件几何形状,以符合最终部件大小和所需表面光洁度的精确要求。通过使离开喷嘴的高压流体在带有或不带磨料介质的情况下在制品的表面上经过而产生高剪切速率局部表面变形。高压流体从其离开的喷嘴的运动可以是旋转、平移或振荡。例如,使用该喷嘴,可实现超过50英寸每分钟的线性速度,并且该速度水平与尺寸在从50微米至400微米的范围内的磨粒结合可导致材料(包括余料)从金属间化合物合金制品的表面的大量移除。在一个示例中,喷嘴的速度在1×10^{-3}和10×10^{-3}英寸每分钟的范围内。

[0042] 在一方面,本公开是一种用于从含钛铝化物的涡轮叶片的凸形表面移除多余材料的方法,该方法包括:提供含钛铝化物合金的涡轮叶片;使高压流体在含钛铝化物的涡轮叶片的凸形表面上经过;以及从含钛铝化物的涡轮叶片的凸形表面移除多余材料。根据一个示例,通过在离喷嘴出口规定距离处的切口(kerf)来移除0.025mm至5mm的材料。根据一个示例,通过在离喷嘴出口规定距离处的切口来移除0.5mm至3mm的材料。在一个示例中,约1mm至2mm的材料被移除。

[0043] 在一个示例中,在流体以高压从其离开的喷嘴和诸如涡轮叶片的工件的表面之间的间隙为约0.1cm至约5.0cm。在相关实施例中,喷嘴和工件表面之间的距离为约0.1cm、1.0cm、1.5cm、2cm或2.5cm。该距离可被调整以适合对任何给定物件的要求。例如,如果所有其它变量保持不变,则喷嘴口越靠近工件的表面,离开喷嘴且与工件表面接触并相互作用的流体的冲击就越高。喷嘴越近,切口就越窄—射流被更好地限定,所以更高的精度是可能的,但被呈指数更高的材料移除速率所抵消。反之,如果喷嘴远离工件,则可移除的材料的速率和/或数量小于若喷嘴与工件的待移除部分的表面保持非常靠近时。类似地,离开喷嘴口的流体接触工件表面的角度是确定从工件表面移除材料的速率和/或数量的因素。在一个示例中,诸如涡轮叶片或另一种含钛铝化物合金的制品的工件被固定,并且喷嘴相对于工件的表面移动(参见图1至图3)。

[0044] 根据本文的教导,带有或不带磨料介质的流体在高压下从喷嘴排出,并且在含钛

铝化物合金的制品的表面上经过。压力在表面上通常为约5000至约10,000磅每平方英寸。在一个实施例中,表面上的压力为约40,000至约80,000磅每平方英寸。在另一实施例中,喷嘴口处的流体的压力为约80,000磅每平方英寸至约150,000磅每平方英寸。由制品表面和高压流体之间的相互作用产生的剪切力产生金属间化合物材料的局部流动而不使表面开裂或损伤。该过程移除微凸体并移除表面中的凹坑。含钛铝化物合金的制品或工件包括含钛铝化物合金的发动机、涡轮或涡轮叶片。

[0045] 在一个示例中,经过步骤可包括两个工序或多达五个工序。例如,经过步骤包括使不同尺寸的磨料介质悬浮在流体中,并且该流体接着在含钛铝化物合金的制品的表面上高速经过。构成磨料介质的颗粒的尺寸是本公开的一方面。例如,经过步骤包括使不同尺寸的颗粒悬浮在流体中,并且然后使悬浮在流体中且在从约140微米至约195微米的范围内的颗粒的第一磨料介质在表面上经过,然后使悬浮在流体中且在从约115微米至约145微米的范围内的颗粒的第二磨料介质在表面上经过,并且然后使悬浮在流体中且在从约40微米至约60微米的范围内的颗粒的第三磨料介质在表面上经过。

[0046] 在一个示例中,不同尺寸的磨料介质顺序地悬浮在流体中,并且流体在制品的表面上高速经过,以便在流体经过制品表面的时段内减小尺寸的颗粒与制品的表面接触。例如,经过步骤包括首先使悬浮在流体中且在从约70微米至约300微米的范围内的颗粒的磨料介质在表面上经过,然后使悬浮在流体中且在从约20微米至约60微米的范围内的颗粒的磨料介质在表面上经过。在另一示例中,经过步骤包括首先使悬浮在流体中且在从约140微米至约340微米的范围内的颗粒的磨料介质在表面上经过,然后使悬浮在流体中且在从约80微米至约140微米的范围内的颗粒的磨料介质在表面上经过,并且进一步然后使悬浮在流体中且在从约20微米至约80微米的范围内的颗粒的磨料介质在表面上经过。

[0047] 在一特定实施例中,第三或最后一道磨料介质涉及使悬浮在流体中且在从约5微米至约20微米的范围内的颗粒在表面上经过。在一特定实施例中,最后一道磨料介质涉及使悬浮在流体中且在从约10微米至约40微米的范围内的颗粒在表面上经过。在相关实施例中,最后一道磨料介质可以是在表面上的第二、第三、第四或第五道悬浮的磨料介质。在一个实施例中,颗粒的单位反映颗粒的尺寸。在另一实施例中,颗粒的单位反映颗粒的外部大小,例如宽度或直径。在某些实施例中,磨料介质可以是在表面上带有不同尺寸的相同物质组成,或者它可以是一种或多种不同的物质组成。例如,磨料介质为具有不同尺寸的氧化铝颗粒或者具有不同尺寸的氧化铝颗粒和石榴石的混合物。

[0048] 考虑到待加工表面的硬度和粗糙度以及要达到的表面光洁度,根据一示例性实施例的磨料的颗粒尺寸应当为与所需作业速率一致的最小尺寸。一般而言,磨料的颗粒或“磨粒”尺寸越小,可移除的颗粒的块体越小,并且得到的表面越平滑。磨料通常将具有从低至约50微米到高达约600微米的颗粒尺寸。更常见地,磨料晶粒尺寸将在从约100至约300微米的范围内。

[0049] 在一个示例中,流体选自由水、油、乙二醇、乙醇或它们的组合组成的组。在一个示例中,在流体在制品的表面上经过之前,流体中夹带有在从约50微米至约400微米的范围内的颗粒,并且流体的固体负荷按质量流计为约10%至约40%。在一个实施例中,流体的固体负荷为约5%至约50%。在另一实施例中,流体的固体负荷为约15%至约30%。

[0050] 除了构成磨料介质的颗粒的尺寸之外,颗粒在制品表面上的速度和每个经过步骤

的持续时间也是受控的。在一个实施例中，经过速度使得颗粒花费少于1分钟来经过一英尺的制品。在另一实施例中，颗粒花费10秒至40秒之间来经过一英尺的制品。在另一实施例中，颗粒花费1秒至20秒之间来经过一英尺的制品。

[0051] 在一方面，高压流体具有高线性速度。这种高线性速度包括50英寸每分钟，在另一示例中为至少100英寸每分钟，并且在另一示例中为至少1000英寸每分钟。这是指当切削头移动时在切削头的行进方向上的射流的线性速度。在某些实施例中，带有磨料介质的流体在含钛铝化物合金的制品的表面上以约50英寸每分钟至约1000英寸每分钟的高线性速度经过。在线性速度描述射流自身的速度的情况下，在一个示例中，该速度为从约200m/s至约1000m/s，并且在另一示例中为从约300m/s至约700m/s。在一个示例中，带有磨料介质的流体在制品的表面上经过且与钛铝化物微观结构相互作用。

[0052] 用于材料从含钛铝化物制品的表面的高剪切速率移除的当前教导的方法允许表面的平滑处理和制品表面上的微凸体和凹坑的消除。即，当前教导的方法允许从制品移除材料而不在制品表面上产生表面裂缝或其它损伤。根据本公开的教导，通常在10至150微米的深度内发生仅仅含钛铝化物合金的局部塑性变形。然而，这与其中含钛铝化物合金的至少一个相塑性变形的技术形成对比。在一个实施例中，在使流体经过制品的表面之前，流体被加热至室温以上。所提出技术的特征是其中表面变形过程与表面以下的合金微观结构中的相相互作用的方式。

[0053] 当前教导方法的经过和变形步骤可被顺序地重复，直到实现材料从制品表面的期望移除或期望的粗糙度值。在一个示例中，期望诸如涡轮叶片、涡轮静叶/喷嘴、涡轮增压器、往复式发动机阀、活塞等的高性能制品的表面具有约20微英寸或更小的粗糙度(Ra)。在一些情况下，经过和变形步骤顺序地重复至少两次。在一些情况下，经过和变形步骤顺序地重复多次，其中，流体悬浮物包括具有不同尺寸或顺序减小的尺寸的磨料介质。该过程进行直到获得期望的表面光洁度。例如，经过步骤包括使悬浮在流体中且在从约140微米至约195微米的范围内的颗粒的第一磨料介质在表面上经过，然后使悬浮在流体中且在从约115微米至约145微米的范围内的颗粒的第二磨料介质在表面上经过，并且然后使悬浮在流体中且在从约40微米至约60微米的范围内的颗粒的第三磨料介质在表面上经过。

[0054] 相比当前教导的方法，通常，钛铝化物构件的表面精修(finish)通过多轴线铣削、磨削、磨料抛光、翻滚过程或化学抛光来进行。相比当前教导的方法，机械方法带来表面损伤的风险，而化学方法是耗时的。对于可能始终产生的表面光洁度上的这种常规处理，存在局限性。由这些批量加工技术引入的力可引起不期望的应力，该应力可导致构件的表面开裂。典型的钛铝化物铸造制品的有限延展性和对开裂的敏感性限制了使用常规磨削和抛光技术对铸造制品表面光洁度的改善。所提出技术提供了改善的表面光洁度且大大降低了上述缺点的风险。

[0055] 本公开的另一方面是一种用于改变含钛铝化物合金的制品的表面的方法。在一个实施例中，该方法包括：使含钛铝化物合金的制品在结构上稳定化；使流体以高线性速度在稳定化的钛铝化物合金制品的表面上经过；以及使钛铝化物合金的γ钛铝化物基相和α2(Ti_3Al)相两者变形，其中，材料从含钛铝化物合金的制品的表面被移除，且由此改变制品的表面。稳定化步骤在一个示例中包括将所述含钛铝化物合金的制品固定、附连和结合到结构中的一个或多个。使包括磨料介质的流体在制品的表面上经过，其中，在包括磨料介质

的流体和钛铝化物微观结构的相之间存在相互作用。在一方面，本公开是一种根据以上叙述的方法制成的含钛铝化物合金的制品。在一个实施例中，含钛铝化物合金的制品包括含钛铝化物合金的发动机、含钛铝化物合金的涡轮或者含钛铝化物合金的涡轮叶片。

[0056] 在另一方面，本公开是一种用于加工含钛铝化物合金的制品的表面的方法，该方法包括：提供含钛铝化物合金的制品；使高压流体在含钛铝化物合金的制品的表面上经过；使含钛铝化物合金的制品的表面变形；以及从含钛铝化物合金的制品的表面移除材料。

[0057] 在另一方面，本公开是一种用于从含钛铝化物合金的制品移除多余材料的方法，包括：提供含钛铝化物合金的制品；使高压流体在含钛铝化物合金的制品的表面上经过；使含钛铝化物合金的制品的表面变形；以及从制品移除余料，其中，还将微凸体和凹坑从含钛铝化物合金的制品的表面移除而不使制品的表面开裂或损伤。

[0058] 所提出技术的另一方面是一种用于降低含钛铝化物合金的制品的表面的Ra值的方法，包括：使钛铝化物合金在结构上稳定化；使流体中悬浮的尺寸顺序减小的磨粒在高压下以高速度在稳定化的钛铝化物合金的表面上经过；以及使钛铝化物合金的TiAl基相和α2(Ti_3Al)相两者塑性变形，且由此降低钛铝化物合金表面的Ra值。

[0059] 所提出技术的一个示例涉及从已通过铸造制备的含钛铝化物制品的表面移除材料，例如过量的多余材料(参见例如图1至图3)。根据所用颗粒的类型及其尺寸和状况，包括包含颗粒的流体在制品上经过多长时间，可获得相比处理之前已降低Ra值的含钛铝化物的制品。70微英寸的Ra值对应于大约2微米；并且35微英寸的Ra值对应于大约1微米。通常要求诸如涡轮叶片、涡轮静叶/喷嘴、涡轮增压器、往复式发动机阀、活塞等的高性能制品的表面具有约20微英寸或更小的Ra。通过实践当前教导的方法，制品表面的粗糙度降低至少约50%。例如，含钛铝化物合金的制品的表面具有大于约100微英寸的初始Ra，并且其中，制品表面的Ra在处理后降低至约50微英寸或更小。在一方面，本公开为含钛铝化物合金的制品，例如涡轮叶片，并且它具有在其表面的至少一部分上小于约1微米的粗糙度。

[0060] 在一个示例中，处理后的制品表面的粗糙度为约20微英寸Ra或更小。在另一示例中，处理后的制品表面的粗糙度为约15微英寸Ra或更小。在另一实施例中，在处理后，Ra值降低至10微英寸或更小。在某些实施例中，在处理后，Ra值降低到约1/3至约1/6。例如，在处理后，Ra值降低到约1/5。在一个实施例中，Ra值从在处理前在铸件上70-100微英寸的水平改善至在处理后小于20微英寸的水平。

[0061] 根据所提出技术的教导，制品表面的粗糙度可降低至少约25%。在一些情况下，制品表面的粗糙度降低至少约50%。在一个实施例中，在与处理前的水平进行比较时，制品表面的粗糙度可降低20%至80%。在一个实施例中，在与处理前的水平进行比较时，制品表面的粗糙度可降低到约1/2。在一个实施例中，在与处理前的水平进行比较时，制品表面的粗糙度可降低到约1/4。在一个实施例中，在与处理前的水平进行比较时，制品表面的粗糙度可降低到约1/6。在一个实施例中，在与处理前的水平进行比较时，制品表面的粗糙度可降低到约1/8。在一个实施例中，在与处理前的水平进行比较时，制品表面的粗糙度可降低到约1/10。在另一实施例中，在与处理前的水平进行比较时，制品表面的粗糙度可降低到约1/2至约1/10。

[0062] 含钛铝化物合金的制品的表面可具有大于约100微英寸Ra的初始粗糙度，并且在处理后，制品表面的粗糙度降低至约50微英寸Ra或更小。在另一实施例中，制品表面的粗糙

度降低至约20微英寸Ra或更小。在一个实施例中，含钛铝化物合金的制品的表面具有约120微英寸Ra的初始粗糙度，并且该粗糙度在处理后降低至约20微英寸Ra。在一个实施例中，含钛铝化物合金的制品的表面具有约115微英寸Ra的初始粗糙度，并且该粗糙度在处理后降低至约10微英寸Ra。在一个实施例中，含钛铝化物合金的制品的表面具有110微英寸Ra或更大的初始粗糙度，并且该粗糙度在处理后降低至30微英寸Ra或更小。

[0063] 本实施例提供了带有基本无缺陷的表面的成品。另外，通过实践所提出技术的教导，获得的成品(例如，涡轮叶片)具有在制品表面的至少一部分上小于50微英寸且在备选方案中小于10微英寸的粗糙度。

[0064] 一个方面是一种含钛铝化物合金的制品，其在含钛铝化物合金的表面的至少一部分上具有小于约一微米的粗糙度。在一个实施例中，该制品为铸造制品。在一个示例中，该制品为熔模铸造制品。在另一示例中，该制品通过热等静压被热处理或加工。热等静压(HIP)是一种用于减小金属的孔隙度并增加许多陶瓷材料的密度的制造工艺。这改善了材料的机械性质和可加工性。HIP工艺使构件在诸如安全壳容器的高压环境中经受高温和等静气压两者。氩通常用作加压气体。使用诸如氩的惰性气体，使得制品不发生化学反应。腔室被加热，导致容器内部的压力增加，从而从所有方向对制品施加压力(因此称为“等静压”)。在一个示例中，在7,350 psi (50.7MPa)和45,000 psi (310MPa)之间施加惰性气体，15,000psi (100MPa)为一个示例。

[0065] 制品可以是发动机或涡轮。在一个具体实施例中，制品为涡轮叶片。在另一实施例中，含钛铝化物合金的制品包括含钛铝化物合金的涡轮叶片。在一个示例中，含钛铝化物合金的制品为涡轮叶片，并且涡轮叶片的工作表面的至少一部分具有小于约40微英寸的Ra粗糙度。在另一实施例中，钛铝化物合金制品的表面区域的大部分为基本上平坦的且具有小于约20微英寸Ra的粗糙度。在一个具体实施例中，制品为在叶片的工作表面的至少一部分上具有小于约15微英寸Ra的平均粗糙度的涡轮发动机叶片。

[0066] 常规的磨料水射流(AWJ)用于以完全切穿工件材料的射流切削金属。本公开应用AWJ的修改型式来产生刮削切削或表面抛光。磨料水射流被设置为在工件表面上掠过，用于对构件表面进行浅切削或抛光。AWJ方法被设置成用于修正铸造余料误差和对部件进行精修加工，以满足公差和表面光洁度要求。射流按复杂的工具路径顺着工件的轮廓相对于工件移动。相对运动由多轴线CNC驱动器提供。射流空间轮廓匹配加工区域中的工件轮廓。

[0067] 水射流是一种研磨方法且具有低的切削力。另一优点是工具加工成本较低。当前教导的方法的另一优点是高压射流以高的移除速率切削和抛光材料，从而导致低的循环时间。磨料水射流抛光还可用带有受控工具路径的射流进行。这是对常规加工和表面抛光方法的备选方法。

[0068] 通常，将期望地采用在制剂中的浓度处于按质量流计从约10%至约30%的水平的磨料。对制品进行加工的速率与磨料的空间浓度有关，并且最好确保浓度足以实现在含钛制品的加工中的最佳效率所需的过程循环时间和生产率。不存在对磨料浓度的精确下限，但应牢记，磨料含量是介质的切削能力的主要决定因素，并且当含量过低时，可能不发生所需变形。当采用低浓度的磨料时，可以采用用于实现所需切削能力的其它技术，例如增加射流压力和速度。使用高压流体的表面变形抛光方法产生带有改善的表面光洁度的构件，并且相比常规的铣削和磨削方法具有若干优点。例如，所提出技术提供了用于在产生最小表面

缺陷的同时提供改善的表面光洁度的快速而简单的方法。该方法具有低成本，并且也适合高速自动化。

[0069] 关于磨料水射流切削的典型文献信息和本领域技术人员的常识表明，射流中的磨料颗粒分布的随机性妨碍使用者具有优于±0.010″的粗切削精度。因此，申请人相信，现有技术/本领域技术人员的知识将AWJ工艺局限于块体材料的粗切削。通常，磨料水射流切削被用于完全切穿物体，而不是用于表面加工。本发明描述了一种磨料水射流铣削或加工的新方式，其允许以受控方式移除少量的材料(0.001″至0.020″)。如本公开所描述的表面磨料水射流铣削的典型配置例如在图1至图3中示出。

[0070] 相比磨料水射流切削领域的技术人员的现有实践，本公开直接使用水射流中的颗粒分布的随机性并结合高质量流率来实现从带余料部件的表面移除材料，而不是贯穿厚度的切削。本发明控制并采用磨料水射流切口。通常在切削过程中，“切口”被认为是导致材料损失的特征(切口被定义为由切削工具在常规加工中制成的凹槽的宽度)，并且因此是有害的。

[0071] 然而，在本公开中，切口被重新定义为在一系列不同的时间内磨料在冲击待加工表面的射流中的空间分布的时间序列积分，如图4中所描述的。该积分结果为用于描述切削几何形状的概率密度函数(PDF)。切口被控制，使得它可被建设性地用于以受控方式从部件移除多余材料。切削几何形状很像常规铣刀的侧面，除了停留时间(其由进给速率或射流的平移速率来控制)直接控制材料移除速率之外。对射流特性和射流运动的控制在控制材料移除速率中起作用。

[0072] 示例。

[0073] 通过参照以下示例，可以更容易理解已经总体上描述的技术，这些示例仅仅是为了说明某些方面和实施例而被包括在内，而并不意图以任何方式限制系统和方法。

[0074] 可以对轮廓或表面计算粗糙度值。轮廓粗糙度参数(Ra，Rq，...)更常见。粗糙度参数中的每一个使用用于描述表面的公式来计算。有许多不同的粗糙度参数在使用，但R_a是目前最常见的。其它常见参数包括R_z、R_q和R_{sk}。

[0075] 平均粗糙度Ra以高度单位来表示。在皇家(英制)系统中，1Ra通常表示一英寸的“百万分之一”。这也被称为“微英寸”。本文所示的Ra值是指微英寸。振幅参数基于粗糙轮廓与平均线的高低偏差来表征表面。表面光度计是使用触笔沿部件表面追踪并确定其平均粗糙度的装置。

[0076] 表面粗糙度由诸如Ra的单个数来描述。有许多不同的粗糙度参数在使用，但Ra是最常见的。所有这些参数将表面轮廓中的所有信息简化成单个数字。Ra是绝对值的算术平均值，并且R_t是所收集的粗糙度数据点的范围。Ra是对表面光洁度的最常见量度之一。

[0077] 下表提供了对使用表面粗糙度的典型量度描述的表面粗糙度的比较。

[0078]

粗糙度值Ra(微米)	粗糙度值Ra(微英寸)	粗糙度(等级)
50	2000	N12
25	1000	N11
12.5	500	N10
8.3	250	N9

3.2	125	N8
1.6	63	N7
0.8	32	N6
0.4	16	N5
0.2	8	N4
0.1	4	N3
0.05	2	N2
0.025	1	N1

[0079] 在一个示例中，喷嘴被设置为使得它与诸如涡轮叶片的工件接触，如图1所示。这里，从喷嘴射出的射流的纵向轴线如图1所示对齐，并且在从凸面侧上有余料的铸造翼型件移除材料之后，射流按待制备表面的轮廓相对于带余料部件移动。水射流被设置为提供诸如水的流体的射流，其包含例如带有约50至约600微米的尺寸的石榴石或铝酸钇颗粒。所用高压流体射流具有0.030英寸的圆形喷嘴孔口直径。射流相对于工件沿复杂的工具路径移动，并且由多轴线CNC驱动器提供相对运动。带余料铸件仅在翼型件的凸面侧上拥有例如1mm的多余材料。

[0080] 采用余料以允许在铸造期间的硬化收缩、与模具反应、在热处理期间与环境反应，并且适应可在部件的最终加工期间适应的铸造中的大小变化。磨料流体射流喷嘴的空间轮廓被设置成遵循在凸表面上的叶片的区域中的工件轮廓，在该区域，多余材料必须被移除(参见图2，其中示出改变轮廓之前和之后的示例)。可用刮削切割移除的材料的厚度范围为从约0.05mm至约5.0mm。在一具体示例中，可以用刮削切割移除约0.1mm至约2.5mm的材料。在一个实施例中，可采用具有诸如槽而非圆形的备选几何形状的喷嘴；还可采用可能更适合翼型件轮廓的其它喷嘴几何形状。

[0081] 在一个实施例中，使用150-300微米尺寸的磨粒以10英寸每分钟的线性速度修剪掉大块的多余材料。在该操作期间，切口充当锯以移除大块的材料。在另一实施例中，更远离喷嘴射流的切口充当允许时控切削深度的扩散接触机构。该实验通过将叶片定向成使其离竖直轴线10°而进行。切削在例如2英寸每分钟的低速下，并且在例如100英寸每分钟的振荡高速下来回地进行。还进行评价切削以确定暴露时间变量的影响及其对切削深度的影响。部件的表面粗糙度小于80微英寸Ra，并且所移除材料的量是一英寸的千分之四。

[0082] 下面的三个附加示例描述了对涡轮叶片后缘的磨料水射流加工，以将部件精加工至最终大小。图3示出了用于在后缘的大约1″内的区域中从涡轮叶片/翼型件的凸形表面移除0.004″的实验方案。含钛铝化物的制品(在此情况下为涡轮叶片)被置于夹具中以稳定它。夹具被设置在旋转轴线上，使得叶片可围绕平行于叶片纵向轴线的轴线旋转。叶片被定向在夹具上，使得叶片平台的表面直接平放在夹具的水平基准线上。然后旋转夹具，使得在后缘表面的1″内的后缘表面的切线偏离与水射流喷嘴重合的竖直轴线10°而呈现。

[0083] 被加工的叶片的后缘的摄影图像在图5至图7中示出。所关注的具体区域在图像中标为区域1、2和3。区域1为原始材料，并且区域2示出了示例1中的磨料水射流加工过的表面，如下文所述。区域3示出了示例3中的磨料水射流加工过的表面，如下文所述。在示例1和示例2中获得的表面光洁度是可接受的，而在示例3中获得的表面光洁度是不可接受的。

[0084] 在第一示例中，使部件与射流粗略接触，并且使射流以下列方式沿叶片的纵向轴

线移动，以从叶片的凸形表面成功地移除材料。使射流以约100英寸每分钟的最大进给速率在平行于纵向轴线的长度2″的区域上振荡。进行四个完整的循环(+2″，-2″)，所得表面在图5至图7的照片中显示在区域2中；这些图示出了加工过的表面的不同透视图。大约0.004″的钛铝化物以受控方式被成功地移除。加工前的原始表面可在图5至图7的照片的区域1中看到。在磨料水射流铣削的表面上获得小于80微英寸Ra的良好表面光洁度(例如，参见图8)。

[0085] 在第二示例中，使钛铝化物涡轮翼型件与磨料水射流粗略接触，并且使射流以下列方式沿叶片的纵向轴线移动：在与第一示例中不同的叶片的后缘的区域中，在平行于叶片的纵向轴线的约1″的横向长度上，以约1英寸每分钟的缓慢速度连续移动射流。大约0.004″的材料被成功移除。获得小于80微英寸的Ra的表面光洁度。

[0086] 在第三示例中，使部件在原样叶片的新区域中与磨料水射流粗略接触，并且沿叶片的纵向轴线平移射流。射流在叶片表面上的运动被中断，并且速度接近零。当速度变低并接近零时，材料移除的速率显著增加，并且控制移除材料的量的能力降低。例如，在区域3中，当射流速度接近零并保留就位达5秒时，以不可控方式移除最大厚度0.025″的材料；在涡轮叶片的表面中产生不期望的凹槽。与示例1和示例2中的情况不同，在示例3中，不可以充分控制材料的速率。在图5中的叶片的表面上和图6及图7中的叶片的后缘上可看到这种加工响应。

[0087] 磨料水射流加工操作使用带有常规高压水射流系统的4轴线计算机数控机床进行。在所描述三个示例中的每一个中，采用质量流率1磅每分钟的标准石榴石(150-300微米颗粒分布)，并且采用85,000磅每平方英寸的水压。

[0088] 磨料水射流与要铣削/加工的表面的这种10°的呈现角度仅代表根据期望的材料移除量可能的若干呈现角度之一。通常，角度越陡，被加工或抛光的区域越小，并且操作越快。更浅的角度将导致更大的材料移除线性范围，并且移除材料更慢，从而允许更精细地控制。呈现角度的优选范围为5至20度。在另一实施例中，呈现角度的范围为7至12度。在一个实施例中，该角度为约10度。

[0089] 应当理解，以上描述意图是说明性而不是限制性的。例如，上述实施例(和/或其方面)可彼此结合使用。另外，可对各个实施例的教导在不脱离其范围的情况下做出许多修改，以适合特定的情况或材料。虽然本文所述材料的大小和类型意图限定各个实施例的参数，但是这些实施例决不是限制性的，而仅仅是示例性的。通过回顾以上描述，许多其它实施例对本领域技术人员将显而易见。因此，各个实施例的范围应当参照所附权利要求连同授予这些权利要求的等同物的全部范围来共同确定。在所附权利要求中，术语“包括”和“在其中”被用作相应术语“包含”和“其中”的普通英语等同物。此外，在所附权利要求中，术语“第一”、“第二”和“第三”等只用作标识，而并不意图对其对象强加数字要求。此外，所附权利要求的限制并不按装置加功能的格式书写，且并不意图根据美国专利法第112条第六款来解释，除非这类权利要求限制明确使用短语“用于…的装置”加上没有其它结构的功能陈述。应当理解，不一定上述所有此类目的或优点都可以根据任何特定实施例来实现。因此，例如，本领域技术人员将认识到，可以以实现或优化如本文所教导的一个或一组优点的方式来体现或实现本文所述的系统和技术，而不必实现本文可能教导或建议的其它目的或优点。

[0090] 虽然已结合仅仅有限数量的实施例详细描述了本发明，但应该容易理解，本发明不限于这样公开的实施例。而是，本发明可被修改以并入此前未描述但与本发明的精神和范围相称的任何数量的变型、改动、替换或等同布置。另外，虽然已经描述了本发明的各种实施例，但应当理解，本发明的方面可包括所描述实施例中的仅仅一些。因此，本发明不被视为由先前的描述限制，而是仅由所附权利要求的范围限制。本文提及的所有出版物、专利和专利申请全文以引用方式并入本文中，好像每个单独的出版物或专利具体地且独立地表示为通过引用而并入。在有冲突的情况下，将以包括本文中的任何定义在内的本申请为准。

[0091] 该书面描述使用示例来公开本发明，包括最佳方式，并且还使本领域技术人员能够实施本发明，包括制造和使用任何装置或系统以及执行任何包括在内的方法。本发明的可专利范围由权利要求限定，并且可包括本领域技术人员想到的其它示例。如果这种其它示例具有与权利要求的字面语言没有差别的结构元件，或者如果它们包括与权利要求的字面语言无实质差别的等同结构元件，则这种其它示例意图在权利要求的范围内。

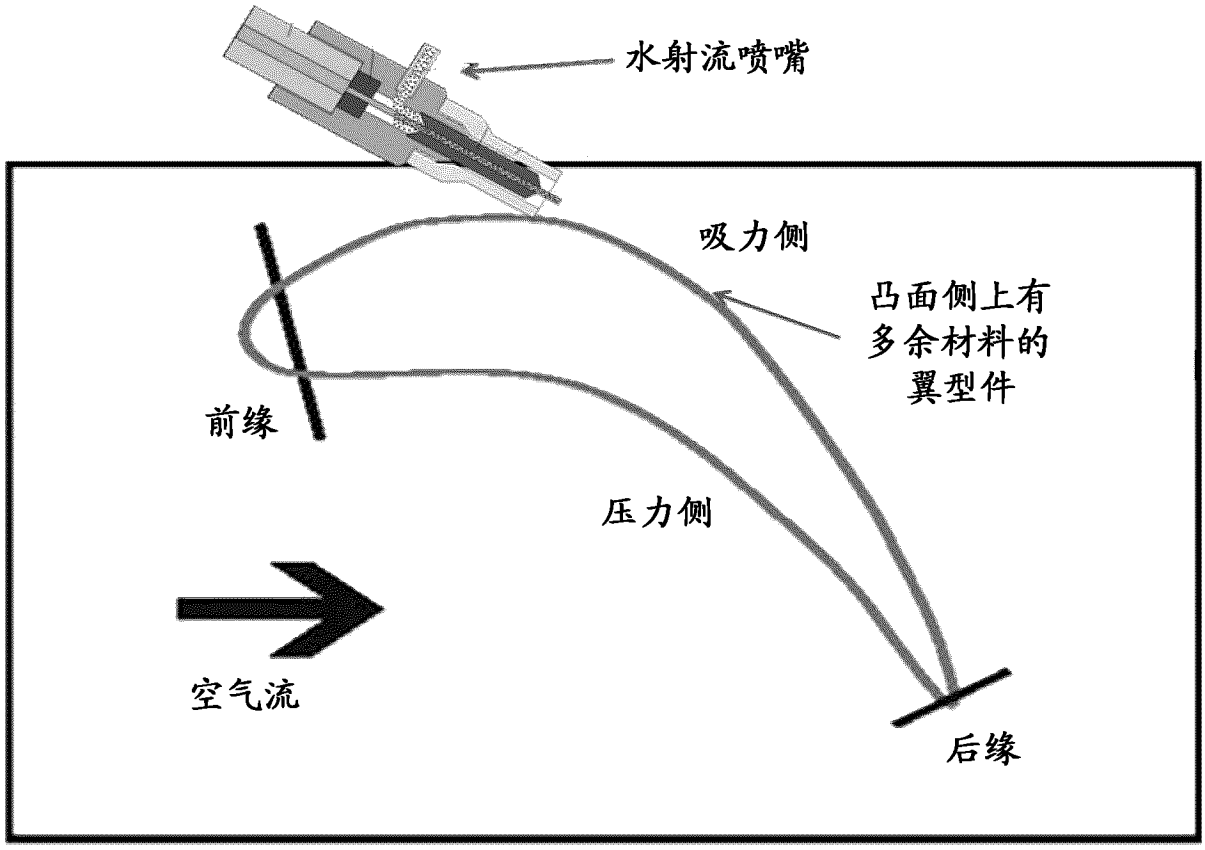


图 1

在表面加工之后的翼型件的示例

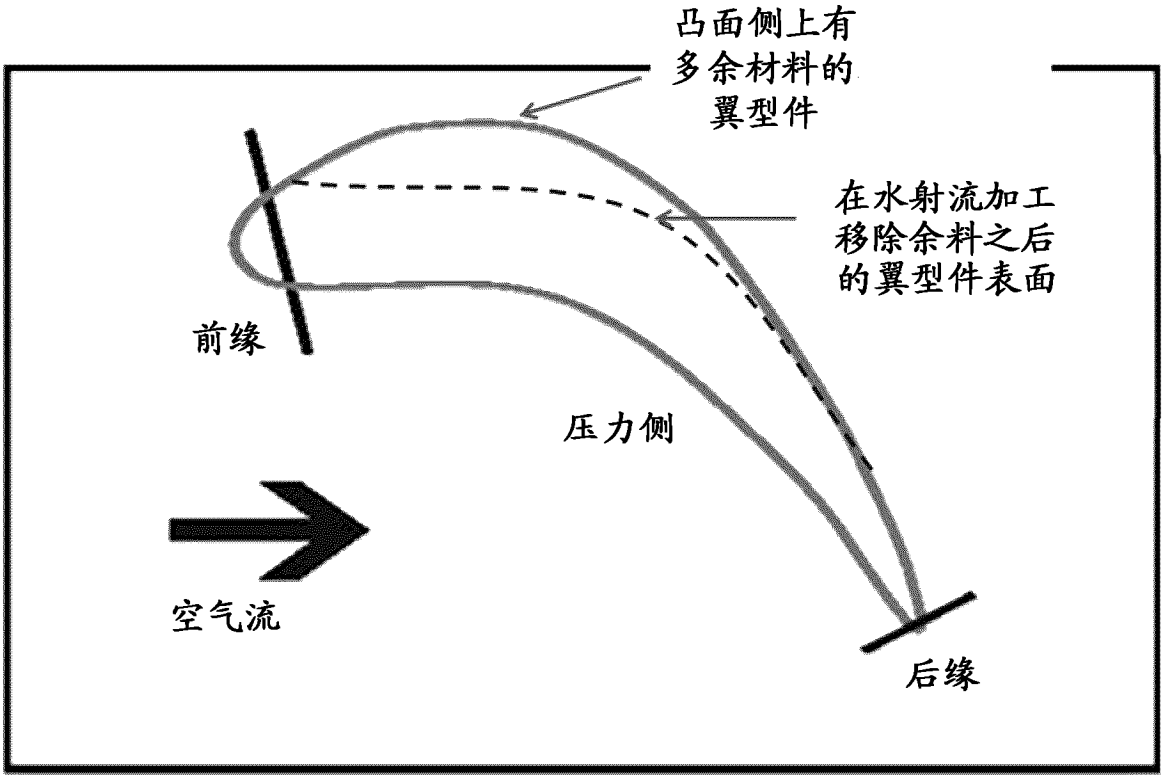


图 2

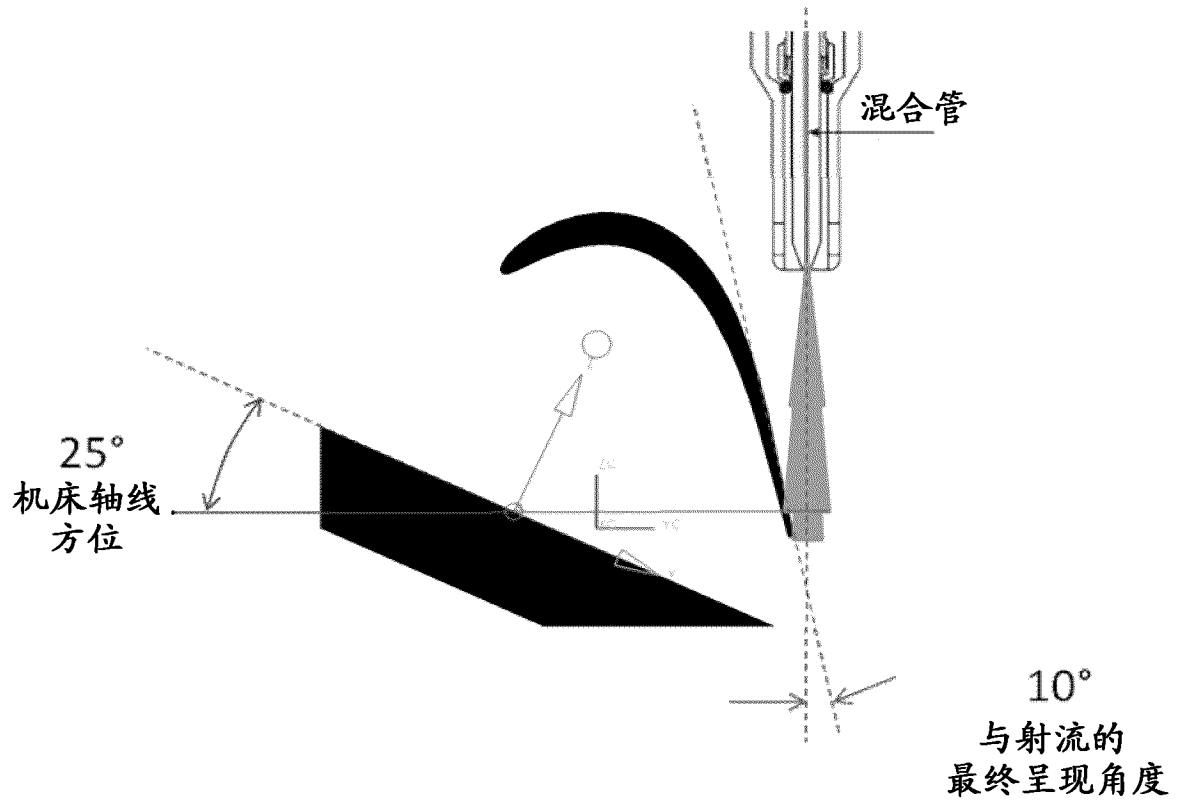

混合管
25°
机床轴线
方位
10°
与射流的
最终呈现角度

图 3

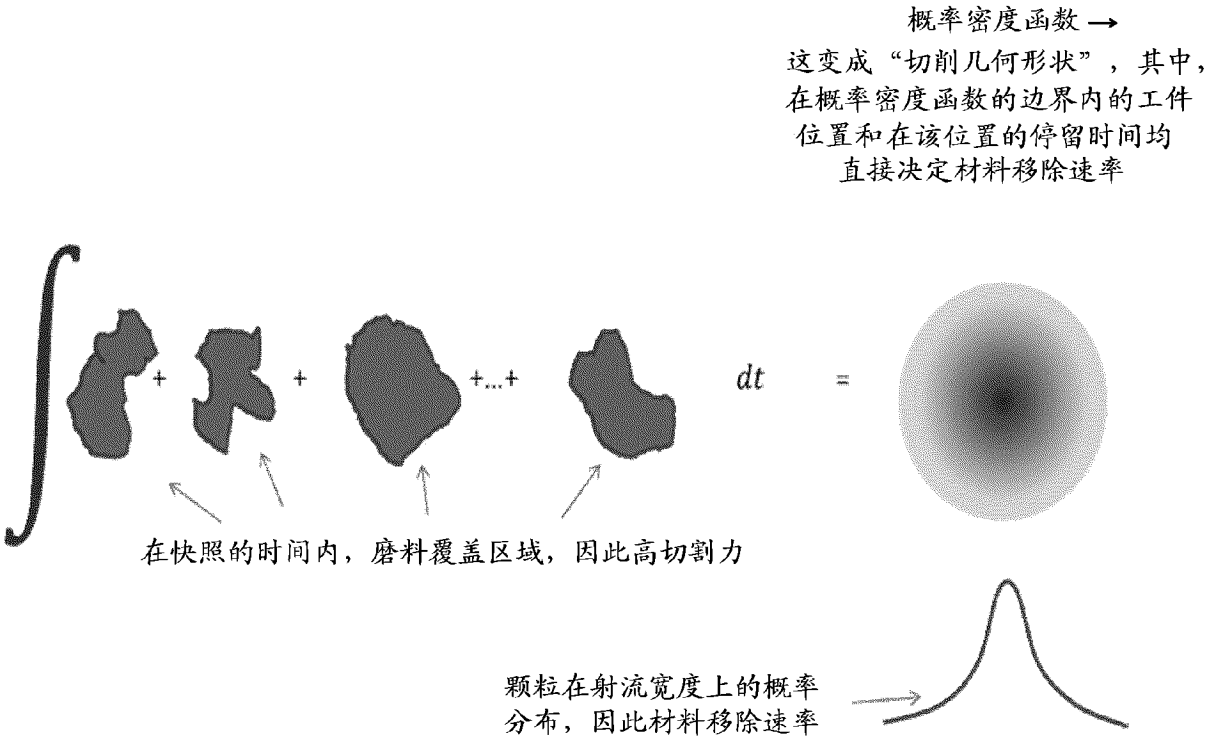

概率密度函数 →
这变成“切削几何形状”，其中，
在概率密度函数的边界内的工件
位置和在该位置的停留时间均
直接决定材料移除速率
+
+
+...+
dt
=
在快照的时间内，磨料覆盖区域，因此高切割力
颗粒在射流宽度上的概率
分布，因此材料移除速率

图 4

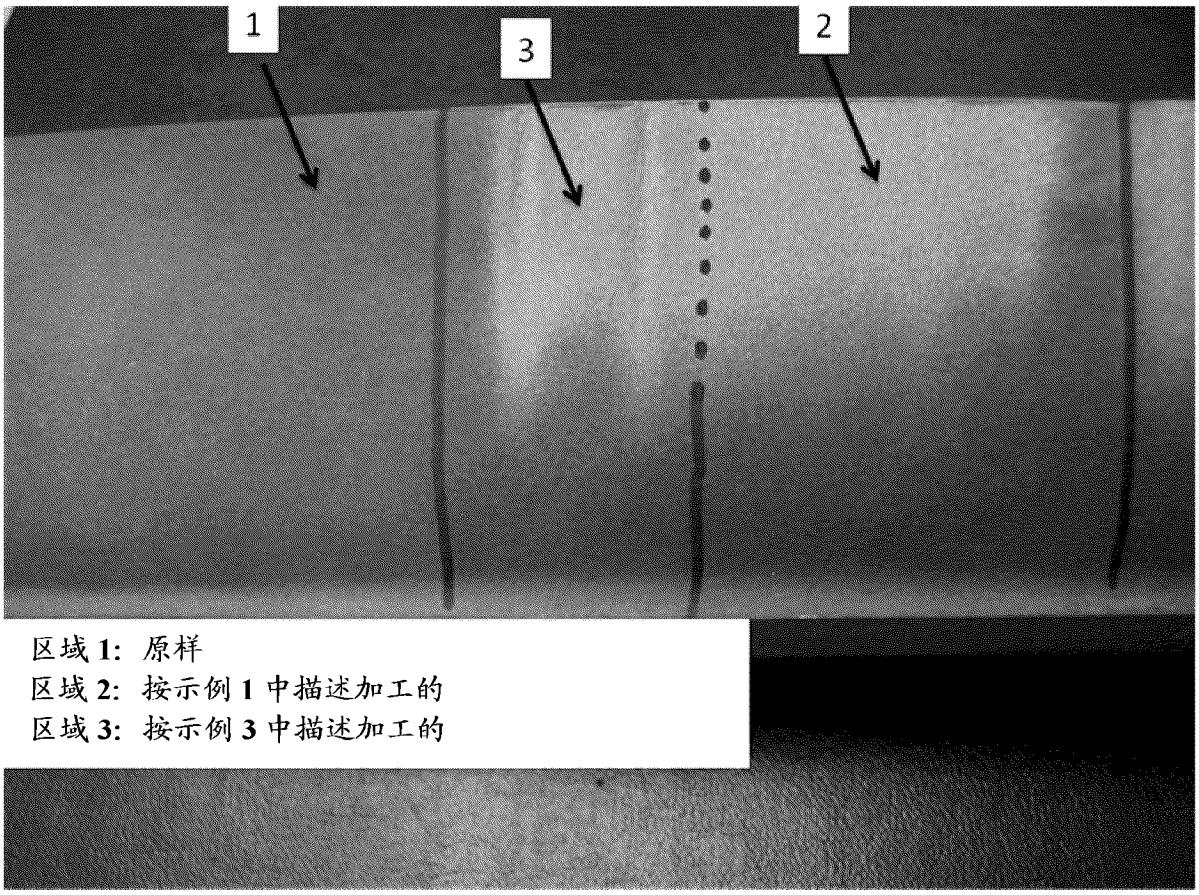


图 5

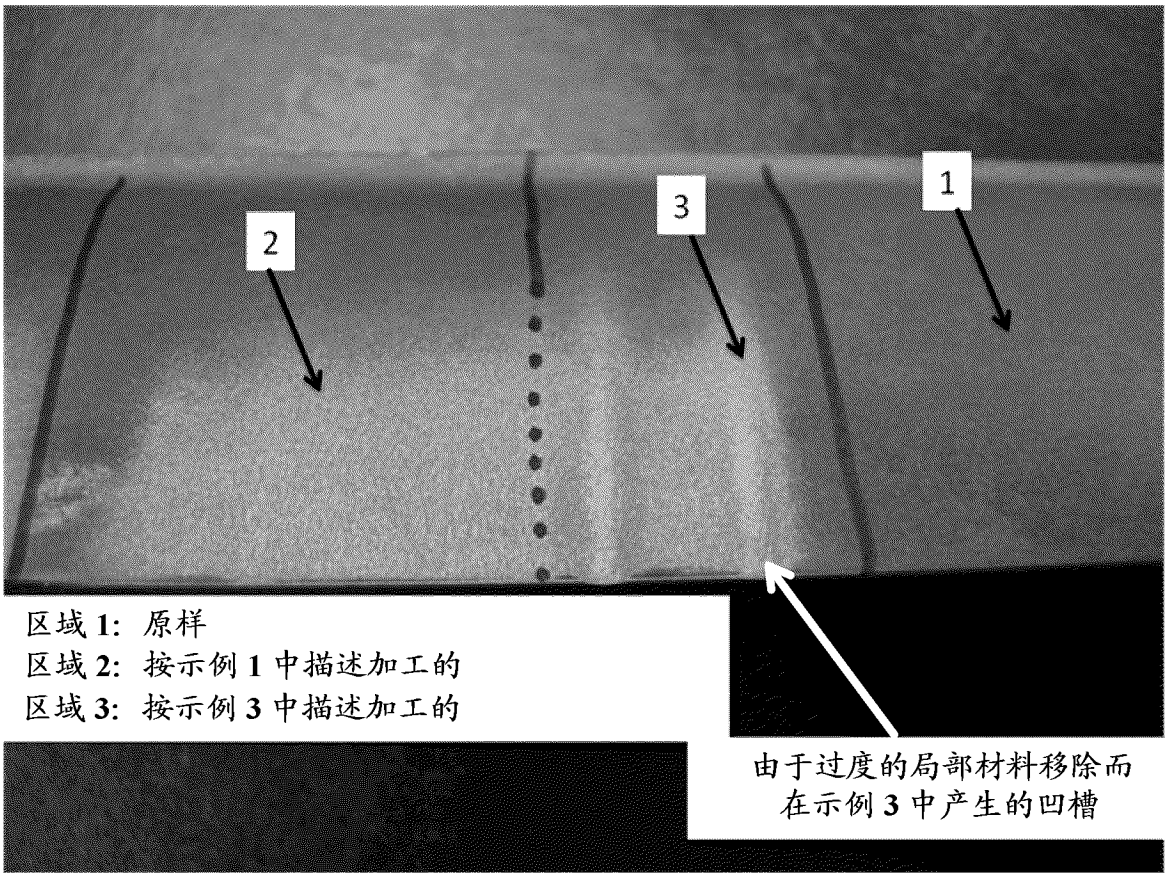

2
3
1
区域 1: 原样
区域 2: 按示例 1 中描述加工的
区域 3: 按示例 3 中描述加工的
由于过度的局部材料移除而
在示例 3 中产生的凹槽

图 6

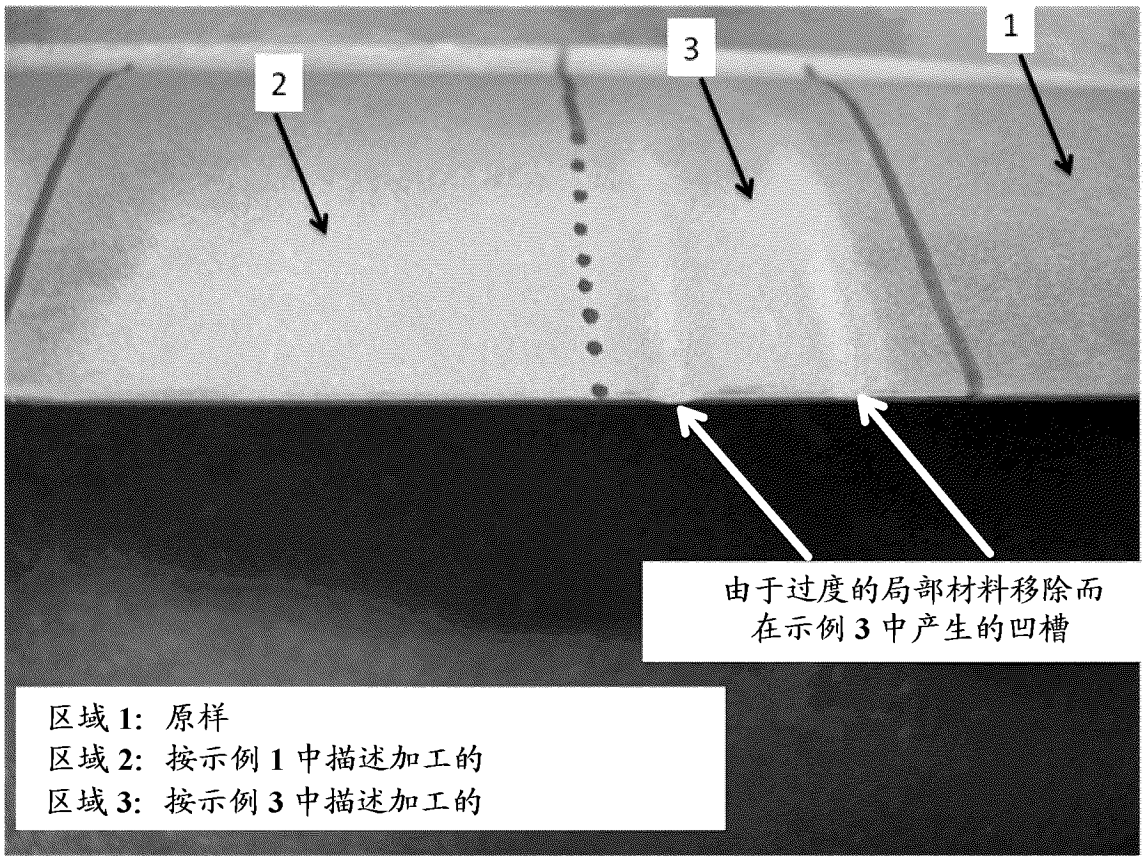


图 7

a)

使高压流体在含钛铝化物合金的制品的表面上经过

↓

使含钛铝化物合金的制品的表面变形

↓

从含钛铝化物合金的制品移除材料，其中，微凸体和凹坑从含钛铝化物合金的制品的表面被移除而不使制品的表面开裂或损伤

图 8(a)

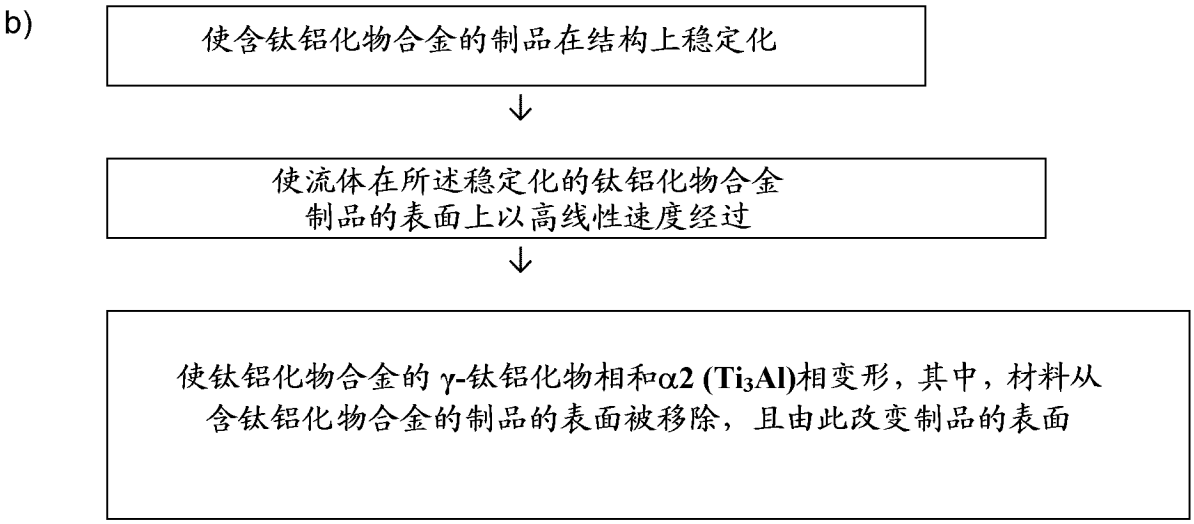

b)
使含钛铝化物合金的制品在结构上稳定化
使流体在所述稳定化的钛铝化物合金制品的表面上以高线性速度经过
使钛铝化物合金的γ-钛铝化物相和α2 (Ti_3Al)相变形，其中，材料从含钛铝化物合金的制品的表面被移除，且由此改变制品的表面

图 8(b)