



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102560472 B

(45) 授权公告日 2013.09.25

(21) 申请号 201210040007.7

(22) 申请日 2012.02.22

(73) 专利权人 河海大学

地址 210098 江苏省南京市西康路1号

(72) 发明人 江静华 陈建清 马爱斌 宋丹

(74) 专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司 32200

代理人 楼高潮

(51) Int. Cl.

C23C 24/00 (2006.01)

审查员 杜艳艳

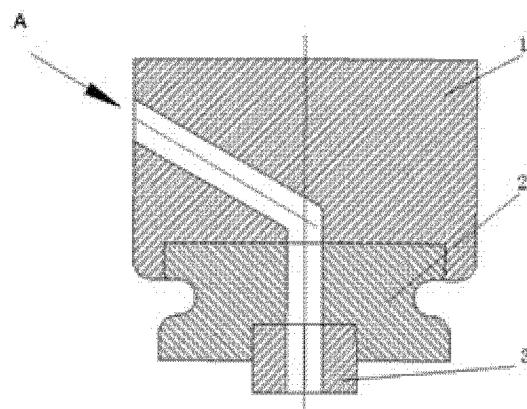
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

搅拌头同步送粉的金属表面纳米复合化加工装置与方法

(57) 摘要

本发明涉及一种采用搅拌头同步送粉对金属工件搅拌摩擦加工以原位合成纳米复合材料表层的加工装置和方法。该搅拌头夹持部位1、轴肩2与搅拌探针3可采用刚性整体或紧固式同轴分离体，搅拌头内设送粉通道A，入口在夹持部位1侧面或中轴向，出口在探针3中轴向与工件接触面上。加工时，利用可自动升降的工作台中的液压装置沿搅拌头轴向B加压，旋转轴驱动搅拌头高速旋转并压紧工件，外接自动送粉器经搅拌头送粉通道A将亚微米级增强相粉体送至工件表层严重塑化区C，籍由摩擦热原位合成纳米复合材料。本发明设备简单，操作方便，适于各种金属基体的表层复合化与组织细化，技术经济效益高，工业应用潜力大。



1. 一种用搅拌头同步送粉的金属表面纳米复合化加工的装置进行金属表面复合纳米化的加工方法,其特征在于所述的加工装置包括搅拌头、旋转轴(5)和可自动升降的工作台(7),其特征在于还包括自动送粉器(4),搅拌头内设置送粉通道A,其中搅拌头由夹持部位(1)、轴肩(2)与搅拌探针(3)所构成,送粉通道A由搅拌头上端夹持部位(1)入口,经轴肩(2)由搅拌探针(3)轴向端面出口,自动送粉器(4)固定在旋转轴承台的侧面,并与送粉通道A的入口相连接,旋转轴(5)与搅拌头的夹持部位(1)相连接;

利用该加工装置进行金属表面复合纳米化的加工方法,其加工步骤如下:

(1)将金属工件(6)固定在可自动升降的工作台(7)上,安装好搅拌头使之与自动送粉器(4)和旋转轴(5)连接;

(2)利用可自动升降的工作台(7)中的液压装置沿搅拌头轴向B轴向加压,并驱动金属工件(6)横向运动使搅拌头在旋转轴(5)的驱动下高速旋转并压紧金属工件(6);

(3)开启均装有亚微米级增强相粉体的自动送粉器(4),经搅拌头内部送粉通道A将亚微米级增强相粉体送至金属工件(6)表层严重塑化区C,藉搅拌头高速旋转产生大的摩擦热使增强相粉体与塑化区基体材料反应,金属工件(6)表层获得原位合成金属基纳米复合材料。

2. 根据权利要求1所述的加工方法,其特征在于在步骤(2)中所述的搅拌头高速旋转压紧金属工件(6),搅拌头的旋转速度为1200rmp,加工速率为60mm/min。

3. 根据权利要求1所述的加工方法,其特征在于在步骤(3)中所述的搅拌头内部送粉通道A将亚微米级增强粉体送至金属工件(6)表层严重塑化区C的送粉速率为5g/min或10g/min。

搅拌头同步送粉的金属表面纳米复合化加工装置与方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种采用搅拌头自动同步送粉的表面纳米复合化加工装置对金属工件搅拌摩擦加工以原位合成纳米复合材料表层的方法，属于金属材料表面改性技术领域。

背景技术

[0002] 搅拌摩擦焊(friction stir welding, 简称 FSW)是英国焊接研究所 1991 年发明并获世界范围内专利保护的新型固相焊接技术。与传统焊接方法相比, 搅拌摩擦焊的热源来自工件和搅拌头之间的摩擦, 焊接温度一般低于材料熔点, 焊接过程中没有材料熔化, 能够降低许多焊接缺陷产生的可能性。其一经发明便引起了世界范围的关注, 在航空航天、车辆、造船等行业获得了大量成功应用。

[0003] 搅拌摩擦加工(friction stir processing, 缩写为 FSP)是美国密苏里大学的 R. S. Mishra 在 2000 年基于搅拌摩擦焊工艺开发出的金属材料表面加工新技术。利用搅拌摩擦加工技术, 可实现金属材料表层组织超细化、致密化、均匀化及改性层的原位合成。较之其它金属加工技术, 其具有如下优点:(1)FSP 是一种可实现组织细化、致密化、均匀化的短程、单步固相加工技术;(2)通过优化工具设计、调整 FSP 工艺参数、外加热量输入或冷却, 可精细控制和调节搅拌摩擦加工区的组织与性能;(3)处理区域的深度可以通过改变“搅拌针”的长度任意调节(数百微米到数十毫米);(4)FSP 工艺中的热量主要来源于摩擦热和材料变形热, 是一种绿色节能加工技术。

[0004] 目前 FSP 原位合成技术得到了国内外研究者的普遍关注。FSP 可使搅拌区的材料剧烈塑性变形(应变量可达到 40), 致使材料表层金属与外加陶瓷增强相粉末在固态下发生均匀的机械混合, 从而制备出高硬度、耐磨的颗粒强化表层复合材料。利用 FSP 制备复合材料具有独特的技术优势:第一, FSP 是在固态下进行的, 可避免界面反应与有害相的形成;第二, FSP 在表面复合化同时还可显著细化晶粒、改善母材显微组织结构。目前相关研究主要包括:(1)FSP 制备铝基表层复合材料, 增强相颗粒主要包括 SiC、Al₂O₃、TiO₂、富勒烯、碳纳米管等, 母材主要有 5083、6082、1100、6061 等铝合金;(2)FSP 制备镁基表层复合材料, 增强颗粒主要有:SiO₂、碳纳米管、SiC、ZrO₂ 等, 母材主要有 AZ91、AZ61、AZ31、AZ91D 等。

[0005] 目前, FSP 复合材料制备技术存在的主要不足在于:增强相的混入大多采用在母材表面加工小槽(或小孔)再填充粉料的方法, 而后利用 FSP 使增强相颗粒(或纳米管)均匀化分布。开槽或开孔一方面破坏了母材的完整性, 可能会影响母材的机械性能, 进而影响复合材料的性能;另一方面开槽(孔)、填充粉体增加了工艺的复杂性, 影响工艺的自动化水平, 将会影响 FSP 复合材料制备技术的推广与应用。

发明内容

[0006] 技术问题:

[0007] 本发明所要解决的技术问题是提供一种搅拌头同步送粉的金属表面纳米复合化加工装置, 以及利用该装置对金属工件表面搅拌摩擦加工以实现表层纳米复合材料原位合

成的加工方法。鉴于搅拌摩擦加工在金属材料表层复合化与组织超细化方面的广阔实用前景,如何实现增强相的同步连续送粉是实现自动化 FSP 加工并使之获得工业化应用所要解决的重要技术问题。本专利申请就是涉及搅拌头自动同步送粉、实现 FSP 连续加工以便在金属工件表面原位合成纳米复合材料改性层的金属表面纳米复合化方法与装置。

[0008] 技术方案：

[0009] 一种搅拌头同步送粉的金属表面纳米复合化加工的装置,包括搅拌头(5)和可自动升降的工作台(7),还包括自动送粉器(4),搅拌头内设置送粉通道 A, 其中搅拌头由夹持部位(1)、轴肩(2)与搅拌探针(3)所构成,送粉通道 A 由搅拌头上端夹持部位(1)入口,经轴肩(2)由搅拌探针(3)轴向端面出口,自动送粉器(4)固定在旋转轴承台的侧面,并与送粉通道 A 的入口相连接,旋转轴(5)与搅拌头的夹持部位(1)相连接。

[0010] 所述搅拌头的送粉通道 A 分为侧式送粉通道 A 和轴式送粉通道 A,其中侧式送粉通道 A 的入口设在搅拌头夹持部位(1)的侧面上,中段和下段设在轴肩(2)与搅拌探针(3)的中轴向位置;轴式送粉通道 A 设置在搅拌头夹持部位(1)、轴肩(2)与搅拌探针(3)的中轴向位置,其中,轴式送粉通道 A 通过旋转轴承台中的通道与自动送粉器(4)相连。

[0011] 所述搅拌头结构分为整体式搅拌头和紧固式搅拌头,其中整体式搅拌头的夹持部位(1)、轴肩(2)与搅拌探针(3)用刚性材料整体制作而成,紧固式搅拌头的夹持部位(1)、轴肩(2)与搅拌探针(3)为同轴紧固连接的分离体。

[0012] 所述的加工装置进行金属表面复合纳米化的加工方法,其加工步骤如下:

[0013] (1)将金属工件(6)固定在可自动升降的工作台(7)上,安装好搅拌头使之与自动送粉器(4)和旋转轴(5)连接;

[0014] (2)利用可自动升降的工作台(7)中的液压装置沿搅拌头轴向 B 轴向加压,并驱动金属工件(6)横向运动使搅拌头在旋转轴(5)的驱动下高速旋转并压紧金属工件(6);

[0015] (3)开启均装有亚微米级增强相粉体的自动送粉器(4),经搅拌头内部送粉通道 A 将亚微米级增强相粉体送至金属工件(6)表层严重塑化区 C,籍搅拌头高速旋转产生的摩擦热使增强相粉体与塑化区基体材料反应,金属工件(6)表层获得原位合成金属基纳米复合材料。

[0016] 如图 1 所示,该金属表面纳米复合化加工装置包括了搅拌头、旋转轴、自动送粉器和可自动升降的工作台,其中搅拌头由上端夹持部位(1)、中部轴肩(2)与下端搅拌探针(3)构成,搅拌头内设置送粉通道 A 以便制备金属表层复合材料时增强相粉体的连续送入,送粉通道 A 的入口在搅拌头上端夹持部位(1)的侧面或中轴向,出口在探针 3 中轴向与工件接触面上,送粉通道出口孔径与探针直径之比宜小于 0.4 以保证探针刚度。在表面纳米复合化加工过程中,自动送粉器(4)与送粉通道 A 的入口通过螺栓套接固定或经由旋转轴上固定搅拌头的承台与送粉通道 A 的入口通过螺栓套接固定,实现连续送粉以及送粉速率、送粉量的控制;旋转轴(5)通过承台以螺纹的方式(与旋转方向相反的螺纹)连接搅拌头夹持部位(1)以精确控制搅拌头的旋转速率,金属工件固定在可自动升降的工作台(6)上,由工作台中的液压装置提供工件轴向压力,并驱动工件横向运动;整套设备在搅拌头、旋转轴、自动送粉器和可自动升降的工作台等几个部件的协调工作下进行连续加工。

[0017] 搅拌头内设置的送粉通道 A 分为侧式送粉通道 A 和轴式送粉通道 A,其中侧式送粉通道 A 的入口设在搅拌头夹持部位(1)的侧面上,中段和下段设在轴肩(2)与搅拌探针(3)

的中轴向位置；轴式送粉通道 A 设置在搅拌头夹持部位(1)、轴肩(2)与搅拌探针(3)的中轴向位置。搅拌头结构分为整体式搅拌头和紧固式搅拌头，其中整体式搅拌头的夹持部位(1)、轴肩(2)与搅拌探针(3)用刚性材料整体制作而成，紧固式搅拌头的夹持部位(1)、轴肩(2)与搅拌探针(3)为同轴紧固连接的分离体。本发明提出的四类搅拌头结构与送粉通道示意图分别如附图中图 2、图 3、图 4 和图 5 所示。其中，图 2 是一种紧固式同步连续送粉的搅拌头剖面结构及其侧式送粉通道示意图；图 3 是一种紧固式同步连续送粉的搅拌头剖面结构及其轴式送粉通道示意图；图 4 是一种整体式同步连续送粉的搅拌头剖面结构及其侧式送粉通道示意图；图 5 是一种整体式同步连续送粉的搅拌头剖面结构及其轴式送粉通道示意图。

[0018] 利用该装置对金属工件表面搅拌摩擦加工以实现表层纳米复合材料原位合成的加工方法，其加工步骤如下：(1) 将金属工件固定在可自动升降的工作台上，根据增强相粉体种类和粒径分布情况选择外接的商用送粉器型号(增强相粉体主要采用亚微米级陶瓷粉体，如： SiC 、 Al_2O_3 、 TiO_2 等)，安装好搅拌头使之与自动送粉器和旋转轴连接；(2) 利用可自动升降的工作台中的液压装置控制轴向施压，由旋转轴驱动搅拌头高速旋转并压紧工件；(3) 开启自动送粉器，外接自动送粉器经过搅拌头内部贯通的送粉通道 A 将亚微米级增强相粉体送至工件表层严重塑化区 C，籍由高速旋转的搅拌头与金属工件之间产生的摩擦热，驱使增强相粉体与塑化的金属基体材料反应，往返加工数次即可使工件表层原位合成金属基纳米复合材料。

[0019] 为避免塑化材料伴随搅拌头的高速旋转而喷射出去，可在轴肩上加工一些规则的几何图案使之与塑化材料紧密耦合；为提高钻采力、控制塑化材料的流动性并改善陶瓷增强相的分散程度，可将搅拌探针加工成特定的形状并加工一些同轴螺纹；改变搅拌探针插入深度，可获得不同厚度的纳米复合材料表面层；改变搅拌头内部贯通孔的几何形状，调控外接自动送粉器的送粉速率，可制备不同增强相体积比的复合材料表面层。

[0020] 有益效果：

[0021] 本发明的采用搅拌头同步送粉的搅拌摩擦加工以实现金属表面纳米复合化的加工装置，通过搅拌头内部开孔实现自动送粉，与母材表面开槽或孔后填充粉体的现有技术相比，更有利于保持母材表面完整性、使复合表层成分均匀从而改善表面性能。

[0022] 本发明的搅拌头结构可采用整体式或紧固式，前者刚性较好，而后者既可根据所加工金属基体的性质来更换轴肩或探针以提高加工效率，又便于搅拌头的维护有利于降低加工成本；搅拌头内部贯通孔入口可设置在支承部位的侧向或轴向正中，以适应不同类型自动送粉器的安装及送粉速率的调控。采用该简易装置对金属工件进行自动连续的搅拌摩擦加工时，搅拌头的旋转速率和下压力可由旋转轴和可自动升降的工作台中的液压装置分别精确控制，送粉速率和送粉量可由自动送粉器和搅拌头内部送粉通道截面形状和尺寸加以调整，故可方便地实现金属工件表面纳米复合材料的原位合成。

[0023] 本发明可根据加工需要改变搅拌探针和轴肩端面几何形状以获得不同的塑化能力，亦可改变送粉通道的几何形状及送粉速率以获得增强相体积比不同的表面层复合材料，故而适用于各种金属基体的表层组织细化与复合化。其工艺简单，加工方便，自动化水平高且通用性强，工业应用潜力大。

附图说明

- [0024] 图 1 搅拌头同步送粉的金属表面纳米复合化加工装置及原理示意图
- [0025] I : 侧式送粉通道的加工装置 II : 轴式送粉通道的加工装置
- [0026] 图 2 本发明的紧固式搅拌头剖面结构及其侧式送粉通道示意图
- [0027] 图 3 本发明的紧固式搅拌头剖面结构及其轴式送粉通道示意图
- [0028] 图 4 本发明的整体式搅拌头剖面结构及其侧式送粉通道示意图
- [0029] 图 5 本发明的整体式搅拌头剖面结构及其轴式送粉通道示意图。
- [0030] 附图标记 :
- [0031] 1 — 搅拌头的夹持部位 2 — 搅拌头的轴肩 3 — 搅拌探针
- [0032] 4—送粉器 5 —旋转轴 6 — 金属工件 7 — 可自动升降的工作台
- [0033] A—送粉通道 B—可自动升降的工作台轴向加压 C- 金属工件中的严重塑化区。

具体实施方式

[0034] 下面结合具体实例对本发明的技术方案进行进一步说明。本发明所述的搅拌头自动同步送粉的金属表面纳米复合化加工装置与方法不只局限于该具体实例。其中，搅拌头外形和尺寸相同时，采用整体式和紧固式搅拌头所取得的纳米复合化效果相同。

[0035] 所有试验用金属工件进行加工前，根据试件材质及表面实际状况，均应按常规预处理工艺(如：磨光、除油、除锈等)进行处理以获得清洁、干燥的表面。

[0036] 实施例 1：

[0037] 设备：搅拌摩擦加工整套设备由 X6140A 型立式铣床改造而成，由铣床提供旋转轴和可自动升降的工作台，工作台提供轴向施压并驱动工件横向运动。外接 IGS-3(x) 型精确送粉器采用螺纹插入式连接并紧固于搅拌头夹持部位侧面的送粉道 A 入口，并将送粉器用铁环和螺栓固定在旋转轴承台的侧面，输粉速率 5g/min。采用侧式送粉的紧固式搅拌头，其夹持部分直径为 26mm，高 20mm；轴肩直径为 20mm，高度 24mm；探针直径 9mm，长度 3mm，搅拌头内部送粉通道出口孔径为 3mm。搅拌头所用材质为 H13 热作模具钢，采用机加工和热处理的方式制备。

[0038] 加工方法：利用上述搅拌摩擦加工设备在 ZL108 铝合金板材上制备 SiC 颗粒增强的复合材料表面改性层(SiCp/ZL108)。

[0039] 加工步骤为：(1) 经预处理后 ZL108 铝合金板材厚度为 20 mm 固定在可自动升降的工作台上准备进行搅拌摩擦加工；

[0040] (2) 利用可自动升降的工作台中的液压装置沿搅拌头轴向 B 轴向加压，并驱动金属工件横向运动，使搅拌头在旋转轴的驱动下高速旋转，并压紧工件，搅拌头旋转速度为 1200rpm/min，加工速度在 60mm/min；

[0041] (3) 开启均装有增强相 SiC 粉体粒径为 1 μm 的自动送粉器，经搅拌头内部送粉通道 A 将增强相 SiC 粉体送至 ZL108 铝合金板材表层严重塑化去 C，藉搅拌头高速旋转和金属工件的横向运动所产生的摩擦热使增强相 SiC 粉体与塑化区基体材料反应，经往返加工 6 次后，ZL108 铝合金基体晶粒细化至 200nm，SiCp/ZL108 复合材料表面层中 SiC 增强相分布均匀，体积含量达到 6%。

[0042] 实施例 2：

[0043] 设备：搅拌摩擦加工整套设备由 X6140A 型立式铣床改造而成，由铣床提供旋转轴和可自动升降的工作台，工作台提供轴向施压并驱动工件横向运动。外接刮板式送粉器(型号)采用螺纹插入式连接并紧固于搅拌头夹持部位侧面的送粉通道 A 入口，并将送粉器用铁环和螺栓固定在旋转轴承台的侧面，输粉速率 10g/min。采用轴式送粉的整体式搅拌头，其中夹持部分直径为 26mm，高 20mm；轴肩直径为 20mm，高度 24mm；探针直径 9mm，长度 3mm，搅拌头内部送粉通道出口孔径为 3mm。搅拌头所用材质为 H13 热作模具钢，采用机加工和热处理的方式制备。

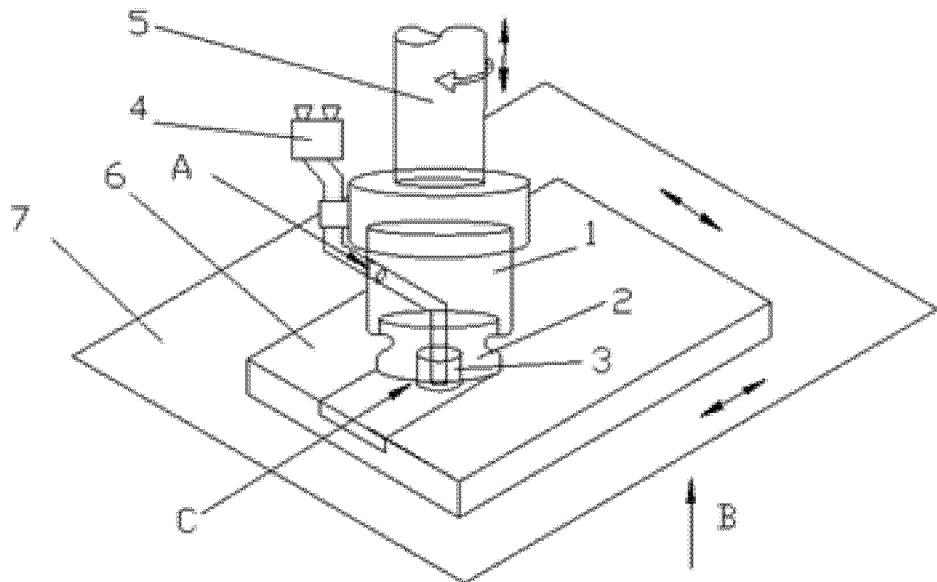
[0044] 加工方法：利用上述搅拌摩擦加工设备在 7075 铝合金板材上制备 Al_2O_3 颗粒增强的复合材料表面改性层($\text{Al}_2\text{O}_3\text{p}/7075$)，增强相 Al_2O_3 粉体粒径为 $15 \mu\text{m}$ 。

[0045] (1)经前处理后 7075 铝合金板材厚度为 30 mm 固定在可自动升降的工作台上准备进行搅拌摩擦加工；

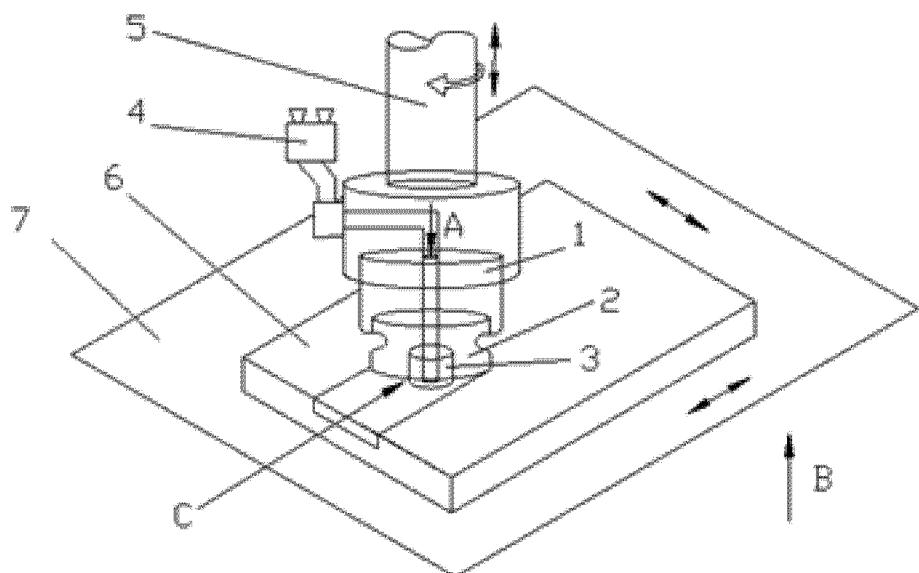
[0046] (2)利用可自动升降的工作台中的液压装置沿搅拌头轴向 B 轴向加压，并驱动金属工件横向运动，使搅拌头在旋转轴的驱动下高速旋转，并压紧工件，搅拌头旋转速度为 1200rpm/min，加工速度在 60mm/min；

[0047] (3)开启均装有增强相 Al_2O_3 粉体粒径为 $15 \mu\text{m}$ 的自动送粉器，经搅拌头内部送粉通道 A 将增强相 Al_2O_3 粉体送至 7075 铝合金板材表层严重塑化去 C，籍搅拌头高速旋转和金属工件的横向运动所产生的摩擦热使增强相 Al_2O_3 粉体与塑化区基体材料反应，经往返加工 4 次后 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{p}/7075$ 复合材料表面层中 Al_2O_3 分布均匀，7075 铝合金基体晶粒细化至 300nm， $\text{Al}_2\text{O}_3\text{p}/7075$ 复合材料表面层中 Al_2O_3 增强相分布均匀，体积含量达到 12%。

[0048] 本发明公开和提出的一种搅拌头自动同步送粉的金属表面纳米复合化加工装置与方法，本领域技术人员可通过借鉴本文内容适当改变搅拌头内部送粉通道形状、尺寸等环节实现。特别需要指出的是，所有针对搅拌头内部送粉通道形状、尺寸的类似变更与组合都被视为包括在本发明精神、范围和内容中。



I



II

图 1

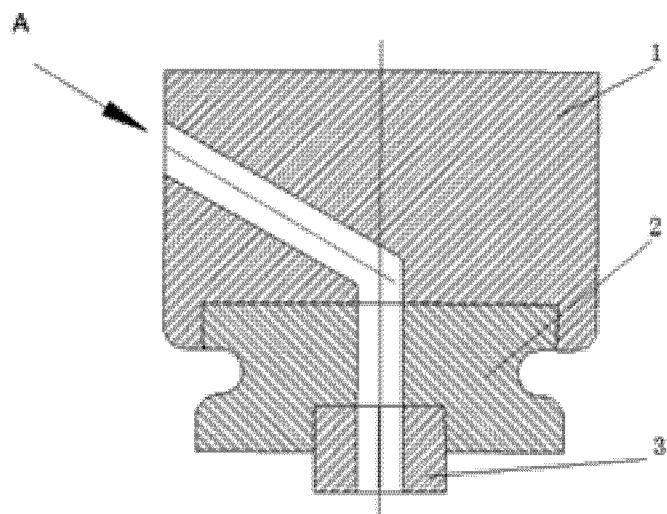


图 2

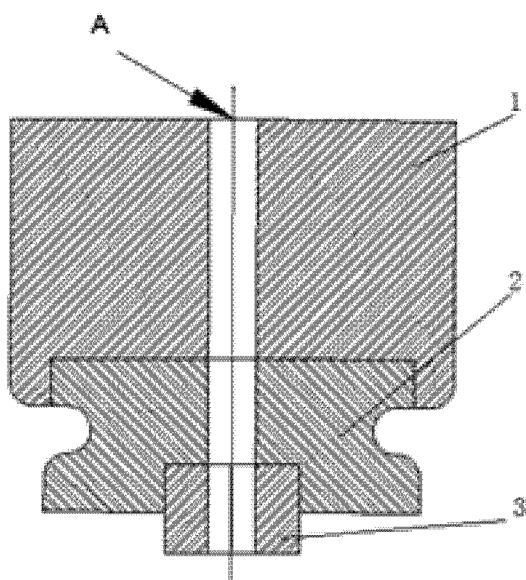


图 3

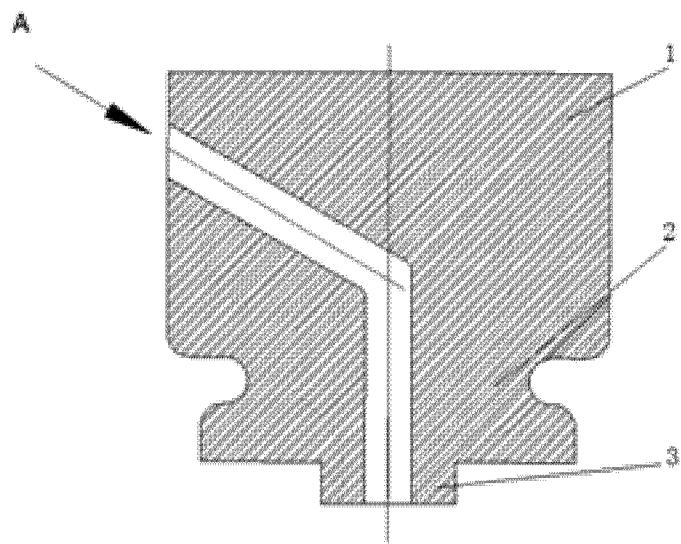


图 4

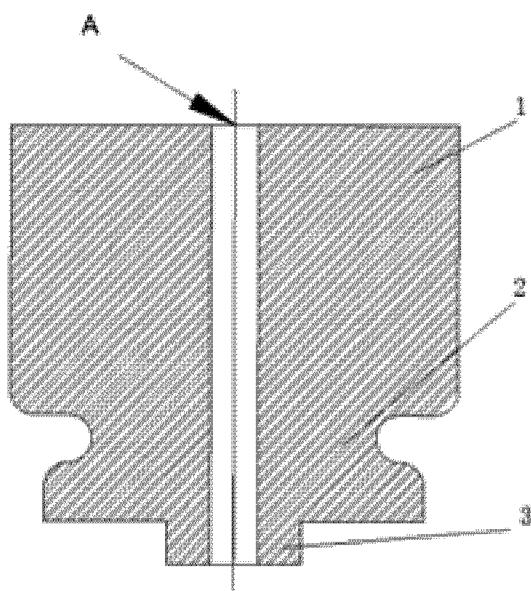


图 5