



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102861956 B

(45) 授权公告日 2014. 06. 18

(21) 申请号 201210353590. 7

(22) 申请日 2012. 09. 20

(73) 专利权人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区 100084-82 信箱

(72) 发明人 佟浩 李勇 王志强 孔全存

周凯

(74) 专利代理机构 北京众合诚成知识产权代理

有限公司 11246

代理人 薄观玖

(51) Int. Cl.

B23H 5/00(2006. 01)

B23H 9/14(2006. 01)

审查员 陈友

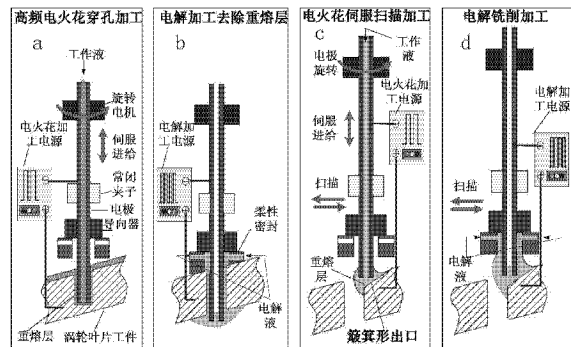
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

一种航空发动机涡轮叶片无重熔层气膜孔的加工方法

(57) 摘要

本发明属于微小孔电加工技术领域,特别涉及一种航空发动机涡轮叶片无重熔层气膜孔的加工方法。本发明分为四个步骤,首先,对燃气轮机镍基高温合金叶片,按设计要求利用中空电极内冲液电火花加工出所需尺寸的圆孔;然后使用同一电极在外冲液的电解液环境中对已加工圆孔进行电解,去除重熔层;接着抬起电极,利用电火花伺服扫描、铣削加工工艺加工出气膜孔的簸箕形孔口;最后使用该电极端部对簸箕形孔口进行电解铣削加工,去除孔口重熔层,提高表面质量。本发明可以解决电火花加工气膜孔残留的重熔层和微裂纹问题,以及避免二次装夹定位误差,提高加工效率。



1. 一种航空发动机涡轮叶片无重熔层气膜孔的加工方法,其特征在于,具体步骤如下:

(1)高频电火花穿孔加工过程:即根据气膜孔加工要求的空间位置和角度,数控定位主轴头与涡轮叶片工件之间的相对位置,采用旋转的中空管状电极旋转高压冲液方式的电火花加工,控制电极加工进给到达预期设定的加工位置,加工出气膜圆孔;

(2)电解加工去除重熔层过程:保持同一电极与工件相对位置,使自适应密封机构贴合在工件表面实现密封,采用旋转的中空管状电极高压外冲液方式的电解加工去除预期厚度的重熔层,并实现气膜孔内壁的抛光;具体过程为:首先针对叶片壁面曲率的变化采用自适应密封机构对待加工圆孔入口区域进行密封,在机构中使用防腐蚀材料设计若干周向喷口,高压泵对电解液加压后通过管路和喷口注入电极与圆孔壁之间;

(3)电火花伺服扫描加工过程:采用旋转的中空管状电极旋转的端部高压冲液放电铣削加工方式,进行沿着簸箕形孔口方向的相对扫描运动加工;

(4)电解铣削加工过程:利用外冲液和电极端部电解扫描加工;

通过上述四个步骤即完成单个气膜孔的加工,对叶片上气膜群孔重复上述四个步骤,即可一次装夹完成叶片全部气膜孔的加工。

2. 根据权利要求1所述的一种航空发动机涡轮叶片无重熔层气膜孔的加工方法,其特征在于:所述步骤(1)中利用电极下端的常闭夹子实现电极的夹持进给,提高加工过程中细电极的伺服进给刚度;并通过电极下端常闭夹子与电极上端常开夹子的协调开闭和进给控制,实现电极损耗补偿;通过旋转的中空管状电极高压内冲液,采用高频窄脉宽脉冲电源的放电加工,实现具有较薄重熔层的圆孔成形。

3. 根据权利要求1所述的一种航空发动机涡轮叶片无重熔层气膜孔的加工方法,其特征在于:所述步骤(2)中利用同一电极对圆孔已加工孔壁进行电解加工去除重熔层,采用自适应密封机构针对叶片不同角度壁面实现密封,高压充液方式使用在电极和工件间隙非常小的环境中,通过高压冲液的方式保证电极和孔壁之间充满工作液。

4. 根据权利要求1所述的一种航空发动机涡轮叶片无重熔层气膜孔的加工方法,其特征在于:所述步骤(3)中利用同一电极的电火花伺服扫描、铣削工艺,加工出所要求的形状孔口,通过对扫描路径、加工参数和电参数进行规划和优化,实现对孔出口的成形加工。

5. 根据权利要求1所述的一种航空发动机涡轮叶片无重熔层气膜孔的加工方法,其特征在于:所述步骤(4)中利用同一电极电解铣削加工工艺对已加工的孔口表面进行电解加工,去除重熔层和提高表面精度,电解液采用自适应密封机构喷射的方式进入电极和工件间隙。

一种航空发动机涡轮叶片无重熔层气膜孔的加工方法

技术领域

[0001] 本发明属于微小孔电加工技术领域,特别涉及一种航空发动机涡轮叶片无重熔层气膜孔的加工方法。

背景技术

[0002] 涡轮是航空发动机中热负荷和机械负荷最大的部件,涡轮叶片在发动机循环中承受着燃烧后的高温高压燃气冲击。涡轮前温度是发动机性能的重要指标,提高涡轮前温度是提高每千克气体循环功、提高发动机推力的有效措施。由于涡轮叶片材料可承受的温度有限,这就需要采用有效的冷却方式来降低涡轮叶片的壁面温度。涡轮冷却主要依靠气膜冷却技术,气膜冷却是由壁面上的喷口喷出冷却空气来阻隔主燃气流对壁面加热的一种热防护措施,气膜冷却兼有隔热和散热的双重作用,在航空发动机中得到广泛应用。

[0003] 气膜孔的材料、结构和技术要求特征,决定了传统机械加工方法难于满足微小气膜孔加工需求。为了达到气膜孔加工技术要求,激光加工、电火花加工、电解(电液束)加工等非接触式特种加工被研究并逐步应用于气膜孔加工,各技术具有其优势和局限性。激光加工速度快,材料适用范围广,但加工孔深受到限制,而且由于激光烧熔作用,孔内粗糙度不均匀且形成较厚的重熔层。电火花加工精度较高,利用旋转电极中空高压冲液的小孔加工工艺,可达到较高加工效率,加工孔深可达到 150 mm,孔内粗糙度较均匀,但也存在一定厚度的重熔层。电解加工根据工具电极不同可分为采用玻璃管内金属丝电极的加工和采用外壁涂有绝缘层金属管电极的加工两种方式,电解加工可实现无重熔层和微裂纹、无热影响区、表面精度高,但加工效率仍然远低于电火花加工小孔效率(朱海南, 齐歆霞. 涡轮叶片气膜孔加工技术及其发展. 航空制造技术. 2011, (13): 71~74)。

[0004] 随着微小孔激光加工和电火花加工工艺的进步,气膜孔内重熔层的形态和厚度有所改善,但由于涡轮用镍基高温合金材料有着高的热裂纹敏感性,在航空发动机的高温高压高转速环境下,气膜孔的重熔层和微裂纹将会导致气膜孔破裂、腐蚀从而致使叶片失效,威胁飞行体的安全。目前,除去激光、电火花加工微小孔重熔层的通用去除方法是采用磨粒流工艺,该工艺采用由聚合物载体和磨料组成的具有流动性的粘弹性材料对气膜孔表面进行抛光和去毛刺,可以获得较好的表面质量,但存在死角难以去除、对工件大小孔去除不均匀的问题。化学研磨是近期出现的气膜孔重熔层去除工艺,该工艺基于重熔层和叶片基体之间存在电位差的原理,通过化学溶液浸泡去除重熔层,对叶片进行大批量的后处理,特点是去除重熔层均匀、经济性好,但存在着通用性差、不同材料需配置不同化学溶液等问题(王茂才, 谢玉江, 王东生, 张杰. 镍基高温合金叶片无再铸层气膜孔快速制造方法. CN:200910012654.5, 2009)。

[0005] 影响气膜冷却效率的因素有很多,如吹风比、气膜冷却表面曲率、气膜孔复合角和气膜孔几何结构等,其中气膜孔出口形状对冷却效率的影响最为显著。大量研究表明:与常规圆柱形气膜孔相比,带复合角的气膜孔以及扇形气膜孔可获得更高的气膜冷却效率。目前加工气膜孔扇形孔口或簸箕形孔口的方法主要是采用带有一定角度的成形电极进行成

型加工,该方法存在电极制造时间较长、电极损耗造成电极更换频繁和加工形状精度等问题。

发明内容

[0006] 为解决带有复合角孔口(如扇形孔口、簸箕形孔口)的气膜孔的加工表面重熔层去除问题,以及簸箕形孔口的加工问题,本发明提供了一种航空发动机涡轮叶片无重熔层气膜孔的加工方法。

[0007] 一种航空发动机涡轮叶片无重熔层气膜孔的加工方法,其具体步骤如下:

[0008] (1) 高频电火花穿孔加工过程:即根据气膜孔加工要求的空间位置和角度,数控定位主轴头与涡轮叶片工件之间的相对位置,采用中空高压冲液电极旋转方式的电火花加工,控制电极加工进给到达预期设定的加工位置,加工出气膜圆孔;

[0009] (2) 电解加工去除重熔层过程:保持同一电极与工件相对位置,使自适应密封机构贴合在工件表面实现密封,采用高压环电极外冲液方式的电解加工去除预期厚度的重熔层,并实现气膜孔内壁的抛光;

[0010] (3) 电火花伺服扫描加工过程:采用中空高压冲液电极旋转的端部放电铣削加工方式,进行沿着簸箕形孔口方向的相对扫描运动加工;

[0011] (4) 电解铣削加工过程:利用外冲液和电极端部电解扫描加工;

[0012] 通过上述四个步骤即完成单个气膜孔的加工,对叶片上气膜群孔重复上述自动化工艺过程,即可一次装夹完成叶片全部气膜孔的加工。

[0013] 所述步骤(1)中利用电极下端的常闭夹子实现电极的夹持进给,提高加工过程中细电极的伺服进给刚度;并通过电极下端常闭夹子与电极上端常开夹子的协调开闭和进给控制,实现电极损耗补偿;通过中空旋转电极高压内冲液,采用高频窄脉宽脉冲电源的放电加工,实现具有较薄重熔层的圆孔成形。

[0014] 所述步骤(2)中利用同一电极对圆孔已加工孔壁进行电解加工去除重熔层,采用自适应密封机构针对叶片不同角度壁面实现密封,在电极和工件间隙非常小的环境下采用高压冲液方式保证电极和孔壁之间充满工作液。

[0015] 所述步骤(3)中利用同一简单电极的电火花伺服扫描、铣削工艺,加工出所要求的形状孔口,通过对扫描路径、加工参数和电参数进行规划和优化,实现对孔出口的成形加工。

[0016] 所述步骤(4)中利用同一电极电解铣削加工工艺对已加工的孔口表面进行电解加工,去除重熔层和提高表面精度,电解液采用自适应密封机构喷射的方式进入电极和工件间隙。

[0017] 本发明的有益效果为:

[0018] 1. 本发明对气膜孔的圆孔和簸箕形孔口采用中空圆形截面的同一简单电极进行加工,降低电极制造难度,减小成形电极制造周期,节约成本;

[0019] 2. 将气膜孔圆孔加工分为电火花加工和电解去除重熔层两个工序在同一工位进行,可以兼顾效率和精度,并能完全去除重熔层,从工艺上可以解决二次装夹中的定位误差;

[0020] 3. 簸箕形孔口的加工由于采用简单电极进行扫描加工,可以解决电极损耗带来

的补偿问题,通过伺服扫描加工和路径规划,实现簸箕形孔口的成形加工;

[0021] 4. 采用步骤(1)和步骤(3),即仅利用高频窄脉宽脉冲电源对圆孔和簸箕形孔口进行电火花加工,可以实现较薄重熔层的气膜孔成形;

[0022] 5. 采用高频脉冲电源电解工艺对孔壁进行重熔层去除,基于重熔层和基体的不同电解加工特性实现重熔层去除,提高表面加工质量。

附图说明

[0023] 图1为整个叶片多组气膜孔电火花电解组合加工工艺流程示意图;

[0024] 图2为单个气膜孔电火花电解组合加工工艺示意图,其中图2a为高频电火花穿孔加工工艺示意图,图2b为电解加工去除重熔层工艺示意图,图2c为电火花伺服扫描加工工艺示意图,图2d为电解铣削加工工艺示意图;

[0025] 图3为簸箕形气膜孔及电火花伺服扫描加工孔口示意图,其中图3a为簸箕型气膜孔结构示意图,图3b为电火花伺服扫描加工孔口示意图。

具体实施方式

[0026] 本发明提供了一种航空发动机涡轮叶片无重熔层气膜孔的加工方法,下面结合附图和具体实施方式对本发明做进一步说明。

[0027] 如图1所示,一种航空发动机涡轮叶片无重熔层气膜孔的加工方法,主要包括高频电火花穿孔加工过程、电解加工去除重熔层过程、电火花伺服扫描加工过程和电解铣削加工过程。

[0028] 如图2a所示,圆孔电火花加工原理是在旋转的中空管状电极中通以高压工作液,冲走加工屑,保持稳定的极间环境,同时保持高电流密度连续正常放电。电极旋转可使端面损耗均匀,不致受高压工作液的反作用力而偏斜。加工中采用高频窄脉宽脉冲电源,既能通过高频窄脉宽放电减小重熔层生成厚度,又可以通过高频放电保证加工效率。加工中采取合理的电极进给深度,以补偿电极端部径向和轴向损耗给圆孔出口造成的形状误差,保证圆孔加工形状精度。

[0029] 如图2b所示,首先针对叶片壁面曲率的变化采用自适应密封机构对待加工圆孔入口区域进行密封,在机构中使用防腐蚀材料设计若干周向喷口,高压泵对电解液加压后通过管路和喷口注入电极与圆孔壁之间。然后将连接到电极和工件两级的小能量的高频电解脉冲电源打开,进行电解加工。针对高压电解液流体中基体和重熔层材料电解加工的不同特性,判断重熔层去除是否完成,以去除圆孔孔壁的重熔层,并形成圆滑的孔出口。

[0030] 如图2c所示,将电极抬起至圆孔入口,针对簸箕形孔口(如图3b所示)的三维形状进行合理的路径规划,利用电火花伺服扫描、铣削加工的方式完成三维型腔的加工,通过电极旋转和高压内冲液保证极间环境的稳定。伺服扫描的基本原理:每层扫描加工中电参数不变时,单次火花放电能量为恒定值 W_M ,存在确定的放电间隙范围 $S_B \in (S_{min}, S_{max})$ 。若保持放电间隙 S_B ,则放电频率 f_e 符合统计规律恒定,即单位时间的放电能量 $W_T = W_M f_e$ 恒定,则单位时间的工件材料去除量即去除率 $V_T = k_a W_T$ (k_a 为系数常量)恒定。根据此推论,若设定伺服扫描速度 v_s 和扫描宽度 d_s ,实时伺服保持放电间隙 S_B ,每层伺服扫描加工深度 h_T 具有一致性(如下式所示),称为伺服扫描加工深度一致性原理。

$$[0031] \quad h_T = \frac{V_T}{v_s d_s} = \frac{k_a W_{M_e} f_e}{v_s d_s}$$

[0032] 根据上述原理分析,三维微细电火花伺服扫描、铣削、加工过程示意图如图 3b 所示。保持放电间隙 S_B ,虽然工具电极逐渐损耗从 $\Delta l_1 (\Delta l_1 = l_2 - l_1)$ 到 $\Delta l_2 (\Delta l_2 = l_3 - l_2)$,但电极放电端部和工件之间的相对位置不变,即电极轴向损耗自动实时在线补偿,加工深度具有一致性,并且保持放电间隙有利于稳定高效放电。

[0033] 如图 2d 所示,簸箕形孔口重熔层去除的电解扫描加工中工具电极不损耗,依照预定的加工轨迹和扫描速度完成逐层铣削,电极端部通过外冲液对簸箕形孔口进行电解铣削加工。通过控制脉冲宽度和加工间隙,实现电解加工中加工定域性控制。

[0034] 下面以直径为 0.5 mm 的圆孔簸箕形气膜孔加工为例,结合附图对本发明做进一步说明。

[0035] 实施例 1

[0036] 根据叶片气膜孔加工位置、形状要求,利用叶片榫头将叶片夹紧和定位,通过 X、Y、Z、A、B 五轴将待加工孔调整到工位,将外径为 0.38 mm 的中空电极丝通过主轴头夹紧并通过机床调整到叶片待加工孔的要求位置。

[0037] 如图 2a 所示,启动高频窄脉宽脉冲电源、电极旋转电机、电极内冲液高压水泵,通过检测放电状态,利用电极下端的常开和常闭两个夹子对电极实现夹紧、进行伺服进给,实现电火花圆孔加工。通过检测电极穿透待加工孔出口瞬间由液中放电到气中放电转变的电流电压变化和 Z 轴伺服进给状态的变化,实现对电极穿透圆孔出口瞬间精确判断,控制电极穿透后的继续进给量,实现圆孔的薄重熔层加工。

[0038] 本例中粗加工参数为:工具电极直径为 0.38 mm,叶片厚度为 3 mm,叶片壁和圆孔相对角度为 30° ,脉冲电源峰值电压为 100 V,峰值电流为 40 A,脉冲宽度和脉冲间隔为 $15 \mu s : 15 \mu s$,电极旋转速度为 100 r/min,内冲液压力为 8 MPa,加工圆孔内径尺寸为 0.45 mm,重熔层厚度为 $20 \mu m \sim 30 \mu m$,电极穿透圆孔后继续进给量为 1.5 mm。

[0039] 如图 2c 和图 3b 所示,将电极端部调整至待加工孔的入口位置,通过 CAD/CAM(ProE 造型和生成的刀位文件)生成电极端部的扫描路径,采用电火花小孔加工工艺参数对簸箕形孔口进行三维伺服扫描加工,实现孔口的三维成型。

[0040] 本例中三维扫描的参数为:扫描速度为 1 mm/s,分层厚度为 0.02 mm。

[0041] 根据图 1 所示工艺流程,完成上一孔加工后,将电极抬起,通过叶片群孔加工程序判断是否到达电极损耗长度极限,来判断是否进行更换新电极,若加工同一尺寸圆孔且电极丝有加工余量则不更换电极丝,若加工同一尺寸圆孔且电极丝加工余量不足则更换同一尺寸电极丝;若加工不同尺寸圆孔时则需更换带有不同尺寸电极的主轴头。调整电极和工件相对位置,对下一孔进行定位加工。

[0042] 实施例 2

[0043] 根据叶片气膜孔加工位置、形状要求,利用叶片榫头将叶片夹紧和定位,通过 X、Y、Z、A、B 五轴将待加工孔调整到工位,将外径为 0.38 mm 中空电极丝通过主轴头夹紧并通过机床调整到叶片待加工孔的要求位置。

[0044] 如图 2a 所示,启动高频窄脉宽脉冲电源、电极旋转电机、电极内冲液高压水泵,通过检测放电状态,利用电极下端的常开和常闭两个夹子对电极实现夹紧、进行伺服进给,实

现电火花圆孔加工。通过检测电极穿透待加工孔出口瞬间由液中放电到气中放电转变的电流电压变化和 Z 轴伺服进给状态的变化,实现对电极穿透圆孔出口瞬间精确判断,控制电极穿透后的继续进给量,实现圆孔的高效精确加工。

[0045] 本例中粗加工参数为:工具电极直径为 0.38 mm,叶片厚度为 3 mm,叶片壁和圆孔相对角度为 30° ,脉冲电源峰值电压为 100 V,峰值电流为 40 A,脉冲宽度和脉冲间隔为 15 μs :15 μs ,电极旋转速度为 100 r/min,内冲液压力为 8 MPa,加工圆孔内径尺寸约为 0.45 mm,重熔层厚度为 20 μm ~30 μm ,电极穿透圆孔后继续进给量为 1.5 mm。

[0046] 如图 2b 所示,启动电解加工电源、电解液高压冲液泵和自适应密封机构,对已加工圆孔和电火花加工电极之间注入高压电解液,实现对重熔层的去除。自适应密封机构采用压力径向锁紧式橡胶和电极进行配合实现密封、采用周向均布的 6 个测压型弹性件压紧橡胶密封圈的方式实现和叶片之间的配合和密封。在自适应密封机构周向均布 6 个陶瓷性喷管对加工区域喷射高压电解液,实现均匀电解加工。

[0047] 本例中电解加工的参数为:脉冲电源峰值电压为 12 V,平均电流为 0.1 A,脉冲宽度和脉冲间隔为 10 μs :10 μs ,电解液冲液压力为 5 MPa。

[0048] 如图 2c 和图 3b 所示,将电极端部调整至待加工孔的入口位置,通过 CAD/CAM(ProE 造型和生成的刀位文件)生成电极端部的扫描路径,采用电火花小孔加工工艺参数对簸箕形孔口进行三维伺服扫描加工,实现孔口的三维成型。

[0049] 本例中三维扫描的参数为:扫描速度为 1 mm/s,分层厚度为 0.02 mm。

[0050] 如图 2d 所示,依照预定的加工轨迹和扫描速度完成逐层铣削,利用环电极外冲液和电极端部电解扫描加工去除簸箕形孔口重熔层,完成该气膜孔加工。

[0051] 本例中三维扫描的参数为:扫描速度为 1 mm/s。

[0052] 根据图 1 所示工艺流程,完成上一孔加工后,将电极抬起,通过叶片群孔加工程序判断是否要进行更换,若加工同一尺寸圆孔且电极丝有加工余量则不更换电极丝,若加工同一尺寸圆孔且电极丝加工余量不足则更换同一尺寸电极丝;若加工不同尺寸圆孔时则需更换带有不同尺寸电极的主轴头。调整电极和工件相对位置,对下一孔进行定位加工。

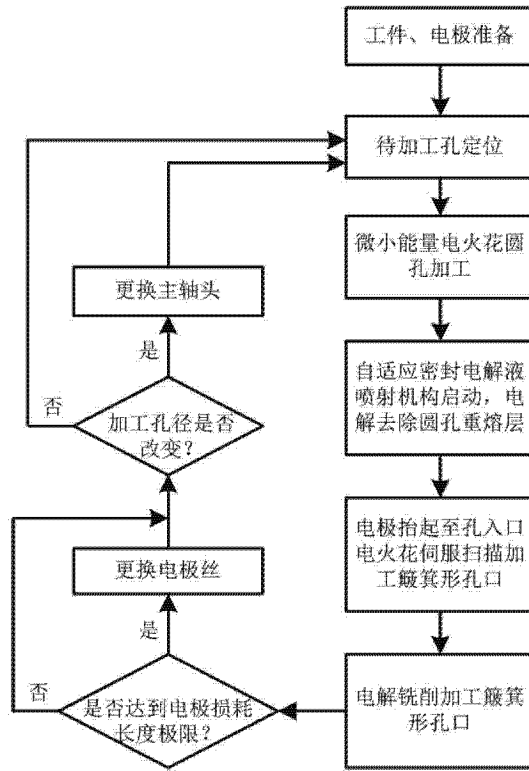


图 1

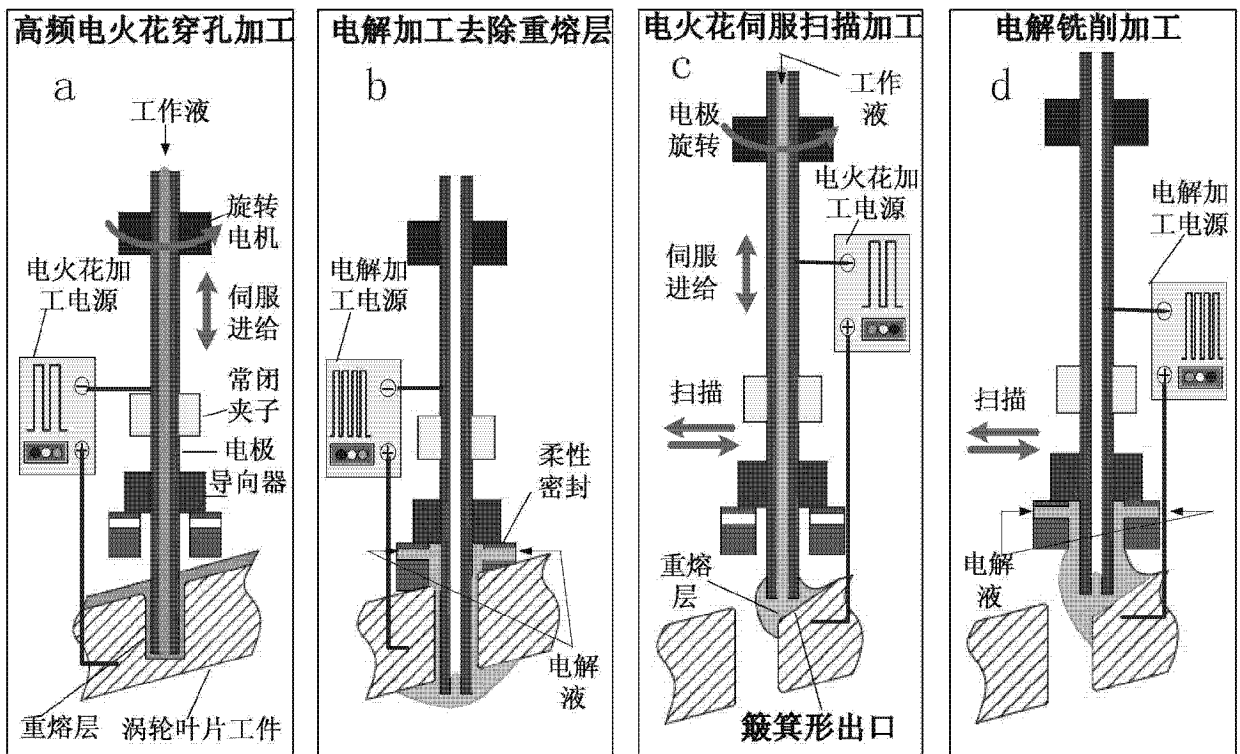


图 2

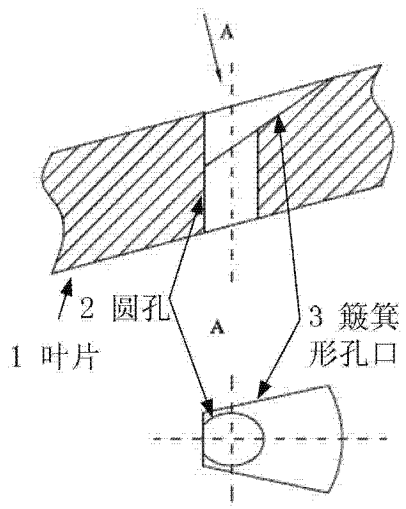


图 3a

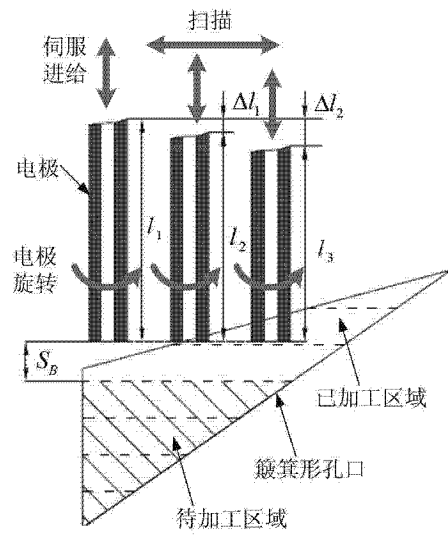


图 3b