



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112352063 B

(45) 授权公告日 2023.05.05

(21) 申请号 201980026736.7  
 (22) 申请日 2019.03.13  
 (65) 同一申请的已公布的文献号  
 申请公布号 CN 112352063 A  
 (43) 申请公布日 2021.02.09  
 (30) 优先权数据  
 18168526.4 2018.04.20 EP  
 (85) PCT国际申请进入国家阶段日  
 2020.10.19  
 (86) PCT国际申请的申请数据  
 PCT/EP2019/056291 2019.03.13  
 (87) PCT国际申请的公布数据  
 W02019/201517 EN 2019.10.24  
 (73) 专利权人 普兰西复合材料有限公司  
 地址 德国滨湖莱希布鲁克  
 (72) 发明人 皮特·波尔契克  
 西拉德·科洛兹瓦里  
 伊戈尔·日尔科夫 约翰娜·罗森

(74) 专利代理机构 北京市万慧达律师事务所  
 11111  
 专利代理师 周倩羽 赵洁

(51) Int.Cl.  
 G23C 14/32 (2006.01)  
 H01J 37/32 (2006.01)  
 G23C 14/56 (2006.01)  
 H05H 1/24 (2006.01)  
 G23C 14/06 (2006.01)  
 C04B 35/58 (2006.01)

(56) 对比文件  
 JP H1068069 A, 1998.03.10  
 US 2007034501 A1, 2007.02.15  
 US 6361663 B1, 2002.03.26  
 CN 102947478 A, 2013.02.27  
 US 6495002 B1, 2002.12.17  
 US 2013220800 A1, 2013.08.29  
 US 4430184 A, 1984.02.07  
 EP 0577246 A1, 1994.01.05

审查员 赵亚斌

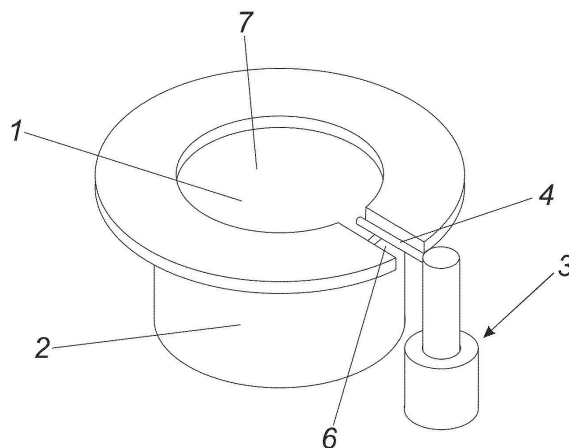
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

## (54) 发明名称

真空电弧源

## (57) 摘要

一种用于硼化物的电弧蒸发的真空电弧源，包括：由至少90原子%的硼化物，特别是由大于98原子%的硼化物制成的阴极(1)；阳极(5)，其优选地为圆盘形状；主体(2)，其由与阴极(1)相比电弧放电不太优选的材料制成；主体(2)以这样的方式围绕所述阴极(1)，使得在真空电弧源的操作期间，电弧在阴极(1)的电弧表面上的移动受到主体(2)限制，其中阳极(5)的材料的至少90原子%具有与阴极(1)相同的化学组成。



1. 一种用于硼化物的电弧蒸发的真空电弧源,包括:
  - 阴极(1),其由至少90原子%的硼化物制成;
  - 阳极(5);
  - 主体(2),其由与所述阴极(1)相比具有较低的电弧放电的材料制成,所述主体(2)围绕所述阴极(1),使得在所述真空电弧源的操作期间,电弧在所述阴极(1)的电弧表面上的移动受到所述主体(2)的限制;
  - 其中,在从所述阴极(1)的电弧表面上看时,所述阳极(5)覆盖所述主体(2)的端面,并且所述阳极(5)设有用于点火系统的触发销(4)的狭缝(6),  
其特征在于,  
所述阳极(5)的材料的至少90原子%具有与所述阴极(1)相同的化学组成。
2. 根据权利要求1所述的真空电弧源,其中,所述阴极(1)由大于98原子%的硼化物制成。
3. 根据权利要求1所述的真空电弧源,其中,所述阳极(5)为圆盘形状。
4. 根据权利要求1至3中任一项所述的真空电弧源,其中,所述阴极(1)由TiB<sub>2</sub>、ZrB<sub>2</sub>、VB<sub>2</sub>、TaB<sub>2</sub>、CrB<sub>2</sub>、NbB<sub>2</sub>、W<sub>2</sub>B<sub>5</sub>或WB<sub>2</sub>、HfB<sub>2</sub>、AlB<sub>2</sub>、MoB<sub>2</sub>或MoB、或其混合物制成。
5. 根据权利要求1至3中任一项所述的真空电弧源,其中,所述阴极(1)的形状为棱柱形或圆柱形和/或所述主体(2)的形状为棱柱形或圆柱形。
6. 根据权利要求5所述的真空电弧源,其中,所述阴极(1)的形状和所述主体(2)的形状至少基本上相同。
7. 根据权利要求5所述的真空电弧源,其中,所述阴极(1)朝向所述电弧表面逐渐变细。
8. 根据权利要求1至3中任一项所述的真空电弧源,其中,所述阴极(1)和所述主体(2)之间的最大间隙低于1毫米。
9. 根据权利要求8所述的真空电弧源,其中,所述阴极(1)和所述主体(2)之间的最大间隙低于0.5毫米。
10. 根据权利要求8所述的真空电弧源,其中,所述主体(2)邻接所述阴极(1)。
11. 根据权利要求1至3中任一项所述的真空电弧源,其中
  - 所述主体(2)轴向突出超过所述阴极(1)的电弧表面,或者
  - 所述阴极(1)轴向突出超过所述主体(2)的端表面,或者
  - 所述阴极(1)的所述电弧表面与所述主体(2)的端表面共面。
12. 根据权利要求1至3中任一项所述的真空电弧源,其中,所述主体(2)的高度(H<sub>p</sub>)为所述阴极(1)的高度(H<sub>c</sub>)的至少30%。
13. 根据权利要求1至3中任一项所述的真空电弧源,其中,围绕所述阴极(1)的所述主体(2)由以下材料制成:
  - 钼、钨、钽、铌或其合金,或
  - 基于Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ZrO<sub>2</sub>、BN的电绝缘陶瓷。
14. 根据权利要求1至3中任一项所述的真空电弧源,其中,所述阳极(5)的材料的超过99原子%具有与所述阴极(1)的材料相同的化学组成。
15. 根据权利要求1至3中任一项所述的真空电弧源,其中,在从所述阴极(1)的电弧表

面上看时,所述阳极(5)留有允许从所述阴极(1)的电弧表面传输材料流的孔(7)。

16. 根据权利要求1至3中任一项所述的真空电弧源,其中在

-所述阴极(1)和所述阳极(5),或

-所述主体(2)和所述阳极(5)

之间的最小距离为0.5毫米至10毫米。

17. 根据权利要求16所述的真空电弧源,其中在

-所述阴极(1)和所述阳极(5),或

-所述主体(2)和所述阳极(5)

之间的最小距离为1毫米至5毫米。

18. 根据权利要求1至3中任一项所述的真空电弧源,其中,所述真空电弧源的点火系统包括触发销(4),所述触发销(4)被布置成接触围绕所述阴极(1)的所述主体(2)。

19. 根据权利要求18所述的真空电弧源,其中,所述主体(2)具有大于所述触发销(4)的直径的径向宽度,从而允许可靠的点火。

20. 根据权利要求1至3中任一项所述的真空电弧源,其中,在所述真空电弧源的操作期间,所述电弧放电的运动由在所述阴极(1)和所述阳极(5)之间延伸的电场线控制,并且不存在用于引导所述电弧放电的磁体。

21. 根据权利要求1至20中任一项所述的真空电弧源用于薄膜涂层的PVD沉积的用途。

22. 根据权利要求21所述的用途,所述真空电弧源用于切削工具或成形工具。

## 真空电弧源

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种具有权利要求1前序部分的特征的用于硼化物电弧蒸发的真空电弧源以及这种真空电弧源的用途。

### 背景技术

[0002] 迄今为止,还没有从电弧蒸发可重复地合成硼化物,特别是 $TiB_2$ ,并且从报道的使用 $TiB_2$ -阴极用于薄膜合成的少数尝试中,可以得出严重的不稳定性、开裂和阴极失效的结论。在使用现有工业电弧源时,观察到阴极烧蚀通常不均匀,极有可能在阴极表面上局部地粘住电弧点,随后阴极损坏,并且在仅几分钟的操作之后就终止沉积过程(即,不良的阴极利用率)。

[0003] 文献中没有很好地描述通过真空电弧法在 $TiB_2$ 阴极上沉积 $TiB_2$ 薄膜。这主要限于实验室使用,主要是由于与材料合成相关的挑战,例如广泛的不稳定性、开裂和阴极失效(O.Knotek, F. Löffler, M. Böhmer, R. Breidenbach and C. Stöbel, "Ceramic cathodes for arc-physical vapour deposition: development and application," Surface and Coatings Technology, vol. 49, pp. 263-267, 1991)。

[0004] 已经提出了用于改善工艺稳定性的假设途径,例如施加合适的磁场,或在反应性气氛中工作(O.Knotek, F. Löffler, M. Böhmer, R. Breidenbach and C. Stöbel, "Ceramic cathodes for arc-physical vapour deposition: development and application," Surface and Coatings Technology, vol. 49, pp. 263-267, 1991), 或通过使用脉冲电弧(J.Treglio, S. Trujillo and A. Perry, "Deposition of  $TiB_2$  at low temperature with low residual stress by a vacuum arc plasma source," Surface and Coatings Technology, vol. 61, pp. 315-319, 1993)。

[0005] 这些途径仍然有待证实,尽管已经报道了在 $N_2$ 中使用 $TiB_2$ 阴极的改进的电弧法稳定性(H.Fager, J. Andersson, J. Jensen, J. Lu and L. Hultman, "Thermal stability and mechanical properties of amorphous coatings in the Ti-B-Si-Al-N system grown by cathodic arc evaporation from  $TiB_2$ ,  $Ti_{33}Al_{67}$ , and  $Ti_{85}Si_{15}$  cathodes," J. Vac. Sci. Technol. A., vol. 32, no. 6, p. 061508, 2014)。

[0006] 还观察到,去除外部磁场似乎导致电弧点的耗散和阴极的活性区域增加,结果过热减少和等离子体生成稍微稳定(I. Zhirkov, A. Petruhins, L. -A. Naslund, S. Kolozsvári, P. Polcik, and J. Rosen "Vacuum arc plasma generation and thin film deposition from a  $TiB_2$  cathode", Applied Physics Letters 107, 184103 (2015))。

[0007] WO 2011/137472A1公开了一种 $TiB_2$ 靶,其含有一种或多种选自铁、镍、钴和铬的金属的部分,以及具有 $TiB_2$ 颗粒的特定平均颗粒尺寸和碳含量的碳。

[0008]  $TiB_2$ 阴极在电弧放电时的破坏被认为是由相对高的热膨胀系数引起的。 $TiB_2$ 阴极被电弧点局部加热导致高应力,在温度梯度下产生裂纹。

## 发明内容

[0009] 本发明的目的是提供一种用于硼化物电弧蒸发的真空电弧源,该真空电弧源可以连续使用或相比现有技术的真空电弧源使用更长时间。

[0010] 这通过具有权利要求1的特征的真空电弧源和这种真空电弧源的用途来实现。本发明的实施例在从属权利要求中限定。

[0011] 根据本发明,提供了:

[0012] -由至少90原子%的硼化物,特别是由大于98原子%的硼化物制成的阴极

[0013] -由与阴极相比电弧放电不太优选的材料制成的主体,所述主体以这样的方式围绕阴极,使得在真空电弧源的操作期间,电弧在阴极的电弧表面上的移动受到主体的限制

[0014] -阳极,其优选地为圆盘形状,至少90原子%的阳极材料具有与阴极相同的化学组成。

[0015] 在本发明的真空电弧源中,电弧放电被耗散(因为不需要使用磁体),导致电流密度较小,因此热冲击较小,从而降低了阴极开裂的风险。实现了使用本发明的真空电弧源产生的涂层至少基本上没有杂质。

[0016] 将阳极放置在阴极附近导致强烈的阳极加热。选择阳极,其材料的至少90原子%(优选大于99原子%)与阴极具有相同的化学组成,防止了阳极材料的阴极污染,以及在材料合成期间所导致的无意的杂质掺入。

[0017] 优选地,阴极由 $TiB_2$ 、 $ZrB_2$ 、 $VB_2$ 、 $TaB_2$ 、 $CrB_2$ 、 $NbB_2$ 、 $W_2B_5$ 或 $WB_2$ 、 $HfB_2$ 、 $AlB_2$ 、 $MoB_2$ 、或 $MoB$ 、或其混合物制成。

[0018] 由于为任何物理方法的最低功耗成本的努力,在由两个或多个具有明显不同的元素组成的区域组成的阴极上电弧点火,导致在能够提供最低发光阴极电势的材料上优先电弧发光,即使初始电弧在具有较高电势的材料上被点火。因此,本发明提供了在另一种材料处放电的点火,随后电弧点移动到硼化物阴极。为此目的,阴极被由与阴极相比不太优选电弧放电的材料制成的主体围绕。

[0019] 在本发明中,通过增加电弧点的有效面积并由此改善热分布来防止工作阴极表面的破坏。本发明通过消除由于在电弧的点火和/或操作期间发生的电和/或机械效应而导致的阴极破坏,增加了用于硼化物的电弧蒸发的真空电弧源可以使用的时间。

[0020] 通过用由电弧放电不太优选的材料制成的主体包围阴极,可以防止在阴极边缘出现电弧点,从而提高工艺稳定性。在现有技术中,磁体用于保持工作阴极表面处的电弧。没有磁体和没有主体,电弧点开始到达阴极的一侧,在那里产生的金属流可能破坏源绝缘体或者电弧点可能消失。这两种效果都影响工艺稳定性。本发明不需要使用磁体,换句话说,在真空电弧源的操作期间,电弧放电的运动由在阴极和阳极之间延伸的电场线控制,并且优选地不存在引导电弧放电的磁体。

[0021] 在本发明的真空电弧源中,设计成提供用于电弧点的耗散、稳定的等离子体生成和因此均匀的阴极烧蚀的条件,不需要使用磁体(其通常用于现有的源中)。没有磁体可能导致电弧点到达阴极的边缘,电弧斑在阴极的边缘熄灭,并中断沉积过程。这里提出的具有较高阴极电势的材料的主体在由圆柱边缘限定的阴极表面的工作区域中包含电弧。在不存在源磁体的情况下,硼化物阴极表面上的尖锐晶粒上的电场强度的增加支持较低点电流的同时操作的点弧点的点火。这降低了工作阴极表面处的温度梯度,并降低了伴随的应力和

阴极破坏的可能性。

[0022] 由于任何物理过程都努力获得最低的功耗成本,并且所进行的实验表明电弧放电在阴极-阳极电势低于25V的阴极处发光,因此该材料应当提供明显更高的电势。一种这样的材料是钼(Mo),对于与用于例如TiB<sub>2</sub>相同的条件,其具有大约30V的电势。比较所得的功率(电势乘以电弧电流),在本发明中Mo或其合金优选用作阴极周围主体的材料。其它可能的材料是钨、钽、铌或其合金,或基于Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ZrO<sub>2</sub>、BN的电绝缘陶瓷。

[0023] 优选地,阴极的形状是棱柱形或圆柱形和/或主体的形状是棱柱形或圆柱形(具有用于阴极的开口),其中优选的是阴极的形状和主体的形状至少基本上相同。然而,应当理解,可以以阴极显示为朝向电弧表面逐渐变细的方式来修改阴极的上述形状。阴极的圆柱形和主体的中空圆柱形允许阴极旋转。

[0024] 关于主体相对于阴极的径向布置,优选的是,阴极和主体之间的最大间隙低于1毫米,优选低于0.5毫米。尽管这种小尺寸的间隙是可接受的,但是优选的是,主体邻接阴极。

[0025] 关于主体相对于阴极的轴向布置,存在不同的备选可能性:

[0026] -主体可以布置成轴向突出到阴极的电弧表面之上

[0027] -阴极可以布置成轴向突出超过主体的端表面

[0028] -阴极的电弧表面和主体的端表面可以布置成共面的

[0029] 关于主体的高度相对于阴极的高度,尽管可能,但它们不是必须相同。只要主体的高度至少为阴极高度的30%就足够了。

[0030] 在优选实施例中,阳极——从阴极的电弧表面上看——覆盖主体的端面(可能除了用于点火系统的触发销的狭缝之外)——留下允许从阴极的电弧表面传输材料流的孔。

[0031] 优选的是,在

[0032] -阴极和阳极,或者

[0033] -主体和阳极

[0034] 之间的最小距离为0.5毫米至10毫米,优选为1毫米至5毫米。

[0035] 围绕阴极的主体不仅防止在阴极边界处的电弧的发光,而且保护工作阴极表面免受伴随电弧的点火电和机械损坏效应。在许多传统的工业DC电弧源中,电弧放电由气动系统基于触发销对阴极表面的短暂接触而点火。流过触发器的点火电流通常在几十安培的范围内,并且接触面积相对较小。结果,根据现有技术,在阴极上的电弧点火往往导致触发销周围的表面的局部破坏,最终防止销接触阴极并使电弧不可能点火。

[0036] 在优选实施例中,触发销可布置成接触围绕阴极的主体而不是阴极本身(例如,可以调节触发销的长度)。在这种情况下,主体的径向宽度应当大于触发销的直径,从而确保可靠的点火。然后,主体的边缘用作电弧点火过程的位置(只有当主体的材料是导电的时,这才不会与例如电绝缘材料(例如前述陶瓷)一起工作),随后放电移动到阴极,在阴极处电弧优先发光。申请人的测试表明,与阴极相比,主体的烧蚀是不显著的。当使用由钼制成的主体时,从组件和所得薄膜产生的等离子体的诊断显示没有钼的痕迹。

[0037] 在最近的出版物(I.Zhirkov,A.Petruhins,L.-A.Naslund,S.Kolozsvári,P.Polcik,and J.Rosen“Vacuum arc plasma generation and thin film deposition from a TiB<sub>2</sub> cathode”,Applied Physics Letters 107,184103(2015))中,建议具有TiB<sub>2</sub>阴极的相关表面特征的晶体结构通过在TiB<sub>2</sub>晶粒处的电场强度的增加而诱导电弧点的耗

散(除非被例如通过磁场的操纵所阻碍),这改进了电弧等离子体生成的稳定性。通过将系统阳极放置得尽可能靠近阴极表面,减小阴极-阳极距离,可以实现场强的类似增加。对于这种配置,提出来自阴极表面的材料流通过阳极孔。然而,短的阴极-阳极距离导致阳极的蒸发。这可能导致阳极材料沉积到阴极表面上,以及在材料合成期间无意地混入污染物。为了避免这种情况,可以使用阳极的冷却系统,然而,在本发明中这不是必需的,因为至少90原子%的阳极材料具有与阴极相同的化学组成。

[0038] 本发明阴极组件的测试证明与现有技术的源模式相比稳定性大大改善。进一步的发展基于通过增加阴极表面晶粒处的电场强度来改善电弧耗散。任何放电以及这里考虑的电弧放电在至少两个电极——阴极和阳极(其中一个可以是虚拟的)之间发光。工业电弧源通常没有单独的阳极,而是室壁起阳极的作用,结果通常具有大的阴极-阳极距离。然而,已知的是,电场强度由阳极-阴极距离确定。另一方面,还已知等离子体将放电电极彼此屏蔽,并且几乎所有的电势降都发生在阴极附近。在本发明的实施例中,提出了阴极-阳极距离的减小将增加阴极-阳极间隙中的等离子体的密度,并且因此促进电弧点的点火并且增强点耗散。

[0039] 根据本发明的真空电弧源可用于薄膜涂层的PVD沉积,优选用于切削和成形工具。

[0040] 测试结果:

[0041] 所提出的真空电弧源已经针对TiB<sub>2</sub>阴极成功地测试。每个组装部件被单独地以及一起地测试。对于所有进行的实验,在工作压力为10<sup>-5</sup>托的室中使用了等于100安培的电弧电流。

[0042] 为了通过使用Mo圆柱体形式的主体并检查在来自电弧源的所得材料流中Mo的可能存在来测试电弧点火,将来自Hiden LTD的等离子体分析仪EQP置于距离TiB<sub>2</sub>阴极35cm处,该阴极具有59mm的直径,并被内径为约59mm和外径为约63mm的Mo圆柱体包围。点火以超过10次每分钟进行了大约1小时。发现Mo上的电弧点火和随后移动到TiB<sub>2</sub>阴极的尝试至少90%得到保证。对所得的材料流的等离子体诊断显示了非显著量的Mo。该实验还表明,在主体包围TiB<sub>2</sub>阴极的情况下,触发销不会破坏阴极表面。然而,电弧点有时仍能够局部地粘住。

[0043] 使用TiB<sub>2</sub>圆盘作为阳极也已经单独测试,其中等离子体分析在35cm的距离处用分析仪进行。阳极盘厚度为5mm,直径为150mm。对于这里使用的63mm阴极,阳极内的孔为55mm。在该实验中,阴极和阳极之间的距离设定为2mm。对于触发销,在阳极中存在狭缝,从而允许通过触发销点火电弧。所进行的实验显示阳极的存在对电弧放电的稳定性有正面影响。与没有阳极情况下所生成的等离子体相比,等离子体诊断没有显示等离子体特性和/或生成的流的组成的变化。然而,实验表明,在没有Mo圆柱体的情况下,电弧经常在阴极边缘处熄灭。

[0044] 还测试了由TiB<sub>2</sub>阴极、Mo圆柱体和具有用于电弧点火的狭缝的TiB<sub>2</sub>圆盘阳极组成的真空电弧源。整个组件显示出稳定的电弧点火过程和平稳且稳定的电弧等离子体生成。发现工作阴极表面的烧蚀是光滑和均匀的。在整个实验时间,约2小时内,没有检测到电弧点的粘附和伴随的阴极破坏。所执行的对所生成的材料流的等离子体诊断可以在实验期间的不同时间再现,或者在相同条件下执行的不同实验之间再现。

[0045] 根据本发明的阴极组件和/或根据本发明的真空电弧源可用于涂层的PVD沉积,用

于切削和成形工具。

[0046] 优选地,对于给定形状的阴极,相应地选择主体的中空形状,例如对于圆柱形阴极,主体为中空圆柱形形状,对于圆锥形阴极,主体为中空圆锥形形状,对于棱柱形阴极,主体为中空棱柱形形状等。

### 附图说明

[0047] 本发明的实施例在附图中示出:

[0048] 图1是本发明阴极组件的一个实施例;

[0049] 图2是本发明的真空电弧源的一个实施例;

[0050] 图3a-3i是阴极、主体和阳极的不同的可能构造。

### 具体实施方式

[0051] 图1示出了用于电弧蒸发 $TiB_2$ 的阴极组件,其具有由 $TiB_2$ 制成的阴极1,该阴极1被由与 $TiB_2$ 阴极1相比电弧放电不太优选的材料(此处为Mo)制成的主体2包围。示出了包括触发销4的点火系统。

[0052] 图2示出了用于使用图1的阴极组件的 $TiB_2$ 电弧蒸发的真空电弧源。Mo圆柱形式的主体2保护阴极1免受伴随电弧点火的不期望的影响,同时,它将电弧点保持在工作阴极表面。

[0053] 阳极5具有带有用于将所生成的材料流传输到衬底的孔7的盘状。还可以注意到,所进行的实验表明,在阳极5下方点火的电弧点倾向于到达阳极孔下方的阴极区域。

[0054] 该圆盘设有用于触发销4的狭缝6,以提供电弧放电点火,使得触发销4可以穿过圆盘的平面以接触主体2。

[0055] 图3a至3i示出了阴极1、主体2和阳极5的不同的可能构造。在所有的图中,阴极1、主体2和阳极5都是旋转体的形式。在图3a至3f中,阴极1是具有用于主体2的凹槽的圆柱体形状,该主体是中空圆柱体形状。在图3g和3h中,阴极1是(截头)锥形,主体2是中空(截头)锥形。在图3i中,阴极1是朝向电弧表面逐渐变细的圆柱形状。在图3a至3i中,阳极5呈环形形式。

[0056] 在所有图中,主体2的高度 $H_b$ 是阴极1的高度 $H_c$ 的至少30%。

[0057] 在所有图中,主体2邻接阴极1的罩表面(mantle surface)。然而,主体2和阴极1之间的小间隙小于1毫米,优选地小于0.5毫米是可接受的。

[0058] 在图3a至3c中,主体2的顶表面或端表面与阴极1的电弧表面共面。

[0059] 在图3d中,主体2突出到阴极1的电弧表面之上。

[0060] 在图3e和3g至3i中,阴极1突出到主体2之外。

[0061] 在图3f中,主体2与阴极1的电弧表面的外缘共面。在朝向中心的径向方向上,阴极1的电弧表面的内部中心区域位于阴极1的电弧表面的外缘的下方。

[0062] 附图标记列表:

[0063] 1 阴极

[0064] 2 围绕阴极的主体

[0065] 3 点火系统

- [0066] 4 触发销
- [0067] 5 阳极
- [0068] 6 阳极中的狭缝
- [0069] 7 阳极孔
- [0070]  $H_b$  主体高度
- [0071]  $H_c$  阴极高度

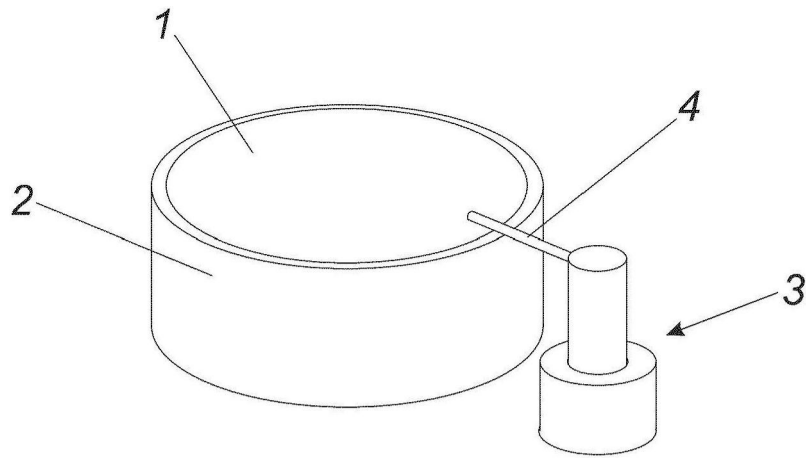


图1

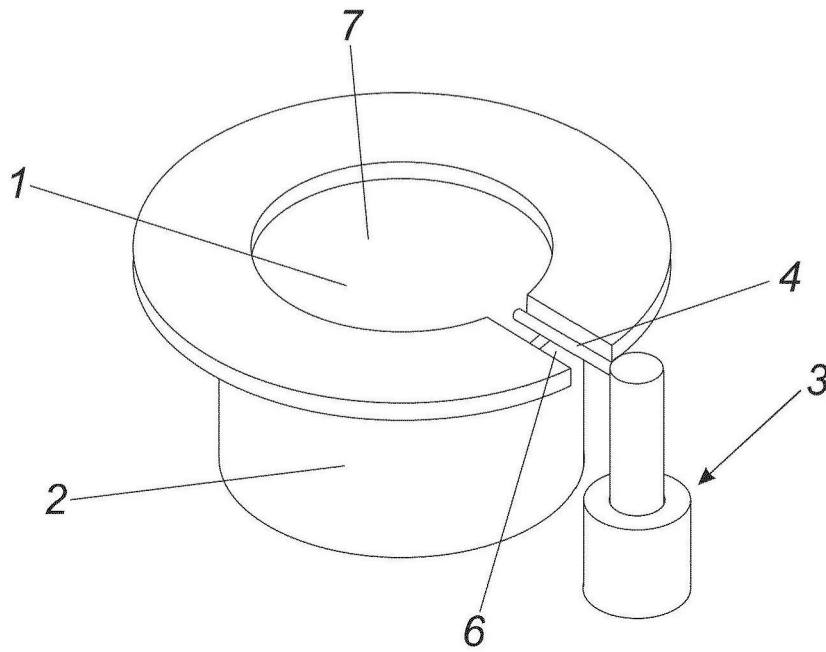


图2

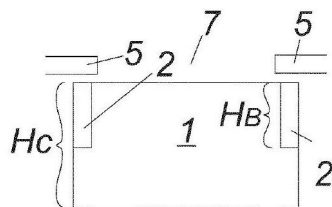


图3a

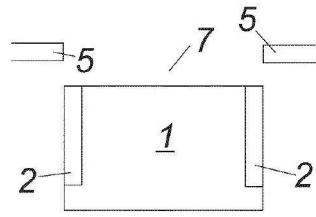


图3b

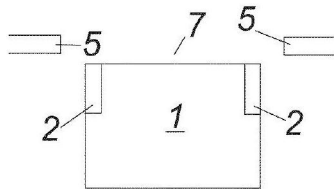


图3c

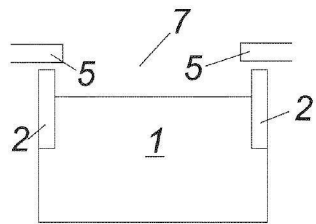


图3d

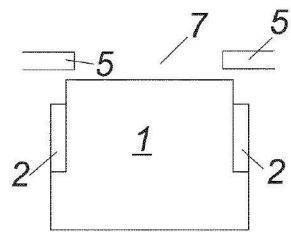


图3e

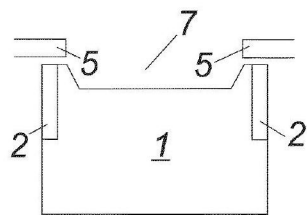


图3f

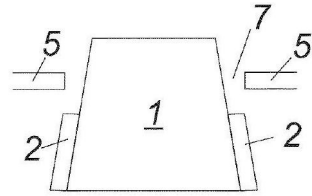


图3g

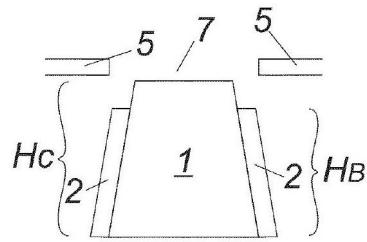


图3h

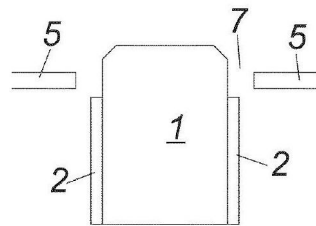


图3i