YAG 激光诱导放电复合毛化坑形貌研究

占　剑，　杨明江
(中国科学院力学研究所 ,北京　100080)

提要　从机理上讨论了激光诱导放电采用阴极性放电可改善放电坑形貌 ,并从实验上得出放电坑直径在不同放电介质下随放电脉宽的变化关系。当工件表面涂层为聚四氟乙烯时 ,研究了放电坑由单坑变为多坑形貌的原因是电脉冲后期通道中电子供给不足 ,电弧由聚集型过渡到扩散型 ,导致阳极斑点不稳定。

关键词　激光诱导放电；　形貌；　脉宽；　阳极斑点

Investigation on Crater Morphology by YAG laser Guiding Discharge Texturing

Zhan Jian ,　Yang Mingjiang
(*Institute of Mechanics , The Chinese Academy of Sciences , Beijing* 100080 , *China*)

Abstract　It is discussed that the breakdown voltage will be reduced and the texturing crater morphology will be improved in mechanism , when adopting cathodal discharge in processing. The relationship between diameter of craters and pulse-width of the discharge is reached. The reason of single crater changed into multi-craters is investigated that the electrons in the discharge chunnel are supplied shortage in the later discharge pulse.

Key words　Laser guiding discharge ;　morphology ;　pulse-width ;　anode spot

1　引言

毛化在工业上得到越来越多的应用和认可 ,为此 ,毛化技术和手段在国内外得到很大发展 ,如激光毛化和电火花毛化技术。激光诱导放电是利用激光在辊面所激起的等离子体羽作为通道开关来有效控制放电 ,从而达到毛化 - 强化的目的。它既可以利用激光的可控优点 ,又能充分利用放电能量的低成本 ,有很好的发展前景。

2　放电机理

放电击穿机理包括电子崩的产生、电子崩向流注的过渡和流注的发展过程[1]。因为加工中要求电极易于放电 ,这就必须考虑电极极性的选择 ,并且要求放电坑能量利用率高、强化层深而起到毛化 - 强化的作用 ,这就要求所得放电坑直径小。

2.1　极性的考虑

在自然放电时 ,与负极性放电相比 ,正极性放电的击穿电压要小很多[2]。激光诱导下的放电机理有所不同 ,对于正极性放电 ,激光等离子体中的空间正电荷 ,使纵深处的场强进一步减小 ,这样不利于向激光等离子通道中补充能量并转化为热电离通道 ,故放电电压下降低。而对于负极性放电 ,激光等离子体为高压电离波的传输提供通道 ,并且由于等离子体中的自由电子与原来的正空间电荷中和 ,使间隙深处的场强进一步加强。激光等离子体通道电场得到能量使通道电离进一步提高 ,并使电离波的衰减变小 ,因此能传输更远的距离最终导致间隙在较小电压下放电击穿 ,故负极性放电的击穿电压下降得很快 ,而正极性放电的击穿电压却下降很少。与自然放电不同 ,在激光诱导下 ,负极性更易放电击穿[3]。

由于火花通道为电弧等离子体[4] ,在放电过程中 ,阴极端不稳定 ,出现快速移动的阴极斑点 ,故阴极坑呈中坑主坑、周围许多小坑的多坑形貌 ;通道的阳极较稳定 ,阳极斑点移动速度小 ,可看成固定不变。故采用负极性放电 ,可增大加工的功率密度 ,提高能量的利用率。

2.2　电极材料的选择

电极对由所加工工件和工具电极组成 ,放电由工件电极尖端释放电子而引起电子崩 ,再向流注过

收稿日期 :2007-01-29

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

渡和流注的发展从而形成。若工具电极的逸出功大,则放电难,相反逸出功小则易于放电。而逸出功大小是由电极的材料决定。在本次实验中,工件为45号钢,工具电极为铸铁或1Cr18Ni9Ti。

2.3 压缩通道的考虑

压缩通道的考虑,抑制等离子体向外膨胀,增大功率密度,提高能量的利用率。

压缩通道的方法有两种:其一为减小激光聚焦光斑直径,利用扩束镜,扩大入射光直径,减小发散角,从而减小光斑尺寸,使得等离子体作用范围变小,从而使通道变窄。

由 $D = f \cdot \theta$,其中D为聚焦光斑直径,f为聚焦镜焦距,θ为高斯光束的发散角。而发散角θ与入射光直径大小成反比,利用扩束镜,可使入射光束直径增大β倍,则发散角θ就会减少β倍,在本次实验中,采用5倍扩束镜来减小光斑的发散角,进而来减小聚焦光斑直径。

另一种方法为在加工表面涂油或绝缘薄膜。由于油膜的限制,则只有沿着照射形成的通道发展的流注才可能最终形成放电通道,在通道形成后,由于油膜的密度和粘性系数较大,同时限制了通道的扩展。本实验中涂层采用聚四氟乙烯绝缘树脂,更能有效的箍缩放电通道,减小放电坑直径,增大能量利用率。

3 实验

3.1 按放电脉宽的不同,放电坑直径和深度的变化关系

在放电起始电压U(在本实验中即为低压充电电压)为450v和激光声光频率和放电频率f为1kHz保持不变下,改变放电脉宽τ从200μs到1500μs,测得放电坑直径,表1所示的直径为实际坑最长和最短轴的平均值。

表1 放电坑直径随放电脉宽的变化(工件涂油)

τ(μs)	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
D(μm)	550	625	675	625	650	625	725	675	675	675	675	700	700	825

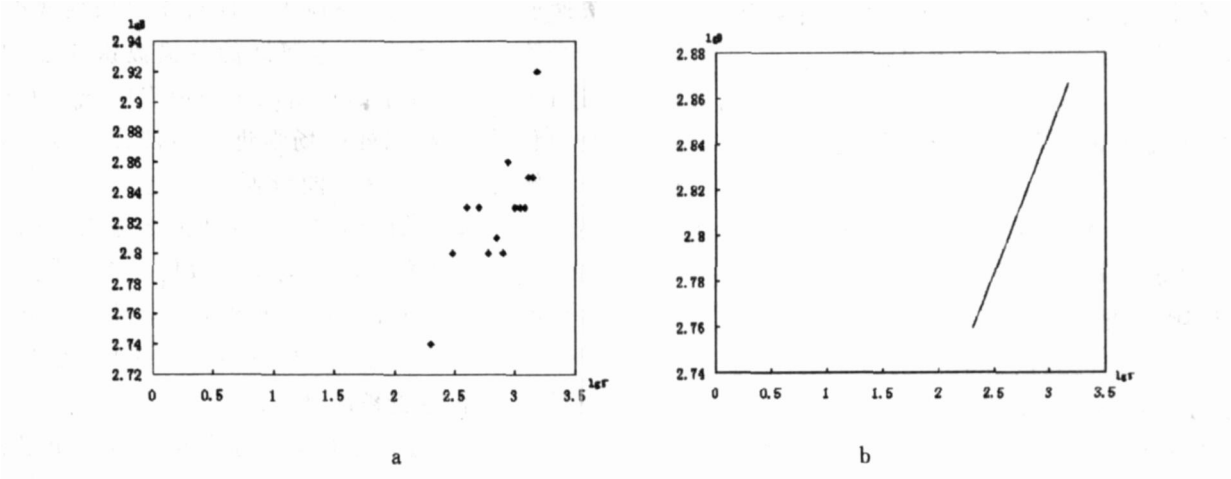


图1 涂油介质下放电坑直径随放电脉宽的变化(涂油后)

a为实验点,b为由最小二乘法拟合的直线

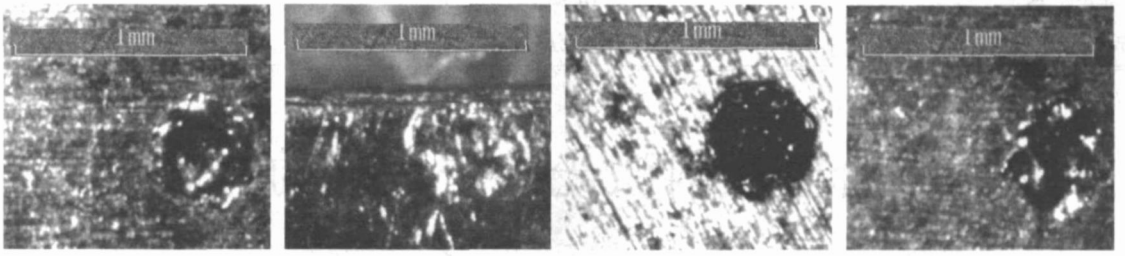
3.2 不同涂层下放点坑直径变化

表2 放电坑直径随放电脉宽的变化(工件涂层为聚四氟乙烯树脂)

τ(μs)	100	200	300	400	500	600	700	800	900
D(μm)	450	400	400	500	500	500	500	525	500

在放电起始电压U为450v,激光声光频率和放电频率f为1kHz和放电脉宽τ为100 - 900μs下,将表面涂油换为一层薄的聚四氟乙烯绝缘树脂时的放电坑形貌。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)τ=100μs (b)τ=400μs (c)τ=500μs (d)τ=900μs

图 2 放电介质为树脂随放电脉宽变化的激光诱导放电坑形貌

4 结果及分析

当工件表面涂油时,随着放电脉宽τ的增大,放电能量加大,放电坑直径逐渐增大,原因可能有两个:能量越大,径向热传导越广,坑径越大;另一方面,提高放电脉宽,阳极区电子供给不足,电弧由聚集型过渡到扩散型,坑径变大。并且两者的对数呈线性关系,用最小二乘法得关系式为 $\lg D = 0.125\lg\tau + 2.47$,如图 1(b)所示。

当工件表面涂层为聚四氟乙烯时,在脉宽τ从 100μs～300μs 时,坑径均在 400μm 左右,而在 τ = 400μs 时,坑直径突变为 500μm,当 τ ≥400μs,随着脉宽的增加,所形成的放电坑直径均在 500μm 左右,可见在此涂层下,放电坑直径随放电脉宽的变化影响不大,可有效箍缩放电通道,提高光电能量的利用率。在此试验中,电脉冲与光脉冲同步,电脉冲初期,由于激光等离子体通道中提供足够的电子,阳极斑点形成并稳定,随着电脉宽的延展,阳极区材料蒸发加大,熔融物增多,凸台明显,如图 2 中所形成的放电坑(a)和(b)边缘凸台较多,且呈明显的单坑形貌,所形成的放电坑(c)仍呈以单坑为主、周围有几个小坑的形貌,随着放电脉宽的进一步增加,电脉冲后期通道中电子供给不足,电弧由聚集型过渡到扩散型,导致阳极斑点不稳定,如所形成的放电坑(d)为明显的多坑结构。

5 结论

当工件表面涂油时,随着放电脉宽的增大,放电坑直径逐渐增大,并且两者的对数呈线性关系。

当工件表面涂层为聚四氟乙烯时,在脉宽τ从 100μs～300μs 时,坑径均在 400μm 左右,而在 τ = 400μs时,坑径突变为 500μm,τ ≥400μs,随着脉宽的增加,所形成的放电坑直径均在 500μm 左右。并且在放电脉宽τ = 400μs 前坑边缘凸台增多,之后凸台变少,并且由单坑形貌变为多坑形貌,能量利用率降低。

参考文献

[1] 杨津基编著,气体放电[M],科学出版社,1983,120 - 123

[2] H. A. 卡普卓夫,气体与真空中的电现象下册[M],南京工学院无线电系工业电子学教研组译,高等教育出版,1958,569

[3] 王巨丰,激光诱发间隙气体放电的试验研究[J],广西大学学报(自然科学版),第 25 卷第 2 期,2000.6

[4] 李正阳,激光诱导放电复合毛化坑形貌与电极损耗问题研究,中国科学院研究生院博士学位论文,2003.9,22 - 23

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net