文章编号 1674-2915(2009)03-0263-06

大功率 TEA CO_2 激光器旋转火花开关电极的烧蚀实验

李世明,李殿军,杨贵龙,邵春雷,郭汝海
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要:旋转火花开关系统用于控制 TEA CO_2 激光器脉冲放电工作过程,是关系到激光器能否实现大面积均匀辉光放电的核心技术之一。介绍了一种旋转开关系统的设计、组成和工作原理,并对影响开关寿命的放电电极烧蚀问题进行了实验研究。研究结果表明,选择比热、密度和熔点高的电极材料可减少电极烧蚀。通过向电极间隙吹气以及采用高效的气体循环冷却系统等措施,可有效地提高旋转火花开关电极的使用寿命。应用结果显示,设计的旋转火花开关系统可在峰值电流 300 kA,工作电压 38 kV 下以 500 Hz 重复频率工作,稳定脉冲放电工作寿命达到了 10^7 次,满足 TEA CO_2 激光器的工作寿命要求。

关 键 词:TEA CO_2 激光器;旋转火花开关;电极烧蚀;使用寿命;钨铜
中图分类号:TN248.22 **文献标识码**:A

Erosion experiment of rotated spark switching system of high-power TEA CO_2 laser

LI Shi-ming, LI Dian-jun, YANG Gui-long, SHAO Chun-lei, GUO Ru-hai

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)

Abstract: The rotated spark switching system for controlling the pulsed discharge process in a TEA CO_2 laser is one of the key components for the large area uniform glow discharge between two laser discharged electrodes, which determines the main technical specifications of the TEA CO_2 laser directly. In this paper, the design, constructing and working principles of a rotated spark switching system are introduced, and the corresponding experimental studies on the discharged electrode erosion related with the operating life of the switch are performed. The results suggest that to choose electrode materials with high specific heat, density and melting point could reduce the erosion of electrodes, and to blow gas to the electrode gaps and construct a high effective gas circle cooling system could improve the operating life of the switching electrodes. The applied result show that the rotated spark switching system designed here can work at a repetition frequency of 500 Hz when using a peak current of 300 kA and a work voltage of 39 kV, and its work life of stable pulsed discharge has reached 10^7 times. These results prove that the spark switching system meets the requirement of high power

收稿日期:2009-03-11;**修订日期**:2009-05-13

TEA CO_2 lasers.

Key words: TEA CO_2 laser; rotated spark switch; electrode erosion; operating life; CuW

1 引 言

激光推进、激光照明、空间碎片探测、太赫兹CO_2激光研制以及强激光与物质相互作用研究等技术领域[1~4],对大功率脉冲 TEA CO_2激光器的输出功率、重复频率和稳定工作寿命等不断提出新的要求。目前,激光输出功率超过几十千瓦、脉冲重复频率达数百赫兹的大功率脉冲 TEA CO_2激光器的技术已比较成熟。TEA CO_2激光器是一种以大面积均匀辉光放电产生激光输出的增益系统。然而,一旦在产生激光输出的主放电电极之间发生辉光放电向弧光放电的转移,气体放电的负阻特性将会导致放电电流在瞬间内剧烈增加,严重的弧光放电不仅阻止了激光的振荡,而且会损坏主放电电极和放电回路的电子元器件。对气体放电的理论和实验研究已经证明:当气体在辉光放电状态时,由辉光放电向弧光放电转移需要一定的时间,因此,短的脉冲放电激励时间可以避免弧光的发生,由此促进快速放电技术在 TEA CO_2激光器中的应用[5]。为了实现和控制脉冲的快速放电过程,各种开关器件便成为激光器的核心技术之一。

大功率 TEA CO_2激光器主要应用两种开关系统,一种是闸流管,另一种是火花开关。大功率闸流管不仅制造技术和工艺复杂、造价高、耐电流冲击性差、维护比较复杂,工作前还需要一定的预热时间。同闸流管相比,火花开关的主要优点是能够承受很高的电压和电流、放电速度快、耐冲击能力强、可靠性高、抗干扰能力强、价格相对低廉,可以在超大功率条件下使用,但是火花开关的缺点也是显而易见的,就是如何突破使用寿命问题。一般来讲,在大功率使用时火花开关寿命很难达到10^6次[6~8]。为解决火花开关系统使用寿命的问题,本文介绍了作者研制的旋转火花开关系统。该系统采用特殊的设计和对开关电极材料的精心选择,使开关使用寿命达到10^7的水平。

2 旋转开关系统结构与工作原理

常见的火花开关电极由一对球形电极加一触发电极构成,触发电极一般为针状或薄的圆盘型,以有机玻璃或尼龙绝缘支撑。触发电极以及球形电极在瞬间大电流放电过程中极易烧蚀,特别是应用于高功率高重复频率 TEA CO_2激光器时更是如此,这一特点严重地影响了激光器的工作性能,是制约激光器技术发展的技术瓶颈。为此,本文设计了一种可在高功率高重复频率条件下工作的旋转火花开关系统,如图1所示。旋转火花开关

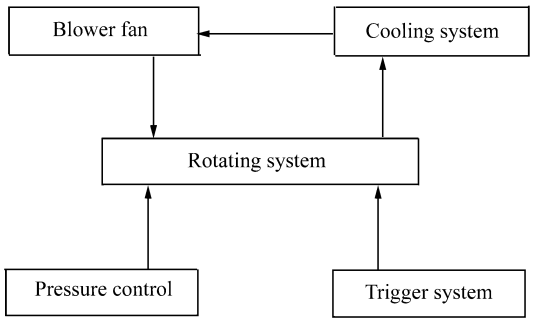


图1 旋转火花开关系统

Fig. 1 Rotated spark switch system

系统由高压触发系统、旋转火花开关、冷却系统、高速风机以及压力控制单元组成。高速风机和冷却系统通过管道与旋转火花开关组成一个密闭的气体循环冷却系统。该系统内充工业氮气作为工作气体介质,压力控制单元将系统气体压力控制在一定的压力范围内。整个开关的击穿工作电压由密闭气体循环冷却系统中的充气压力、气体流速、气体种类、电极材料、电极间距、电极形状以及高压触发脉冲等参数共同确定。旋转火花开关系统的核心为放电电极,如图2所示,主要由高压电极、接地电极和旋转的触发电极组成。高压电极和接地电极通过触发电极构成上下两个放电间隙,为满足不同条件下的放电要求,上下两个放电间隙可在适当的范围内调整。

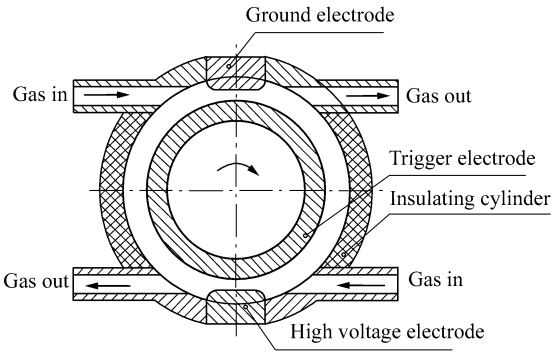


图 2　开关电极结构

Fig. 2　Discharged electrodes of the switch

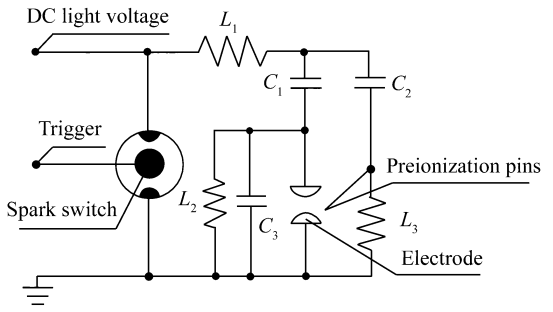


图 3　TEA CO_2 激光器电路原理图

Fig. 3　Circuit sketch of TEA CO_2 laser

火花开关击穿的机理是流注理论,其工作过程实际上就是实现气体脉冲放电和绝缘恢复的过程,也是带电粒子产生和消失的过程。对于脉冲方式工作的 TEA CO_2 激光器而言,要求激励的脉冲电流上升沿陡,脉宽窄,特别是在高重复频率放电时要求在两个任意的脉冲之间不能产生连弧现象。由此带来的问题是开关的电极必须在数万伏电压条件下和极短的时间内承受大电流冲击,而且要在百纳秒量级的时间内达到灭弧,完成一个放电周期。这样苛刻的条件意味着电极开关电极不仅能够承受高达 1 kMW 的瞬间峰值功率,而且承受的平均功率也达到了数百千瓦的水平。高电压大电流放电产生的等离子体将在电极间堆积大量的热能需要及时传导出去,因此,本开关采用经过有效冷却的高速气流带走热能,而高速气流在通过放电间隙的同时也起到了灭弧的作用。为达到有效地冷却和灭弧的效果,上下电极间隙的形状和尺寸以及流道的设计不仅要满足气体放电的要求,还必须符合流体动力学原理。

旋转火花开关在整个脉冲 TEA CO_2 激光器放电回路中的作用参见图 3。由图 3 可见,当脉冲 TEA CO_2 激光器工作时,触发器开始产生的第一个高压尖峰脉冲施加到中间的触发电极,在该触发脉冲作用下,开关的上下电极间隙中的气体被迅速击穿形成短路。在这个短路的瞬间,放电回路中电容的储能通过开关电极通道输送到激光器的一排预电离针和一对主放电电极上,由于预电离针的击穿电压较低,预电离针首先通过主接地电极在一对主放电电极之间产生紫外预电离,预电离作用导致主电极间的气体电离电位下降从而实现主放电电极之间产生均匀的辉光放电过程。因此,在触发脉冲的控制下,激光器即可以单脉冲

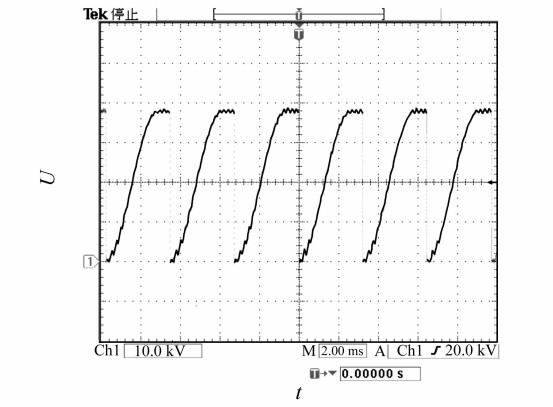


图 4　旋转开关 300 Hz 工作时充放电波形

Fig. 4　Charge and discharge voltage waveform of rotated switch in 300 Hz

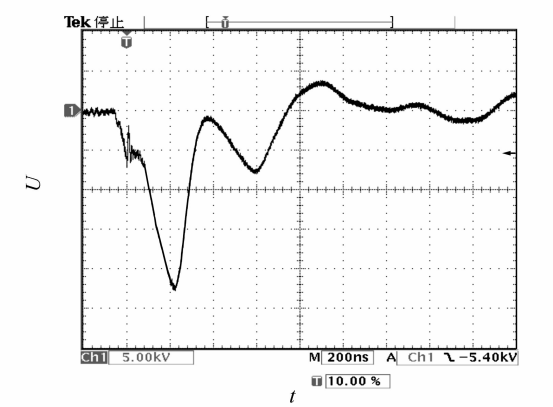


图 5　开关电极的脉冲放电波形

Fig. 5　Discharge voltage waveform of the switch

放电工作,也可以按照触发器输出的频率实现重复脉冲运转。经过反复的试验和修正,旋转火花开关系统能够在峰值电流 300 kA、工作电压 38 kV 下以 500 Hz 重复频率连续工作,完全满足激光器对于开关系统的工作要求。到目前为止,该开关累计工作寿命已经到了 10^7 次,而且目前仍然处在良好的正常工作状态中。图 4 表示的是旋转火花开关在 38 kV 和 300 Hz 条件下的充放电电压波形,由图可见,整个充放电非常均匀稳定,没有连弧现象。图 5 表示的是旋转开关的瞬间放电过程,放电的时间约为 200 ns 左右,完全满足激光器对于开关器件的快速导通与关断要求。

3 开关电极材料选择与试验研究

旋转开关工作时,电极间隙间电弧的高温使电极发生强烈的物理、化学变化。这些变化会引起电极的烧蚀,改变电极间隙的距离,从而会影响旋转开关的稳定工作并减少旋转开关的使用寿命。因此,正确选择电极材料是十分重要的。基于电弧侵蚀的考虑,电极材料选择的原则是选择机械性能和力学性能好的金属或合金材料。理想的电极材料必须满足低电阻率、高导热率、熔点和沸点高、起弧最低电流和电压高、电子逸出功高并耐电弧烧蚀,但没有一种材料能完全符合这些要求。大量的研究与实验表明[9~12]:采用粉末冶金溶渗法制备的钨铜材料是火花开关电极比较好的选择。钨铜合金综合了金属钨和铜的优点,其中钨熔点高(钨熔点为3 410 ℃)、密度大(钨密度为 19.34 g/cm^3),而铜导电导热性能优越。钨铜合金微观组织均匀、密度大、强度高、耐高温电弧烧蚀并且导电导热性能好,广泛应用于高压开关设备中。通过对各种牌号钨铜材料的比对试验,综合各方面因素,最后选择牌号为 CuW80 钨铜合金作为旋转火花开关的电极材料。该牌号电极化学性能与物理指标如表 1 所示。

表 1 钨铜材料性能

Table 1 Performance of CuW

Label	Mass percent of composition/%			Density ≥ /(g·cm^{-3})	Resistivity ≥ /(μΩ·cm)	Conductivity ≥ /ICAS%	Hardness HBS ≥	Bending ≥ /MPa
	WCu80	impurity ≤	tungsten					
WCu80	20 ± 2	0.5	surplus	15.15	5.0	34	220	736

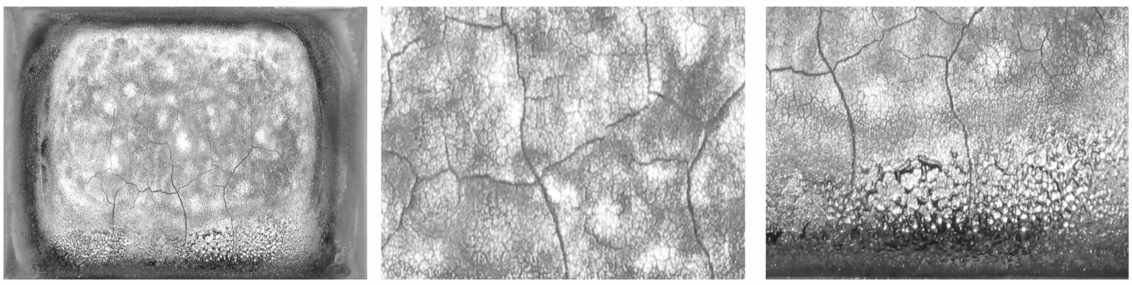
为提高旋转开关电极寿命,高压电极和接地电极外形设计为长方体,长 50 mm,宽 30 mm。放电面四周均倒圆角(R8),以避免出现场强集中,保证旋转开关工作的稳定性。触发电极外形为圆柱形(外径 ϕ 120 mm),外圆两边棱倒圆角(R8)。触发电极由电机驱动绕顺时针方向旋转,增大了触发电极的放电面积,使得放电产生的热量分散在触发电极外圆柱面上,有利于减轻电极烧蚀,延长了触发电极的使用寿命。

4 实验结果分析

实验装置如图 3 所示,旋转火花开关接入大功率脉冲 TEA CO_2 激光器放电电路中,旋转火花开关击穿时,高温脉冲电弧将作用于电极表面并转移其能量,由于脉冲作用时间短、热传导速度慢、电极表面温度迅速上升,因此,开关放电过程可以看作是瞬态热源对电极的一个加热过程,其结果是使电极表面局部区域的金属材料瞬时熔化和汽化,因过程十分短促而喷爆出来,并产生很大反向冲击力,使那些在表面张力作用下尚留在熔潭中的液态金属挤出或溅出,结果在电极表面形成一放电凹坑,而残留在小坑底部的熔化材料冷凝成凝固层,在小坑边缘形成突起。

图 6 为旋转火花开关接地电极放电 10^6 次后电极型面照片。从图 6(a)电极型面烧蚀情况可以明显看出放电后的电极表面比较粗糙,电极表面布满了脉冲放电后留下直径约为 3 ~ 4 mm 中心呈白色的圆形烧蚀痕迹,放大后可看见圆形烧蚀痕迹内有很多细小突起颗粒,放电烧蚀痕迹在电极表面上分布均匀。由于烧蚀位置不固定,是随机分布的,故电极间电场分布也是均匀的。图 6(b)是图 6(a)的放大照片,用肉眼可以看到电极表面布有许多微小龟裂纹和几条较大的裂

纹。大裂纹从电极中间开始产生,一直延伸到电极的下边缘,这是由于在向电极间隙吹气的作用下,电极上边缘表面热量较下边缘表面更易被气流冷却。电极表面与氮气在电弧的作用下形成的氮化物或氧化物具有脆性,附着在电极的边缘(如图 6(c))并随着电极表面烧蚀的加深而逐渐脱落,进入气体循环系统中的气体过滤器中。图 7 为触发电极表面烧蚀情况。从电极表面上可看到放电烧蚀痕迹在电极圆柱表面分布均匀,没有肉眼可见的裂纹,较大的放电面积显著提高了触发电极的抗烧蚀能力,其烧蚀情况明显好于高压电极和接地电极。



(a) 电极在放电10^6次后的烧蚀形貌
(a)Appearance of electrode ablation after discharge 10^6 times

(b) 电极表面裂纹
(b) Surface crackle of electrode

(c) 电极边缘附着物
(c) Adhesive substance of electrode edge

图 6　旋转火花开关接地电极放电 10^6次后的型面照片

Fig. 6　Appearance of grounded electrode for rotation spark switching after discharge 10^6 times

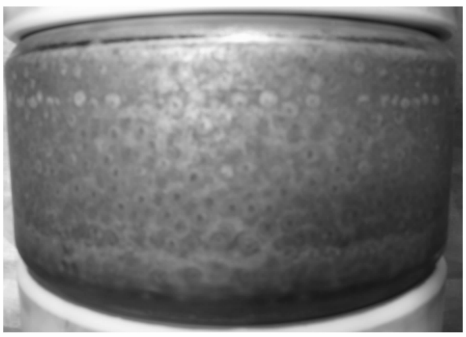


图 7　触发电极在放电 10^6 次后的烧蚀形貌

Fig. 7　Appearance of trigger electrode ablation after discharge 10^6 times

电极表面裂纹表明,开关被击穿后较大的电弧能量作用于电极表面时,电极因受强烈热膨胀而产生一种自弧根指向周围的扩张力;电弧熄灭时电极材料因熔化金属的凝固又会产生一种从周围指向弧根的收缩力。这种剧烈和重复的扩张与收缩力如超过材料本身的内聚力便产生热应力裂纹。而局部过热还会使电极材料晶体结构变化,引起体积变化,这也是导致电极材料开裂的重要原因。通过增大放电电极几何尺寸以及加强对放电电极的冷却,可以减小电极的裂纹,提高电极的抗烧蚀能力。实验中发现,电极表面微小裂纹(如图 6)对电极放电没有明显影响。

5　结　论

通过对实验结果的分析,可以得出以下结论:

1)在大功率脉冲 TEA CO_2激光器放电实验中,旋转火花开关完全满足了激光器对开关的高功率、高重频、快放电、长寿命的要求。

2)为了减少电极烧蚀,电极材料应选择比热、密度、熔点高的电极材料。

3)通过旋转触发电极、向电极间隙吹气以及采用高效的气体循环冷却系统等措施,使开关寿命 $>10^7$次,有效地解决了旋转开关电极寿命较低这一影响旋转开关寿命的瓶颈问题。

参考文献:

[1]　MYRABO L N. Brief history of the light craft technology demonstrator(LTD) project[C]. *AIP Conf. Proc.*,2003,664:

79-60.

[2] BOHN W L,SCHALL W O. Laser propulsion activities in Germany[C]. *AIP Conf. Proc.*,2003,664:49-94.

[3] HASSON V. Review of design concepts and diagnostics for 100 kW-class repetitive pulsed CO_2 laser[J]. *SPIE*,2003,5120:717-730.

[4] 黄磊,朱海红,程祖海,等. 用于激光推进的球隙火花开关放电特性的研究[J]. 激光推进技术,2007,28(5):561-565.
HUANG L,ZHU H H,CHENG Z H,*et al*.. Investigation of discharge characteristics of the high-voltage trigatron switch for laser propulsion[J]. *J. Propulsion Technol.*,2007,28(5):561-565. (in Chinese)

[5] G. 贝克菲. 激光等离子体原理[M]. 庄国良,褚成,译. 上海:上海科学技术出版社,1981:185-186.
BEKEFI G. *Principles of Laser Plasmas*[M]. ZHUANG G L,CHU CH,Trans. Shanghai:Shanghai Technology Press,1981:185-186. (in Chinese)

[6] CHU E,GRAHAM J,LOPEZ E,*et al*.. Rep-rated high, coulomb rail switch development[C]. 7*th IEEE International Pulsed Power Conference*,Monterey,California,1989:87-89.

[7] BHASAVANICH D,HITCHCOCK S S,CREELY P M,*et al*.. Development of a compact high-energy spark gap switch and trigger generator system[C]. 8*th IEEE International Pulsed Power Conference*,Monterey,California,1991:343-345.

[8] 何孟兵, 贺臣, 李劲. 气体火花开关的电极的烧蚀研究[J]. 高电压技术,2004,30(10):54-55.
HE M B,HE CH,LI J. Research on erosion of gas spark switch electrodes[J]. *High Voltage Eng.*,2004,30(10):54-55. (in Chinese)

[9] 罗敏,汪金生,常安碧,等. 高功率气体火花开关电极烧蚀机理研究[J]. 强激光与粒子束,2004,16(6):781-786.
LUO M,WANG J SH,CHANG A B,*et al*.. Study on mechanism of electrode erosion of high-power gas spark gap switch [J]. *High Power Lasers and Particle Beams*,2004,16(6):781-786. (in Chinese)

[10] 李殿军,杨贵龙. TEA CO_2激光器主放电延迟时间对效率的影响[J]. 光学 精密工程,2006,14(5):807-810.
LI D J,YANG G L. Impact of main discharge delay time on optoelectronic conversion efficiency in TEA CO_2 laser[J]. *Opt. Precision Eng.*,2006,14(5):807-810. (in Chinese)

[11] 白峰,邱毓昌,姜惟. 气体火花开关电极材料的冲击电流侵蚀特性[J]. 电工技术学报,2001,16(4):76-80.
BAI F,QIU Y CH,JIANG W. Erosion characteristics of electrodes used for gas spark gap[J]. *J. Electrotechnology*,2001,16(4):76-80. (in Chinese)

[12] 陈维青,曾正中,邹丽丽,等. 100 kA 微秒级气体火花开关电极材料熔蚀研究[J]. 强激光与粒子束,2004,16(1):98-100.
CHEN W Q,ZENG ZH ZH,ZOU L L,*et al*.. Selection of gas spark gaps electrode material under microsecond 100 kA current pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2004,16(1):98-100. (in Chinese)

作者简介:李世明(1964—),男,吉林长春人,高级实验师,主要从事气体激光器的研究。E-mail:6158@sohu.com