

# 球状闪电与等离子体的约束

陆文庆

(沈阳工业学院理学院 辽宁 110016)

## 一、雷电与球状闪电

人们知道在雷阵雨天气经常会出现雷电,这是由于云层间或云地间的电荷瞬间放电造成的。雷电往往给人们恐怖威严之感,一方面它会给自然界和人类环境造成一定的破坏,有时会毁坏建筑、引起火灾甚至造成人员伤亡,自古以来人们就渴望对它的本质进行认识,如今现代科技“防雷”已成为应用于许多领域的重要技术;另一方面雷电促进了降雨和植物生长,对有机物的合成及生命的起源起着特殊的作用,它也促进了人类对电现象本质的认识。雷雨云是所有云层中最厚的,其云层厚度可达 10 公里,由于云层内部重力浮力和空气对流的作用,云中大量带有正负电荷的微粒分离,在云中形成若干个正负电荷中心。随着电场的增大,就会产生云层间和云地间的放电,使电介质 - 空气击穿,随即产生强大的电流,电流经过的通道产生高温等离子体,并将等离子体激发至高能态放出强光,强电流传导通道就形成闪电,随着高温而产生的高压等离子体因急剧膨胀而消散,产生强烈的纵波向周围扩散造成巨大的雷声,这就是雷电产生的机理。

枝状闪电较为平常,而奇特的球状闪电(以下简称球闪)则很少见,从目击者的描述来看球闪有许多奇异的特征。球闪一般为球状,也有环状、柱状的,

从拳头到脸盆大小的都有;往往呈橙黄色,像气球一样飘忽不定,但能逆风飘移,常伴有嘶嘶的响声;有的能量非常大,有热辐射效应,能灼伤人体、破坏建筑或引起燃烧,少部分能量很小,没有热感,像冷的物体一样;常有电磁效应,它喜欢沿着导体运动,能使电器设备烧毁短路,《梦溪笔谈》中描写它使宝刀融化而刀鞘却完好无损。

## 二、球闪机理的物理解释

球闪既神秘又令人费解,目前有化学燃烧论、核反应论、射频论、等离子论等各种解释,大多数球闪有较强的电磁效应,如仅使非金属中的金属熔化,容易使其所经之处停电,这说明球闪是等离子体的观点更为合理些。由于这种现象罕见,目前实验难以进行研究验证,这些解释也只能是一些假说。在此我们提出球闪形成机制的等离子体自我约束假说,并给出其过程的物理图像,以解释球闪

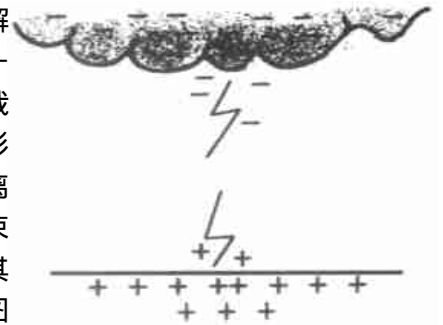


图1 云地感应电荷产生强电场即将引起放电的现象,也想探讨一种对等离子约束的新方法。下面

成果是在试样表面涂上各种不同的液体涂层,涂层可增强对光能量的吸收。

## 激光超声信号检测灵敏度问题

从样品表面进入干涉仪的光通量越多,检测的信噪比越好。在实验室里,检测样品表面被高度抛光,以尽可能加大反射光的接收量。然而在工作现场,表面会发生漫反射或很脏,这对许多领域的推广应用是临界的,且大多数激光超声波系统的灵敏度在数量级上比常规超声无损检测系统要差些,如果激光超声信号的检测灵敏度特别高,反过来可以降低对激发超声信号的激光功率的要求,由于换能器检测的局限性,不太适合检测激光超声信号。针对这种情况,笔者建议应进一步发展光学检测法,光学

检测法特别适合于窄脉冲激光产生的宽频带超声检测,因此提高光学检测法的灵敏度是目前发展趋势之一。

若上述两个问题得到解决,激光超声技术将得到更广泛的应用。

由于激光超声无损检测技术具有非接触、可远距离测量、高的时间分辨率及空间分辨率等一系列优点,特别适用于恶劣环境条件下的在线检测、快速超声扫描成像等一系列实际场合。虽然目前存在着一些技术难题,但是如果由激光能量到超声能量的转换频率以及激光超声信号检测灵敏度进一步提高,激光超声技术的应用将更加广泛,激光超声无损检测技术会有更加广阔的前景。

我们就运用电磁学理论结合等离子体特点分析球闪形成的原因。

雷雨天气中积雨云层底部一般会积累大量的负电荷,并在地面感应出等量的正电荷,因此形成强大的电场,当电场强度达到能电离空气中的大量分子时,空气就不再是绝缘体,放电就要产生(如图1),地面和云层分别伸出带有正负电荷的火舌迅速汇合,在电火舌交汇之处产生强大的放电电流。根据安培环路定律该强放电电流必然同时产生强大的磁场。我们根据麦克斯韦方程来定量分析

$$\mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I + \iint \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s}$$

设闪电电流为  $I_{\text{闪}}$ ,闪电通道半径为  $r$ ,在此把闪电电流定义为无限长直线电流,假设电流在闪道内均匀分布,闪道附近电场变化所激发的磁场相对电流所激发的磁场可以忽略,闪电发生时主闪放电可达1万~10万安培,闪道半径一般为1~5厘米,闪电通道边缘的磁场强度最大,由  $B_m = \frac{\mu I_{\text{闪}}}{2r}$  的关系式可知,最大磁感应强度为2000~4000高斯,闪道内的磁场是内弱外强的(如图2),起到对等离子体的箍缩作用。

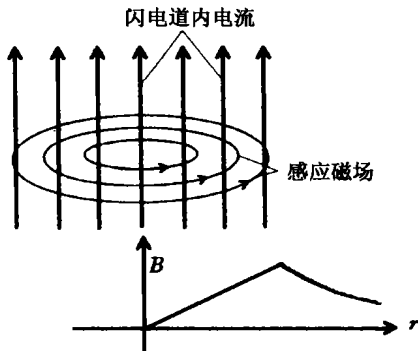


图2 闪电电流产生感应磁场

强大的电流使得闪道内的温度可达20000,必然使闪道内的空气形成腊肠等离子体,由于电火舌交汇之处放电电流最为强大,此处的腊肠等离子体的截面最宽(如图3),根据等离子体的腊肠截面效应,腊肠截面较窄的等离子体容易消散,在火舌交汇点的等离子体最易存留。同闪电电流同时产生的磁场先于等离子体存在,磁

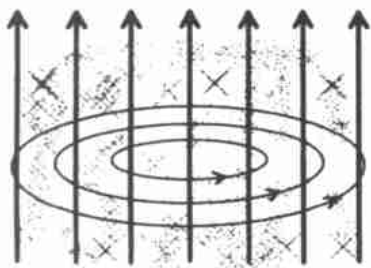


图3 闪电电流通道内产生高温等离子体

场就固化在等离子体中。由于闪电电流是瞬间的放电电流,放电后电流必然很快消失,这时如果没有等离子体,其周围的磁场也必然同时消失,但由于等离子体的电磁特性,即便原磁场消失等离子体内也会产生环形感应电流,以保持原来体内的磁场分布(如图4),感应电流相当于环形螺线管电流,在内部产生磁场  $B = \mu nI = \mu \sum I$ ,此磁场应等于原磁场,  $\sum I$  为所有环形感应电流之和,由最大感应电流总和的数量关系式  $\sum I = B_m / \mu = I_{\text{闪}} / 2r$ ,可知球闪的内部电流最大可达16万~32万安培!

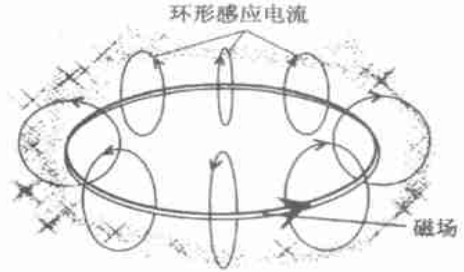


图4 在等离子体内产生感应电流以保持原来的磁场

由此可见等离子体内的环形感应电流总和可能十分强大,每个环形电流对其流经的等离子体都有箍缩作用,相邻的环形电流也有相互吸引作用,相当于两个N极S极相邻的小磁针(如图5),产生对整体的箍缩作用,箍缩力显然与感应电流强度成正比关系,由于感应电流强度很大,箍缩力

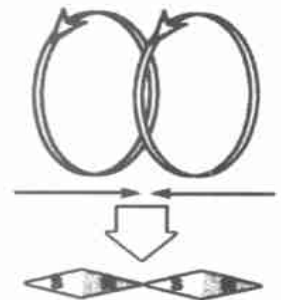


图5 相邻的电流环间相互吸引相当于两个小磁针



图6 形成天然的球状磁瓶式约束体,看似火球

就十分巨大,足以同等离子体内的高温膨胀力相平衡,形成天然的球状磁瓶式的等离子约束体(如图6),一般来说球闪直径应为闪道直径的2倍,当箍缩力较大时球闪体积就会变小些,当内部膨胀力较大时,球闪的体积就会变大些。由于感应电流的自然减弱,其对等离子体的箍缩力也会降低,但由于热辐射等离子体的压强也会随温度降低而下降,球闪在一定时间内是能够维持动态平衡的,因而体积不会发生明显变化,因此由高温等离子体组成的球闪可存在10秒钟甚至更长时间。

### 三、球闪的特点及解释

球闪很轻并有磁场,根据楞次定律,当有物体接近它时,它易使该物体产生有排斥力的微弱感应电流,当有物体离它远去时,它易使物体产生有吸引力的微弱感应电流,因此球闪有排斥同实物物体接触的能力。如果目击者试图接近它,它会躲避;如果目击者想躲避它,它还会跟随而来,有时球闪也会沿着导体或烟道飞行,它的磁场会使其临近的金属造成涡型感应电流而使金属融化,它的磁场可以随着等离子体伸缩而伸缩,有时它可能安然挤过窄缝。球闪是电磁体,飘忽不定,在电磁场的作用下可能逆风飘移,能够严重干扰和破坏电器设备,有时会造成导线融化、电路短路,导致严重的停电事故。球闪表面的电流同外部空气摩擦或轻微放电而产生嘶嘶的声音,其体内感应电流也能长时间激发等离子体发光,由于感应电流分散和自耗,其激发等离子体发光已不如放电发光的强度大,一般球闪呈现不十分耀眼的橙黄色。有的球闪内部等离子体的温度较低,较弱的电流就能约束其形成球形闪电,这种球闪能量低属于冷球闪。

当然由于热辐射和焦耳热最终将使球闪熄灭,随着感应电流的减弱其磁场也会减弱,其排斥同其他物体接触的能力就会降低,如果球闪带有一定的净电荷,它就同周围形成电势差,就有可能因同周围物体放电而解体,由于感应电流约束解除,内部的高温等离子体喷出而伴随有较大的爆裂声。如果球闪净电荷为零且内部温度较低,它就可能悄悄地消逝。从以上论述可以看出,等离子理论是能够解释球闪的产生和其行为表现特性,在高压设备尤其是高压开关,有时也会放电产生电火球,这同球闪产生的机制是一样的,只不过由于电压和电流没有雷电那么强大,产生的电火球一般都较小,存在寿命也较短,但一般寿命也可达1秒钟。

有关球状闪电之谜,最近新西兰坎特伯雷大学科学家阿伯拉翰森和戴尼斯提出一种解释。他们认为,球形闪电是硅燃烧发光所致。该理论认为,当土壤被雷电袭击后,会向大气释放含有硅的纳米微粒,来自雷电袭击的能量以化学能的形式储藏在这些纳米微粒中,当达到一定高温时,这些微粒就会氧化并释放能量。研究人员将土壤样品暴露于跟闪电过程一样的条件下,便会产生含有硅的纳米微粒,其被氧化的速率与球形闪电平均10秒的生命周期是一致的。但据1999年国际等离子科学会议的报告,有科学家用火箭人工在高空中诱发闪电,并多次发现球状闪电,这种现象较容易用本文的观点来解释,而用新西兰科学家的观点就很难解释。

由于火球产生的条件并不完全相同,所表现的性质也有差异,因此存在着两种甚至多种产生机制的可能性。更完善的、科学的球状闪电的产生和稳定机制理论,还有待于进一步的实验和理论研究。最可靠的方法是用实验模拟多种可能产生球状闪电的条件,探索球闪产生的机理和方法。

### 四、对提高等离子体寿命的新设想

如果以上的假说成立,我们就可以根据球闪机理,探索一种对高温等离子约束的新方法,这就是用强放电电流制造和约束等离子体的方法。这要求有超强的瞬间电流,放电正负电极间的距离足够大(如图7),接通开关高压电源会引起主反应放电,断开开关由电感线圈产生的瞬间感应高电压放电,通过反应物出入阀和热交换通道调解主反应室的条件,反应物可以是空气或氢气。如果这种方法能够实现,将能够大大提高高温等离子体的约束时间,从而推进可控核聚变反应的研究。

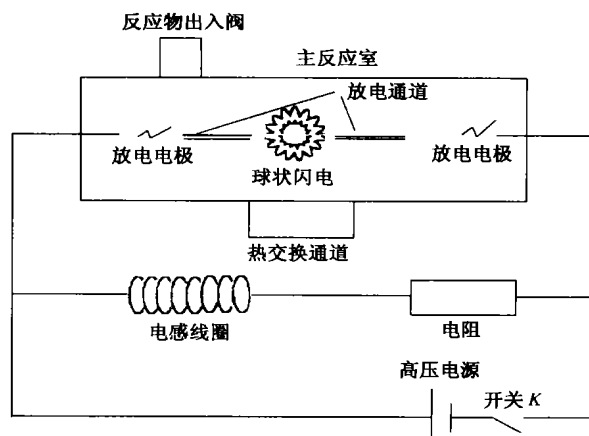


图7 球状闪电发生装置设计图