

电晕放电与介质阻挡放电等离子体简介

尹淑慧

等离子体(Plasma)是在宏观尺度内维持电中性的非凝聚系统,又被称为物质第四态。Plasma 源于希腊语 μ ,原意是能够成型的东西,生物学上作原生质讲。1927年,朗缪尔(I. Langmuir)最先引入等离子体(Plasma)这个术语,并在两年后与唐克斯(L. Tonks)一起给等离子体赋予电离气体的涵义。其主要特征是:体系内除了单个分子间的弹性碰撞外,还发生大量的使分子处于激发量子态的非弹性碰撞;粒子间存在长程库仑力,导致带电粒子群的集体效应;等离子体的运动与电磁场的运动紧密耦合。按其体系温度,等离子体可分为高温等离子体和低温等离子体两大类。通常所涉及的等离子体属低温等离子体范畴。

低温等离子体是指在实验室和工业设备中通过气体放电或高温燃烧而产生的、温度低于几十万度的部分电离气体。它一般是弱电离、多成分的,并和其他物质有强烈的相互作用。低温等离子体按物质性质分为三类,热等离子体(或近局域热力学平衡等离子体)、冷等离子体(非平衡等离子体)、燃烧等离子体。实验室和工业生产中一般所涉及的属于冷等离子体范畴。非平衡等离子体通常是对低气压下的稀薄气体采用高频、微波、激光、辉光放电或对常压下气体采用电晕放电所产生。体系中电子温度 T_e 远远大于离子温度 T_i , T_i 约为室温到几百度。

低温等离子体主要是由气体放电产生。根据放电产生的机理、气体的压强范围、电源性质,以及电极的几何形状,气体放电等离子体主要分为以下几种形式:辉光放电、电晕放电、介质阻挡放电、射频放电、微波放电。基于减少前期投入、操作方便、降低能源消耗的考虑,常温常压是理想的操作条件,而能在此条件下产生低温等离子体的只有电晕放电和介质阻挡放电两种形式。

电晕放电通常是用直流高电压来启动,并将高电压加载在曲率半径很小的电极(如针状电极或细线状电极)上。当针状电极(或细线状电极)上的电位升高到一定程度时,也就是电荷累积到一定浓度时,针尖附近的强电场就能使其周围的空气产生电离,从而产生局部放电现象,甚至产生晕光。我们能

看到均匀稳定的发光体笼罩在电极周围,这就是电晕放电。

在电晕放电中,电极的几何构型起着关键作用。电场的均匀性把主要的电离过程局限于局部电场很高的电极附近,特别是发生在曲率半径很小的电极附近或大或小的薄层中,气体的发光也多发生在这个区域里,这个区域称为电离区域或电晕层。在这个区域之外,由于电场弱、不发生或很少发生电离,电流的传导依靠正离子和负离子或电子的迁移运动,因此电离区域之外的区域被称为迁移区域或外围区域。若两电极中仅有一个电极起晕,则放电的迁移区域中基本上只有一种符号的带电粒子,在此情况下电流是单极性的。

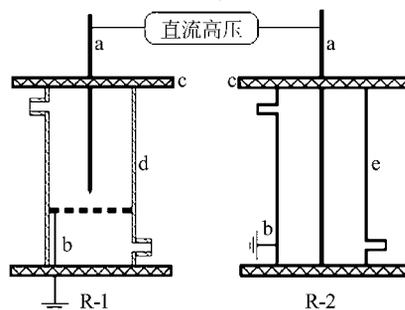


图1

图1所示为两种典型的单极性电晕放电和间隙结构类型,其中a为放电电极、b为接地极、c为绝缘介质、d为绝缘反应器筒体、e为金属反应器筒体。R-1为针板式结构,放电是发生在放电电极尖端与接地极(金属筛板)之间的区域内;R-2为线筒式结构,放电是发生在处于同轴的放电电极(金属线)与接地极(接地极为圆的金属反应器筒体)之间的环形区域内。

介质阻挡放电又叫无声放电。与脉冲电晕放电相比,介质阻挡放电是用频率为50赫兹到兆赫兹级的交流高电压来启动,在放电空间插入绝缘介质的一种气体放电。由于同时具有大空间反应区域、可在大气压强下工作,以及低气压下辉光放电的均匀、漫散、稳定等特点,而且可以防止在放电空间形成局部火花或弧光放电,因而具有很好的工业化应用前景,通常也被用于转化一些常态下极稳定的物质(如甲烷)。介质阻挡放电呈现微通道的放电结构,即通

过放电间隙的电流由大量快脉冲电流细丝组成。电流细丝在放电空间和时间上都是无规则分布的,这种电流细丝称为微放电。反应也主要是在这些微放电中发生的。

微放电是介质阻挡放电的核心,可以把每个微放电在交流电压的一个周期内分成三个阶段: . 放电的形成; . 放电击穿后,气体间隙电流脉冲或电荷的输送; . 在微放电电流通道中原子、分子的激发和反应动力学的启动,也就是自由基、准分子等的形成。通常放电的击穿在几个纳秒(10^{-9} 秒)内完成,微放电的寿命一般为10纳秒量级,原子分子的激发和反应所需时间为100纳秒到秒量级。

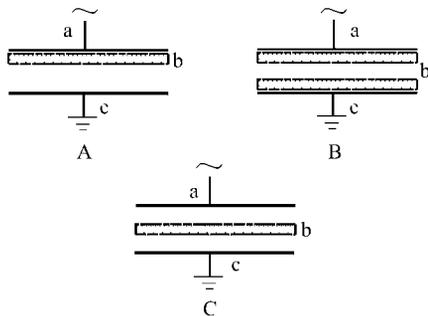


图2 三种介质阻挡放电间隙结构类型

典型的介质阻挡放电和间隙结构主要有三种类型,如图2所示,其中a为放电电极、b为绝缘介质薄层、c为接地极。这些电极和间隙结构可以是平面型的,也可以是同轴圆柱型的。A型为单绝缘介质插入放电空间,且只与一个电极表面接触,这种放电构型的特点是结构简单,且可以通过金属电极把放电产生的热量散发掉。B型为双绝缘介质插入放电空间,且分别与两个电极表面接触,这种放电构型的特点是放电发生在两层介质之间,防止放电等离子体直接与金属电极接触,可以产生高纯度等离子体。C型放电构型为单绝缘介质插入放电空间,且不与任何一个电极表面接触,其特点是在绝缘介质两边同时生成两种成分不同的等离子体。

鉴于这两种非平衡放电等离子体均可在1个大气压(10^5 Pa左右)下产生,又能在接近室温的条件下实现,因此被广泛地应用在化学学科方面,谓之等离子体化学(Plasma Chemistry)。等离子体化学是利用在等离子体空间中生成的活性化学基团进行有效化学反应的技术。从化学角度看,等离子体空间富集的离子、电子、原子及自由基,是极活泼的高活性物种,这些高活性物种在普通的热化学反应中不

易得到,而在等离子体中可源源不断地产生。目前,等离子体技术与催化技术相结合,已广泛用于甲烷转化、合成氨反应、臭氧合成及材料表面改性等催化热点课题的研究。

在甲烷转化方面,一些研究者利用这两种等离子体技术进行甲烷脱氢偶联生成 C_2 烃(C_2 烃是指含有2个碳的烃类,主要为乙炔、乙烯和乙烷)反应及甲烷转化生成合成气(合成气为氢气和一氧化碳的混合物)反应。例如2001年,大连理工大学宫为民等在室温常压下,利用脉冲电晕等离子体实现了在化学催化法中难以进行的含氢条件下甲烷脱氢偶联反应,得到了甲烷转化率为57.1%和 C_2 烃产率为43.3%的结果;2004年,海因茨(M. Heintze)等将介质阻挡放电等离子体与催化剂相结合,在较低温度下实现了甲烷转化生成合成气的反应。

氮气和氢气在介质阻挡放电等离子体作用下可生成氨气。2004年,Mizushima Takanori在该氮氢等离子体中加入一种管状、类膜的催化剂,提高了氨气的产率。

工业上臭氧的合成是介质阻挡放电用于物质合成的典型例子。大连海事大学白敏冬等采用该技术得到了高浓度的臭氧。工业臭氧发生装置的典型结构为:在平行板电极的一侧或两侧插入一定厚度的薄层非玻璃电介质(一般为 $-Al_2O_3$ 陶瓷),中间留有合适距离的气隙,使臭氧在气隙内生成。

利用低温等离子体进行材料表面改性研究属于多学科、多种技术的综合性研究,它包括等离子体物理、等离子体化学、材料表面物理、表面化学、反应工程学、气体放电技术和真空技术等。低温等离子体改性材料表面,目前已广泛用于电子、机械、纺织、航天、印刷、环保和生物医学等领域。低温等离子体材料表面改性的方法大致可分为以下4种,等离子体表面刻蚀、等离子体气相沉积、等离子体表面接枝和等离子体粘接。

(辽宁省大连海事大学物理系 116026)

