文章编号：1008－8857(2015)03－0174－07 DOI：10.13259/j.cnki.eri.2015.03.010

高频感应等离子场中液滴运动蒸发过程模拟

王艺霖，许恋斯

（上海理工大学 能源与动力工程学院，上海 200093）

摘 要：建立在高频感应热等离子体环境下单个溶液液滴的运动蒸发模型，采用数值计算的方法模拟了液滴在等离子体射流中的运动和传热过程，分析了不同操作参数对液滴运动蒸发过程的影响.结果表明：液滴初始入射尺寸越小，表面溶质质量分数达到饱和状态所用时间越短；初始入射速度越快，表面溶剂蒸发速度越快，溶质结晶析出时间越短；入射角较大时，液滴会被反向涡流卷吸，表面浓度达到饱和状态的时间较长.

关键词：高频感应热等离子场；液滴蒸发；入射参数；数值模拟

中图分类号：TK 124 **文献标志码**：A

Modeling of the movement and evaporation processes of the droplets injected into the rapid-frequency plasma jet

WANG Yilin，XU Liansi

（School of Energy and Power Engineering，University of Shanghai for Science and Technology，Shanghai 200093，China）

Abstract：The movement and heat transfer of the droplets injected into the rapid-frequency (RF) plasma jet were simulated using the evaporation model of a single droplet in the RF plasma environment. The influence of different operation parameters on the movement and evaporation processes was investigated. The results show that for the smaller droplet，the surficial solute gets saturated with shorter time. For the droplets with higher injecting velocity，the evaporation of the surficial solvent and the crystallization of the solute take place more quickly. In the case of greater injecting angle，the droplets will be entrained by reverse direction vortex flow，and it would be longer when the solution gets saturated.

Keywords：rapid-frequency plasma field；droplet evaporation；injecting parameter；numerical simulation

溶液注入热等离子喷涂(solution precursor plasma spray，SPPS)对传统热喷涂技术进行了改进，具有前驱体溶液化学组分的可控性和材料选用的灵活性等诸多优点[1].目前，SPPS技术中较多使用直流(DC)热等离子炬作为等离子体的发生器，但是其使用寿命受到电极腐蚀和烧损的限制[2]，而高频(rapid-frequency，RF)感应热等离子炬是通过高频电磁场的感应作用加热气体产生等离子体，具有无电极消耗、环保无污染等优势.本文通过讨论RF感应热等离子炬加热气体产生等离子体，建立了单个溶液液滴运动的蒸发模型，忽略液滴内部的温度梯度，采用数值计算的方法

收稿日期：2014－03－27

基金项目：国家自然科学基金资助项目(50706027)；上海市教委科研创新基金重点资助项目(13ZZ119)

第一作者：王艺霖(1988—)，男，硕士研究生. 研究方向：热等离子喷涂技术. E-mail：uylwang@126.com

模拟了液滴在 RF 射流中的运动和传热，通过改变入口的操作参数研究液滴的运动蒸发过程.

1　物理问题及数学模型

高频感应热等离子炬中，材料的前驱体溶液液滴是通过内气携带，经过雾化喷口进入热等离子体射流场. 图 1 为利用高频感应热等离子炬的 SPPS 过程[3]. 液滴进入热等离子体后，溶剂加热蒸发，溶质浓度升高，饱和后溶质开始结晶析出. 因为液滴的入射参数改变，到达基板后的情况也各不相同，这样也会影响到涂层的质量. 本文研究不同的液滴入射参数对液滴运动蒸发产生的影响，所以当液滴表面浓度达到溶液的临界饱和浓度时即可停止计算. 为简化计算模型，对其进行如下假设：① 液滴内部温度均匀；② 液滴自身进行球对称蒸发；③ 对液滴表面的蒸发气相混合层应用准稳态分析；④ 不考虑液滴对热等离子体的反向作用，也不考虑多个液滴间的碰撞、影响和二次雾化作用；⑤ 仅考虑热等离子体对液滴的影响和气体阻力作用；⑥ 液滴在流场中的重力、热泳力作用、热等离子体的稀薄气体效应均予以忽略.

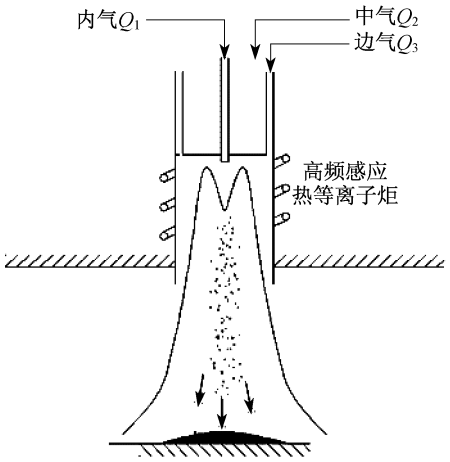

图 1　利用高频感应热等离子炬的 SPPS 过程

Fig. 1　The SPPS process with the rapid-frequency plasma jet

图 2 为高频感应热等离子炬简图[11]，采用三重石英同心管，工作气体为氩气(Ar)，三股氩气分别以内气、中气和边气进入炬内. 图 2 中：L_1、L_2 分别为工作气体抵达 RF 场的最近位移和最远位移；L_3 为同心管的长度；r_1、r_2、r_3 分别为内气、中气和边气的运动区域半径；R_0、R_C 分别为同心管的内径以及感应线圈的半径. 等离子体工作气体的初始温度为 300 K，三股氩气的体积流量 Q_1、Q_2、Q_3 分别为 2、4、29 L·min^{-1}，激励电流频率为3 MHz，输入功率为 5 kW.

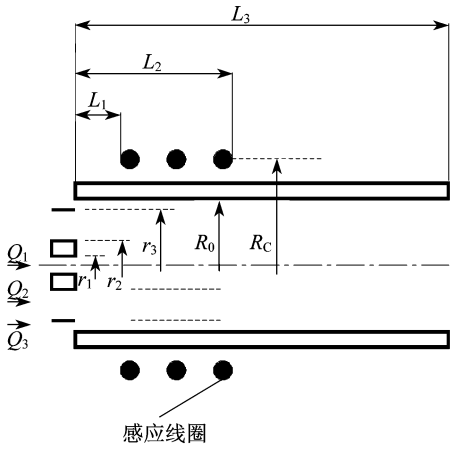

图 2　高频感应热等离子炬简图

Fig. 2　The Structure of the rapid-frequency plasma torch

1.1　液滴运动蒸发模型

从图 1 可看出，液滴沿轴向进入热等离子射流中，受到环境温度加热，溶剂蒸发，溶质结晶析出. 通过建立液滴的运动蒸发模型确定液滴在 RF 感应热等离子体中表面温度和液滴半径的变化. 动量和质量方程为[4]

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{3C_D\rho_\infty}{8r_s\rho_L}|U_\infty - U|(U_\infty - U) \tag{1}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{3C_D\rho_\infty}{8r_s\rho_L}V^2 \tag{2}$$

$$\frac{\partial r_s}{\partial t} = -\frac{\dot{m}}{4\pi\rho_L r_s^2} \tag{3}$$

式中：U、V、r_s 分别为液滴的轴向速度、径向速度和瞬态半径；U_∞、ρ_∞ 分别为热等离子体的速度和密度；$\dot{m}$ 为液滴表面质量蒸发率；C_D 为液滴阻力系数[5]；ρ_L 为液滴密度；t 为时间.

液滴沿对称轴方向进入热等离子体内，所以等离子体的轴向速度占主要作用. 在径向动量方程中较小的等离子体径向速度分量予以忽略.

根据以上方程可得出等离子体中液滴表面温度和自身尺寸变化情况. 在蒸发时液滴表面是水蒸气和环境工作气体的二元混合物，在气相特征常数比液相大的前提下，求解表面质量蒸发率时可对液滴表面气相层应用准稳态分析，并假设液

滴的传热传质过程处于准稳态过程.

在液滴表面的气相混合层中,因为热量和质量传递导致薄膜表面和周围环境的分子运动相同,所以,通过热量和质量扩散的液滴表面蒸发气体的质量蒸发率也相等,表达式分别为[6]

$$\dot{m}_{\mathrm{M}} = 2\pi\rho_{\mathrm{g}} D r_{\mathrm{s}} Sh \ln(1 + B_{\mathrm{M}}) \tag{4}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{T}} = 2\pi \frac{\lambda_{\mathrm{g}}}{C_{pv}} r_{\mathrm{s}} Nu \ln(1 + B_{\mathrm{T}}) \tag{5}$$

式中:$\dot{m}_{\mathrm{M}}$、$\dot{m}_{\mathrm{T}}$ 分别为通过质量和热量扩散的液滴表面蒸发气体的质量蒸发率;ρ_{g}、λ_{g}、C_{pv}分别为液滴表面薄膜混合物的平均密度、平均导热系数和平均比热容;D 为气体扩散系数;Sh、Nu 分别为舍伍德数和努塞尔数;B_{M}、B_{T} 分别为质量传递系数和热量传递系数.

$$B_{\mathrm{M}} = \frac{m_{\mathrm{vs}} - m_{\mathrm{v}\infty}}{1 - m_{\mathrm{vs}}},\ B_{\mathrm{T}} = \frac{C_{pv}(T - T_{\mathrm{s}})}{L + \dfrac{Q_{\mathrm{g}}}{\dot{m}_{\mathrm{T}}}} \tag{6}$$

式中:m_{vs}为液滴表面的溶剂蒸气质量分数;$m_{\mathrm{v}\infty}$为无穷远处热等离子体来流的蒸气质量分数;L 为蒸发过程中的汽化潜热;T、T_{s} 分别为等离子体环境温度和液滴表面温度.

单个液滴蒸发时 $m_{\mathrm{v}\infty}=0$,$m_{\mathrm{vs}} = P_{\mathrm{vs}} M_{\mathrm{v}} / (P_{\infty} \bar{M})$,其中:$M_{\mathrm{v}}$、$\bar{M}$ 分别为溶剂蒸气的分子质量和液滴表面混合物的平均分子量;P_{∞}为热等离子体的环境压力;P_{vs}为液滴表面的饱和蒸气压力.

根据式(4)、(5)求出液滴表面质量蒸发率后,假设初始 B_{T}^{0} 值,经过迭代计算,当$|B_{\mathrm{T}} - B_{\mathrm{T}}^{0}| < \varepsilon_{\mathrm{B}}$ 时,即可求出 B_{T}.

对于无蒸发的球形液滴,液滴表面传热及扩散层的厚度表达式分别为[7]

$$\delta_{\mathrm{T0}} = \frac{2r_{\mathrm{s}}}{Nu_0 - 2},\ \delta_{\mathrm{M0}} = \frac{2r_{\mathrm{s}}}{Sh_0 - 2} \tag{7}$$

式中,Nu_0、Sh_0 分别为相应特征常数的初始值.

基于传统薄膜模型,式(7)可用于蒸发液滴的计算,而由于在液滴和热等离子体射流之间存在斯蒂芬流,会对层流边界层的厚度产生影响.因此引入薄膜修正系数 F_{T}、F_{M},即

$$F(B) = (1 + B)^{0.7} \frac{\ln(1 + B)}{B} \tag{8}$$

$$F_{\mathrm{M}} = F(B_{\mathrm{M}}),\ F_{\mathrm{T}} = F(B_{\mathrm{T}}) \tag{9}$$

$$F_{\mathrm{T}} = \frac{\delta_{\mathrm{T}}}{\delta_{\mathrm{T0}}},\ F_{\mathrm{M}} = \frac{\delta_{\mathrm{M}}}{\delta_{\mathrm{M0}}} \tag{10}$$

通过引入薄膜修正系数,Nu 和 Sh 的最终求解表达式如表 1 所示,其中:$f(Re)$为考虑了 Re 影响的修正因子,当 $1 < Re \leqslant 400$ 时,$f(Re) = 0.077$,当 $Re \leqslant 1$ 时,$f(Re) = 1$;Pr 为普朗特数;Sc 为施密特数.

表 1 Nu 和 Sh 的最终求解表达式

Tab. 1 The solution formula of the Nu and Sh

特征数	经验公式[7]	最终表达式
Nu	$Nu_0 = 1 + (1 + RePr)^{1/3} f(Re)$	$Nu = 2 + \dfrac{(Nu_0 - 2)}{F_{\mathrm{T}}}$
Sh	$Sh_0 = 1 + (1 + ReSc)^{1/3} f(Re)$	$Sh = 2 + \dfrac{(Sh_0 - 2)}{F_{\mathrm{M}}}$

考虑到液滴内部的热传导以及液滴受热蒸发的质量传递,得出液滴的能量守恒方程为

$$Q_{\mathrm{g-i}} = \dot{m} L + Q_{\mathrm{i-l}} \tag{11}$$

式中:$Q_{\mathrm{g-i}}$为液滴通过热等离子体加热所吸收的总热量;$Q_{\mathrm{i-l}}$为环境传入液滴内部的热量.

$$Q_{\mathrm{g-i}} = 2\pi r_{\mathrm{s}} \lambda_{\infty} (T - T_{\mathrm{s}}) Nu \tag{12}$$

$$Q_{\mathrm{i-l}} = \frac{4\pi}{3} r_{\mathrm{s}}^{3} C_{pl} \frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{s}}}{\mathrm{d}t} \tag{13}$$

式中,λ_{∞}、C_{pl}分别为等离子场的导热系数和液滴自身的比热容.

利用上述公式进行计算后,可求出最终传入液滴内部的热量,进而求得液滴表面的瞬时温度,最后联立液滴的动量方程组求得液滴在 RF 感应热等离子体内的半径变化.

1.2 液滴表面混合层的物性计算

液滴表面混合层主要成分是液滴受热蒸发产生的溶剂蒸气和周围热等离子工作气体,其物性随着温度和组分的变化而改变.根据“1/3”法则(平均参数系数 $A_{\mathrm{r}} = 1/3$)[12]可获得其定性温度 T 和蒸气浓度 m_{s} 的表达式分别为

$$T = T_{\mathrm{s}} + A_{\mathrm{r}} (T_{\infty} - T_{\mathrm{s}}) \tag{14}$$

$$m_{\mathrm{s}} = m_{\mathrm{vs}} + A_{\mathrm{r}} (m_{\mathrm{v}\infty} - m_{\mathrm{vs}}) \tag{15}$$

平均密度和平均比热容的计算表达式分别为

$$\rho_{\mathrm{g}} = \left[\frac{m_{\mathrm{s}}}{\rho_{\mathrm{v}}} + \frac{(1 - m_{\mathrm{s}})}{\rho_{\infty}} \right]^{-1} \tag{16}$$

$$C_{pv} = C_{p\mathrm{F}} m_{\mathrm{s}} + C_{p\infty} (1 - m_{\mathrm{s}}) \tag{17}$$

二元混合气体的黏度根据 Chapman-Enskog 动力理论可近似表示为[8]

$$\mu = \sum_{i=1}^{n} \frac{y_i \mu_i}{y_i \varphi_{ij}} \tag{18}$$

式中：y_i 为各组分的摩尔分数；μ_i 为各组分的动力黏度；φ_{ij} 为组分的结合因子，可根据 Sutherland 分子动力理论模型推算其数值解[8].

混合气体的导热率 λ 可根据 Wassilijewa 提出的混合气体热导率方程[9]表示为

$$\lambda = \sum_{i=1}^{n} \frac{y_i \lambda_i}{\sum_{j=1}^{n} y_i A_{ij}} \tag{19}$$

式中：λ_i 为各组分气体的导热系数；A_{ij} 为组分的结合参数，根据 Mason 和 Saxena 的修正式，可得出 $A_{ij} = \varphi_{ij}$.

在传热过程中水蒸气扩散在热等离子体中，水蒸气扩散系数采用 Fuller 等提出的经验公式求解[8]，即

$$D_{AB} = \frac{1.43 \times 10^{-7} \cdot T^{7/4}}{PM_{AB}^{1/2}\left[\left(\sum \gamma\right)_A^{1/3} + \left(\sum \gamma\right)_B^{1/3}\right]^2} \tag{20}$$

式中：M_{AB} 为折合相对分子质量；P 为压力；$\sum \gamma$ 为分子的扩散体积，可通过原子的扩散体积（无量纲）相加进行求解，相关原子和简单分子扩散体积如表 2 所示.

$$M_{AB} = 2(M_A^{-1} + M_B^{-1})^{-1} \tag{21}$$

式中，M_A、M_B 分别为组分 A、B 的相对分子质量.

表 2　原子和简单分子的扩散体积

Tab. 2　The diffusion volume of the molecules and atoms

原子种类	C	H	O	简单分子种类	N_2	空气	Ar
原子的扩散体积/($cm^3 \cdot mol^{-1}$)	15.9	2.31	6.11	简单分子的扩散体积/($cm^3 \cdot mol^{-1}$)	18.5	19.7	16.2

2　计算结果及分析

2.1　计算参数选取

本文所用的模拟对象是 $ZrO(CH_3COO)_2$ 溶液液滴，液滴达到临界过饱和浓度后，溶质分解，在液滴表面形成 ZrO_2 并结晶析出. 溶液的物性参数计算参考文献[10].

液滴的入射参数选取参考相关的实验统计数据[11]，液滴由喷嘴喷出的尺寸范围为 1～100 μm，入射速度范围为 5～60 $m \cdot s^{-1}$，喷嘴出口处的液滴平均尺寸约为 40 μm，平均速度为 10 $m \cdot s^{-1}$.

2.2　液滴初始入射尺寸对其蒸发过程的影响

本小节主要考察的影响因素是液滴的初始入射尺寸. 液滴的初始温度为 300 K，轴向入射速度为 10 $m \cdot s^{-1}$，所选择的液滴入射尺寸分别为 10、20、30、40、50、60、80、100 μm，比较这些尺寸的液滴进入热等离子体后液滴的半径 R 变化.

图 3、4 分别表示中等尺寸（30～60 μm）的液滴和其它较小或较大尺寸的液滴半径变化，图中 R、R_0 分别表示等离子场中液滴自身尺寸和液滴的初始入射尺寸. 由图中可以看出：中等尺寸的液滴随着尺寸的增大，半径的变化并不明显，而自身蒸发所需时间却逐渐增加；尺寸较大的液滴初始轴向动量较小，在等离子体低温区停留时间较长，表面溶质析出所需时间也较长，所以半径变化较小；相反，尺寸较小的液滴可以迅速吸收环境热量，受热比较充分，液滴表面溶质达到饱和浓度所需的时间较短，半径变化也较大.

2.3　液滴初始入射速度对其蒸发过程的影响

本小节模拟了不同的初始入射速度下液滴的运动蒸发情况. 雾化液滴的入口位于热等离子体射流的中心点；液滴初始温度为 300 K；所考察的液滴尺寸为 40 μm；液滴的初始入射速度分别为 5、10、15、20、25、30、40 $m \cdot s^{-1}$.

为了分析初始入射速度对液滴在 RF 感应热等离子体中运动蒸发的作用，将模拟结果分成高速和低速. 图 5、6 分别为较低速液滴、较高速液滴的半径变化. 从图中可以看出，由于环境热量等因素，液滴在 RF 感应热等离子体中运动吸热，溶剂蒸发，液滴尺寸也会随之改变. 在液滴进入热等离子场的初始阶段，液滴经历的环境温度较低，表面溶剂蒸发速率也较低，所以半径变化率较小；当液滴进入较高温度的环境时，表面溶剂蒸发速率加快，液滴的尺寸迅速减小，当表面有溶质析出时停止计算. 液滴的初始入射速度越大，液滴抵达热等离子体高温核心区域能力越强，表面的溶剂蒸发速率也加快，半径的变化也越小，最终溶质结晶析出所需要的时间越短.

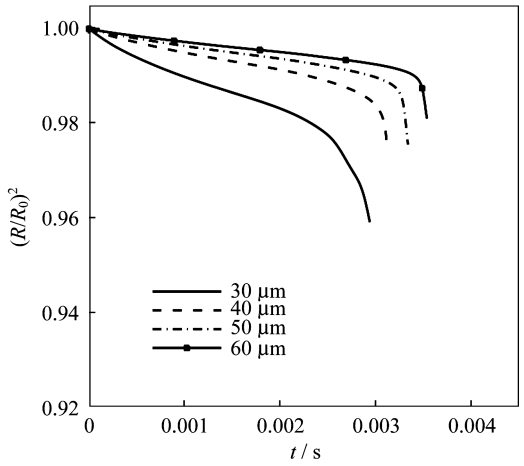

图 3 适中尺寸液滴的半径变化

Fig. 3 The radius variation of the medium droplets

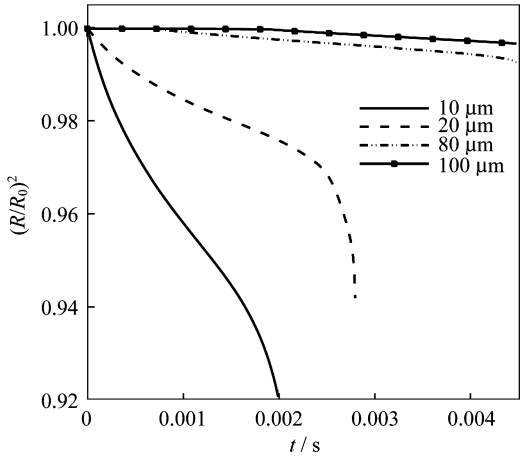

图 4 较大和较小尺寸液滴的半径变化

Fig. 4 The radius variation of the smaller or larger droplets

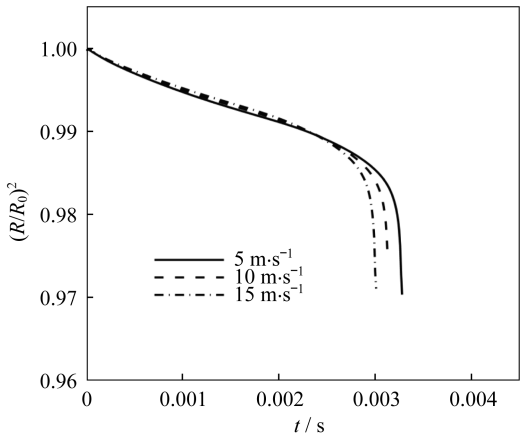

图 5 较低速液滴的半径变化

Fig. 5 The curves of the droplet radius changing at low velocity

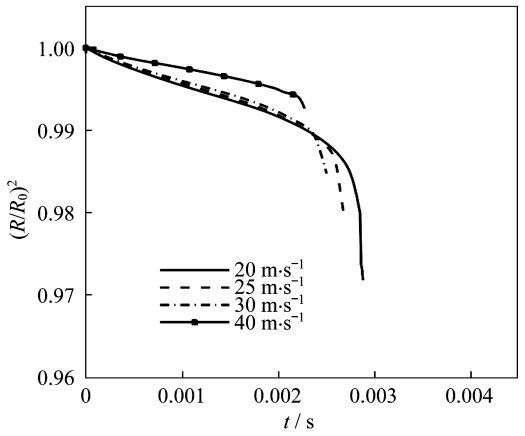

图 6 较高速液滴的半径变化

Fig. 6 The curves of the droplet radius changing at high velocity

2.4 液滴初始入射角对其蒸发过程的影响

在高频感应热等离子射流场中，液滴雾化入口会因为热等离子体的工作气体入射速度的不同而产生若干大小不等的反向涡流，部分雾化液滴会以一定入射角进入热等离子体[11]. 图 7 为液滴入射角示意图. 为了研究雾化液滴的入射角对其蒸发运动过程的影响，定义入口轴线与 r 轴的夹角 θ 为液滴的入射角，定义正方向为绕 r 轴的逆时针方向. 由于在 RF 感应热等离子体射流场中温度和速度呈轴对称分布，所以夹角 θ 主要在 0°～90°之间.

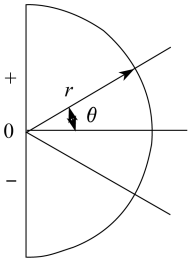

图 7 液滴入射角示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the droplet inlet angle

模拟的液滴入射参数为：液滴半径为 40 μm；入射速度为 10 m•s^{-1}；液滴的初始入射角 θ 分别取为 0°、5°、10°、15°、20°、25°；液滴初始温度为 300 K.

图 8 为液滴在高频热等离子场中不同入射角下的运动轨迹，其中：Y 为轴向距离；X 为径向距离. 入射角较小的液滴能够较早地进入 RF 感应热等离子区域. 以入射角 $\theta = 5°$ 的液滴为例，其运

动轨迹的轴向距离较入射角 $\theta = 0^\circ$ 明显缩短；入射角较大的液滴，因为雾化喷口附近存在反向涡流，运动轨迹轴向距离的变化并不明显，而径向距离则明显增加，而且液滴的整个轨迹呈现弯曲的现象；入射角适中的液滴，其运动轨迹的轴向距离随着入射角的增加而逐渐缩短，径向距离则因为入射角的增加而逐渐拉长.

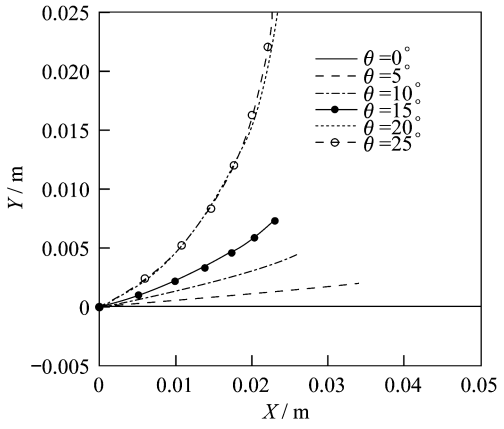

图 8　不同入射角液滴的运动轨迹

Fig. 8　The droplet trajectory at different inlet angles

图 9 为不同入射角液滴的半径变化. 由于液滴在穿过热等离子体中运动时，表面受热，溶剂蒸发，自身半径也会随之改变. 液滴进入等离子环境的初期所经历的环境温度较低，表面溶剂蒸发率也较低，半径的变化并不明显. 当液滴深入到较高温度的热等离子环境时，液滴表面温度升高，溶剂受热蒸发速率加快，液滴半径也迅速变小，直到表面有溶质析出为止. 对于入射角较大的液滴，其在

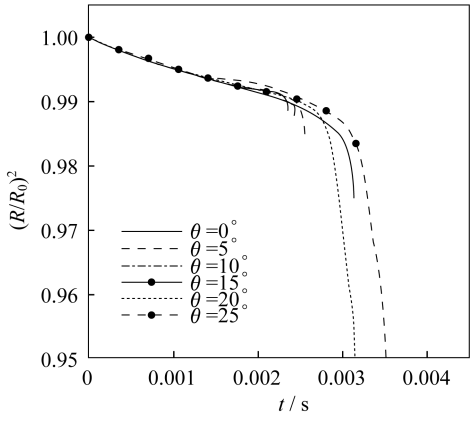

图 9　不同入射角液滴的半径变化

Fig. 9　The curves of the droplet radius changing at different inlet angles

运动过程的前期因为加热充分，液滴自身半径变化也较小；而在后期液滴穿出热等离子区域后不能得到有效的加热，液滴的溶质析出时间也会延长.

3　结　论

（1）在高频感应热等离子喷涂过程中，液滴的入射尺寸越小，表面溶质质量分数达到饱和的时间也越短；入射尺寸较小的液滴进入热等离子体后受热蒸发速率加快，尺寸变化也越大.

（2）液滴的初始入射速度越大，液滴可以到达热等离子体高温核心区域的能力越强，表面的溶剂蒸发速率也加快，半径变化也越小.

（3）入射角适中或较小（$\theta < 20^\circ$）的液滴所经历的环境温度随着角度增大而增大，而且入射角越大，液滴表面溶剂蒸发速度也会越快，溶质析出所需时间越短；液滴因为受热不充分，液滴表面需要较长的时间才能达到饱和状态.

参考文献：

[1] 王峰，王旭波. 溶液注入等离子喷涂——一种制备热障涂层的新技术[J]. 江苏陶瓷，2006，**39**(6)：4－6.

[2] 朱清文. 等离子体技术几个方面的研究进展[J]. 力学进展，1986，**16**(2)：281－292.

[3] PFENDER E. 热等离子体技术：现状及发展方向[J]. 力学进展，1999，**29**(2)：251－267.

[4] ABRAMZON B，SIRIGNANO W A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer，1989，**32**(9)：1605－1618.

[5] FAETH G M. Current status of droplet and liquid combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science，1977，**4**(3)：191－224.

[6] SHERWOOD T K. 传质学[M]. 时钧，李盘生，译. 北京：化学工业出版社，1988.

[7] CLIFT R，GRACE J R，WEBER M E. Bubbles，drops and particles[M]. New York：Academic Press，1978.

[8] 童景山. 流体热物性学——基本理论与计算[M]. 北京：中国石化出版社，2008.

[9] MESSING G L，ZHANG S C，JAYANTHI G V. Ceramic powder synthesis by spray pyrolysis[J]. Journal of the American Chemical Society，1993，**76**(11)：2707－2726.

[10] ZHANG S C, MESSING G L, BORDEN M. Synthesis of solid, spherical zirconia particles by spray pyrolysis [J]. Journal of the American Chemical Society, 1990, **73**(1): 61 - 67.

[11] OZTURK A, CETEGEN B M. Modeling of axially and transversely injected precursor droplets into a plasma environment [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, **48**(21/22): 4367 - 4383.

[12] HUBBARD G L, DENNY V E, MILLS A F. Droplet vaporization: Effects of transients and variable properties [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1975, **18**(9): 1003 - 1008.

信息

首个光伏“领跑者”项目落地大同

8 月 3 日，联合光伏中标的“山西大同采煤沉陷区国家先进技术光伏示范基地”招商项目正式签约，这意味着我国首个光伏产业的“领跑者”计划落地.

2015 年 6 月份，国家能源局联合工业和信息化部、国家认证认可监督管理委员会出台《关于促进先进光伏技术产品应用和产业升级的意见》提出，中国将提高光伏产品市场准入标准，实施“领跑者计划”.“山西大同采煤沉陷区国家先进技术光伏示范基地”是该文件下发后首个获能源局批准的光伏“领跑者”项目. 其中 12 个单体项目总量为 950 MW，包括 7 个“领跑者计划项目”，每个项目单体容量 100 MW；5 个“领跑者计划 + 新技术、新模式示范项目”，单体规模为 50 MW. 此外，还有一个 50 MW 的基地公共平台.

联合光伏、华电、华能、中广核、中电国际、三峡、大同煤矿等 7 家企业摘得 100 MW 项目，阳光电源、英利、晶科电力、正泰新能源、晶澳太阳能等 5 家企业中标 50 MW 项目.

大唐黄金坪水电站首台机组正式投产发电

9 月 3 日，大唐国际甘孜水电公司大渡河黄金坪水电站首台 20 万 kW 机组顺利通过 72 h 试运行，正式投入商业运行.

黄金坪水电站系大渡河干流水电规划第 11 级电站，总装机容量 85 万 kW，为国家西部大开发重点工程、四川省重点工程、国家支持藏区发展重点工程，主体工程于 2011 年 2 月开工建设，2015 年 8 月 31 日并网发电.

据了解，此次投产发电的黄金坪水电站 4 号机组在 72 h 试运行期间，完成发电量 1031.94 万 kW·h，机组平均负荷为 14.3 万 kW，各部位温度、振动、摆度正常，各项参数良好，机组运行稳定，为该公司实现“一年四投”目标奠定了基础，也标志着该公司大渡河项目进入收获季节.

智利开建全国最大的太阳能发电站

智利《战略报》7 月 9 日报道，Enel 绿色能源集团(EGP)在智利安托法加斯塔大区开始建设一新的太阳能发电站，一旦建成，将成为智利目前规模最大的太阳能光伏发电站.

该发电站总装机容量 160 MW，发电能力为每年 400 GW·h，相当于智利 19 万个家庭的年用电量，建成后可减少约 20 万 t 二氧化碳排放. 据 EGP 公司透露，项目总投资约为 2.7 亿美元，预计 2016 年上半年投产运营，所发电力将输送智利北部互联电网系统(SING).

目前 EGP 公司在智运营的发电项目总装机容量约 600 MW，其中 340 MW 为风力发电，154 MW 为光伏发电，92 MW 为水电.

(王 波)