

氩氢摩尔比对直流电弧等离子体喷射法等离子体放电特征影响的计算

郭建超¹⁾, 刘金龙¹⁾, 朱 涛²⁾, 陈良贤¹⁾, 魏俊俊¹⁾, 李成明¹⁾✉, 王海兴²⁾

1) 北京科技大学新材料技术研究院, 北京 100083 2) 北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191

✉ 通信作者, E-mail: chengmli@mater.ustb.edu.cn

摘 要 假定氩-氢等离子体处于局部热力学平衡状态, 利用理想气体分子运动论和经典查普曼-恩斯科格(Chapman-Enskog)方法, 在获取符合直流电弧等离子体喷射法实际工况的等离子体热力学和输运参数的基础上, 基于 FLUENT 软件进行二次开发, 添加电磁场相关的电流连续方程、安培定律等方程及洛伦兹力、焦耳热等源项, 模拟研究氩氢摩尔比对等离子体放电特征影响规律。结果表明: 在气压为 8 kPa, 工作电流 150 A, 氩氢摩尔比由 3:1 降至 1:3 时, 等离子体最大流速由 $829 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增至 $1127 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最高温度由 20600 K 逐渐降低至 16800 K, 电弧对基体的加热能力逐渐增强的同时使基体表面温度均匀性变差。在其他条件不变的前提下, 氩氢摩尔比为 1:2 时能获得适宜金刚石生长且相对均匀的基体表面温度。

关键词 等离子体喷射; 放电特性; 氩; 氢; 数值模拟

分类号 TM924.4

Calculation of the influence of argon-to-hydrogen mole ratio on the discharge characteristics of plasma in DC arc plasma jet

GUO Jian-chao¹⁾, LIU Jin-long¹⁾, ZHU Tao²⁾, CHEN Liang-xian¹⁾, WEI Jun-jun¹⁾, LI Cheng-ming¹⁾✉, WANG Hai-xing²⁾

1) Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China

✉ Corresponding author, E-mail: chengmli@mater.ustb.edu.cn

ABSTRACT The effect of argon-to-hydrogen mole ratio on the discharging behavior of argon-hydrogen plasma was simulated and studied on the assumption that argon-hydrogen plasma is in a local thermodynamic equilibrium. The kinetic theory of ideal gases and the classical Chapman-Enskog method were employed in the study. The plasma thermodynamic and transport parameters consistent with the actual condition of the DC arc plasma jet method were firstly found, and secondary development was made on FLUENT software platform. Equations, like current continuum and Ampere's law, and source items, like Lorentz force and Joule heat, which are associated with electromagnetic fields were also taken into account. The results show that when the gas pressure and operating current are 8 kPa and 150 A, respectively, and the argon-to-hydrogen mole ratio changes from 3:1 to 1:3, the maximum flow rate of plasma increases from $829 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ to $1127 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the maximum temperature falls from 20600 K to 16800 K, and the heating capacity of the DC arc improves while the substrate surface temperature uniformity deteriorates. Under the other conditions being unchanged, when the argon-to-hydrogen ratio is 1:2, a relatively uniform and proper substrate surface temperature can be obtained for the growth of diamond films.

KEY WORDS plasma jet; discharge characteristics; argon; hydrogen; numerical simulation

直流电弧喷射等离子体具有气体温度高、能量密度大等特点, 属于热等离子体范畴。在众多金刚石膜

制备方法中,直流电弧等离子体喷射法在高沉积速率和大面积沉积等方面具有独特优势^[1-3],其等离子体发生装置由杆状阴极和环形阳极构成.在阴极与阳极之间形成的持续弧光放电的作用下,反应气体受热膨胀并发生电离,离化后的含碳基团高速向外喷出并最终在基体表面沉积金刚石膜.但目前为止其仍然存在难以解决的理论和技術难题,金刚石膜制备过程中出现的绝大多数问题都被认为是等离子体的传热与流动特征引起的^[4],其直接影响金刚石膜的沉积速率、品质、厚度均匀性等.因此,掌握直流电弧等离子体内部的传热和流动规律是解决直流电弧等离子体喷射法金刚石膜制备过程中现存问题的关键所在.然而,直流电弧等离子体温度高,等离子体诊断检测难度大等因素极大限制了直流电弧等离子体的深入研究.数值模拟工作日渐成为等离子体传热与流动等相关研究的常用方法.

直流电弧等离子体炬中发生着复杂的物理化学反应,涉及气、热、电磁等多物理场耦合,以氩气和氢气为主要反应气体^[5-7].其接近热力学平衡状态.根据不同制备需求,工作气压一般维持在2~8 kPa不等^[5,8].氩氢摩尔比是重要的工艺参数之一,其对直流电弧等离子体放电特征影响较大^[9].因此,获取准确且符合实际工况的氩-氢等离子体物性参数是直流电弧等离子体模拟的基础.现阶段已有较多氩-氢等离子体热力学和输运性质参数的相关计算结果公开发表^[10-12];但到目前为止,未见与直流电弧等离子喷射法金刚石膜制备体系中的实际工况相符的氩-氢等离子体物性数据.本文中,在利用理想气体分子运动论和基于Chapman-Enskog方法对玻尔兹曼方程近似求解获取符合实际工况氩-氢等离子体物性参数后,基于FLUENT软件进行二次开发,添加电磁场相关的电流连续方程、安培定律等方程及洛伦兹力、焦耳热源项,对符合实际工况且不同氩氢摩尔比条件下等离子体放电特征进行数值模拟工作.

1 模型与数值求解方法

1.1 氩-氢等离子体热力学与输运性质参数计算

热力学和输运性质参数的准确求解均以精准的等离子体组分为基本前提,假定氩-氢等离子体体系由七种粒子组成,即氢分子(H_2)、氢原子(H)、一次电离氢离子(H^+)、氩原子(Ar)、一次电离氩离子(Ar^+)、二次电离氩离子(Ar^{2+})和电子(e)组成.

等离子体中各粒子组分由Saha方程^[13]、气体状态方程和电中性条件^[14]联立求解.求解配分函数所需的原子能级数据取自美国国家标准技术研究院(NIST)最新光谱数据库^[15].待求得氩-氢等离子体体

系的组分构成后,利用标准热力学关系即可直接求得密度、比焓、比定压热容等热力学参数,具体计算方法和表达式可参见文献[10,16].

获取粒子之间的相互作用的碰撞积分是采用Chapman-Enskog方法求解等离子体输运参数的基本前提^[10,17].本文计算中涉及的碰撞积分计算归纳如下:对于中性粒子之间,氢粒子间直接引用文献中碰撞积分列表^[18-19];氩原子及氩原子和氢粒子间的碰撞积分采用文献[20-22]介绍的作用势推导得到;对于离子和中性粒子间的碰撞,考虑电荷转移的非弹性碰撞和弹性碰撞两种不同类型的作用^[23],其体系内弹性和非弹性碰撞的数据来源参见文献[24];带电粒子之间的势能按照屏蔽的库伦(Coulomb)相互作用势^[25]进行计算,并考虑电子对电场的屏蔽作用;在电子与中性粒子之间的碰撞积分求解中,对 $e-Ar$ 作用,利用文献[26]中给出电子碰撞的微分碰撞截面数值直接积分得到各阶碰撞截面,在高能区采用Frost和Phelps的结果;对 $e-H$ 和 $e-H_2$ 作用,本文直接采用文献[27]中碰撞积分列表.

输运性质采用经典的Chapman-Enskog方法,将输运系数表示成以粒子间平均有效碰撞积分为参数的代数形式,并参考文献[28-29]将此方法扩展到高阶近似,获得较大气压和温度范围的氩-氢等离子体的黏性、电导率和热导率.这种方法是建立在Boltzmann积分-微分方程求解的基础上,假设粒子的分布函数对Maxwellian分布是一阶扰动,并采用一系列Sonine多项式表示,进一步整理后可以得到一系列线性方程组来求得不同的输运系数.

1.2 氩-氢等离子体放电特征数值模拟

直流电弧等离子体化学气相沉积法金刚石膜制备过程中,氩氢摩尔比是重要的工艺参数之一.前述计算结果中显示氢气比例增多使等离子体热导率大幅度提升,黏度明显降低,电导率在高温段也有较大幅度升高.等离子体物性参数差异势必会导致等离子体放电特征发生变化,等离子体放电特征对金刚石膜生长影响巨大.结合实际情况(气压为8 kPa,工作电流150 A),对不同氩氢摩尔比(3:1、2:1、1:1、1:2和1:3)条件下等离子体放电特征进行数值模拟工作.模型中基于FLUENT软件进行二次开发,通过自定义标量(user-defined scalars, UDS)技术将电场强度和磁矢势以标量的形式引入,并添加电磁场相关的电流连续方程、安培定律等方程,通过自定义函数(user-defined functions, UDF)的方式分别在动量方程和能量方程中添加洛伦兹力项、焦耳热源项,并为源项分配相应的存储单元,从而实现速度场、温度场和电磁场之间相互耦合.边界条件等详细信息参见先前工作^[30].

2 结果与讨论

2.1 计算程序可靠性验证

由于缺少光谱诊断等检测手段,为了验证氩-氢等离子体热力学与输运性质参数及其等离子体数值模拟计算程序的可靠性,检验方式如下:如图1所示,对气压为 101.3 kPa,氩氢摩尔比为 1:1 (便于与文献数据进行比对)条件下氩-氢等离子体物性参数进行相关求解,并把获得的化学组分摩尔分数和电导率随温度的变化数据与文献[10]报道值进行比较.如图2所示,利用计算获得的物性参数,并采用文献[31]中介绍的等离子体数值模拟方法,对标压下氩-氢自由燃烧电弧进行建模求解并与文献中求解结果进行比较.图中 r 表示径向距离, z 表示轴向距离.通过对比可以看出,本文所采用计算程序计算获得的相应条件下各粒子摩尔分数和电导率等随温度变化规律及计算获得的氩-氢自由燃烧电弧主体部分温度分布均与文献报道结果符合较好.

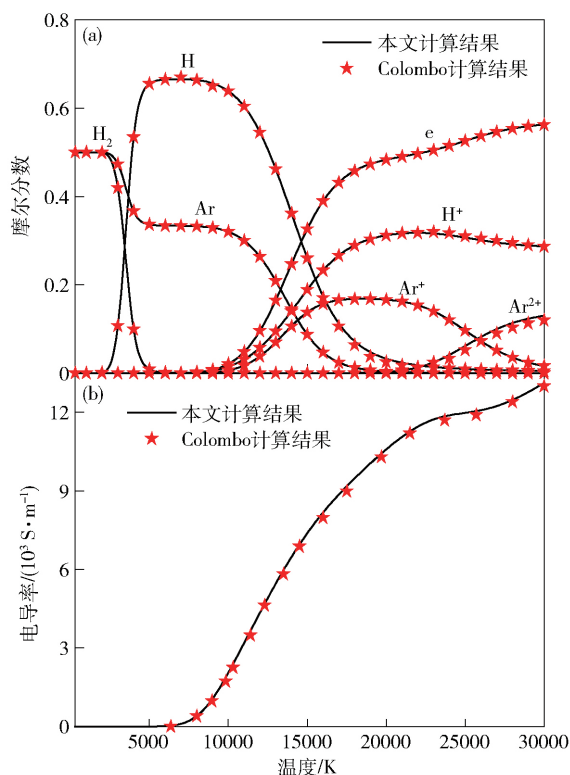


图1 气压为 101.3 kPa 和氩氢摩尔比为 1:1 时氩-氢等离子体的物性参数。(a) 组分摩尔分数; (b) 电导率

Fig.1 Temperature dependence of physical parameters for a 50% argon-50% hydrogen mixture at atmospheric pressure: (a) mole fraction; (b) electrical conductivity

2.2 氩氢摩尔比对氩-氢等离子体热力学与输运性质参数的影响

图3 给出气压为 8 kPa、不同氩氢摩尔比条件下等

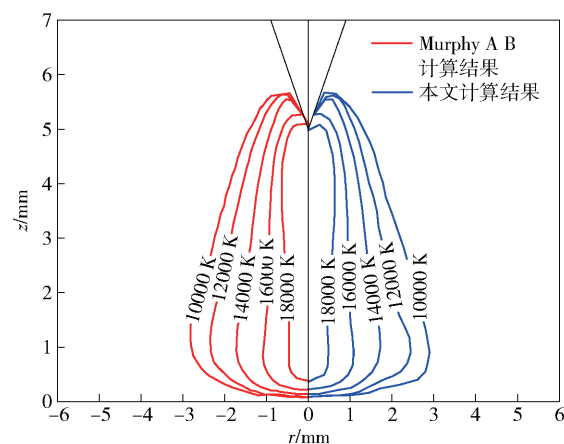


图2 氩氢质量比为 95:1 和进气流量为 $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时 200 A、5 mm 自由燃烧电弧主体部分温度分布

Fig.2 Isotherms calculated for a 200 A, 5 mm arc with a $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ input flow composed of 5% hydrogen and 95% argon by mass

离子体热力学参数(密度、比焓和比定压热容)随温度的变化情况.由图3可以看出氩氢摩尔比对等离子体的密度、比焓、比定压热容等热力学参数影响较为明显.随氢气比例增多等离子体密度明显相对降低.比焓大幅上升的温度区间略微向低温段移动且增长幅度逐渐相对增大.比定压热容的峰位温度区间无明显变

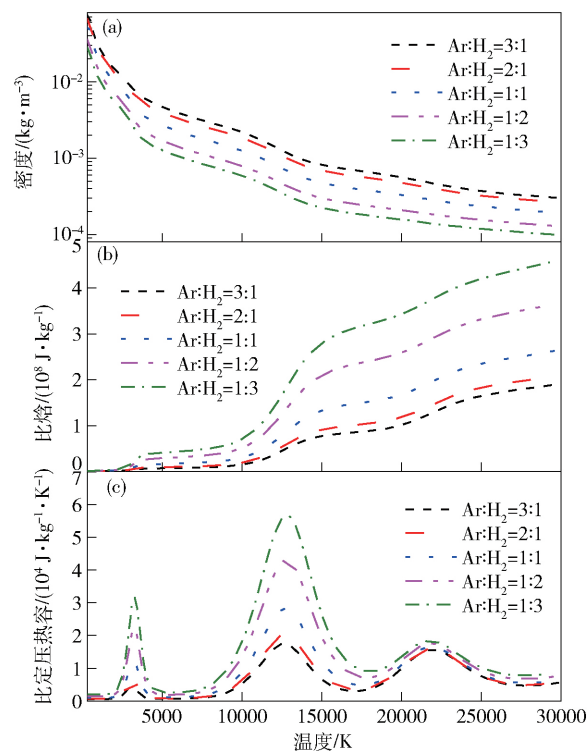


图3 气压为 8 kPa、不同氩氢摩尔比下等离子体体系的热力学性质随温度变化。(a) 密度; (b) 比焓; (c) 比定压热容

Fig.3 Temperature dependence of the thermodynamic properties of the argon-hydrogen mixture at different argon-to-hydrogen mole ratios and a pressure of 8 kPa: (a) density; (b) total specific enthalpy; (c) total specific heat

化,但峰值均有明显相对提升,尤其是在9000~17000 K温度区间内。图4给出8 kPa气压、不同氩氢摩尔比条件下等离子体输运性质参数(黏度、热导率和电导率)随温度的变化情况。如图4(a)所示,在等离子体体系中的氩氢原子电离前,不同氩氢摩尔比下黏度的数值差别不大。随着温度升高,气体发生电离后,黏度随氢气比例增多而明显相对降低,待温度高于15000 K后无明显差异。图4(b)中热导率的第一个峰值区域对应氢分子解离的区间,第二个峰值是由于氢原子和氩原子发生一次电离引起。通过比较可以发现,氩氢摩尔比对热导率的影响同样较为显著,特别是在两个峰值温度区间,较大的氢气含量可以使等离子体的热导率明显增大。从图4(c)中可以看出,当温度高于18000 K后,氢气所占比例增多使电导率明显相对升高。

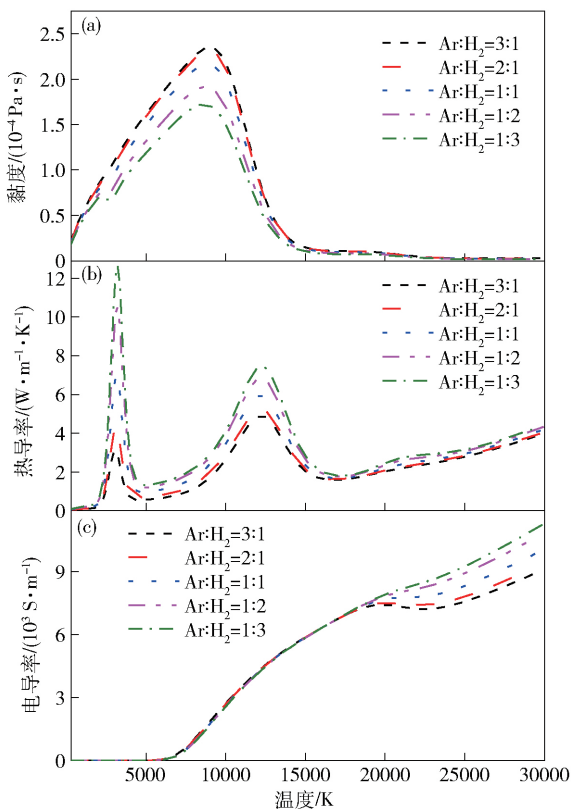


图4 气压为8 kPa 不同氩氢摩尔比下等离子体体系的输运性质随温度变化。(a)黏度;(b)热导率;(c)电导率

Fig.4 Temperature dependence of the transport coefficients of the argon-hydrogen mixture at different argon-to-hydrogen mole ratios and a pressure of 8 kPa: (a) viscosity; (b) thermal conductivity; (c) electrical conductivity

2.3 氩氢摩尔比对氩-氢等离子体放电特征的影响

2.3.1 不同氩氢摩尔比下氩-氢等离子体放电区域温度分布

图5展示了不同氩氢摩尔比条件下直流电弧等离子体放电区域温度分布。图中 r 仍表示径向距离, z 表

示轴向距离。等离子体最高温度均出现在阴极尖端附近,从温度分布特点可以看出等离子体在阴极和阳极之间均形成明显的“L型”分布,与电弧实际形状基本一致。模型中等离子体温度变化趋势均为:在阴极尖端附近等离子体温度急剧升高,然后下降,最后在阳极附近又有较大幅度上升,等离子体温度在阴极尖端附近达到最大。随着氢气比例增多,上游区域的高温等离子体半径有逐渐减小的趋势,等离子体最高温度逐渐降低,但对基体的加热能力却逐渐增强,使基体上表面温度逐渐升高。

2.3.2 不同氩氢摩尔比下轴线上等离子体温度、电流密度和速度分布

图6(a)为不同氩氢摩尔比下直流电弧等离子体轴线位置温度分布。氩氢摩尔比对三个不同区域(上游、中游和下游)的等离子体影响程度不同:靠近阴极位置的等离子体温度随氢气比例增多明显相对降低,氩氢摩尔比由3:1降至1:3过程中,等离子体最高温度由20600 K逐渐降低至16800 K,而且当氩氢摩尔比由2:1降至1:2过程中温度降幅最为明显。其主要原因是随着氩氢摩尔比降低,等离子体热导率逐渐升高,且氩氢摩尔比在2:1与1:2之间变化时等离子体热导率增幅最为明显。随着与阴极距离逐渐增大,不同氩氢摩尔比条件下等离子体温度差异逐渐减小。当靠近基体表面位置,因基体材料表面温度随氩氢摩尔比降低明显升高,其热导率随表面温度升高而明显降低,等离子体受到基体表面的冷却作用随氩氢摩尔比降低而明显减弱,当氩氢摩尔比小于1:1后,等离子体温度随氩氢摩尔比改变无明显相对变化。

由于受到壁面压缩作用,在阴极尖端附近中心电流密度最大,欧姆加热能力最强,因此如图6(b)所示,电流密度均在阴极尖端附近达到峰值,且随着逐渐靠近基体表面而不断降低。这也正是不同氩氢摩尔比条件下,等离子体最高温度均出现在阴极尖端位置的原因。氢气比例增多使等离子体的热导率明显相对升高,在周围冷气流作用下等离子体放电通道会相应减小,电弧电压也会相应提升。因此,氢气比例较高时电弧主体部分电流密度相对较大。但在靠近基体表面的位置,氢气比例较高时等离子体电流密度的下降趋势明显加快,其主要是由于电弧整体上移趋势的影响。

等离子体在阴极尖端位置附近发生明显膨胀,使等离子体内能向动能转化。图6(c)显示了轴线上等离子体最快流速仍在阴极尖端附近。当氢气比例较大时,等离子体在阴极尖端附近具有最高的电流密度,而且氢气比例增多会使等离子体黏度大幅度相对降低。因此,当氩氢摩尔比为1:3时,等离子体流速最大,其值接近 $1180 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,但仅出现在阴极尖端附近极小区域。在等离子体中下游区域,等离子体流速明显降低。

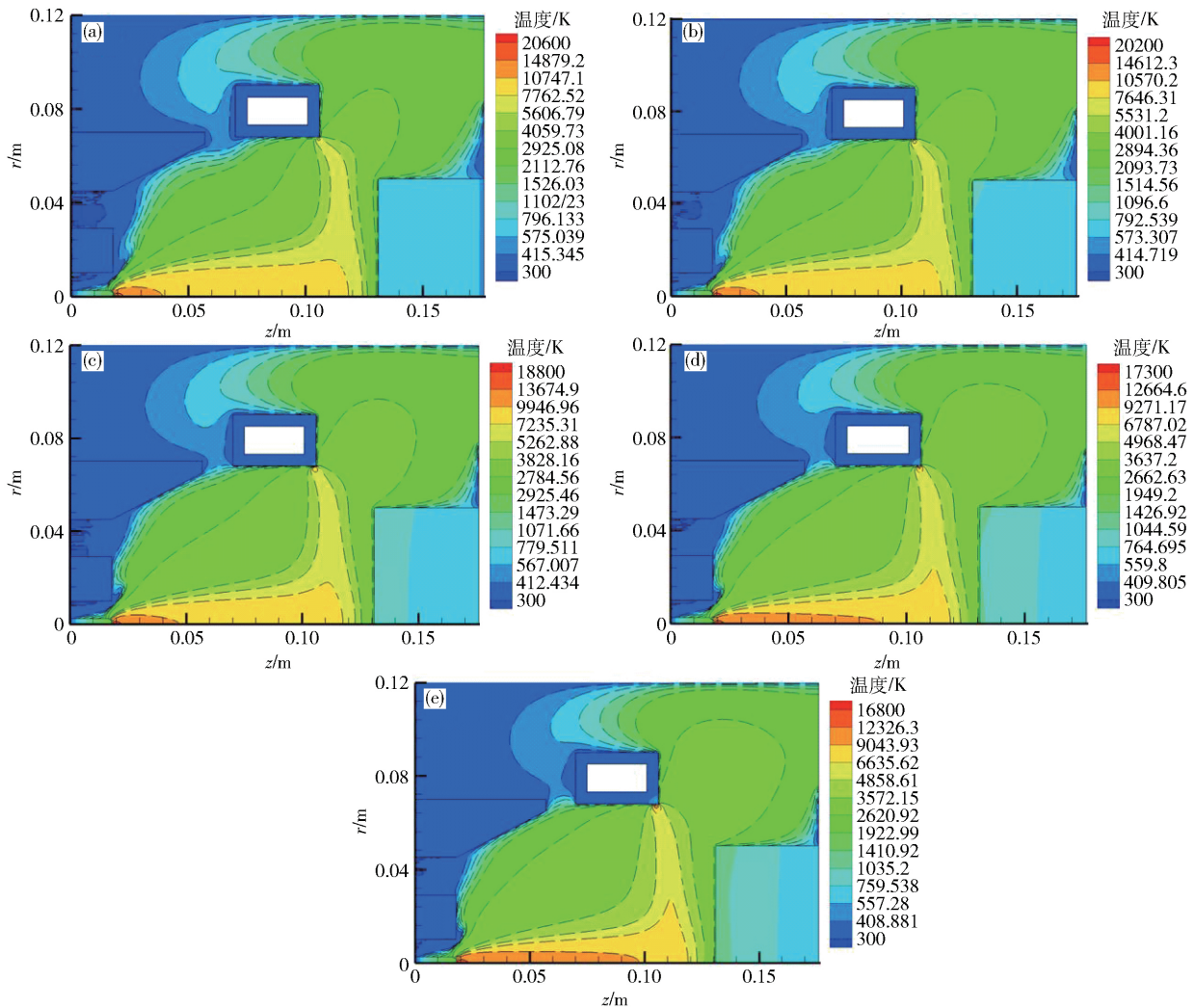


图5 气压为8 kPa、不同氩氢摩尔比条件下等离子体放电区域温度分布。(a) Ar: H₂ = 3:1; (b) Ar: H₂ = 2:1; (c) Ar: H₂ = 1:1; (d) Ar: H₂ = 1:2; (e) Ar: H₂ = 1:3

Fig.5 Distribution of temperature in the DC arc plasma discharge region at different argon-to-hydrogen mole ratios and a pressure of 8 kPa: (a) Ar: H₂ = 3:1; (b) Ar: H₂ = 2:1; (c) Ar: H₂ = 1:1; (d) Ar: H₂ = 1:2; (e) Ar: H₂ = 1:3

在靠近阴极表面位置,等离子体受到基体表面压缩作用,等离子体流速表面为小幅度上升后再迅速下降,且氢气比例较高时此趋势尤为明显。

2.3.3 不同氩氢摩尔比下基体表面温度分布

温度对于金刚石生长极为关键^[32-34],基体表面温度分布对金刚石膜制备更是至关重要。图7显示了不同氩氢摩尔比条件下基体上表面温度分布变化情况,并与实测值进行对比。基体表面温度受氩氢摩尔比变化影响较大,随着氢气比例增多,基体上表面不同径向位置的温度均明显提高。氩氢摩尔比由3:1降至1:3时基体上表面中心位置温度自722 K增至1164 K,采用热电偶实际测得相应位置的温度由763 K升至1229 K,计算结果与实测值的偏差均小于5%。此外,因基体表面中心位置受到阴极高温射流作用较为明显,而基体表面边缘位置又距阳极斑点附近高温区域较近,随着氢气比例增多,基体表面整体温度上升的同时,基

体表面中心位置与边缘位置升温更为明显,基体表面温度均匀性逐渐变差。考虑到直流电弧等离子体喷射法金刚石膜制备过程中基体表面常用温度为850~950℃^[5],其他条件不变,150 A工作电流条件下,氩氢摩尔比为1:2时能获得适宜金刚石膜生长且相对均匀的基体表面温度。计算获得的基体表面温度与实测值之间存在些许偏差,但变化趋势是相符合的,且偏差不大。偏差的存在很可能与本文等离子体物性参数和电弧计算模型均以局部热力学平衡为基本假设有关。在8 kPa工作压强下,电弧等离子体可能在一定程度上偏离了局部热力学平衡状态。因此,非热力学平衡条件下等离子体物性参数计算和电弧模型的建立将是进一步研究的重点。

3 结论

(1) 氩氢摩尔比对符合直流电弧等离子体喷射法

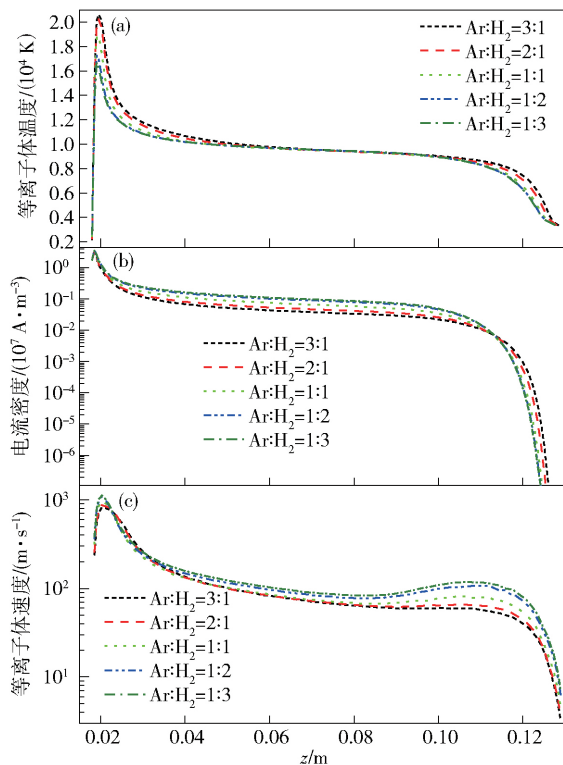


图6 气压为8 kPa、不同氩氢摩尔比条件下等离子体放电区域特征分布。(a) 温度; (b) 电流密度; (c) 速度

Fig. 6 Distribution of parameters in the DC arc plasma discharge region at different argon-to-hydrogen mole ratios and a pressure of 8 kPa: (a) temperature; (b) current density; (c) velocity

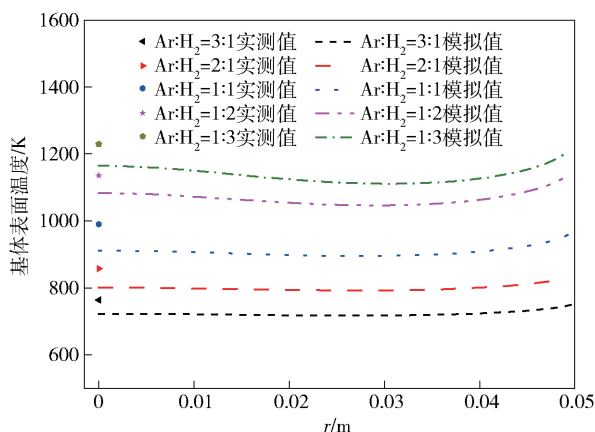


图7 气压为8 kPa、不同氩氢摩尔比条件基体上表面温度分布

Fig. 7 Distribution of temperature on the substrate surface at different argon-to-hydrogen mole ratios and a pressure of 8 kPa

实际工况的低压氩-氢等离子体的热力学和输运性质参数峰值或峰值温度区间影响较大,进而对直流电弧等离子体放电特征产生影响。

(2) 当气压为8 kPa、工作电流150 A和氩氢摩尔比由3:1降至1:3时,上游区域的高温等离子体半径有逐渐减小的趋势;等离子体最大流速由 $829 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增至 $1127 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;最高温度由20600 K逐渐降低至16800 K,

但对基体的加热能力却逐渐增强;基体上表面温度逐渐升高的同时,基体表面温度均匀性变差。其他条件不变的前提下,氩氢摩尔比为1:2时能获得适宜金刚石生长且相对均匀的基体表面温度。

参 考 文 献

- [1] Busch J V, Dismukes J P. Trends and market perspectives for CVD diamond. *Diamond Relat Mater*, 1994, 3(4): 295
- [2] Matsumoto S, Manabe Y, Hibino Y. Diamond deposition using an X-Y stage in a dc plasma jet chemical vapour deposition. *J Mater Sci*, 1992, 27(21): 5905
- [3] Ohtake N, Yoshikawa M. Nucleation effects and characteristics of diamond film grown by arc discharge plasma jet chemical vapor deposition. *Thin Solid Films*, 1992, 212(1): 112
- [4] Lü F X, Huang T B, Tang W Z, et al. Instabilities on diamond film growth by high power DC arc plasma jet method. *Trans Mater Heat Treat*, 2001, 22(1): 46
(吕反修, 黄天斌, 唐伟忠, 等. 直流电弧等离子体喷射金刚石厚膜生长不稳定性问题. 材料热处理学报, 2001, 22(1): 46)
- [5] Li C M, Zhu R H, Liu J L, et al. Effect of arc characteristics on the properties of large size diamond wafer prepared by DC arc plasma jet CVD. *Diamond Relat Mater*, 2013, 39: 47
- [6] Chen G C, Li B, Li H, et al. In situ observation of nucleation by optical emission spectra in CVD diamond. *Diamond Relat Mater*, 2010, 19(1): 15
- [7] Li C M, Wang L M, Chen L X, et al. Free-standing diamond films deposited by DC arc plasma jet on graphite substrates with a destroyable Ti interlayer. *Diamond Relat Mater*, 2009, 18(11): 1348
- [8] Liu J, Hei L F, Song J H, et al. High-rate homoepitaxial growth of CVD single crystal diamond by dc arc plasma jet at blow-down (open cycle) mode. *Diamond Relat Mater*, 2014, 46: 42
- [9] Zhu Z Y, Chen G C, Tang W Z, et al. OES study of the gas phase during diamond films deposition in high power DC arc plasma jet CVD system. *Chin Phys*, 2006, 15(5): 980
- [10] Colombo V, Ghedini E, Sanibondi P. Two-temperature thermodynamic and transport properties of argon-hydrogen and nitrogen-hydrogen plasmas. *J Phys D*, 2009, 42(5): 055213
- [11] Cressault Y, Gleizes A. Thermodynamic properties and transport coefficients in Ar-H₂-Cu plasmas. *J Phys D*, 2004, 37(4): 560
- [12] Murphy A B, Arundelli C J. Transport coefficients of argon, nitrogen, oxygen, argon-nitrogen, and argon-oxygen plasmas. *Plasma Chem Plasma Process*, 1994, 14(4): 451
- [13] Han P, Chen X, Li H P. On the correct form of the Saha equation for two-temperature plasmas. *Chin Phys Lett*, 1999, 16(3): 193
- [14] Wang H X, Sun S R, Chen S Q. Calculation of two-temperature transport coefficients of helium plasma. *Acta Phys Sin*, 2012, 61(19): 195203
(王海兴, 孙素蓉, 陈士强. 双温度氦等离子体输运性质计算. 物理学报, 2012, 61(19): 195203)

- [15] Kramida A, Ralchenko Y, Reader J, et al. *NIST Atomic Spectra Database* (ver. 5.3) [DB/OL]. National Institute of Standards and Technology (2015-10-01) [2016-01-01]. <http://www.physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/Htm/verhist.shtml>
- [16] Wang W Z, Rong M Z, Murphy A B, et al. Calculation analysis on statistic thermodynamic properties of thermal arc plasmas. *J Xi'an Jiaotong Univ*, 2011, 45(4): 86
(王伟宗, 荣命哲, Murphy A B, 等. 平衡态电弧等离子体统计热力学属性的计算. 西安交通大学学报, 2011, 45(4): 86)
- [17] Devoto R S. Transport coefficients of partially ionized hydrogen. *J Plasma Phys*, 1968, 2(4): 617
- [18] Stallcop J R, Levin E, Partridge H. Transport properties of hydrogen. *J Thermophys Heat Transfer*, 1998, 12(4): 514
- [19] Stallcop J R, Partridge H, Levin E. H-H₂ collision integrals and transport coefficients. *Chem Phys Lett*, 1996, 254(1): 25
- [20] Aziz R A, Slaman M J. The repulsive wall of the Ar-Ar interatomic potential reexamined. *J Chem Phys*, 1990, 92(2): 1030
- [21] Aubreton J, Fauchais P. Influence des potentiels d'interaction sur les propriétés de transport des plasmas thermiques: exemple d'application le plasma argon hydrogène à la pression atmosphérique. *Rev Phys Appl*, 1983, 18(1): 51
- [22] Dunker A M, Gordon R G. Bound atom-diatom molecule complexes. Anisotropic intermolecular potentials for the hydrogen-rare gas systems. *J Chem Phys*, 1978, 68(2): 700
- [23] Murphy A B. Transport coefficients of helium and argon-helium plasmas. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1997, 25(5): 809
- [24] Murphy A B. Transport coefficients of hydrogen and argon-hydrogen plasmas. *Plasma Chem Plasma Process*, 2000, 20(3): 279
- [25] Devoto R S. Transport coefficients of partially ionized argon. *Phys Fluids*, 1967, 10(2): 354
- [26] Adibzadeh M, Theodosiou C E. Elastic electron scattering from inert-gas atoms. *At Data Nucl Data Tables*, 2005, 91(1): 8
- [27] Bruno D, Catalfamo C, Capitelli M, et al. Transport properties of high-temperature Jupiter atmosphere components. *Phys Plasmas*, 2010, 17(11): 112315
- [28] Mason E A, Munn R J, Smith F J. Transport coefficients of ionized gases. *Phys Fluids*, 1967, 10(8): 1827
- [29] Devoto R S. Simplified expressions for the transport properties of ionized monatomic gases. *Phys Fluids*, 1967, 10(10): 2105
- [30] Guo J C, Liu J L, Yan X B, et al. Numerical simulation of plasma discharge properties in DC arc plasma jet. *Vac Sci Technol*, 2016, 36(3): 312
(郭建超, 刘金龙, 闫雄伯, 等. 基于 FLUENT 软件直流电弧等离子体喷射法等离子体放电特征二维数值模拟. 真空科学与技术学报, 2016, 36(3): 312)
- [31] Murphy A B. Demixing in free-burning arcs. *Phys Rev E*, 1997, 55(6): 7473
- [32] Zhang H, Li S S, Su T C, et al. Effect of temperature on the (100) surface features of type Ib and type IIa large single crystal diamonds. *Acta Phys Sin*, 2015, 64(19): 0198103
(张贺, 李尚升, 宿太超, 等. 温度对 Ib 型和 IIa 型金刚石大单晶 (100) 表面特征的影响. 物理学报, 2015, 64(19): 0198103)
- [33] Liu C, Wang J H, Weng J. Preparation of the high-quality highly (100) oriented diamond films with controllable growth. *Acta Phys Sin*, 2015, 64(2): 028101
(刘聪, 汪建华, 翁俊. 高质量高取向 (100) 面金刚石膜的可控性生长. 物理学报, 2015, 64(2): 028101)
- [34] Mccauley T G, Gruen D M, Krauss A R. Temperature dependence of the growth rate for nanocrystalline diamond films deposited from an Ar/CH₄ microwave plasma. *Appl Phys Lett*, 1998, 73(12): 1646