

移动大热区拉锥系统中设定参数对拉锥光纤形状的影响分析

孙伟民¹ 袁 明¹ 曾宪金¹ T. A. Birks²

(¹ 哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001
² Department of Physics, University of Bath, Bath BA2 7AY, UK)

摘要 利用离散递推的计算方法, 推导了移动大热区拉锥系统中拉锥光纤形状的计算公式。在推导出的计算方法的基础上, 定性分析了加热火焰移动距离、加热火焰移动速度、光纤拉伸速度等移动大热区拉锥系统的设定参数对拉锥光纤形状的影响, 其中主要分析了对拉锥光纤锥腰形状的影响。发现加热火焰移动距离对拉锥光纤锥腰宽度和锥腰半径都有很大影响, 而加热火焰移动速度、光纤拉伸速度则对拉锥光纤锥腰半径有很大影响, 但是对拉锥光纤锥腰宽度影响不大, 这些发现对大热区熔融拉锥技术具有一定的理论指导意义。

关键词 光纤光学; 光纤拉锥; 离散递推; 大热区; 移动式火焰

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0705005

Impact Analysis of Setting Parameter of Movable Large-Zone Furnace Fiber-Tapering System to Shape of Tapered Fibers

Sun Weimin¹ Yuan Ming¹ Zeng Xianjin¹ T. A. Birks²

(¹ College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)
² Department of Physics, University of Bath, Bath BA2 7AY, UK)

Abstract The calculation formula for the shape of tapered fibers in movable large-zone furnace fiber-tapering system is derived by the discrete deducing method. We analyze the influences of some setting parameters of the movable large-zone furnace fiber-tapering system, such as moving distance, moving speed of the furnace and moving speed of the holders, on the shape of tapered fibers. The impact to the shape of the fiber waist is discussed primarily. It is found that the furnace moving distance affects the fiber waist length and radius greatly, while the moving speed of the furnace and the holders can effect the fiber waist radius visibly. However, both the speed of the furnace and the holders cannot affect the fiber waist length obviously. All these results are important for the large-zone furnace fiber-tapering technology.

Key words fiber optics; fiber tapering; discrete deducing method; large-zone furnaces; movable flame

OCIS codes 060.2280; 060.2340; 060.2290

1 引 言

现今的光纤已经形成了一个庞大的家族, 它不仅作为光通信的介质存在, 而且在很多的光学领域中, 都少不了光纤器件的身影。熔融拉锥装置是一种重要的光纤加工设备, 广泛应用于很多领域, 如制作锥形光纤传感器、熔融拉锥光纤耦合器、波分复用器、滤波器、光开关、光调制器、微球激光器、超

连续光源和光纤连接器等。随着对熔融拉锥器件的应用和研究, 对熔融拉锥技术的要求也越来越高, 人们已经不满足于对称的双锥形光纤以及形状无法控制的非对称双锥形光纤, 一些新型熔融拉锥技术方法和理论分析方法也随之出现。

早期固定火焰熔融拉锥装置利用固定火焰进行加热, 两侧的光纤夹具以同速率背向行进, 利用这种

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-03-14

基金项目: 国家自然科学基金天文专项基金(11078009)和黑龙江省自然科学基金(A200914)资助课题。

作者简介: 孙伟民(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光子晶体光纤、锥形光纤传感器等方面的研究。

E-mail: weimin_sun2003@yahoo.com.cn

装置仅能拉制对称的双锥形熔融拉锥光纤。1992年, T. A. Birks 等^[1]在固定火焰拉锥技术的基础上, 提出了移动点火焰熔融拉锥技术, 基于这种技术的熔融拉锥装置利用移动的点火火焰代替了固定火焰对光纤进行熔融拉锥, 这种拉锥装置可以拉制任意锥形的光纤, 极大地增强了熔融拉锥器件的应用范围。但移动点火焰熔融装置的加热点火焰径向宽度非常小, 不利于进行大尺度光纤(棒)器件的加热与拉锥, 因此人们又设计、制作了一种大热区移动熔融拉锥装置, 例如 Vytran 公司的 GPX-3000 系列玻璃加工熔接系统。

在熔融拉锥技术发展的同时, 人们也在不断地研究熔融拉锥技术的成形理论, 以便于更精确地分析、预测锥形光纤的形状。有的研究者^[2~4]用分段函数模拟锥形曲线, 他们认为锥形曲线的锥形光纤的腰部为直线, 腰外部分则为指数函数曲线, 然而其计算结果与实际的对称双锥形光纤曲线的差异较大。也有研究者^[5~7]认为锥形曲线的曲线函数可以利用抛物线等函数形式表达, 但其模拟计算的结果与实际锥形曲线相比误差依旧较大。对于固定火焰熔融拉锥锥形曲线的计算, 由陈振宜等^[8,9]提出的计算方法是较为精确的, 他们引入了有效熔融区的概念, 通过计算温度分布、环境温度、拉伸速度以及拉伸时间等诸多参数, 从而得到了与实验结果相近的拉锥结果曲线。1992年, T. A. Birks 等^[1]在提出移动点火焰熔融拉锥技术的同时也给出了相应的理论分析。考虑到移动点火焰熔融拉锥技术的特点, 计算移动点火焰拉制的锥形曲线需要额外考虑加热火焰的移动参数, 其难度更高。T. A. Birks 等^[1,10]利用点火火焰的径向宽度非常小的特性, 忽略加热火焰的火焰形状、径向宽度以及温度分布

等因素对拉锥结果的影响, 使得计算过程和推导过程大大简化, 经过计算得到的光纤锥形的形状曲线与实验结果非常吻合。

但对于可以拉锥大口径光纤(棒)器件的移动大热区拉锥系统, 其加热火焰由于宽度较大, 已经无法被看作是点火火焰, 移动点火焰拉锥理论已经无法准确适用于这种拉锥系统, 需要一种新的、更精确的理论来分析其锥形形状曲线与拉锥系统设定参数之间的关系。本文利用移动大热区熔融拉锥光纤形状曲线的计算方法, 研究了各个设定参数对于拉锥结果曲线的影响, 并对其原因进行了定性的分析。

2 理论分析

为了对整个拉锥过程进行分析, 将加热区中的光纤部分单独隔离出来进行分析。加热区中的锥形光纤形状如图 1 所示, 其中 l_w 为腰区长度, $d_w = 2r_w$ 为腰区直径, 长度 l 为加热区域的径向宽度, 其移动速度为 v_L , 光纤两侧夹具 (TS_L 和 TS_R) 拉伸速度各为 $v/2$, 光纤的初始半径为 r_0 。

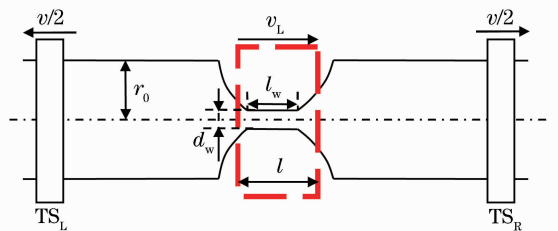


图 1 锥形光纤及拉锥过程示意图

Fig. 1 Structure of tapered optical fiber and the tapering process

在加热拉伸过程中, 移动的大热区(图 2 中虚线框)中不是均匀的光纤, 而是经过复杂拉锥过程形成的非均匀形状。在分析计算时, 将加热火焰的连

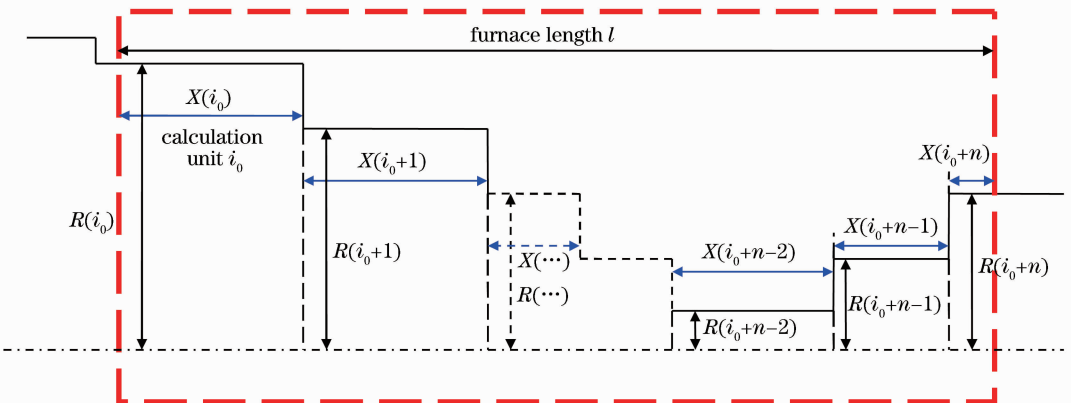


图 2 热区内拉伸运算示意图

Fig. 2 Sketchmap of the elongation process inside the furnace

续移动和加热拉伸过程看作是离散的,即将火焰一边移动一边加热拉伸的过程看作是先移动,再在加热的同时进行拉伸的过程,每一次移动与加热拉伸的过程持续 Δt 时间。

加热过程中,加热火焰区域内的光纤形状如图2虚线框所示,在每一次移动并加热之后,从侧面看,光纤的剖面形状是阶梯型。将剖面的每一个阶梯,即半径相同的部分看作一组,设其半径和宽度分别为 $X(i)$ 和 $R(i)$,视为一个运算单元。并认为热区内部被均匀地加热,热区以外的部分低于材料的软化温度,迅速凝固成锥形,即热区之外的光纤部分在拉伸时只有移动而无形变,所以只对热区内的部分进行计算即可得到下一时刻未加热时的光纤形状。由于初始时刻光纤形状及移动条件已知,通过不断递推计算下一时刻光纤形状,即可得到加热之后的光纤锥形曲线。

计算过程基于两个基本方程:

第一个基本方程是基于光纤质量守恒,设光纤材料的密度不变,就可以得到体积守恒定律

$$x\pi r_0^2 = (x + \Delta x)\pi r^2, \quad (1)$$

式中 x 为热区中某半径光纤加热之前的长度, r_0 为原光纤半径, Δx 为此段光纤在经过 Δt 拉伸之后的伸长长度, r 为拉伸后的光纤半径。

第二个基本方程是基于每段光纤的相对变形量与所受应力成正比

$$\frac{1}{x} \frac{\Delta x}{\Delta t} = K \frac{F}{\pi r_0^2}, \quad (2)$$

式中 x 为光纤被加热区域内,半径相同部分的径向长度,从图2中可以看出, x 即为运算单元的宽度 $X(i)$, Δx 为光纤被加热区域内,半径相同部分的径向长度的变化量,即运算单元宽度 $X(i)$ 的变化量 $\Delta X(i)$, Δt 为每一次移动加热的时间, F 为两侧光纤夹具对光纤的拉力, πr_0^2 为拉力作用的截面面积, K 为比例系数。

在图2中,每一个运算单元都符合体积守恒定律

$$X(i_0)\pi R^2(i_0) = [X(i_0) + \Delta X(i_0)]\pi R'^2(i_0), \quad (3)$$

式中 $X(i_0)$ 为此运算单元拉伸前的宽度, $\Delta X(i_0)$ 为此时刻拉伸后的伸长长度, $R(i_0)$ 为此运算单元拉伸前的半径, $R'(i_0)$ 为此运算单元此时刻拉伸后的半径。

对于第二个基本方程,对于图2中的第 i_0 个运算单元

$$\frac{1}{X(i_0)} \frac{\Delta X(i_0)}{\Delta t} = K \frac{F}{\pi R^2(i_0)}, \quad (4)$$

由于 K 和 F 是未知的,并且不同时刻的拉伸过程的 K 和 F 是不同的,所以每一次加热火焰移动之后,都必须重新计算 K, F 的值。

由图2可知,热区长度 l 为热区内所有运算单元宽度之和,即

$$l = \sum_{j=i_0}^{i_0+n} X(j). \quad (5)$$

而每一时刻(持续 Δt 时间)的拉伸过程中伸长总量 ΔX 是固定的,为拉伸速度 v 与 Δt 的乘积,则有

$$\Delta X = v\Delta t = \sum_{j=i_0}^{i_0+n} \Delta X(j). \quad (6)$$

由(4)式可知

$$\Delta X(i_0) = K \frac{F}{\pi R^2(i_0)} \Delta t X(i_0). \quad (7)$$

将热区内所有运算单元的伸长长度加和,有

$$\sum_{j=i_0}^{i_0+n} \Delta X(j) = \sum_{j=i_0}^{i_0+n} K \frac{F}{\pi R^2(j)} \Delta t X(j) = \Delta X, \quad (8)$$

$$KF \sum_{j=i_0}^{i_0+n} \frac{1}{\pi R^2(j)} \Delta t X(j) = \Delta X, \quad (9)$$

$$KF = \frac{\Delta X}{\sum_{j=i_0}^{i_0+n} \frac{\Delta t X(j)}{\pi R^2(j)}} = \frac{v\Delta t}{\sum_{j=i_0}^{i_0+n} \frac{\Delta t X(j)}{\pi R^2(j)}} = \frac{\pi v}{\sum_{j=i_0}^{i_0+n} \frac{X(j)}{R^2(j)}}. \quad (10)$$

有了某一 Δt 时间段拉伸过程中 KF 的值,就可以依据此时刻热区内每一个运算单元的参数算出下一时刻拉伸过程中 KF 的值和每一个运算单元的参数了。

由(3),(7),(10)式可知,拉伸后的第 i_0 段光纤半径为

$$R'(i_0) = \sqrt{\frac{X(i_0)R^2(i_0)}{[X(i_0) + \Delta X(i_0)]}} = \sqrt{\frac{X(i_0)R^2(i_0)}{[X(i_0) + \frac{KF}{\pi R^2(i_0)}X(i_0)\Delta t]}} = \sqrt{\frac{\pi R^4(i_0)}{\pi R^2(i_0) + KF\Delta t}}. \quad (11)$$

在运算中,基本方程(1)和(2)可以适用于每一个运算单元。每一次火炉移动以及拉伸中,依靠(10)式求出系数 K 和 F ,依靠(7),(11)式求出热区内每一个运算单元的伸长量以及拉伸之后的半径,这样理论上可以从第一次拉伸一直到拉伸过程结束,从而计算出拉伸之后的锥形形状曲线。

3 拉锥参数对锥形曲线的影响分析

在移动大热区拉锥过程中,需要计算的拉锥参数主要有:加热火焰径向宽度 l ,加热火焰的具体移动路径,加热火焰移动速度 v_L ,拉伸速度 v 。为了找出拉锥参数对锥形曲线的影响,对加热火焰的具体移动路径进行了简化,即认为连续的同向移动是一次整体移动,并且加热火焰每次的移动距离是相同的,都为 L_0 ,且在拉锥过程中,加热火焰共移动 n 次。这种情况下,如果以实验台为参照物,则可看出加热火焰是在固定的区域中以恒定的速率往返移动。

为了分析各个拉锥参数对拉锥结果的影响,选取了一组参数作为基础数据。基础数据中,取加热火焰移动距离 $L_0 = 40$ mm,加热火焰径向宽度 $l = 100$ mm,加热火焰往返次数 $n = 26$,加热火焰移动速度 $v_L = 30$ mm/min,拉伸速度 $v = 7$ mm/min。图3所示曲线为基于基础数据计算出的锥形曲线。

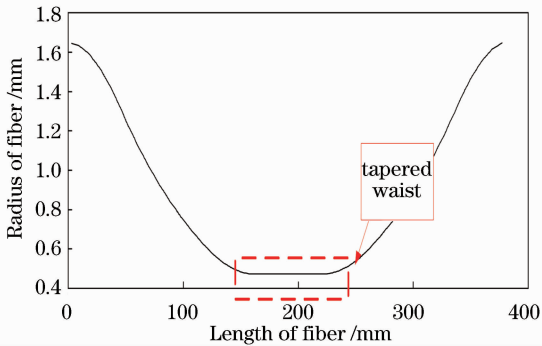


图3 利用基础数据计算出的锥形曲线
Fig.3 Tapered shape curve calculated based on the basic data

图3中的平坦部分为锥形腰区,严格意义的锥形腰区部分拥有半径相等且锥半径最小的特性。如图3中虚线框所示,腰区宽度 l_w 为平坦区域的长度,锥腰半径 r_w 则为平坦区域所对应的纵坐标值。

为了分析各个参数对锥形光纤形状的影响,在简化加热火焰移动路径的情况下,主要讨论锥腰部分与其他参数的变化情况,并对其进行了拟合,尝试分析出现此变化的原因。

3.1 移动距离 L_0 的影响

以 L_0 为变量,以加热火焰往返次数 $n = 26$,加热火焰移动速度 $v_L = 30$ mm/min,拉伸速度 $v = 7$ mm/min为确定参数,分别取 $L_0 = 80, 70, 60, 50, 40$ mm时,得到的锥形曲线如图4(a)所示。

由图4(a)可见,随着 L_0 从40 mm变化为80 mm,腰区宽度 l_w 与腰区半径 r_w 都不断变小。

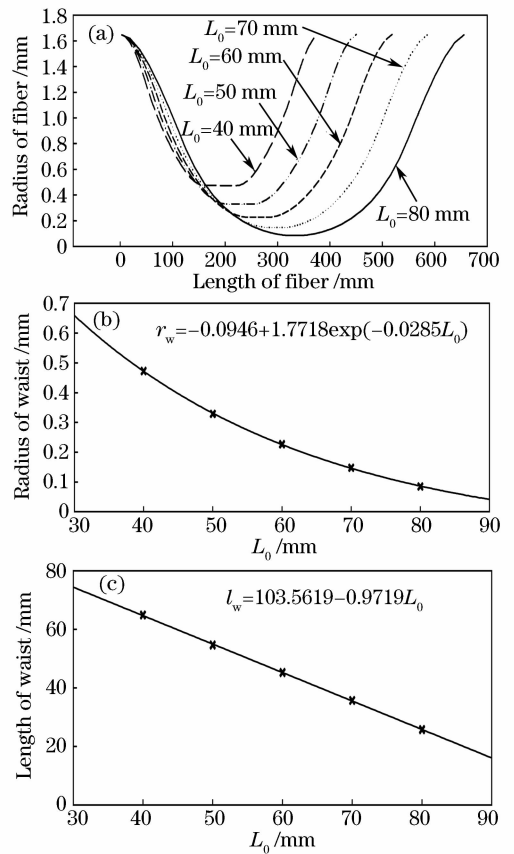


图4 L_0 变化得到的仿真数据曲线。(a) 锥形曲线, (b) 锥腰半径曲线, (c) 锥腰宽度曲线
Fig.4 Simulation data curves of different L_0 . (a) tapered shape curves, (b) tapered waist radius curve, (c) tapered waist length curve

腰区半径 r_w 随加热火焰移动距离 L_0 的拟合变化曲线如图4(b)所示,可以拟合为指数函数 $r_w = -0.0946 + 1.7718\exp(-0.0285L_0)$;腰区宽度 l_w 的拟合变化曲线如图4(c)所示,可以拟合为线性函数 $l_w = 103.5619 - 0.9719L_0$ 。经过分析,发现锥腰宽度 l_w 随 L_0 增加而减小的原因是随着其移动距离增加,每次移动中被加热的范围不断增加;在加热区域中,严格意义上的锥腰部分成形原因主要是光纤被加热的部分中有一部分始终在被加热,即加热火焰每一次移动过程中其终止位置与初始位置会出现重合部分;而在 n 次的移动中,会有一部分区域在每次移动中都会出现重合,即这部分区域在加热开始直至加热结束的过程中,一直被持续加热,才会形成统一的最小半径。这部分区域的宽度 l_d 基本就是锥腰部分的宽度 l_w 。如图5所示,重合区域的宽度 l_d 由加热火焰宽度 l 与加热火焰移动距离 L_0 决定。从图中可以看出,第 n 次移动过程中重合区域的宽度为 $l_d = l - L_0$,若 l 固定不变,当 L_0 增加,每一次的重合

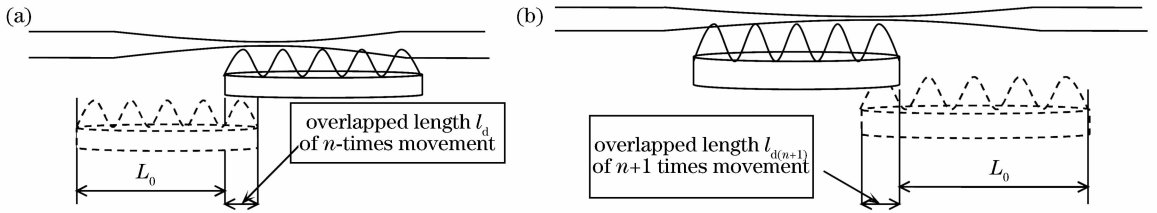


图5 加热火焰第 n 次移动(a)以及第 $n+1$ 次移动(b)状态示意图

Fig. 5 Sketchmap of the (a) n -times and (b) $(n+1)$ times movement

部分都将减少,锥腰部分的宽度也一定会减少。

而锥腰半径 r_w 之所以随 L_0 增加而变小,是因为 L_0 增加,而移动速度 v_L 和 v 却保持不变。因此造成光纤被加热的时变长,光纤被加热的区域也变大。相应地,腰区对应的光纤部分会被加热更长的时间,因此其半径 r_w 会变得更小。

3.2 加热火焰移动速度 v_L 的影响

以 v_L 为变量,以加热火焰往返次数 $n = 26$, $L_0 = 40$ mm,拉伸速度 $v = 7$ mm/min为确定参数,分别取加热火焰移动速度 $v_L = 42, 36, 30, 24, 18$ mm/min,得到的锥形曲线如图 6(a)所示。

由图 6(a)可见,随着加热火焰移动速度 v_L 的增加,锥腰宽度 l_w 几乎没有变化;而锥腰半径 r_w 则随 v_L 的增加显著变大。锥腰半径 r_w 变化曲线及锥腰宽

度 l_w 随 v_L 变化的拟合曲线分别如图 6(b)和(c)所示。锥腰半径 r_w 与加热火焰移动速度 v_L 的变化关系可以拟合为指数函数 $r_w = -0.3919 + 1.6246 \times [1 - \exp(-0.0253v_L)]$ 。可以看出, v_L 对于锥腰宽度 l_w 的影响较小,主要是因为 v_L 只影响加热持续时间,并不影响加热的重合区域。因此,对于锥腰宽度 l_w 这一受加热重合区域影响最大的参数, v_L 几乎不产生影响。

而 v_L 对于锥腰半径的影响则较大。因为当 v_L 增加,在 L_0 以及 n 相同的情况下, v_L 越大,加热火焰移动越快;每一个被加热区域在一次移动过程中被加热的时间就会减少,总持续时间也会减少,总的拉伸距离也会减小,因此锥腰半径会随 v_L 增加而增加。

3.3 拉伸速度 v 的影响

以 v 为变量,设定加热火焰往返次数 $n = 26$, $L_0 = 40$ mm,加热火焰移动速度 $v_L = 30$ mm/min为确定参数,分别取拉伸速度 $v = 9, 8, 7, 6, 5$ mm/min,得到的锥形曲线如图 7(a)所示。

由图 7(a)可见,随着拉伸速度 v 增加,锥腰宽度 l_w 几乎没有变化,而锥腰半径 r_w 则显著减小。锥腰半径 r_w 拟合变化曲线及锥腰宽度 l_w 变化曲线分别如图 7(b)和(c)所示,锥腰半径 r_w 与 v 可以拟合为指数函数 $r_w = 0.0418 + 1.695 \exp(-0.1972v)$ 。

由图 7(a)和(b)可以看出, v 的变化对于锥腰半径 r_w 的影响较大:随着拉伸速度 v 的增加,锥腰半径 r_w 以指数形式变小。主要原因是当 L, n 不变,即拉锥总持续时间不变时,若拉伸速度 v 变大,将导致总的拉伸长度以及单位时间的拉伸长度都增加;加热区域宽度 l 不变,单位时间被拉伸得越长,则拉伸后的半径越小。因此 L_0 以及 n 不变时, v 越大锥腰半径 r_w 越小。

图 7(c)表示了 v 与锥腰宽度 l_w 之间的关系,由于拉伸速度 v 主要表征的是拉伸速度的快慢,对加热火焰的重合区域没有太大影响,因此对严格意义上的锥腰宽度 l_w 并没有太大的影响,其关系从图 7(c)中即可看出。

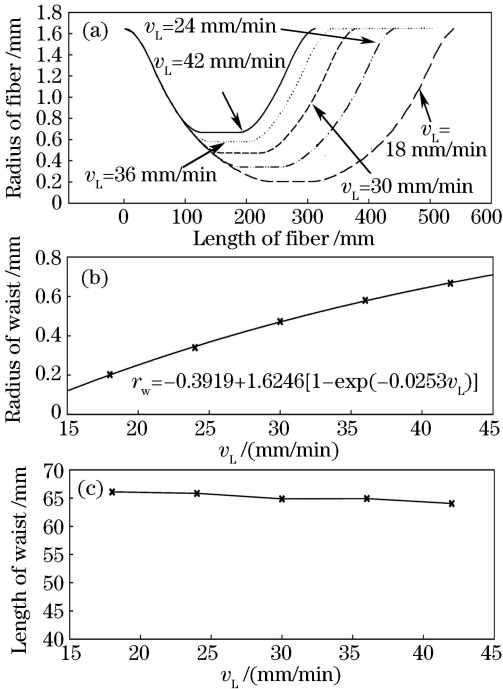


图6 v_L 变化得到的仿真数据曲线。(a) 锥形曲线, (b) 锥腰半径曲线, (c) 锥腰宽度曲线

Fig. 6 Simulation data curves of different v_L . (a) tapered shape curves, (b) tapered waist radius curve, (c) tapered waist length curve

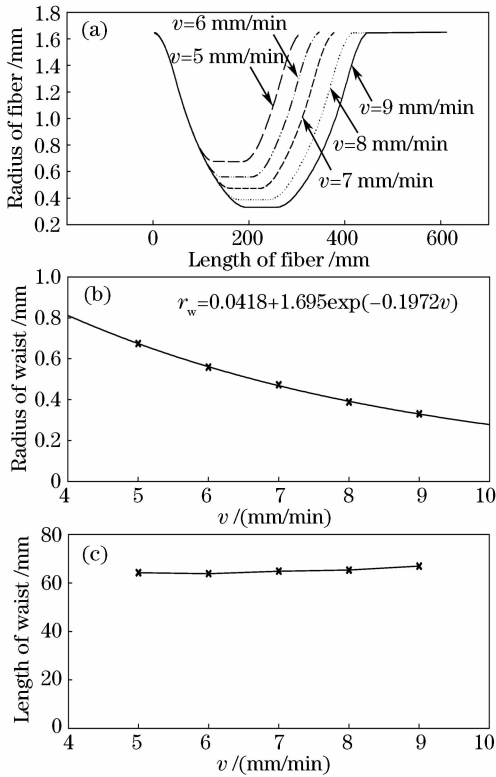


图 7 v 变化得到的仿真数据曲线。(a) 锥形曲线, (b) 锥腰半径曲线, (c) 锥腰宽度曲线

Fig. 7 Simulation data curves of different v . (a) tapered shape curves, (b) tapered waist radius curve, (c) tapered waist length curve

从以上仿真结论不难看出,对锥腰部分的两个基本参量,即锥腰半径 r_w 和锥腰宽度 l_w , 3 种参量 L_0, v_L, v 的改变都造成了不同的影响。其中 L_0 与锥腰半径 r_w 呈指数减小关系,而与锥腰宽度 l_w 则可以拟合为线性递减曲线; v_L 对锥腰宽度 l_w 几乎不造成影响,与锥腰半径 r_w 则成指数增加关系; v 也几乎不对锥腰宽度 l_w 造成影响,但是与锥腰半径 r_w 则呈指数减小的关系。

4 结 论

在大热区移动式拉锥系统中,加热区不能被看作点热源,炉内光纤形状也在实时变化,很难给出一个解析的光纤形状解。利用提出的分段仿真方法,

研究了拉锥参数对锥形光纤形状的影响,并针对其原因进行了定性分析。从结果以及原因分析可以看出,在加热火焰每次移动距离 L_0 和加热火焰移动次数 n 已经确定的情况下,可以通过设定 L_0 确定锥腰宽度 l_w ,并通过调节 v 和 v_L 在一定范围内调整锥腰半径 r_w ,这样就可以根据要求的锥腰半径 r_w 和锥腰宽度 l_w 计算需要输入的参数,从而指导特殊形状光纤的拉锥过程。

参 考 文 献

- 1 T. A. Birks, Y. W. Li. The shape of fiber tapers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(4):432~438
- 2 M. Elsenmann, E. Weidel. Single-mode fused biconical couplers for wavelength division multiplexing with channel spacing between 100 nm and 300 nm [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(1):113~119
- 3 Yang Szuwen, Wu Tzonglin, Wu Chengwen *et al.*. Numerical modeling of weakly fused fiber-optic polarization beamsplitters Part II: The three-dimensional electromagnetic model [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(4):691~696
- 4 Wu Tzonglin. Three-dimensional electromagnetic modeling of fiber-core effects on the coupling characteristics of weakly fused tapered fiber-optic couplers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(7):1024~1030
- 5 W. K. Burns, M. Abebe, C. A. Villarruel. Parabolic model for shape of fiber taper [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(17):2753~2755
- 6 W. K. Burns, M. Abebe. Coupling model for fused fiber couplers with parabolic taper shape [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(19):4190~4192
- 7 J. M. P. Rodrigus, T. S. M. Maclean, B. K. Gazey. Parabolic shape of a tapered fused coupler-comparison with experiment [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(9):1578~1581
- 8 Chen Zhenyi, Wang Tingyun, Yan Fang *et al.*. Theoretical and experimental investigation of dynamic-shape-curve function for fused tapering optical fiber [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(11):1291~1296
- 9 Chen Zhenyi. Tapering shape function for a fused fiber [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2007, **13**(4):383~388
- 10 Sun Weimin, Shi Shuai, Dai Qiang. Fabrication and measurement of tapered fibers [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(11):1474~1477
- 11 孙伟民,石 帅,戴 强. 拉锥光纤的制作工艺与测试方法[J]. *光电子 • 激光*, 2009, **20**(11):1474~1477