

# 微纳光纤加热拉伸制备工艺的研究

周敏雯 李新碗

(“区域光纤通信网与新型光通信系统”国家重点实验室, 上海交通大学)

**摘要:** 本文对微纳光纤加热拉伸制备的工艺进行研究。在加热拉伸准备工艺方面, 本文指出, 干净地去除多层涂覆层、火焰-光纤距离及流量调整、和夹具调整是影响微纳光纤损耗的重要因素; 在加热拉伸过程工艺方面, 本文从预加热时间和拉伸速度两个角度进行研究, 对参数进行优化处理。实验结果表明, 通过本文所阐述的工艺进行微纳光纤的制备, 成品具有损耗较小, 且可重复性较高的优点。

**关键词:** 微纳光纤; 光纤拉伸; 预加热时间; 拉伸速度

## Research on the Fabrication of Micro-nano Fiber by Drawing

Zhpu Minwen Li Xinwan

(State Key Lab. of Adv. Opt. Commun. Syst. &amp; Networks, Shanghai Jiao Tong Univ.)

**Abstract:** The fabrication of micro-nano fiber by taper drawing is addressed in this paper. In

The aspect of preparation of the fiber tapering, it was pointed out that complete removal of the multi-layer coating, fine adjustment of the fire-fiber distance/fire flux and proper adjustment of the clamps are the keys to make low-loss micro-nano fibers. For the process of the fiber taper drawing, the pre-heating time and stretching speed are carefully examined for parameter optimization. It is shown by experiments that the proposed scheme promises low-loss fibers with good reproducibility.

**Key words:** micro-nano fiber; fiber drawing; pre-heating time; stretching speed

### 0 引言

近年来, 微纳光纤的拉伸制备技术成为一项微纳尺度上的材料和光学研究的热点。这主要是因为微纳光纤能产生较大的倏逝场, 且具有较高的光功率密度等特性, 从而在实现高灵敏度的非线性光学器件方面, 比如微纳光纤环形结激光器和微纳光纤环形腔等, 展现出无限的可能。

制备微纳光纤的常用方法是, 通过热源对去掉涂覆层的标准单模光纤的部分区域进行加热, 使光纤软化, 再从加热区域的一端或是两端, 进行手动或是机械拉伸, 从而使加热区域的光纤的物理尺寸变细, 可得到直径仅数百纳米的微纳光纤。文献<sup>[1]</sup>首先公布了通过手动的两步拉伸法成功制备出小直径低损耗微纳光纤的成果, 向人们展示了小直径低损耗微纳光纤制备的可能性, 掀起了这一方向的研究热潮。其后, 文献<sup>[1]</sup>的作者继续致力于微纳光纤的手动制备方法的研究, 又先后提出了自调制拉伸法<sup>[2]</sup>和块状玻璃直接拉伸法<sup>[3]</sup>。与此同时, 其他各科研机构则纷纷尝试重复性更高的机械化制备方法, 利用精密电机控制微纳光纤的拉伸速度和力度, 根据加热源不同又可再分为火焰加热拉伸制备<sup>[4]</sup>(也就是传统制备方法<sup>[5]</sup>)、激光加热拉伸制备<sup>[6]</sup>和电加热拉伸制备<sup>[7]</sup>等。

然而现有的拉伸制备方式中都或多或少地存在着拉伸附加损耗较大, 拉伸结果可重复性较差的问题, 这不仅直接影响到了对微纳光纤诱人应用前景的进一步实验研究, 同时不利于微纳光纤今后的生产性批量制备。本文对微纳光纤加热拉伸制备的准备和拉伸两个阶段的工艺分别进行研究, 通过对参数的优化处理, 提出低损耗、高重复性的微纳光纤加热拉伸制备工艺方案。

### 1 微纳光纤加热拉伸制备工艺

#### 1.1 涂覆层去除工艺

无论是哪一种微纳光纤的加热制备方式, 都需要首先去除光纤的涂覆层。为了确保光纤涂覆层既具有足够的柔韧性又具有较高的抗弯折强度, 一般光纤厂商采用

双层涂覆, 即内涂覆层采用较柔软的涂覆材料, 用于保护裸光纤表面免受机械损伤, 并且在光纤使用中起到缓冲外界应力的作用; 外涂覆层采用硬质的涂料, 有利于光纤耐磨损。

当前, 在实际生产中所采用的光纤涂覆层去除方法一般有三种, 即机械式、化学式和热力学机械式<sup>[8]</sup>。通常我们在进行光纤熔接端面处理的时候, 采用普通的机械式去除法就可以达到需要的去除涂覆层的效果。但是, 对于微纳光纤的制备准备则不然, 这是由于去掉光纤涂覆层包括去掉外涂覆层和内涂覆层, 剥线钳主要用于去掉硬质的外涂覆层, 而柔软的内涂覆层与光纤结合得比较牢固, 剥线钳之类的机械方式无法将其彻底剥离, 而机械式去除法<sup>[9-10]</sup>中“将酒精棉夹住光纤轻轻擦拭, 力争一次成功”的清洁方式仅可以去除被剥线钳破坏后的涂覆层颗粒, 却无法将依然黏附在光纤表面的内涂覆层彻底清除干净。

由于诸如氟丙烯酸树脂涂覆层的沸点一般为80°C左右, 而诸如石英光纤包层的熔点一般为1000°C<sup>[11]</sup>, 如果光纤的涂覆层去除得不够干净, 当用温度超过1000°C的火焰对光纤进行加热后, 内涂覆层片断和可能残留的外涂覆层颗粒会与包层一起熔融并迅速汽化。残余的涂覆层物质在短时间内发生物态性质的变化会导致光纤包层受热不均匀, 从而破坏其轴对称几何特征。而几何形状不正的锥形光纤容易激发出基模LP01和LP02之外的其他复杂模式, 造成能量损失, 同时严重影响制备实验的可重复性。

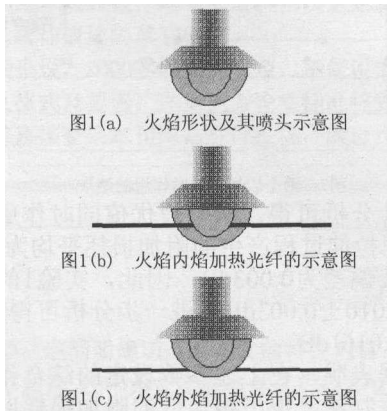
为了微纳光纤的加热拉伸制备, 我们在使用剥线钳剥离涂覆层后, 清洁步骤不“力求一次成功”。在第一次擦拭去除了残余颗粒物之后, 换一块新的浸透无水乙醇的棉胚以一定力度夹住光纤, 沿X轴向以非常缓慢的速度擦拭第二次, 令光纤被溶解液充分浸润, 以保证残余的内涂覆层能够被全方位地充分溶解并随之擦除。然后再使用新的无水乙醇棉胚沿Y轴进行第三次擦拭, 速度中等

即可。三次擦拭后，可以认为微纳光纤制备前去除涂覆层的预处理完成。

### 1.2 火焰-光纤距离及流量

火焰-光纤距离的控制是光纤加热拉伸准备阶段较容易被忽视的一个影响因素。以我们的使用氢气火焰的实验装置为例，火焰形状及其喷头如图1(a)所示。氢气火焰可以分成两个区域，外层呈蓝色，是氢气与氧气燃烧的颜色，温度最高；内层则呈现出红色荧光，那是接触不到氧气或者与氧气燃烧不充分的剩余氢气在外层高温火焰的烘烤下呈现出的颜色。根据我们的研究和摸索实验，当火焰-光纤距离使得光纤加热段主要处于火焰的内焰部分时如图1(b)所示，由于该部分温度不够高，光纤的熔融程度较差，会导致夹具打滑而无法正常拉伸；当火焰-光纤距离使得光纤加热段处于火焰的外焰部分时如图1(c)所示，火焰的温度可以支持拉伸所需的熔融状态。但是需要注意的是，根据文献<sup>[9]</sup>中对光纤拉伸的分析，加热段越长则拉伸效果越好，于是我们在选择火焰-光纤距离的时候存在一个最佳区间，即可以使光纤加热段处于外焰靠近其与内焰分界线区域的距离。

同时，在氢气流量的控制方面也有着最佳的选择范围。这是因为当氢气流量较大时，会导致火焰附近气流的稳定度下降，进而使微纳光纤在接近成品时的微纳直径下容易断裂；而当流量较小时，火焰也随之减小，加热段随之变短，以致损耗变大、也容易造成断裂。



### 1.3 夹具调整架

微纳光纤拉伸制备前的准备工艺中，另外一个重要的因素是被拉伸光纤固定夹具位置的调整。希望微纳光纤制备实验成功率高、成品性能好，就需要在实验进行之前利用光学精密调整架使得固定光纤的两侧夹具槽处在一条直线上。在我们进行过的大量摸索实验中可以发现，当光纤的固定位置不够平直时会使得其受热区域受热不均，而受热不均则会导致光纤加热段熔融程度不足、夹具打滑无法正常拉伸，或者因为熔融段过短而令光纤损耗剧增且易断。

### 2 准备工艺的实验结果

为了对比上述准备工艺对微纳光纤加热拉伸制备结果的影响，我们进行了实验验证。

实验采用图2所示的传统加热拉伸制备微纳光纤的装置。X、Y两个步进电机上分别承载光学精密调整架，其上固定光纤夹具，将光纤中两端分别固定在夹具上，使得去掉涂覆层部分的一段处于火焰头下方。氢气发生器所

产生的氢气通过流量控制仪的控制被匀速地输送到火焰头的部位，在该处被点燃后成为稳定的加热源。PC机通过RS232协议与步进电机控制器建立通信，在PC机上编写应用程序帮助实验者简便而精确地控制步进电机的拉伸长度、速度以及加速度等运动参数。当光纤被火焰加热后处于熔融状态时，两个步进电机按照PC的指令分别向两侧拉伸光纤，使其伸长变细。光纤的一端接在光源上，另一端连接功率计，可以实时观测到拉伸过程中损耗增加的情况。

在实验中，我们统一其他参数，取单边步进电机拉伸速度700p/s，长度7000p。（本实验中采用的步进电机1p=0.319 μm）

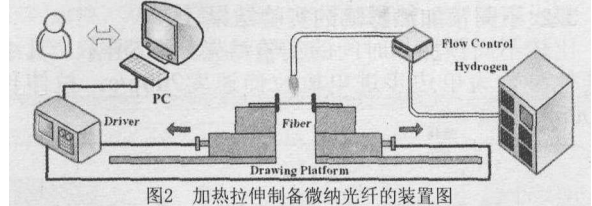


图2 加热拉伸制备微纳光纤的装置图

在实验1中，我们的光纤加热拉伸准备工艺处于摸索阶段，其实验结果见图3；实验2中则对上述准备工艺进行了有针对性的选择和充分的保障，其实验结果见图4。

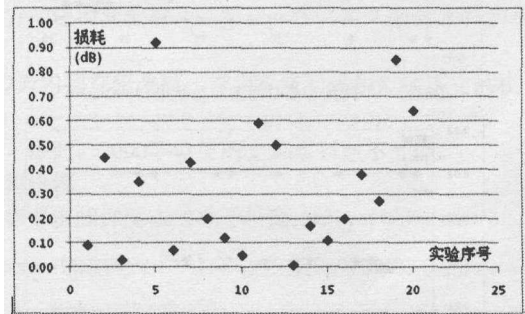


图3 加热拉伸准备工艺不完善的结果

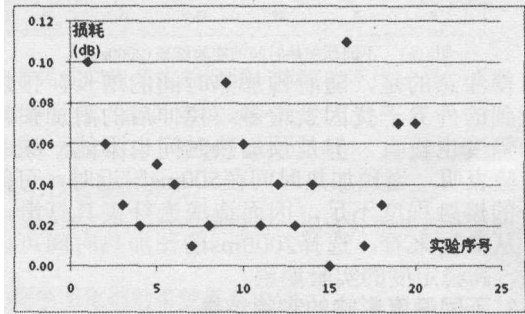


图4 加热拉伸准备工艺完善后的结果

根据统计分析可得，常用机械式去除涂覆层方法的实验结果中，光纤因拉伸过程产生的附加损耗平均为0.322dB，平均值的标准偏差为0.060dB，因此，实验1的损耗增量结果可写为 $0.320 \pm 0.060$ dB，进一步分析可得95%置信区间为(0.203, 0.440)dB。

同样地，经过统计分析，改良的去除涂覆层方法的实验结果中，光纤因拉伸过程产生的附加损耗平均为0.045dB，平均值的标准偏差为0.007dB，因此，实验2的损耗增量结果可写为 $0.045 \pm 0.007$ dB，其95%置信区间为(0.031, 0.058)dB。

可以看到，遵循上述微纳光纤加热拉伸准备工艺后的制备结果，其附加损耗明显减小，且重复性明显增强。

### 3 微纳光纤加热拉伸过程工艺

在满足加热拉伸准备工艺的前提下，我们对微纳光纤加热拉伸的工艺过程进行了进一步的实验研究。

#### 3.1 实验装置升级

为了研究拉伸过程中氢气火焰预加热时间对拉伸结果的影响，我们对实验的软硬件装置同时进行了升级。在硬件方面，我们在氢气火焰下添加了行程轨迹垂直于被拉伸光纤所在直线的步进电机Z，并在控制器中增添上相应的控制模块，使其能够对步进电机Z发送控制指令。而在软件方面，则专门编写了预加热控制的功能模块，对火焰的上火、加热以及退火等一系列动作及其时间进行控制。

#### 3.2 不同预加热影响的实验结果

比较不同预加热时间的实验结果如图5所示。其中统一其他参数为单边步进电机拉伸速度700p/s，拉伸长度70000p。

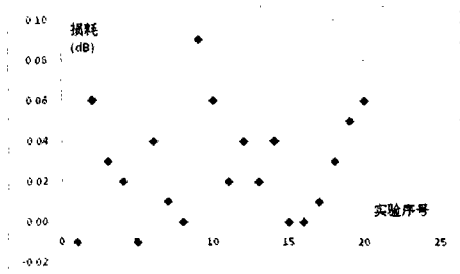


图5(a) 不同预加热时间的实验结果 (3500ms)

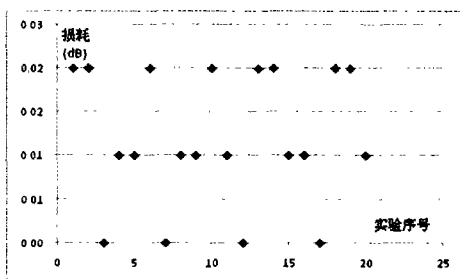


图5(b) 不同预加热时间的实验结果 (2000ms)

值得注意的是，随着预加热时间的增长，预加热过程所受到的外界干扰因素增多，拉伸后的附加损耗较大且波动幅度也较大。但是预加热时间也不能一味求短，因为实验表明，当预加热时间在500ms附近时，可能会发生光纤的熔融程度不足，因而造成光纤夹具打滑，拉伸失败。从数据来看，选择2000ms的预加热时间可以达到低损耗、高稳定度的实验期望。

#### 3.3 不同速度影响的实验结果

比较不同拉伸速度的实验结果如图6所示。其中统一其他参数为火焰预加热时间3500ms，单边步进电机拉伸长度70000p。

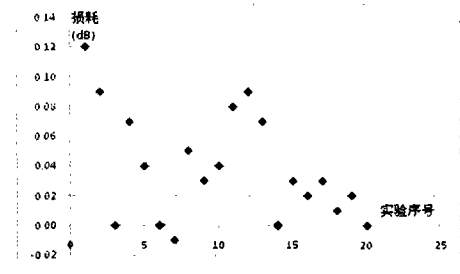


图6(a) 不同拉伸速度的实验结果 (700p/s)

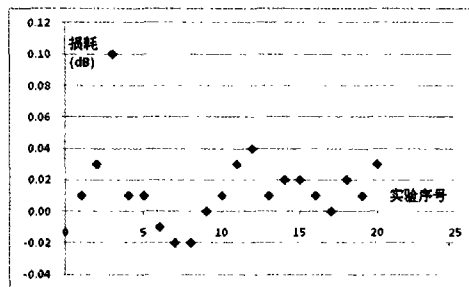


图6(b) 不同拉伸速度的实验结果 (1100p/s)

根据分析和实验结果，我们知道，和预加热时间相对应地，随着拉伸速度的减慢，拉伸过程中所受到的外界干扰因素增多，拉伸后的附加损耗较大且波动幅度也较大。但是拉伸速度也不能一味求快，因为过快的拉伸速度和过短的预加热时间一样，也会导致光纤的熔融程度不足，因而造成光纤夹具打滑，拉伸失败。从实验结果来看，1100p/s的拉伸速度是一个比较适宜的选择。

#### 3.4 两优值同时作用的结果及分析

将两个较优值同时采用，以2000ms的预加热时间和1100p/s的拉伸速度进行实验，得到的结果如图7所示。

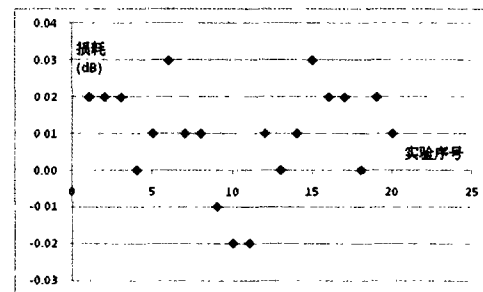


图7 两个较优值同时作用的结果

根据统计分析可得，两个较优值同时作用的实验结果中，光纤因拉伸过程产生的附加损耗平均为0.010dB，平均值的标准偏差为0.003dB，因此，实验1的损耗增量结果可写为 $0.010 \pm 0.003$ dB，进一步分析可得95%置信区间为(0.003, 0.016)dB。

这些数据表明，在上述参数设定的综合作用下，微纳光纤的拉伸制备呈现出相当低的附加损耗以及很高的可重复性。

### 4 结语

本文对微纳光纤加热拉伸制备的工艺进行了研究，提出了在加热拉伸准备阶段和加热拉伸过程中的重要工艺技术点。通过反复实验与总结证明，在微纳光纤加热拉伸制备中，做好加热拉伸的各项准备，与优化调整加热拉伸过程中的参数同样重要。一般而言，涂覆层去除工艺以及拉伸过程中的火焰预热和拉伸速度等因素，是减小微纳光纤损耗的关键因素。本文为微纳光纤加热拉伸制备领域的技术人员提供了简单易操作的详细工艺说明，在微纳光纤制备技术领域中具有较高的实用价值。

#### 参考文献:

[1] Tong, LM, Gattass R R, Ashcom J B, et al. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding [J]. Nature, 2003, 426 (6968): 816-819.

(下接60页)

- [5] UG197 (v1.0).PCI Express Endpoint Block User Guide[G]. 2006.
- [6] UG196 (v1.2).Virtex-5 RocketIO GTP Transceiver User Guide[G]. 2007.

**作者简介:**

周轶男, 江南计算技术研究所, 高级工程师  
电话: 0510-85155422; 13861794927  
电子信箱: zhou\_register@126.com  
通信地址: 江苏省无锡市33号信箱421号 收 (214083)

(上接82页)

- [2] Tong L M, Lou J Y, Ye Z Z, et al. Self-modulated taper drawing of silica nanowires [J]. Nanotechnology, 2005, 16 (9): 1445-1448.
- [3] Tong L M, Hu L L, Zhang J J, et al. Photonic nanowires directly drawn from bulk glasses [J]. Optics Express, 2006, 14 (1): 82-87.
- [4] Brambilla G, Finazzi V, Richardson D J. Ultra-low-loss optical fiber nanotapers [J]. Optics Express, 2004, 12 (10): 2258-2263.
- [5] Payne FP, Mackenzie H S. Novel applications of monomode fibre tapers [C]. Proceedings of SPIE, Fiber-Optic Metrology and Standards, 1991, 1504: 165-175.
- [6] Sumetsky M, Dulashko Y, Hale A. Fabrication and study of bent and coiled free silica nanowires self-coupling microloop optical interferometer [J]. Optics Express, 2004, 12 (15): 3521-3531.
- [7] Lei Shi, Xianfeng Chen, Hongjuan Liu, et al. Fabrication of submicron-diameter silica fibers using electric strip heater [J]. Optics Express, 2006, 14 (12): 5055-5060.
- [8] 彭仁翔, 周次明, 朱海红. TEA CO<sub>2</sub>激光去除光纤涂敷层的实验研究[J]. 激光技术, 2005,29(6): 670-672.
- [9] 陈楠. 光纤网络常用的仪器使用方法及注意事项 [J]. 西部广播电视, 2002, (12): 32-33.
- [10] 黄枢. 光纤端面处理与熔接质量对光纤激光器输出功率的影响[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2007, 6 (B06): 14-18.
- [11] 李刚, 欧书方, 徐剑. 石英光纤涂层材料[J]. 涂料技术与文摘, 2008, (6): 2-5, 14.

**作者简介:**

周敏雯, 上海交通大学电子工程系, 硕士研究生  
手机: 13482558078  
电子信箱: zu365@163.com  
通信地址: 上海市闵行区东川路800号上海交通大学  
电信群楼5号楼200B室 (200240)