

光纤耦合器熔融拉锥粘弹性建模与分析

帅词俊, 段吉安, 王 炯, 钟 掘

(中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙, 410083)

摘要:根据热粘弹流变理论和时温等效原理,以广义 Maxwell 模型模拟高温下熔融光纤玻璃的粘弹特性,建立了光纤耦合器熔融拉锥过程热粘弹数值分析模型;采用热电偶和电位差计测定了气体火焰的温度;并以此温度场作为边界条件,结合有限元软件对光纤耦合器熔融拉锥过程进行热瞬态数值分析,得到了光纤耦合器在熔融拉伸过程中的应力应变场。实验结果表明:当最高温度为 1 171 ℃,拉伸速度为 0.15 μm/s 时,最大拉应力为 20.0 MPa;光纤内部的最大等效应力与拉锥速度呈正比,且在拉伸的过程进行大约 0.4 s 后光纤内部应力达到稳定。

关键词:光纤耦合器; 熔融拉锥; 粘弹流变; 有限元

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2006)01-0079-05

Viscoelastic modeling and analysis of optical fibre coupler in process of fused biconical taper

SHUAI Ci-jun, DUAN Ji-an, WANG Jiong, ZHONG Jue

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Based on thermal rheological theory and time-temperature equivalent principle, the generalized Maxwell model was used to simulate viscoelastic characteristic of fused optical fiber glass. The thermal viscoelastic model of fiber coupler in the process of fused biconical taper was set up. Fused temperature field was measured with thermocouple and potentiometer. Using the temperature as the boundary condition field, the transient analysis of fiber coupler in the process of fused biconical taper was accomplished and stress-strain field was obtained. The results show that when the maximum temperature is 1 171 ℃ and drawing speed is 0.15 μm/s, the maximum stress is 20.0 MPa; the maximum stress is in direct proportion to drawing speed, and it is about 0.4 s when the stress field becomes stable.

Key words: optical fiber coupler; fused biconical taper; viscoelastic rheology; finite element

目前,国内外普遍采用熔融拉锥(fused biconical taper)法制作光纤耦合器,其制作方法是 2 根光纤平行胶合在一起,用可燃气体与纯氧混合加热燃烧,同时,用微电机以一定速率向两端拉伸,最终使火焰熔融区形成双圆锥结构,熔融区横截面长度由 125 μm 拉伸到 20 μm 左右^[1-3]。利用熔融拉锥法制作光

纤耦合器等光纤器件,若拉伸速度太慢,则使光纤在拉伸过程中发生堆积,导致损耗加大,性能降低;若拉伸速度太快,则使光纤器件内部应力过大,严重时产生断裂致使拉锥失败。为此,本文作者根据热粘弹流变理论,利用有限元工具,建立光纤熔融拉锥过程的力学模型,实现对拉伸速度与应力的定量分析。

收稿日期:2005-05-07

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50235040);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-040753);高等学校博士点学科专项科研基金资助项目(20050533037)

作者简介:帅词俊(1976-),男,湖南浏阳人,博士研究生,从事光纤器件制造、计算机辅助设计与制造研究

论文联系人:帅词俊,男,博士研究生;电话:0731-8836858(O),13187317361(手机);E-mail:shuai@mail.csu.edu.cn

1 光纤玻璃的本构方程

在等温(T_0)条件下, 光纤玻璃高温流变特性的积分型本构方程为^[4-7]:

$$\sigma(T_0, t) = \int_0^t 2G(T_0, t - \tau) \frac{de}{d\tau} d\tau + I \int_0^t K(T_0, t - \tau) \frac{d\Delta}{d\tau} d\tau. \quad (1)$$

其中: e 为应变偏张量; Δ 为应变球张量; $G(t)$ 为剪切松弛函数; $K(t)$ 为体积松弛函数; I 为单位张量。

在用粘弹性有限元法分析玻璃等粘弹材料的应力应变时, 通常采用广义 Maxwell 模型的应力松弛模量 $G(t)$; 而从试验或经验中获得的松弛模量数据常用扩展指数形式的 Kohlrausch-William-Watts function(KWW 函数)表达。在进行数值分析前, 需先将 KWW 函数表达式拟合为相应的广义 Maxwell 模型, 求出此时的 Maxwell 模型参数。

1.1 光纤玻璃的 Maxwell 模型松弛模量

函数 $G(t)$ 为剪切松弛函数, 它表示产生并维持单位应变所需要的应力, 为单调递减函数。采用广义 Maxwell 模型表示为:

$$G(T_0, t) = G_0 \sum_{k=1}^n \omega_k \exp(-\frac{t}{\tau_k}). \quad (2)$$

其中: G_0 为初始时刻的剪切模量; ω_k 为加权系数; n 为 Maxwell 单元的个数; τ_k 为松弛时间, 由材料的粘度决定, 由于粘度由温度决定, 所以, 松弛时间是温度的函数。

1.2 KWW 方程的松弛模量

根据经验公式 KWW 方程^[8-10], 松弛模量可用如下公式表示:

$$G_1(T_0, t) = G_0 \exp[-(\frac{t}{\tau})^\beta]. \quad (3)$$

根据文献[8], 材料的粘度与松弛函数相关, 粘度可表示为:

$$\eta = \int_0^\infty G_1(t) dt = G_0 \bar{\tau}. \quad (4)$$

其中: $\bar{\tau} = \eta/G_0$. (5)

将式(4)代入式(5)得:

$$\bar{\tau} = \frac{\tau}{\beta} \Gamma(\frac{1}{\beta}). \quad (6)$$

1.3 松弛模量的转化计算

根据文献[8]可知, 玻璃的应力松弛 β 为 0.5; 由文献[11]可知, 玻璃的粘度 η 为 10.25 Pa·s, 玻璃的剪切模量为 31.4 GPa, 此时玻璃的平均松弛时

间为:

$$\bar{\tau} = \eta/G = 10^{10.25} / (31.4 \times 10^9) = 0.57 \text{ (s)}.$$

根据式(6)有:

$$\tau = \frac{\bar{\tau}}{\frac{1}{\beta} \Gamma(\frac{1}{\beta})} = \frac{0.57}{\frac{1}{0.5} \Gamma(0.5)} = 0.285 \text{ (s)}.$$

同时, KWW 方程为:

$$G_1(T_0, t) = G_0 \exp[-(\frac{t}{\tau})^{0.5}]. \quad (7)$$

在进行数值分析时, 须把式(7)转换成 Maxwell 模型, 即拟合方程:

$$G_0 \exp[-(\frac{t}{\tau})^{0.5}] = G_0 \sum_{k=1}^n \omega_k \exp(-\frac{t}{\tau_k}). \quad (8)$$

使用函数拟合法, 求得 2 种表达式的换算关系, 结果如表 1 与图 1 所示。

表 1 当 $n=9$ 时松弛时间 τ_k 与加权系数 ω_k

Table 1 Relationship between relaxation time τ_k and relevant weight coefficient ω_k

τ_k/s	0.000 7	0.002 1	0.005 9	0.016 4	0.046 0
ω_k	0.024 5	0.049 7	0.063 4	0.068 7	0.112 1
τ_k/s	0.128 8	0.360 6	1.010 0	2.827 0	
ω_k	0.174 3	0.238 3	0.225 1	0.078 2	

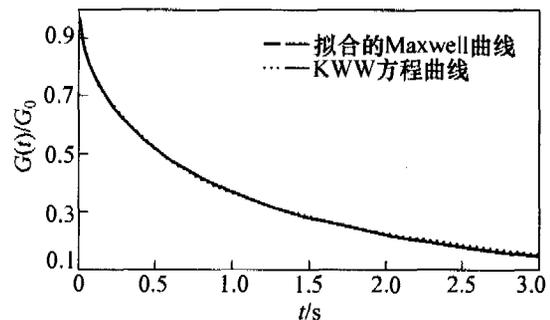


图 1 应力松弛函数的拟合曲线

Fig. 1 Fitting curve of stress relaxation function

2 时温等效原理

玻璃是一种热流变材料, 其应力-应变关系不仅与时间有关, 而且与温度有关, 并遵循“时温等效”原理。在利用熔融拉锥法制作光纤耦合器时, 光纤玻璃处在火焰的温度场中, 其温度分布为空间变化的函数。利用上述关系无法确定温度变化条件下的松弛模量函数, 由于玻璃材料在相当宽的温度范围内遵循“时温等效”原理^[12-14], 利用“时温等效”原理可解决这一问题, “时温等效”原理可表示为:

$$\tau_k(T) = \frac{\tau_k(T_0)}{A(T, T_0)} \quad (9)$$

式中: T 为热力学温度; T_0 为参考热力学温度; $A(T, T_0)$ 为转变方程。根据 Tool-Narayanaswamy 公式确定 $A(T, T_0)$, 即

$$A(T, T_0) = \exp\left[\frac{H}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{X}{T} - \frac{(1-X)}{T_f}\right)\right] \quad (10)$$

式中: H 为激活能, 其值为 $588 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$; R 为摩尔气体常数, 其值为 $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; X 为常数, 根据文献[15], 其值为 0.7; T_f 为假想热力学温度, 其值为 1873 K。

3 几何模型

以火焰中心为坐标原点, 单根熔锥光纤的几何结构如图 2 所示。由于光纤耦合器的结构和载荷均对称于 XOY 平面, 为提高计算速度, 可简化为平面问题分析。取 $X > 0, Y > 0$ 的部分进行分析, 如图 3 所示。

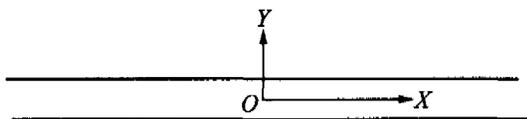


图 2 单根熔锥光纤的几何结构

Fig. 2 Sketch map of simple fused fiber

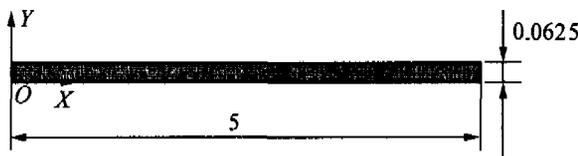


图 3 熔融拉锥模型

Fig. 3 Model of fused biconical taper

4 温度场的测定与计算

4.1 火焰温度场的测定

选用高纯 C_3H_8 和高纯 O_2 燃烧获得熔融温度, 并利用 K 系热电偶和 UJ-33 型电位差计对温度进行测量。由于火焰的温度分布是中央对称的, 故采取从火焰的中心位置开始, 沿着 X 方向测量, 每隔 0.1 mm 计数 1 次, 测得火焰的温度分布如图 4 所示。可见, 火焰中央位置($X=0$)的温度最高, 并随着位置远离中央位置, 火焰的温度逐渐降低, 在 $X=4.1 \text{ mm}$ 时, 火焰的温度只有 $473 \text{ }^\circ\text{C}$, 已远远低于光纤的熔融温度, 所以只测 X 为 $0 \sim 4.1 \text{ mm}$ 时的

温度。将测得的温度利用插值法对光纤的上下表面进行加载。设光纤某一点的横坐标为 x , 其相邻已测 2 点的横坐标为 X_{n-1} 和 X_n , 温度分别为 $T_{X_{n-1}}$ 和 T_{X_n} 。且 $X_{n-1} < x < X_n$, 则 x 点的温度为:

$$T_x = \frac{T_{X_n}(x - X_{n-1}) + T_{X_{n-1}}(X_n - x)}{X_n - X_{n-1}} \quad (11)$$

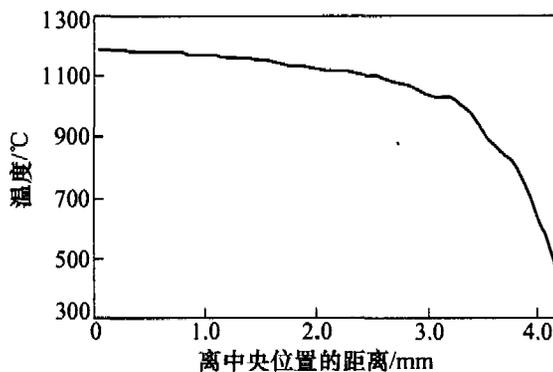


图 4 火焰温度场分布

Fig. 4 Temperature field distribution of flame

4.2 光纤温度场计算

利用 ANSYS 有限元软件进行热分析。选用 PLANE77 二维八节点热单元。此单元有一个温度自由度, 可以用于稳态与瞬态热分析。对对称面即左端面施加对称约束, 对在火焰内的光纤施加火焰温度场, 对未在火焰内的光纤施加对流边界条件, 经计算得温度分布云图(见图 5)。



图 5 光纤温度场分布

Fig. 5 Temperature distribution of optical fibre

5 热流变数值分析

粘弹流变分析单元选用 Visco88 二维八节点粘弹单元(见图 6)。每个单元有 8 个节点, 每个节点有 x 和 y 2 个方向的自由度。单元可以赋予材料 Maxwell 粘弹模型参数进行粘弹性流变分析。

首先, 将热分析单元转化为 Visco88 单元; 然

后, 将热分析所得温度场作为温度体载荷施加到粘弹单元中, 作为起始约束条件对称面施加对称约束。图 7 所示为拉伸速度为 0.15 mm/s 时光纤的应力场分布。

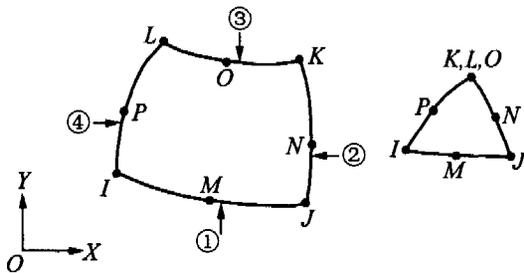


图 6 Visco88 实体模型单元
Fig. 6 Visco88 of solid element



图 7 拉伸速度为 0.15 mm/s 时光纤的应力分布图
Fig. 7 Stress distribution of optical fibre at drawing speed of 0.15 mm/s

由图 5 和图 6 可知, 当最高温度为 1171 °C, 拉伸速度为 0.15 mm/s 时, 光纤中的最大应力为 20.0 MPa, 且应力最高点在火焰对称点 O。图 8 所示为光纤的最大应力点 O 在不同的拉伸速度条件下的最大等效应力。可以看出, 光纤中的最大等效应力与拉伸速度呈正比, 在拉伸的过程中, 大约经过 0.4 s 后其最大应力点应力达到稳定值(见图 9)。

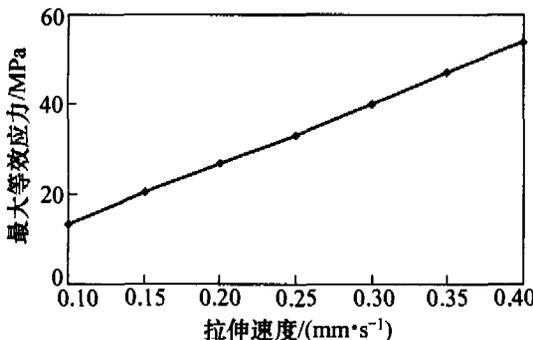
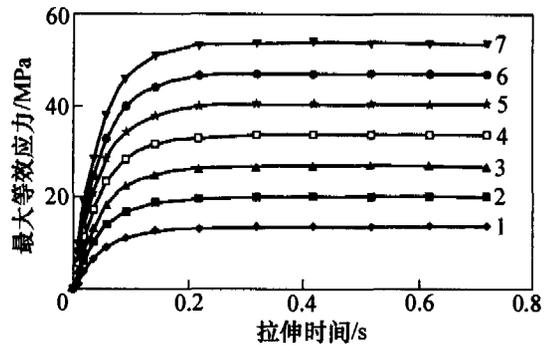


图 8 拉伸速度与最大等效应力的关系
Fig. 8 Relationship between maximum stress and drawing speed



拉伸速度/(mm·s⁻¹): 1—0.10; 2—0.15; 3—0.20; 4—0.25; 5—0.30; 6—0.35; 7—0.40

图 9 最大等效应力与拉伸时间的关系
Fig. 9 Relation between maximum stress and drawing time

6 结 论

a. 采用热电偶和电位差计测得了光纤耦合器熔拉锥时火焰的温度场; 并以此温度场为边界条件, 计算了光纤内部的温度分布。

b. 根据热流变粘弹理论, 采用广义 Maxwell 模型描述了熔融光纤的粘弹特性; 使用有限元工具, 得到了光纤在熔融状态下的应力场分布, 实现了拉伸速度与应力的定量分析。当最高温度为 1170 °C, 拉伸速度为 0.15 mm/s 时, 光纤的最大拉应力为 20.0 MPa。

c. 获得了光纤在不同拉伸速度条件下最大应力的变化规律, 发现光纤内部的最大应力与拉锥速度呈正比。所得结果为光纤器件的制造提供了参考依据。

参考文献:

[1] 宋金声. 我国光无源器件的技术进展和发展趋势[J]. 世界宽带网络, 2002, 9(11): 16-18.
SONG Jin-sheng. Technical evolution and developing current of optical passive device in our country [J]. International Broadband Network, 2002, 9(11): 16-18.

[2] 杨 伟. 光纤无源器件技术发展趋势[J]. 宽带世界, 2003(3): 38-40.
YANG Wei. The technical developing current of optical passive device [J]. Broadband World Forum, 2003(3): 38-40.

- [3] 帅词俊, 段吉安, 苗建宇. 光纤耦合器预拉时熔锥区的热分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(4): 618 - 622.
SHUAI Ci-jun, DUAN Ji-an, MIAO Jian-yu. Thermal analysis of fused biconical taper in the process of optical fibre coupler pre-drawing [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2004, 35(4): 618 - 622.
- [4] Thomas F. Finite-element calculation of stresses in glass parts undergoing viscous relaxation [J]. J Am Ceram Soc, 1987, 70 (2) ; 90 - 95.
- [5] Sakai M, Shimizu S. Indentation rheometry for glass-forming materials [J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2001, 282(3); 236 - 247.
- [6] 王 琛, 刘浩吾. 线性积分模型和微分模型的普遍流变方程[J]. 土木工程学报, 2003, 35(10); 102 - 104.
WANG Chen, LIU Hao-wu. A general rheologic equation of linear integral model and differential model [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(10); 99 - 102.
- [7] 刘朝丰, 鲍文魁, 徐景龙, 等. 剪切模量近似函数和精确数值积分表达式[J]. 上海航天, 2003, 5 (5): 21 - 26.
LIU Chao-feng, BAO Wen-kui, XU Jing-long, et al. An approximate function expression and an accurate numerical calculation method of shear modulus [J]. Aerospace Shanghai, 2003, 5 (5): 26 - 28.
- [8] Sakaguchi S, Todoroki S. Viscosity of silica core optical fiber [J]. Journal of Non-crystalline Solids, 1999, 244(2); 232 - 237.
- [9] 扎齐斯基 J. 玻璃与非晶态材料[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Zarzycki J. Glasses and amorphous materials [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [10] HUANG Nan-nong. Creep deflection of viscoelastic laminated cylindrical panels with initial deflection under axial compression [J]. Composites: Part B, 1999, 30(2); 145 - 156.
- [11] Doremus R H. Melt viscosities of silicate glasses [J]. American Ceramic Society, 2003, 82(3) ; 105 - 110.
- [12] Gorge W. Theories of relaxation [J]. Journal of Non-crystalline Solids, 1990, 123(3); 75 - 89.
- [13] Bonnet J P. On the thermally activated structural relaxation in glasses [J]. Journal of Non-crystalline Solids, 1991, 127(5); 227 - 231.
- [14] Jan P. Master stress relaxation function of silica glasses [J]. Journal of Non-crystalline Solids, 1996, 196(2); 210 - 215.
- [15] George W. Model of structure relaxation in glass with variable coefficient [J]. Communications of the American Ceramic Society, 1986, 89(7); 94 - 96.