1995年第4期　西北建筑工程学院学报　No.4 1995
J. of NW Inst. of Arch. Eng.

光纤损耗机理研究

郑书信
（西安矿业学院　710054）

摘　要　分析了光纤损耗机理，提出了降低损耗的途径。

关键词　光纤损耗机理；吸收损耗；散射损耗
中国图书资料分类号　TN253

光波在光纤中传输，随着传输距离的增加，强度逐渐减弱，光纤对光强产生的衰减作用，称为光纤损耗。它是光纤最重要的光学性质之一，其大小是评定光纤优劣的首要指标，它在很大程度上决定着传输系统的中继距离。低损耗和超低损耗光纤的使用，有利于远距离通信和降低费用。因此，搞清楚产生损耗的机理，定量分析损耗的大小，对研制低损耗或超低损耗光纤和合理使用光纤有着重要的意义。本文分析了光纤损耗的机理，提出降低损耗的一些途径。

1　光纤损耗大小的定义

光纤损耗以 m^{-1} 为单位，其数量定义为

$$\alpha_A(\lambda) = \frac{1}{L}\log P_1/P_2$$

P_1 为入纤前的光强，P_2 为从长度为 L (m)的光纤射出时的光强，P_1 和 P_2 均以 w 为单位。

光纤损耗一方面来源于制造光纤的材料本身性质，另一方面来源于光纤的设计制造和使用条件。前者产生的损耗，称为本征损耗；后者产生的损耗，称为非本征损耗。

2　本征损耗

2.1　本征吸收损耗

本征吸收损耗与光纤的材料有关，即使在其它损耗不存在的理想情况下，它也存在，它基本上确定了任何特定材料的吸收下限。有紫外吸收损耗和红外吸收损耗。

紫外吸收损耗是由于光子与非晶形玻璃材料价带中的电子相互作用，使电子跃迁对光子吸收。电子吸收带的紫外边缘遵从经验公式[1]

收稿日期：1995—03—17
作　　者：男，1940年生，副教授

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\alpha_{A.uv} = C_0 \exp(\lambda_0/\lambda) \tag{2}$$

其中：C_0 为经验常数，λ_0 为紫外本征吸收波长，λ 是入时光波长。上式称为乌尔巴赫定则。

红外吸收损耗是由于光子与玻璃材料中的 Si－O、P－O 和 B－O 中的化学键相互作用，把能量传递给键，引起伸缩振动(分子振动)而产生的吸收损耗。红外吸收损耗的经验公式

$$\alpha_{A.IR}(\lambda) = C_1 \exp(-\lambda_0/\lambda) \tag{3}$$

式中：C_1 为经验常数，λ_0 为红外吸收本征波长。λ 为入射光的波长。

2.2 本征散射损耗

在形成玻璃材料过程中，因为冷却条件不均匀而使玻璃出现分子级大小的密度不均匀或组分不均匀，使其折射率不均匀而引起光的散射产生的损耗。当密度不均匀度与光的波长相比是小尺寸的，产生的损耗称为 Rayleigh 散射。

对单组分玻璃，Rayleigh 散射损耗可用下面两个公式计算。一个是[2]

$$\alpha_{A.R}(\lambda) = 4.343\left(\frac{8\pi^3}{3\lambda^4}\right) n^3 p^2 \beta_T k T_F \tag{4}$$

另一个是[3]

$$\alpha_{A.R}(\lambda) = 4.343\left(\frac{8\pi^3}{3\lambda^4}\right)(n^2-1)^2 \beta_T k T_F \tag{5}$$

式(4,5)中的 n 为折时率，k 是 Bolzmann 常数，P 是光弹性系数，T_F 是固化温度(材料成纤后，其密度不均匀性凝固在玻璃中的温度)，β_T 是等温度压缩系数，由式(4～5)可见，光纤制成后，除光的波长外，其它参数均已确定，只要给定工作波长，就可计算出 Rayleigh 散射损耗。

对多组分玻璃，散射损耗由下式给出[1]

$$\alpha_{A.R}(\lambda) = 4.343\left(\frac{8\pi^3}{3\lambda^4}\right)(\delta n^2)^2 \delta v \tag{6}$$

其中，$(\delta n^2)^2$是体积 δv 中折射率不均匀的方均根的平方，

$$(\delta n^2)^2 = \left(\frac{\delta n}{\delta \rho}\right)^2 (\delta \rho)^2 + \sum_{i=1}^{m}\left(\frac{\partial n^2}{\partial C_i}\right)^2 (\delta C_i)^2 \tag{7}$$

式中：$\delta\rho$ 是密度的起伏，δC_i 是第 i 种组合分浓度的起伏。

3 非本征损耗

3.1 非本征吸收损耗

非本征吸收损耗主要在是制造光纤过程中，材料中存在杂质(如铁、铬、钴、铜等过渡金属离子和氢氧根离子)和缺陷(色心、气泡和结石等)对光吸收产生的损耗。

3.1.1 过渡金属离子的吸收损耗

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

过渡金属离子对光纤损耗影响很大，即使在光纤中它们的含量小于10^{-9}也是实现光纤低损耗的主要障碍。这是由于两个能级间的电子跃迁(与过渡金属离子的未完全填满的内部支壳层有关)或电荷从一个离子转移到另一个离子对光吸收而产生光纤损耗。

过渡金属杂质无论在光纤的原材料中，或是在制造过程中，总是存在的，它影响着光纤损耗。因此，提高光纤材料的纯度和改善制造光纤的工作环境，是降低光纤损耗的重要途径。

3.1.2　OH^-吸收损耗

OH^-对光纤损耗影响也很大，特别是对某些波长。例如，在$\lambda=1.39\ \mu m$，含量为10^{-6}的OH^-产生的吸收峰值损耗高达 $0.033\ m^{-1}$。OH^-主要来源于原材料中含有的水分及含氢化合物，它对长波长区很宽的波长范围都有相当影响，要获得低损耗光纤的重要条件之一，就是把OH^-的含量降到足够低的程度，当含量低于10^{-9}以下，OH^-的吸收损耗就可忽略。人们已经找到了一些消除OH^-的方法，例如，在制造石英玻璃光纤时，通入氯化亚硫酰气，或用氘来置换玻璃中的氢，都会使OH^-的吸收损耗大幅度下降。

3.2　非本征散射损耗

3.2.1　结构不完善散射损耗

在制造光纤过程中，由于纤芯和包层材料的物理、化学性能不同，特别是熔融时的粘度和熔融点不同引起芯---层界面的不完整性。在制作予制棒和拉丝过程中，对温度、速度、流量等控制不好，也会产生芯——层界面的不完整性和芯径的不均匀性，引起模式转换或模式耦合而产生散射损耗。如果忽略模式耦合影响，那么，对阶跃折射率型光纤，(v,m)次模式的损耗为[6]

$$\alpha_A(v,m)=\alpha_1+(\alpha_2-\alpha_1)P_{层}/P \tag{8}$$

对该模式中的百分功率加权，并对所有模式求和，就可得到光波导的总损耗。对梯度折射率型光纤，在距纤芯轴线距离为 r 处，其损耗为[6]

$$\alpha_A(r)=\alpha_1+(\alpha_2-\alpha_1)\frac{\eta^2(0)-\eta^2(r)}{\eta^2(0)-\eta_2^2} \tag{9}$$

式(8～9)中的 α_1 和 α_2 是纤芯和包层的损耗系数，$\eta(0)$是轴线上的折射率，η_2 是包层的折射率。

3.2.2　受激 Brillouin 散射和受激 Raman 散射

光在光纤中的传播，引起电致伸缩。当光波很强时，电致伸缩所形成的弹性波与光波发生显著的受激散射，称为受激 Brillouin 散射。

在强光作用下，光纤材料中的分子振动和旋转，使得光纤极化程度不一样而呈非线性，诱发的散射称为 Raman 散射。当把入纤光的强度限制在阈值以下时，受激 Brillouin 散射和受激 Raman 散射对光传输不产生影响。

3.3　辐射损耗

光纤在绞合成缆及光缆在敷设过程中，总存在一定的弯曲。光纤弯曲会使传导模的部分

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

能量在光纤包层中传输，产生辐射损耗。

对大弯曲，损耗按指数规律随曲率半径 R 的减小而增加，即

$$\alpha_A(R) = C_2\exp(-C_3R) \tag{10}$$

式中：C_2 和 C_3 是常数，与曲率半径无关，当 R 减小到某一临界值(和波导设计有关)，如果再减小，损耗会突然变的非常大。

对微弯(几个 μm 的本地轴向偏移和几个 mm 的空间波长弯曲)，其损耗的实验性关系为

$$\alpha_A \propto (\frac{\alpha}{\alpha+b})^2 \cdot (\frac{1}{NA})^4 \tag{11}$$

式中：α 为纤芯半径；b 为包层厚度；NA 为光纤的数值孔径。

在设计敷设光缆时，尽量减小弯曲，使大弯曲损耗减小到可忽略程度。减小微弯损耗的一种方法是在光纤表面模压一个可压缩的护套，可减小侧压，保持光纤相对直的状态。

光纤通信是当代新技术革命的特征之一，制造低损耗和超低损耗光纤，可以使光信号传输更长距离而不用增强，即中继站间距可以增长，这就降低了远距离通信的费用。研究损耗机理，寻找降低损耗的途径，使损耗降低到最小程度，是光纤研究的重要课题之一。

参考文献

1 Olshansky R. Propagation in Glass Optical Waveguides. Rev. Mod. Phys. 1979,(51):341～367

2 Pinow DA, Rich TC. Osterneyer FW etc.. Fundamental Optical Attenuation Limits in the Liquid and Glassy State with Application to Fiber Optical Waveguide Material ,Appl. Phys. Lett. 1973,(22):527～529

3 Maurer R. Glass Fibers for Optical Communications .Proc. IEEE, 1973,(61):452～462

4 杨同友. 光纤通信技术. 北京：人民邮电出版社，1986. 52

5 李培俊. 光导纤维. 北京：科学出版社. 1984. 16

6 Gloge D. Propagation Effects in Optical Fibers. IEEE Trans. Microwave Theory Phys. 1975,MTT—23. 106～120

Study on the Loss Mechanism of Optical Fibers

Zheng Shuxin

(Xi'an Mining Institute)

Abstract: The loss mechanism of optical fibers is analysed, and the ways to depression loss are presented.

Key Words: optical fibers loss mechanism; absorption loss; scattering loss

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net