

# 一种耐火防咬啄光缆的设计与制造

## 摘要 Abstract

有些光缆会敷设在较为恶劣的环境中，敷设后被啮齿类动物（老鼠、松鼠、鸟类等）咬坏引起通信中断的事故频发。且同时，随着各种灾害和事故的频频发生，光缆等充当助燃原料，使得火灾蔓延，影响线路的运作，造成极大的经济损失。本文介绍的一种室外敷设用的光缆是在普通光缆结构的基础上增设了耐火、防鼠防鸟啄功能。

Some optical cables will be laid in a relatively harsh environment and are laid down by rodents (mice, squirrels, birds, etc.), which cause frequent incidents of communication interruption. At the same time, along with all kinds of disasters and accidents happen frequently, optical cable and other materials are used as combustion supporting materials, making the fire spread, affecting the operation of the lines, causing great economic losses. A kind of optical cable used in this paper is to add fire resistant, anti-mouse and bird-proof pecking function on the basis of common optical cable structure.

## 关键词 Key Words

耐火 防鼠 防鸟啄 光缆 室外

fire resistance; anti mouse; bird proofing; optical fiber cable; outdoor

## 1. 前言

### 1.1 针对防鼠、防鸟啄功能而言

目前市场上防鼠、防鸟啄光缆结构形式主要是松套管层绞式缆芯外加玻璃纤维或金属铠装层。金属铠装层硬度大，啮齿类动物、鸟类无法咬破和啄穿，但重量大，施工困难且生产成本低；玻璃纤维纱铠装层能够扎伤动物口腔，但这种玻璃纤维必须很厚才能达到明显的效果。

为了满足城市基建、城市下水道和山区对防鼠、防鸟啄光缆日益增长的需求，在提高光缆的防咬啄效果的同时，需减轻成缆重量，降低生产成本，本文提出一种加强型全介质FRP（Fiber Reinforced Plastic，亦称玻璃钢或玻璃增强塑料）铠装防咬啄光缆。相较于传统的防咬啄光缆，加强型全介质光缆具有重量轻、防咬啄效果优异、施工方便、应用范围广等优点，为山区、城市下水道等鼠害严重地区以及鸟害严重的林区的光通信提供更好的解决方法。

### 1.2 针对耐火功能而言

在各种火灾中，光缆、线缆等常常扮演导火线的角

色，使火灾迅速扩大蔓延，并损害贵重的电子仪器和设备，影响通信线路的正常运作甚至瘫痪，从而扩大了灾害的损失。为此低烟无卤、低毒、耐火阻燃光缆就显得更加的重要并具有现实的经济和社会意义。<sup>[1]</sup>

## 2. 设计思路

防鼠、防鸟啄光缆的型号规格有很多种，且采用的生产工艺各不相同，所能达到的防护效果也有差异。

### 2.1 防鼠、鸟啄方式

老鼠属于啮齿类动物，其生存力与繁殖力极其强大，且广泛生活在世界各个地区。老鼠生长过程中，其门牙不断生长，为了保持牙齿的锋利性，老鼠会啃咬硬物。其中塑料特有的气味使得老鼠特别爱啃咬。

啄木鸟属于鸟纲鴉形目的一种，其有着坚硬的嘴巴和锋利的爪子。至于光缆为什么受到啄木鸟的损害，行业内有多种解释，如啄木鸟生性喜爱啄，为了磨嘴而啄光缆，破坏光缆缆皮后，暴露光缆内部的松套管，其颜色鲜艳且成型如虫子，故被误认为树枝中的害虫而遭受啄木鸟进一步的啄食破坏。<sup>[2]</sup>

目前光缆的防鼠方法主要有物理防鼠和化学防鼠两类。物理防鼠是采用涂塑钢带和镀锌钢丝铠装，如GYTA53、GYTA33等结构，此类光缆防鼠效果优越，但成本高、重量大，施工困难，应用范围较小，且老鼠破坏光缆表面护套后，暴露的金属铠装层会腐蚀光缆；化学防鼠是指在光缆的外护套中按一定比例添加合成辣味素达到防鼠的目的，该防鼠方式可使光缆达到良好的防鼠效果，但在生产和施工过程中会对人体造成伤害，而且辣味剂在长期环境中从护套料中迁移并挥发，难以保证含辣味剂光缆护套料的防鼠效果和有效时间。

目前光缆的防鸟啄方式主要有物理防鸟啄和生物防鸟啄两类。物理防鸟啄和物理防鼠是同种方式，主要是提高光缆材料的硬度以达到防损害功效；生物防鸟啄是利用鸟类的警戒色进行防护，如利用红色、橙色等鲜艳颜色的护套对啄鸟产生冲击的视觉效果，引起畏惧感，使其远离光缆。

### 2.2 现有光缆耐火方式

现有的耐火光缆主要结构由缆芯、金属铠装层、阻燃料护套组成，其起耐火功能的材料为高阻燃聚烯烃材料以及涂塑钢带或镀锌钢丝。

## 3.加强型全介质防生物咬啄耐火光缆的设计与原理

### 3.1 结构设计

#### 3.1.1 层绞式结构

防鼠、防鸟啄光缆一般敷设于野外或管道中，安装和运行环境较差，对光缆的机械性能和环境性能要求比较高。为了满足其抗拉性能和温度性能，因此采用层绞式结构，其起主要作用的是绞缆过程中形成的光纤余长。

#### 3.1.2 全干式结构

松套管阻水方式采用干式阻水纱代替纤膏，缆芯间隙不填充油膏，采用干式阻水纱和纵包阻水带的方式达到阻水效果，这不仅提高其阻燃耐火性能，而且大大降低了燃烧时的烟密度。

#### 3.1.3 双层非金属耐火带结构<sup>[3]</sup>

缆芯包覆阻水带后，再包覆一层耐火复合带。在完成铠装后，再包覆一层陶瓷复合带。非金属耐火带耐高温等级高，并且具有良好的隔热阻燃效果。陶瓷复合带在燃烧后产生Mg(OH)<sub>2</sub>等氧化物硬壳-陶瓷保护层，阻止氧气燃烧，且产生的水蒸气降低燃烧温度，达到阻燃的目的，从而减少燃烧时热量往光缆内部的传递，减少高温对光纤的影响。其中此耐火防咬啄光缆采用的耐火复合带以及陶瓷化复合带的主要指标值如表1、表2所示。

表1：耐火复合带性能指标

序号	项目名称	单位	指标值	典型值
1	厚度	mm	0.12~0.17±0.02	0.156
2	拉伸强度	N/cm	≥100	125
3	耐热性	1000℃	云母无脱落	无
4	耐火性	A类	3A熔丝不断	不断
5	云母含量	%	≥60	80

表2：陶瓷化复合带性能指标

序号	性能	单位	指标	典型值
1	密度	g/cm <sup>3</sup>	1.40~1.50	1.45
2	拉伸强度	MPa	≥3.5	4.5
3	撕裂强度	KM/m	≥20	24
4	体积电阻率	Ω·cm	≥1.0×10 <sup>13</sup>	1.0×10 <sup>14</sup>
5	击穿强度	KV/mm	≥30	33
6	烟气毒性	—	—	ZA <sub>1</sub>
7	吸水率	%	≤0.75	0.75

#### 3.1.4 双层耐火护套结构

光缆内护套以及外护套均采用陶瓷化复合材料，其在高温以及燃烧的过程中会迅速硬化并逐渐陶瓷化，形成致密而坚硬的陶瓷化壳体隔氧层，减少高温向内部的传递，增加了光缆整体的耐火性能。双护套结构设计，不仅提高了光缆防咬啄的性能，而且提高了耐火性能和侧压性能。此耐火防咬啄光缆所用的护套料性能指标如表3所示。

表3：耐火复合料性能指标

序号	项目名称	单位	指标值	典型值
1	密度	g/cm <sup>3</sup>	—	1.52
2	拉伸强度	MPa	8	10
3	断裂伸长率	%	100	150
4	拉伸强度变化率	%	最大-40	+6%
5	断裂伸长率变化率	%	最大-40	-23%
6	20℃体积电阻率	Ω·cm	1.0×10 <sup>11</sup>	1.1×10 <sup>12</sup>
7	烟密度有焰	—	≤150	89.7
8	无焰	—	≤300	192.1
9	PH值	—	≥4.3	5.38
10	卤酸含量	mg/g	≤5	0.52

#### 3.1.5 非金属加强件铠装结构

从光缆保护效果和使用寿命分析，采用物理防护是目前最可靠的方式。而从光缆重量和敷设方式分析，采用添加非金属铠装层是目前性价比最高的方式。其中非金属铠装层为玻璃纤维复合塑料杆（GFRP或FRP），它具有重量轻，比强度高，耐腐蚀，电绝缘性能好，传热慢，热绝缘性好，耐瞬时超高温性能好，以及能透过电

磁波等特性。多根FRP以匹配的数量通过绞合工序，进行螺旋绞合，FRP密集均匀地布满光缆表面，因玻璃纤维复合塑料杆表面被损坏的过程中会掉落玻璃纤维，而玻璃纤维可以扎伤啮齿类动物和鸟类的口腔，避免动物往里咬啄，确保外护套被啮齿类动物以及鸟类破坏的前提下，防止缆芯被进一步损坏。此耐火防咬啄光缆的非金属铠装层性能指标如表4所示。

表4：玻璃纤维复合塑料杆性能指标

序号	项目名称	单位	指标值	典型值
1	直径偏差	mm	$\pm D \times 2\%$	$\pm 0.032$
2	比重	$g/cm^3$	2.05~2.15	2.1
3	拉伸强度/弯曲强度	MPa	$\geq 1100$	1100
4	断裂伸长率	%	$\leq 4.0$	3.5
5	拉伸/弯曲弹性模量	GPa	$\geq 50$	50

### 3.2 生产制造工艺把控

全介质耐火防咬啄光缆生产工序主要包括光纤着色、套塑工序、绞缆、护套、FRP铠装工序。

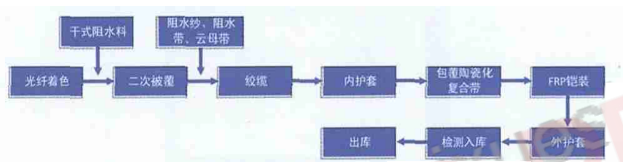


图1：耐火防咬啄光缆生产流程图

#### 3.2.1 光纤着色工序

光纤着色工序为耐火防咬啄光缆的第一道工序。此工序将在本纤表面上涂覆一层油墨，以区分光纤序号。光纤采用全色谱识别，色谱序号为：蓝、橙、绿、棕、灰、白、红、黑、黄、紫、粉红、青绿。在着色工序中，工艺主要把控着色的固化度、光纤的附加衰减等。

#### 3.2.2 套塑工序

套塑工序，又称二次被覆工序。使用材料为聚对苯二甲酸-丁二醇酯（PBT），生产中添加不同颜色的色母料以便区分套管颜色。为了提高耐火光缆的耐火阻燃性能，套管采用干式方式生产，套管内不填充纤膏，而是采用干式材料阻水纱，但干式套管制作存在以下三点问题：

1. 光纤容易粘连在套管内壁引起光纤衰减增大；
2. 套管内壁与阻水纱存在比较大的摩擦而引起光纤余长偏大；
3. 套管外径和圆整度较差，较难控制光纤余长。

针对以上几点问题，作出了以下三点控制方法：

1. 生产前把阻水纱缠绕至光纤盘，生产时和光纤平拉至松套管内，通过调节光纤以及阻水纱的放线张力，通常阻水纱的放线张力比光纤的放线张力大，能较好控制光纤

余长；

2. 采用干式PBT材料，结晶时间较为平缓，且收缩率较低，同时控制热水槽的温度，从而达到不用吹气装置的前提下也能生产外径圆整的套管；

3. 光纤与阻水纱汇合处瓷环必须保持清洁，避免阻水纱粉尘带入导致鼓包。

#### 3.2.3 绞缆工序

绞缆工序，又称成缆工序。此工序将套管和可能的填充绳（保障结构的完整性）以SZ形式绞合在铺有阻水纱的中心加强件上，再经扎纱、阻水带固定成型后成为缆芯，从而更进一步地加强了光纤的抗拉强度、抗侧压能力。

在绞缆工序中，工艺主要通过绞合节距、绞合圈数、套管放线张力、中心加强件放线张力、扎纱节距以及张力等参数来控制缆芯的光纤余长，从而满足光缆的机械性能，通过控制阻水带以及云母带的包覆度来提高光缆的阻水性能和耐火性能。

#### 3.2.4 FRP铠装工序

FRP铠装工序是光缆防咬啄以及抗拉压力形成工序。选取配比的FRP绞合数量、FRP外径，通过调节FRP的放线张力、节距，从而满足光缆在短期施工的力值要求，以及提高防咬啄的物理性能。

为了避免FRP绞合后发生位移错位以及漏芯的情况，应根据不同的内护外径选用正确的并线模具。在绞合后，应采用耐高温、热收缩小的纱线进行包扎，以保证FRP铠装层的完整性以及外护表面光滑度。

玻璃纤维塑料杆FRP在绞合的过程中或绞合后表面容易发生破裂，即玻璃纤维与塑料涂覆层分离，所以绞合节距应当适当放大，建议节径比大于25。

#### 3.2.5 内外护套工序

护套工序是光缆主要的耐火阻燃功能的形成工序。基于陶瓷化聚烯烃耐火料的特性，其密度比其他护套料较高，因此护套制造的工艺要点在于壁厚以及外观光滑度的控制。

为了抵消FRP铠装工序时的侧压力以及满足耐火阻燃的性能，故内护的壁厚需要控制在1.0mm以上。

耐火料在燃烧后会形成陶瓷外壳，但如果外护表面不光滑，有裂纹、凹槽，外护在燃烧陶瓷化的过程中，陶瓷外壳容易产生裂口，热量就会迅速地往光缆内部传递，从而影响光缆整体的耐火阻燃性能。故挤出模具的选用显得尤其重要，经生产试验证明，选用半挤压模具制造，缆表面较为光滑。（图2为光缆结构图）



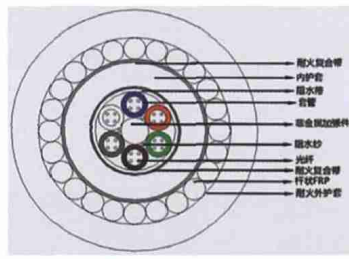


图2: 全介质耐火防咬啄光缆结构图

4.加强型全介质防生物咬啄耐火光缆的相关试验

4.1 机械性能试验

4.1.1 抗拉试验

此光缆设计额定抗拉强度为41KN，实验结果为57.7KN，试验合格。

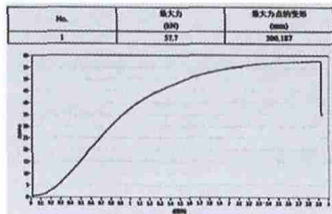


图3: 光缆抗拉试验曲线图

4.1.2 拉伸试验

此光缆受40%RTS力值时，无光纤应变，且光纤无明显附加衰减；受60%RTS力值时，光纤应变为0.13% < 0.35%，且光纤无明显附加衰减，试验合格。



图4: 拉伸试验——光纤应变曲线

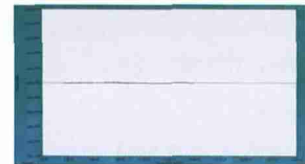


图5: 拉伸试验——光纤衰减曲线

4.1.3 压扁弯曲试验

光缆受2200N允许压扁力作用下，护套表面无目力可见开裂，且光纤无明显附加衰减，试验为合格。



图6: 压扁试验曲线图

4.1.4 冲击试验

光缆护套表面无目力可见开裂，光纤无明显附加衰

减，试验为合格。

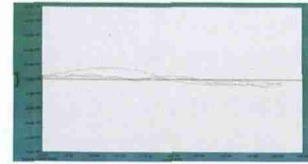


图7: 光缆冲击试验曲线

4.1.5 反复弯曲试验

光缆在弯曲30次后，护套表面无目力可见开裂，光纤无明显附加衰减，试验合格。

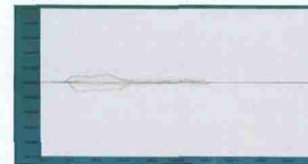


图8: 光缆反复弯曲试验曲线图

4.1.6 扭转试验

光缆经过扭转角度为±180°的10次扭转后，护套表面无目力可见开裂，光纤无明显附加衰减，试验合格。

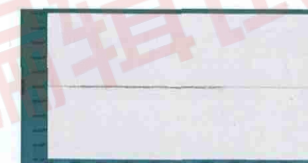


图9: 光缆扭转试验曲线图

4.2 机械性能试验项目汇总

表5: 光缆机械性能

序号	检验项目	标准与要求	检验结果	结论
1	拉伸	拉伸力为25%RTS，光纤无应变，无附件衰减	护套无目力可见开裂，光纤无应变，无附加衰减	合格
		拉伸力为40%RTS，光纤应变：中心管式≤0.1%；层绞式≤0.05%，无附加衰减	光纤无应变，无附加衰减，实测光纤应变曲线见图4-5	合格
		60%RTS，光纤应变：中心管式≤0.5%；层绞式≤0.35%，拉力取消后光纤无明显残余附加衰减	光纤应变≤0.22%，附加衰减≤0.02dB，光纤无明显残余附加衰减，实测曲线见图4-5	合格
2	抗拉	在承受至少100%RTS的拉力下，光缆无任何部件损坏	光缆经100%RTS拉力，光缆无任何部件损坏。实测光缆抗拉力曲线见图3	合格
3	压扁	护套应无目力可见开裂，在允许压扁里下光纤附加衰减≤0.1dB，压扁力去除后光纤无明显残余附加衰减	护套无目力可见开裂，在允许压扁里下光纤附加衰减<0.01dB，压扁力去除后光纤无明显残余附加衰减，实测曲线见图9	合格

4	冲击	护套无目力可见开裂, 光纤无明显残余附加衰减	护套无目力可见开裂, 光纤无明显残余附加衰减实测曲线见图8	合格
5	反复弯曲	护套无目力可见开裂, 光纤无明显残余附加衰减	护套无目力可见开裂, 光纤无明显残余附加衰减实测曲线见图6	合格
6	扭转	护套无目力可见开裂, 扭转到极限位置时光纤无明显附加衰减, 回到起始位置, 无明显残余附加衰减	护套无目力可见开裂, 扭转到极限位置时光纤无明显附加衰减, 回到起始位置, 无明显残余附加衰减实测曲线见图7	合格

4.3 环境性能试验

表6: 光缆环境性能

序号	检验项目	标准与要求	检验结果				结论		
			温度	-40℃附加衰减		+70℃附加衰减			
7	温度循环性能	适用温度范围(-40℃至+70℃), 相对于20℃时的附加衰减应不大于0.05 dB/km	衰减	1310nm	1550nm	1310nm	1550nm	合格	
			蓝	蓝	0.011	0.008	0.004		0.006
				桔	-0.006	0.014	0.004		-0.006
				绿	-0.003	0.019	0.006		0.011
				棕	0.007	-0.009	0.010		0.013
			桔	蓝	0.013	0.024	0.006		0.030
				桔	0.007	-0.009	0.009		-0.007
				绿	0.007	0.008	0.011		0.025
				棕	0.002	0.014	0.011		0.009
			绿	蓝	0.001	0.000	0.004		-0.001
				桔	0.001	-0.007	0.004		0.017
				绿	0.001	-0.016	0.006		0.002
				棕	-0.004	0.004	0.002		0.017
			棕	蓝	0.000	-0.008	0.004		-0.001
				桔	0.008	0.013	0.016		0.022
				绿	-0.003	-0.015	0.002		-0.019
				棕	0.004	-0.004	-0.003		0.002
			灰	蓝	0.013	-0.007	0.010		-0.007
				桔	0.002	0.007	0.009		0.008
				绿	-0.007	-0.003	-0.001		0.004
				棕	-0.005	0.000	0.005		0.005
			白	蓝	-0.004	-0.002	0.005		0.007
				桔	-0.003	0.002	0.003		0.005
				绿	0.005	0.001	-0.001		-0.005
				棕	0.000	-0.009	-0.001		-0.007
			蓝	蓝	0.013	-0.007	0.010		-0.007
				桔	0.002	0.007	0.009		0.008
				绿	-0.007	-0.003	-0.001		0.004
				棕	-0.005	0.000	0.005		0.005
			桔	蓝	-0.001	-0.001	0.001		-0.009
				桔	0.009	0.004	0.005		-0.005
				绿	-0.004	-0.002	0.005		0.007
				棕	-0.003	0.002	0.003		0.005
			绿	蓝	0.005	0.001	-0.001		-0.005
				桔	0.000	-0.009	-0.001		-0.007
				绿	0.006	-0.004	0.007		-0.007
				棕	0.001	0.005	0.003		0.007
			棕	蓝	0.001	-0.001	0.007		0.008
				桔	-0.001	0.000	-0.007		0.003
				绿	-0.001	0.001	-0.001		-0.007
				棕	0.004	-0.005	0.000		-0.013

7	温度循环性能	循环2	灰	蓝	-0.006	-0.008	-0.001	-0.012	合格
				桔	0.004	0.008	0.009	0.008	
				绿	0.005	-0.002	-0.008	0.008	
			白	棕	0.007	0.002	0.012	0.005	
				蓝	-0.001	-0.002	0.002	-0.005	
				桔	-0.004	-0.008	0.003	-0.019	
棕	绿	0.009	0.004	0.009	-0.003				
	棕	0.003	-0.001	0.001	0.000				
8	渗水性	水柱高1米, 平放1小时, 无渗水						合格	

4.4 防咬啄试验

此试验背景为衢州丘陵区域, 大多数电力通信光缆都采用了与电力杆塔同杆架设的方式进行敷设, 采用了全介质自承式ADSS及非金属普通的架空光缆。因植被较发达, 环境生态好, 松鼠、啄木鸟等动物活动猖獗, 且具有很强的噬咬、啄食能力, 光缆容易成为它们磨牙的硬物, 从而受到破坏性损坏, 如图10(a)(b)所示。



图10(a): 被损坏的光缆 图9(b): 被损坏的光缆

为了检验FRP铠装层的防咬啄功能, 因此在同一段光缆上个别点铠装FRP层, 放置在鸟鼠害较为严重的地方, 如图11、12所示。



图11: FRP铠装试验光缆



图12: FRP铠装试验光缆放置示意图

经过一个星期的放置后, 未铠装光缆表面出现大面积鼠咬鸟啄破坏, 而FRP铠装层光缆未出现任何被破坏的迹象。如图13所示。



图13: FRP铠装试验光缆试验后示意图

经过对比分析, FRP铠装确实能起到防鼠、防鸟啄的效果, 且效果显著。

#### 4.5 耐火试验

耐火试验按照IEC60331-11和IEC60331-25规定方法进行。试验光缆样品至少5m, 试样每端连接一段相同的光纤, 使总长度与所用光学试验方法相适应; 合格标准: 750℃ 供火90min, 可通光。光缆耐火试验过程如图14、15、16所示。



图14: 光缆耐火试验前图

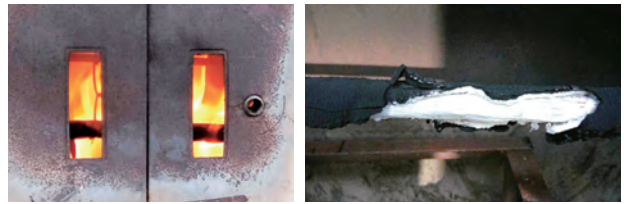


图15: 光缆耐火试验中

图16: 光缆耐火试验后

在光缆耐火试验前, 光纤1550nm窗口测试衰减为0.20dB/km, 燃烧1个半小时后, 光纤1550nm窗口测试衰减为0.33dB/km, 冷却15分钟后, 光纤衰减为0.45dB/km, 即可通光, 试验合格。

#### 5. 结束语

目前, 国内主要厂家及同行的防鼠光缆方案主要采用金属铠装防护, 不能满足电力环境下的使用要求, 其主要用于管道防鼠。国外也有使用FRP铠装的光缆, 但未见使用于电力线路。全介质耐火防咬啄光缆防鼠、防鸟啄效果好, 耐火性能良好, 重量轻, 敷设方式选择方式多, 满足防火、防鼠咬、防鸟啄的管道以及架空要求, 施工方便快捷, 大大降低了施工周期和施工成本, 在人口密集的地铁隧道、楼层间、鼠害以及鸟害严重等特殊应用场景值得推广应用。