



# 测试报告

测试日期: 3月 8-9, 2016

---

# PEEK

## 涂层光纤的评估

---

编制:

Matt Davis

首席研究工程师

LUNA

弗吉尼亚州布莱克斯堡



Jason Fant

光纤全球市场经理

Zeus工业品公司

南卡罗来纳州奥兰治堡

编辑: Kevin J. Bigham, Ph.D.

Zeus工业品公司

南卡罗来纳州奥兰治堡



## 摘要

Zeus工业品公司与光纤技术和测试领域的领导者Luna合作，设计了一种测试光纤聚醚醚酮（PEEK）涂层的测试方案。将Zeus开发的增强涂层工艺应用于PEEK，对其进行测试以评估PEEK涂层对信号衰减的影响。该信号衰减可能是由于涂层的收缩特性引起的收缩应力和对光纤产生的其他形变引起的。PEEK以提供耐磨性，耐辐射性和耐高温的能力而著称，它作为涂层被应用于标准单模Nufern155 $\mu\text{m}$ 聚酰亚胺R1550B-P光纤，得到400 $\mu\text{m}$ 的最终外径。我们对这个光纤进行了测试，以比较PEEK涂层光纤和无涂层的参考光纤之间在三种测试中的传输损耗：从环境温度到-10 $^{\circ}\text{C}$ 的低温热循环；从环境温度升高到240 $^{\circ}\text{C}$ 的高温热循环；在环境温度和150 $^{\circ}\text{C}$ 下，对光纤的大曲率弯曲进行了测试。对于低温和高温测试，分析了250米的光纤盘绕部分的结果。我们发现在环境温度下，参考光纤的衰减为1.14 dB / km，而PEEK涂层光纤的衰减为1.34 dB / km。在-10 $^{\circ}\text{C}$ 时，这些光纤的信号衰减没有差别。在高于环境温度时，观察到两条测试光纤之间的最大平均衰减为1.38 dB / km。在低于150的温度下，结果显示，参考光纤比PEEK涂层光纤的衰减小0.28 dB / km。然而，与参考光纤相比，PEEK涂层光纤在高于150 $^{\circ}\text{C}$ 的温度下显示出改善的衰减，最大衰减减少0.37 dB / km。温度为150 $^{\circ}\text{C}$ 时，PEEK涂层光纤和参考纤维表现出类似的衰减。对于大曲率弯曲测试，在任何测试温度及50mm或30mm弯曲半径下，PEEK涂层光纤和参考光纤之间的衰减没有观察到差异。值得注意的是，在测试的最小弯曲半径为10 mm时，PEEK涂层光纤的衰减为1.22 dB / km，在150 $^{\circ}\text{C}$ 下测量时比参考光纤小0.37 dB / km。总之，这些结果表明，除了提供额外的保护以免受诸如磨损和热的物理损坏之外，Zeus PEEK涂层光纤至少与无涂层的光纤一样好。在某些情况下，PEEK涂层光纤比无涂层光纤表现更好，例如在较高温度下，弯曲成小弯曲半径时。由于温度波动，Zeus PEEK涂层光纤似乎也没有受到收缩应力的影响。因此，PEEK涂层光纤提供额外的耐久性，同时保持高水平的功能。

## 简介

PEEK是一种特性优良的有机热塑性材料，由于其物理和机械强度高，耐化学腐蚀性好，常用于工程应用。PEEK通常应用于光纤，以提高光纤在医疗，航空航天，能源和土木工程行业的恶劣环境中的耐用性。然而，将PEEK涂层应用于光纤时遇到了重大挑战，当涂层冷却至低于其玻璃化转变温度时，PEEK涂层可能会对光纤产生物理应力。光纤易受这些失真的影响，包括收缩，弯曲和其他变形，这些变形会对光纤传输产生负面影响，从而导致信号衰减。

为了评估PEEK涂层光纤的实用性和性能，Zeus进行了初步测试，比较了PEEK涂层光纤和无涂层光纤。使用Zeus的光时域反射仪（OTDR）初步测试表明，与无涂层光纤相比，PEEK涂层光纤保持了衰减特性。为了证实这些发现，Zeus与Luna合作。Luna是一家具有独特光纤技术和测试能力的行业领导者。我们使用了Luna的光学背向散射反射计4600型（OBR 4600）评估Zeus PEEK涂层光纤。该仪器使用光频域反射计（OFDR）来确定光纤的光学特性。OBR 4600的高级功能可以检测典型OTDR中不常见的缺陷。用Luna的OBR 4600测试PEEK涂层光纤，发现了在先前的测试中没有观察到光纤的缺陷，特别是对于含有光纤布拉格光栅的区域。PEEK的收缩效应导致光栅阵列显示出了一个变形的峰值，而早先的Zeus OTDR测试中该问题并不明显。为了解决这个问题，Zeus开发了一种优化的PEEK涂层工艺，专注于涂层光纤实现热稳定性。

## 测试设置

测试旨在评估在应用PEEK涂层后，是否会造成标准单模Nufern155 $\mu\text{m}$ 聚酰亚胺R1550B-P光纤的分贝（dB）损失（衰减），该光纤是基于布里渊散射效应的分布式温度和应力传感。将PEEK涂层涂覆于光纤上，最终得到400 $\mu\text{m}$ 的外径（OD）。Luna和Zeus工程师对无涂层和Zeus PEEK涂层光纤进行了三种测试模式：从环境温度到-10 $^{\circ}\text{C}$ 的低温（零下）热循环；环境温度到240 $^{\circ}\text{C}$ 的高温热循环；在光纤大曲率弯曲时，进行高温测试。每种测试模式，都使用Luna的OBR 4600测量光纤的250米长测试段的dB损耗。

Luna OBR 4600先连接到150米的延迟线上，作为仪器和测试位置之间的跳线。将410米长的参考光纤和455米长的PEEK涂层光纤盘绕在约0.4米直径的环中，并首先放入冷冻机中进行零下（低温）测试，然后放入炉中进行高温测试。每根光纤都有两个K型热电偶，用于记录炉内温度（以及光纤的温度）。每根光纤的尾部，末端被压碎并将光纤卷绕成5-6mm直径的环，环用Kapton胶带固定。该胶带用于减少光纤末端的反射，确保最低噪声基底和最佳瑞利背向散射信噪比的水平。在每个温度间隔，扫描每根光纤并记录数据。使用OBR软件评估这些数据，以距离延迟线末端50米处开始，测量250米范围内光纤的dB损耗。插入损耗（IL）的积分宽度（瑞利散射平均的区域）设定为20米。参考光纤和PEEK涂层光纤各自单独测试。在测试每种光纤之前收集参考数据（图1）。[由于150米跳线线和PEEK光纤样品之间的连接器损耗，PEEK涂层样品在150米处观察到损耗事件。然而，这种损耗在随后的光纤测试中没有任何作用（图1和2）]。



图 1: 在温度和弯曲半径测试之前, PEEK涂层 (蓝色) 和参考光纤 (红色) 的参考数据。

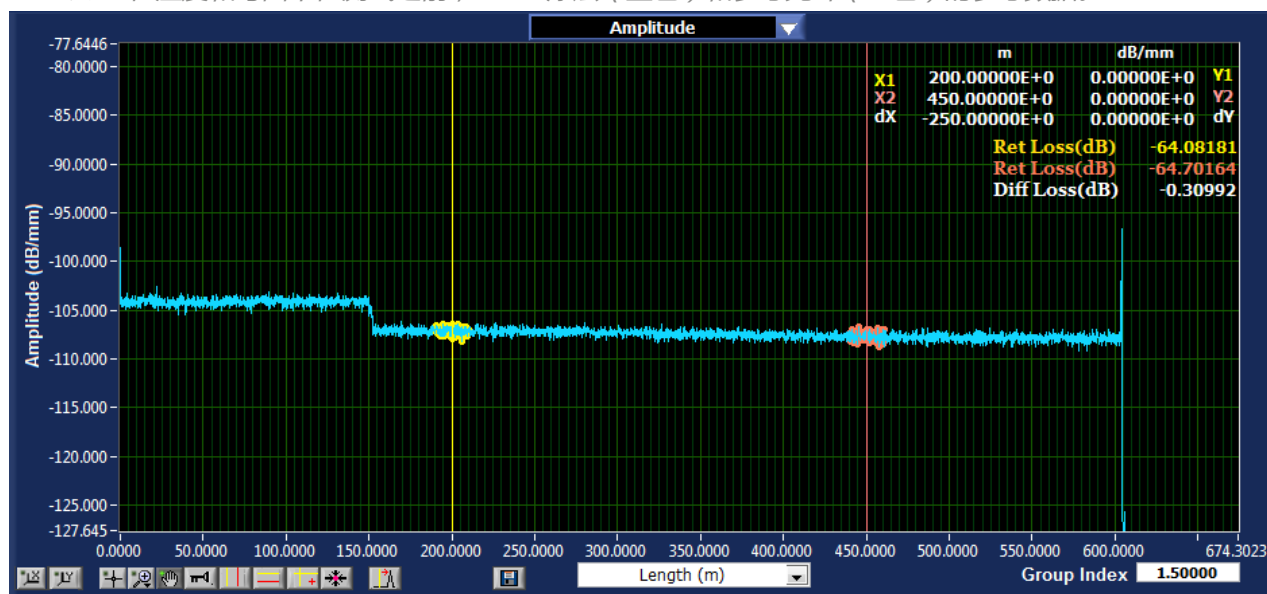


图 2: Luna OBR 4600 屏幕截图, 显示了在温度和弯曲半径测试之前 PEEK 涂层光纤在 150 米处测得损耗。

用 Luna 的 OBR 4600 测量两种光纤的偏振态。偏振态的变化作为与光纤长度相关的函数, 似乎来自 OBR 接收器检测到的光纤盘绕部分 (图 3 和 4)。从条纹来看, S 和 P 偏振态表明周期大约为几米; 这个周期与光纤盘绕部分引起的双折射拍长一致。参考光纤和 PEEK 涂层光纤之间的差异没有明显的不一致, 这表明 Zeus PEEK 涂层工艺只引入了最小的残余应力 (如果有的话)。

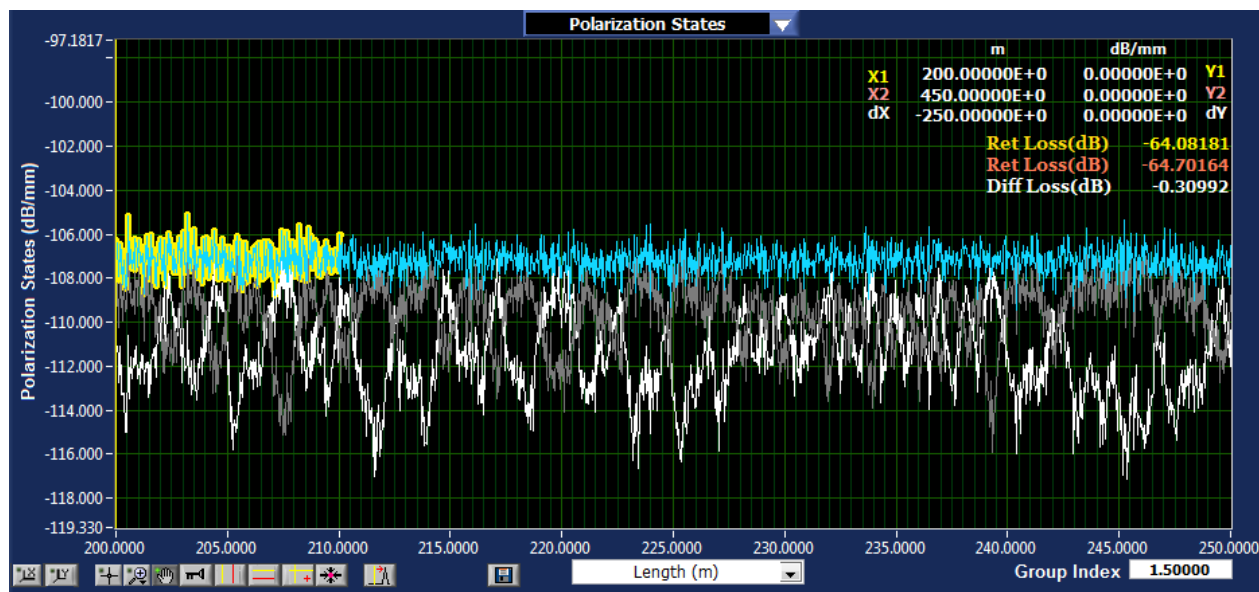


图 3: 在温度和弯曲半径测试之前, PEEK 涂层光纤测量区域前50米的偏振状态。

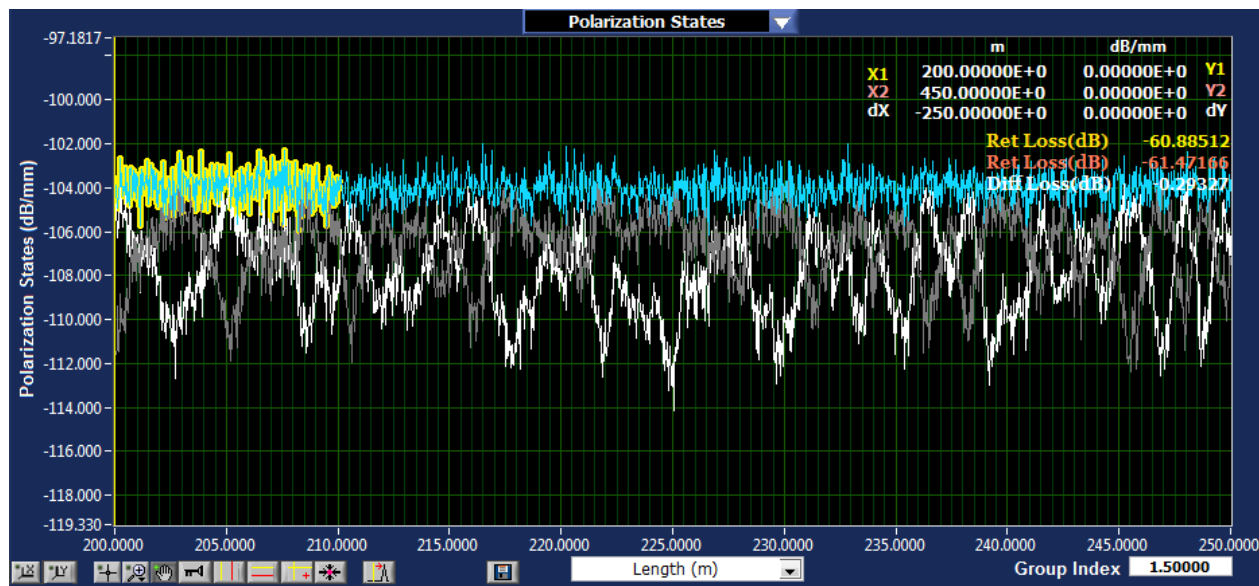


图 4: 在温度和弯曲半径测试之前, 无涂层参考光纤测量区域前50米的偏振状态。

## 测试结果

本节总结了零下（低温）热循环测试，高温热循环和弯曲半径测试所获得的数据。

### 零下（低温）热循环测试结果

第一系列测试包括将光纤线圈放入零度以下的冷冻室中，并在环境温度（约24°C）和-10°C之间温度循环（图5）。冷冻测试室中的K型热电偶用于确定测试前温度是否稳定。最终温度取两个热电偶测量值的平均值。然后在温度循环期间使用Luna OBR 4600测试每根光缆的dB损耗（表1）。



图 5: 零下（低温）热循环测试方案：光纤线圈在冷冻室中的放置状况。

表 1: 使用Luna OBR 4600进行低温测试时获得的损耗结果

设置点 (温度)	参考光纤			PEEK涂层光纤		
	测量值 (温度)	扫描 1 (dB损耗)	扫描 2 (dB损耗)	测量值 (温度)	扫描 1 (dB损耗)	扫描 2 (dB损耗)
°C	°C	dB/km	dB/km	°C	dB/km	dB/km
环境温度	24.1	1.20	1.17	24.1	1.23	1.24
-10	-10.6	1.11	1.08	-9.7	1.19	1.23
环境温度	24.1	1.21	1.20	24.1	1.27	1.25
-10	-11.1	1.25	1.24	-10.1	1.13	1.11
环境温度	22.9	1.04	1.02	22.9	1.51	1.53

零下（低温）热循环的平均环境温度为23.7°C，平均低温为-10.4°C（表2）。在环境温度下，PEEK涂层光纤的平均损耗为1.34 dB / km；然而，这种损失仅略高于参考光纤的平均损耗1.14 dB / km。在-10°C时，PEEK涂层和参考光纤的损耗均为1.17 dB / km。这些结果表明，应用于光纤的PEEK涂层不会改变光纤固有的衰减特性。

表 2: 表1中的零下/低温热循环测试结果总结

平均温度 (参考光纤与PEEK涂层 光纤的环境温度相同)	平均损耗		差异 (PEEK光纤 - 参考光纤)
	参考光纤	PEEK涂层光纤	
°C	dB/km	dB/km	dB/km
23.7	1.14	1.34	0.20
-10.4	1.17	1.17	0.00

### 高温热循环测试

在参考光纤和PEEK涂层光纤上进行高温测试分析，以测量在更宽广的温度范围（约217°C）内的dB损耗。将测试纤维放入高温炉，炉中有两个与之前低温测试时用到的同样的K型热电偶（图6）。热电偶识别出炉室内的温度梯度，通常 $<10^{\circ}\text{C}$ 。然后在环境温度（约 $27^{\circ}\text{C}$ ）和 $240^{\circ}\text{C}$ 之间循环测试温度。然后在环境温度， $100^{\circ}\text{C}$ ， $150^{\circ}\text{C}$ ， $200^{\circ}\text{C}$ 和 $250^{\circ}\text{C}$ 下测量光纤的传导损耗。使用Luna OBR 4600在每个循环的温度上升和下降过程中进行损耗测量，并且类似于零下（低温）热测试进行分析（表3和4）。



图 6: 高温热循环测试方案：光纤线圈在炉室中的放置状况。

高温热循环测试后，对于每个测试温度，参考光纤和PEEK涂层光纤均显示 $<1.5\text{dB} / \text{km}$ 的平均损耗（表3和4;图7）。在接近环境温度时，参考光纤显示出比PEEK涂层光纤低 $0.3\text{dB} / \text{km}$ 的损耗。然而两种纤维在 $150^{\circ}\text{C}$ 下表现出非常相似的增大的损耗特性（ $\sim 1.35\text{dB} / \text{km}$ ），尽管该温度接近PEEK材料的玻璃化转变温度。在 $150^{\circ}\text{C}$ 下，参考光纤中观察到的损耗的增加不是实验预期的，并且暂时不明原因。但是，温度高于 $150^{\circ}\text{C}$ 时，随着光纤被加热，与参考光纤相比，PEEK涂层光纤中的信号衰减似乎减少了（从 $1.38\text{dB} / \text{km}$ 到 $1.01\text{dB} / \text{km}$ ）。在两种纤维之间观察到的这些信号衰减差异虽然可测量，但仍被认为是非常低的。因此，这些数据表明Zeus PEEK涂层对光纤的dB衰减的影响非常小。



表 3: 使用Luna OBR 4600在高温热循环期间获得损耗结果

设置点 (温度)	参考光纤			PEEK涂层光纤		
	测量值 (温度)	扫描 1 (dB损耗)	扫描 2 (dB损耗)	测量值 (温度)	扫描 1 (dB损耗)	扫描 2 (dB损耗)
°C	°C	dB/km	dB/km	°C	dB/km	dB/km
环境温度	22.9	1.04	1.02	22.9	1.51	1.53
100	100.5	1.02	0.98	101.2	1.43	1.43
150	153.5	1.30	1.33	152.8	1.72	1.68
200	204.3	1.02	0.78	204.8	0.79	0.82
240	244.9	1.51	1.53	244.2	0.91	0.89
环境温度	31.5	1.19	1.18	32.1	1.23	1.23
100	100.9	1.06	1.04	101	1.20	1.15
150	148.4	1.30	1.30	146.8	1.27	1.25
200	204.1	1.40	1.43	207.8	1.20	1.19
240	246.1	1.25	1.24	245.8	1.12	1.12
150	154.5	1.38	1.32	154.2	1.20	1.18
环境温度	28.5	1.00	1.01	27.2	1.34	1.29

表 4: 高温热循环测试结果摘要 (环境温度: 27.4-27.6°C)

平均温度			平均损耗		差异 (PEEK - 参考光纤)
参考光纤	PEEK	参考光纤和 PEEK光纤综合	参考光纤	PEEK光纤	
°C	°C	°C	dB/km	dB/km	dB/km
27.6	27.4	27.5	1.07	1.36	0.28
100.7	101.1	100.9	1.02	1.30	0.28
152.1	151.3	151.7	1.32	1.38	0.06
204.2	206.3	205.3	1.16	1.00	-0.16
245.5	245.0	245.3	1.38	1.01	-0.37

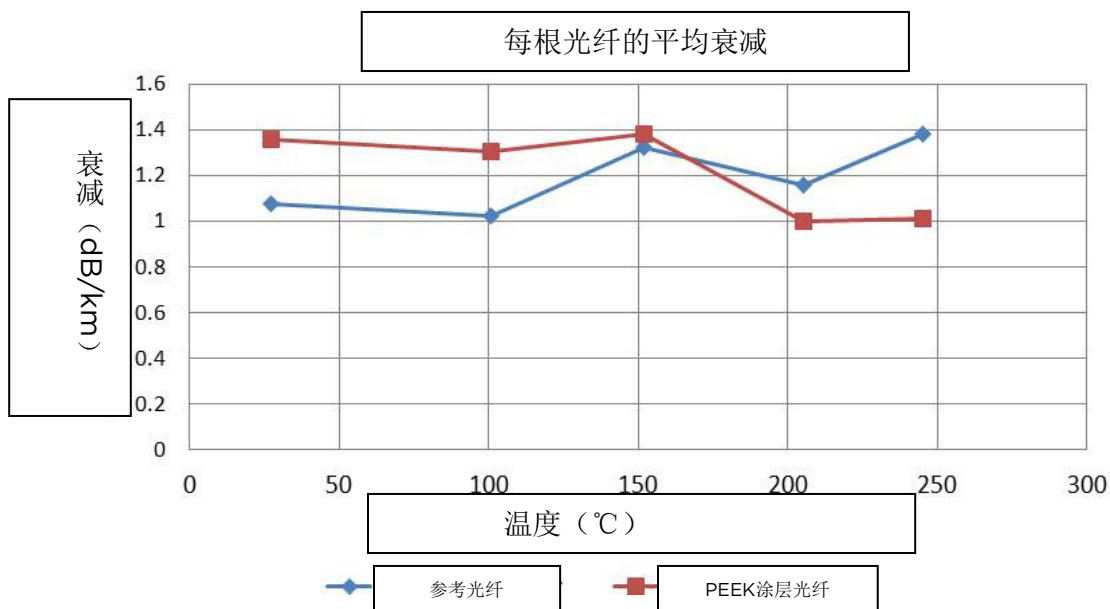


图 7: 表4中用于参考光纤和PEEK涂层光纤在高温热循环测试中衰减数据的图形表示。温度是PEEK和参考光纤温度测量结果的平均值。

### 弯曲半径测试

最后的测试是为了量化光纤按照已知的半径弯曲而引起的dB损耗。对于该测试，我们设计并制做了夹具，通过将光纤缠绕在圆筒上而将光纤保持在三个不同的半径。将PEEK涂层光纤或1550B-P参考光纤放置在测试夹具上，并使用带有硅胶垫的弹簧夹具夹在一侧（图8）。夹紧垫防止光纤因夹紧压力而变形或破裂。然后将光纤缠绕在夹具圆筒的三个半径中的一个上，并返回夹具固定（图8）。圆柱半径（也就是光纤的测试弯曲半径）为50mm，30mm和10mm。这些测量到的信号衰减是在10米长的光纤上完成的。弹簧夹在夹具上的位置是人为选择的，通过调整它而弯曲光纤引入衰减，并使用Luna OBR 4600测量光纤中信号衰减（图9）。这样可以清楚地观察并记录衰减发生的位置。

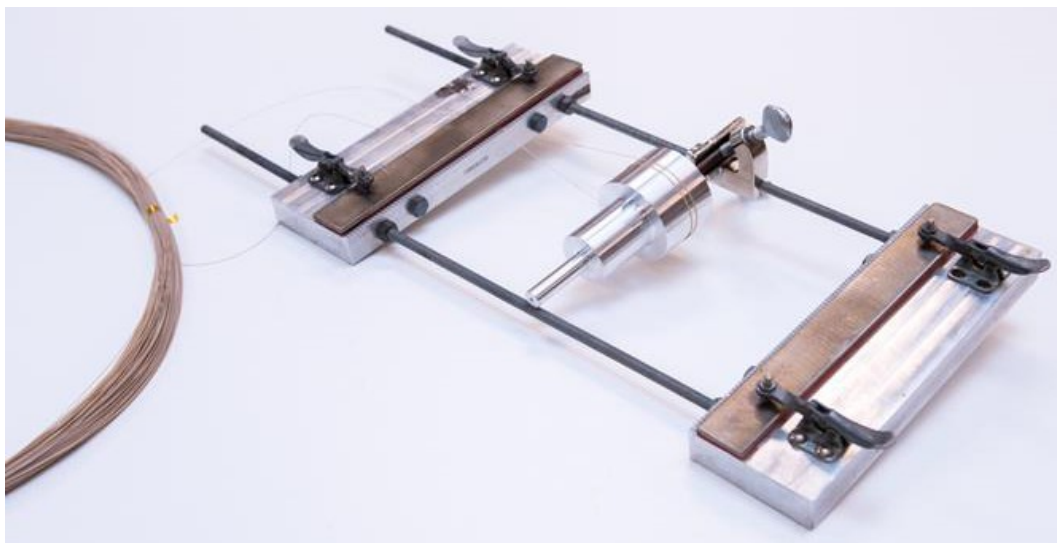


图 8: 用于弯曲半径测试的测试夹具。测试圆筒位于夹具的中间，硅胶垫弹簧夹位于夹具的两端。

将光纤放置在测试夹具中之后，再将固定装置放入炉中，在接近环境条件和150°C下测量信号衰减。当加热达到温度稳定后，进行信号衰减测量。然后将测试夹具从炉中取出，并将光纤从圆筒中解下并使其恢复到环境温度。一旦解下的光纤达到环境温度，再次测量衰减。对于三个弯曲半径中的每一个，都重复该过程，完成PEEK涂层光纤和R1550B-P控制光纤（参考光纤）的测试。弯曲半径测试数据与零下和高温测试组类似地进行分析。沿光纤的每个测量点再次使用20米的积分宽度。测量点在光纤上间隔30米，在弯曲的两侧等间隔。

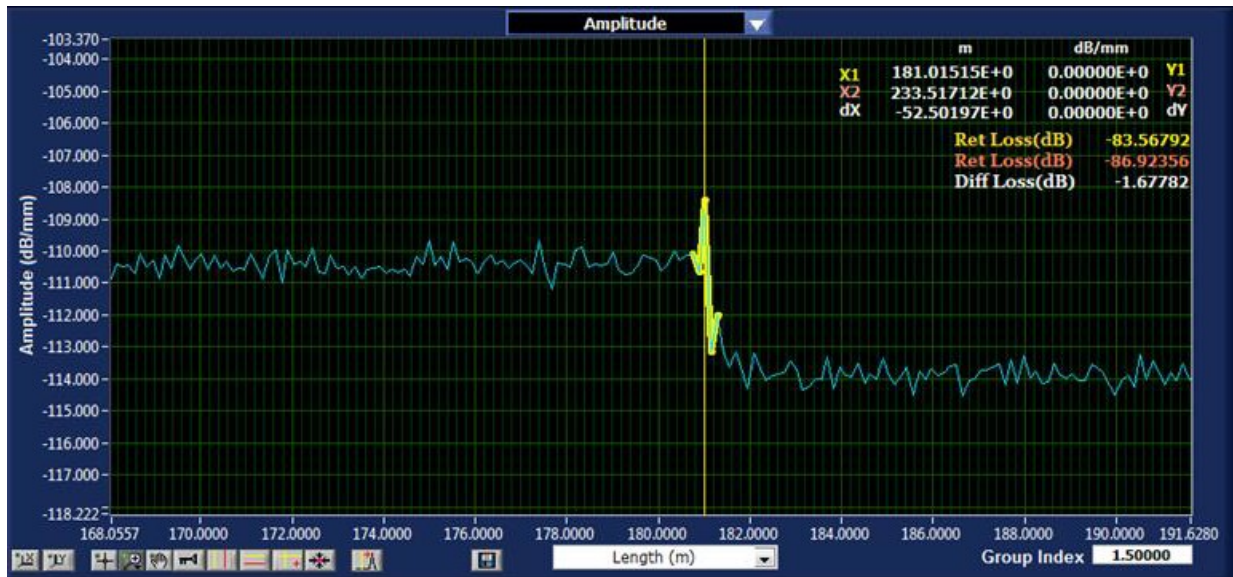


图 9: 典型的图像, 展示了通过人为弯曲光纤确定弹簧夹在光纤上的位置 (图示结果为PEEK涂层光纤)。参考光纤在50mm和10mm弯曲半径的测试中加热至150°C 并冷却到环境温度后, 没有显示出信号衰减 (表5)。这符合预期, 因此没有记录在环境温度下参考光纤的30mm半径试验时的衰减。参考光纤和PEEK涂层光纤按50mm或30mm半径弯曲时, 加热至高温均没有观察到信号衰减。最能够观察到的是150°C时按10 mm半径弯曲, 参考光纤的衰减为1.6 dB, 而PEEK涂层光纤的损耗为1.2 dB, 衰减比参考光纤低25%。Zeus PEEK涂层纤维的这种改进的衰减特性可以通过添加PEEK涂层后光纤厚度增加了来解释。由此产生的厚度将使PEEK光纤的光导芯实际弯曲半径比无涂层光纤的芯线大, 从而减轻衰减。

表 5: 多个弯曲半径在高温循环条件下的衰减结果。测量的是包含弯曲部分在内的10米长的光纤。 (\*未弯曲的光纤; ND = 未确定).

半径	温度	参考光纤		温度	PEEK涂层光纤		差异
		扫描 1	扫描 2		扫描 1	扫描 2	
mm	°C	dB	dB	°C	dB	dB	dB
50	24.1	0.01	ND	22.4	0.04	0.04	0.03
50	143.9	0.02	0.03	154.2	0.04	0.04	0.01
30	环境温度	ND	ND	33.6	0.03	0.04	ND
30	136.0	0.03	0.00	149.2	0.04	0.03	0.02
10	146.8	1.60	1.59	150.5	1.23	1.22	-0.37
*0	24.1	0.01	ND	22.4	0.02	0.02	0.01

## 结论

Zeus工业品公司和Luna合作开展测试，以评估Zeus为光纤应用开发的新型优化的PEEK涂层工艺的效果。Zeus的主要目的旨在推出一种PEEK涂层工艺，该工艺对光纤具有热稳定性，使涂层光纤能够保持其所需的属性，如信号传输效率。为此，Zeus和Luna开发了一系列测试方法来评估Zeus的PEEK涂层光纤，比较涂层和无涂层光纤的信号衰减。测试结合了一系列热循环技术，探索高温和低温及其对光纤的影响以及Zeus的PEEK涂层工艺效果。测试显示，在低于冰点的温度（约-10°C）下，Zeus的PEEK涂层光纤和参考光纤在250米测试长度上表现出相同的衰减。在环境温度下，与参考光纤相比，PEEK涂层光纤仅表现出略微增加的衰减（~0.2 dB / km）。然而，PEEK涂层光纤和参考光纤之间的信号衰减差异随着温度增加到150°C而减小，150°C时，两者基本相同。

值得注意的是，在高于150°C的温度下，与Zeus PEEK涂层光纤相比，参考光纤表现出更多的（尽管是轻微的）衰减。

在热循环测试之后，Zeus和Luna研究了小半径弯曲对PEEK涂层光纤的影响，并比较了PEEK涂层和无涂层参考光纤的信号衰减。这些测试也在升高的温度下进行。该测试表明，在50mm和30mm弯曲半径下，在环境温度和150°C以下，Zeus的PEEK涂层光纤和无涂层的参考光纤在10米光纤测试长度上表现出相同的衰减。然而，值得注意的是，对于最小的弯曲半径，10 mm，在150°C时，无涂层的参考光纤显示出比PEEK涂层光纤更大的衰减。

总之，这些发现表明Zeus的PEEK涂层工艺不会对光纤造成物理应力或微弯曲等变形。

此外，这些数据表明涂层一旦涂覆就是热稳定的，因此不易收缩，特别是在可能发生大的温度波动的情况下。Zeus PEEK涂层光纤的表现至少与无涂层的同类光纤一样，同时具有更好的耐热性，耐化学腐蚀性和耐辐射性，这些PEEK所为人熟知的特性。而在其他条件下，Zeus PEEK涂层光纤可能超过无涂层光纤的性能。