

空芯微结构光纤端面检测方法及带标记空芯微结构光纤

技术领域

本发明属于光通信技术领域，更具体地，涉及一种空芯微结构光纤端面检测方法及带标记空芯微结构光纤。

背景技术

空芯微结构光纤具有结构简单、空芯单模导光、传输谱宽的特点，在光与填充物质相互作用、非线性光学、气体检测、气体激光产生、光流体技术等领域都具有重要的应用；大空气孔纤芯导光具有超低的瑞利散射、低非线性系数、色散可调特性，可以提供更高的激光损伤阈值，使其在高功率激光传输、紫外/中红外光传输、脉冲压缩和光孤子传输等方面有潜在的应用；空气芯的超低损耗、低色散、低非线性、接近光速的传播速度，可实现空芯微结构光纤通信传输及通信器件的开发，为下一代超大容量、低延迟高速光通信系统的建设发展奠定基础。

虽然空芯微结构光纤在设计和应用方面有很大优势，然而其传输损耗一直高于传统的石英光纤，近年发现基于反谐振原理的空芯微结构光纤在合理的结构设计之下，能有效减小传输损耗，具有作为超长距离通信光纤的潜力。进一步降低衰减，是空芯微结构光纤制造领域的一个重要课题。

虽然已知的空芯反谐振光纤，特别是具有嵌套结构元件的光纤，能够显著降低光纤的衰减，但是在空芯反谐振光纤制造过程中由于原材料的不均匀性、嵌套结构元件堆栈过程中的偏差、拉丝过程中的热场分布不均等因素，会造成拉制出来的空芯反谐振光纤的反谐振结构元件出现尺寸大小不一的情况，如图 6 所示。这种几何结构上的不均匀将会极大地影响空芯反谐振光纤的传输损耗。

然而目前尚无法控制微结构光纤的几何均匀性，也无法对微结构光纤

的几何均匀性进行检测或监测。

发明内容

针对现有技术的以上缺陷或改进需求，本发明提供了一种空芯微结构光纤端面检测方法及带标记空芯微结构光纤，其目的在于，采用标记单元破坏采集的光纤端面图像的对称性，从而对各反谐振微结构单元的端面图像进行识别，从而判断光纤的几何均匀性，实现空芯微结构光纤几何均匀性检测，由此解决目前无法检测或监测光纤几何均匀性的技术问题。

为实现上述目的，按照本发明的一个方面，提供了一种空芯微结构光纤端面检测方法，包括以下步骤：

(1) 对空芯微结构光纤的端面进行成像，获得空芯微结构光纤的端面图像；

(2) 根据空芯微结构光纤的端面的不对称性对步骤(1)获得的所述空芯微结构光纤的端面图像中的各反谐振微结构单元进行标记，从而标识所述空芯微结构光纤的端面图像中各反谐振微结构单元；所述空芯微结构光纤具有标记单元，其端面除开标记单元以外的部分呈现几何对称性；而具有标记单元的空芯微结构光纤端面呈现不对称性；

(3) 对于步骤(2)标识的各反谐振微结构单元，从步骤(1)获得的空芯微结构光纤的端面图像中分离各空芯反谐振微结构单元相应的端面图像，进行几何参数提取，判断所述空芯微结构光纤几何均匀性。

优选地，所述空芯微结构光纤端面检测方法，其所述空芯微结构光纤外轮廓为圆形。

优选地，所述空芯微结构光纤端面检测方法，其所述标记单元，在空芯微结构光纤的端面图像中其轮廓具备可识别度。

优选地，所述空芯微结构光纤端面检测方法，其所述标记单元为折射率标记单元、波长标记单元、结构标记单元、或异构标记单元；

所述折射率标记单元，为光纤玻璃部分中材料折射率与其周围材料折

射率不同的玻璃部分；

所述波长标记单元，为光纤玻璃部分中对不同波长的光透过率与周围材料对不同波长的光透过率不同的玻璃部分；

所述结构标记单元，为在端面图像中具备可识别度的形状结构，包括空芯微结构光纤包层的增材结构、空芯微结构光纤包层的减材结构；

所述异构标记单元为对空芯微结构光纤的反谐振微结构单元进行结构调整获得的可识别度的反谐振微结构单元。

优选地，所述空芯微结构光纤端面检测方法，其所述空芯微结构光纤包层的增材结构，为包层增加的管、棒、和/或凸棱；所述空芯微结构光纤包层的减材结构，为凹槽、或钻孔。

优选地，所述空芯微结构光纤端面检测方法，其步骤（3）判断所述空芯微结构光纤几何均匀性，具体可为以下方式之一或组合：

其一、判断各反谐振微结构单元各自的几何结构规整性，所述几何结构规整性用于表征反谐振微结构单元与理论设计的反谐振微结构单元之间的差异，包括但不限于反谐振微结构单元的圆度、尺寸是否符合理论设计标准或与理论设计标准的差异。

其二、判断各反谐振微结构单元之间的几何结构一致性，所述几何结构一致性用于表征各反谐振微结构单元之间的几何结构差异，包括但不限于各微结构之间的尺寸差异、方位角差异以及相对位置差异。

其三、判断各反谐振微结构单元各自的几何结构稳定性，所述几何结构稳定性用于表征反谐振微结构单元在不同位置截取端面之间的差异，包括但不限于反谐振微结构单元端面之间的圆度差异、尺寸差异、方位角差异以及相对位置差异。

按照本发明的另一个方面，提供了一种带标记空芯微结构光纤，其具有标记单元，其端面除开标记单元以外的部分呈现几何对称性；而具有标记单元的空芯微结构光纤端面呈现不对称性。

优选地，所述带标记空芯微结构光纤，其所述空芯微结构光纤外轮廓为圆形。

优选地，所述带标记空芯微结构光纤，其所述标记单元，在空芯微结构光纤的端面图像中其轮廓具备可识别度。

优选地，所述带标记空芯微结构光纤，其所述标记单元与光纤结构中心的距离 D ，使得：

$$E_D \leq 0.5\%$$

$$E_D = \int_0^{2\pi} \int_D^R f(r, \theta) r dr d\theta$$

其中， E_D 为光纤横截面上与光纤结构中心距离大于 D 的区域能量分布占比；对于光纤横截面内以光纤结构中心为极点的极坐标系中的一点，其极径为 r ，极角为 θ ， $f(r, \theta)$ 为光纤横截面的归一化光场分布函数； R 为光纤半径；

和/或

所述标记单元与光纤结构中心的距离 D 满足： $D \geq d$ ，其中 d 为空芯微结构光纤的纤芯直径。

优选地，所述带标记空芯微结构光纤，其所述标记单元为折射率标记单元、波长标记单元、结构标记单元、或异构标记单元；

所述折射率标记单元，为光纤玻璃部分中材料折射率与其周围材料折射率不同的玻璃部分；

所述波长标记单元，为光纤玻璃部分中对不同波长的光透过率与周围材料对不同波长的光透过率不同的玻璃部分；

所述结构标记单元，为形状结构在端面图像中具备可识别度，包括空芯微结构光纤包层的增材结构、空芯微结构光纤包层的减材结构；

所述异构标记单元为对空芯微结构光纤的反谐振微结构单元进行结构调整获得的具有可识别度的反谐振微结构单元。

优选地，所述带标记空芯微结构光纤，其所述空芯微结构光纤包层的增材结构，为包层增加的管、棒、和/或凸棱；所述空芯微结构光纤包层的减材结构，为凹槽、或钻孔。

优选地，所述带标记空芯微结构光纤，其所述折射率标记单元与周围空芯微结构光纤包层的最大折射率差值在 $0.0005\sim 0.03$ 之间，其面积占光纤包层面积的 $0.002\%\sim 2\%$ ；

所述波长标记单元，其在工作波长下与周围空芯微结构光纤包层的透过率差值在 $0.1\%\sim 100\%$ ，波长标记单元的面积占光纤包层面积的 $0.002\%\sim 2\%$ ；

所述结构标记单元，其面积占光纤包层面积的 $0.002\%\sim 2\%$ ；。

所述异构标记单元结构的偏差量应在 $0.8\%\sim 25\%$ 。

总体而言，通过本发明所构思的以上技术方案与现有技术相比，能够取得下列有益效果：

本发明提供的空芯微结构光纤端面检测方法，通过采集具有不对称性的空芯光纤端面图像，根据其不对称性标记各反谐振微结构单元及其几何参数，实现对微结构单元几何均匀性、以及轴向均匀性和/或差异性进行评价，从而检测或监测空心光纤几何均匀性。

本发明提供的带标记的空芯微结构光纤，在不影响传输损耗的前提下，可获得具有不对称性的图像，从而实现几何均匀性的检测或监测。

附图说明

图 1 是本发明实施例提供的需要标记的空芯微结构光纤端面涉及光纤横截面的归一化光场分布图；

图 2 是本发明该实施例提供的需要标记的空芯光纤对称轴上的归一化光场分布图；

图 3 是本发明实施例 1 提供的带折射率标记单元的微结构光纤端面结构示意图；

图 4 是本发明实施例 2 提供的带波长标记单元的微结构光纤端面结构

示意图；

图 5 是本发明实施例 3 提供的带异构标记单元的微结构光纤端面结构示意图；

图 6 是空芯微结构光纤几何均匀性恶化的示意图。

在所有附图中，相同的附图标记用来表示相同的元件或结构，其中：1 为套管，2 为反谐振微结构单元，3 为折射率标记单元，4 为波长标记单元，5 为异构标记单元， θ 为异构单元的方位角差异。

具体实施方式

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。此外，下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

本发明提供的空芯微结构光纤端面检测方法，包括以下步骤：

(1) 对空芯微结构光纤的端面进行成像，获得空芯微结构光纤的端面图像；

(2) 根据空芯微结构光纤的端面的不对称性对步骤 (1) 获得的所述空芯微结构光纤的端面图像中的各反谐振微结构单元进行标记，从而标识所述空芯微结构光纤的端面图像中各反谐振微结构单元；所述空芯微结构光纤具有标记单元，其端面除开标记单元以外的部分呈现几何对称性，所述空芯微结构光纤外轮廓为圆形；而具有标记单元的空芯微结构光纤端面呈现不对称性。

所述标记单元，在空芯微结构光纤的端面图像中其轮廓具备可识别度，可以是折射率标记单元、波长标记单元、结构标记单元、或异构标记单元；

所述折射率标记单元，为光纤玻璃部分中材料折射率与其周围材料折射率不同的玻璃部分，由于折射率与周围材料的折射率不同，其轮廓在透

射光或反射光成像时，在空芯微结构光纤的端面图像中能被识别，具备可识别度；

所述波长标记单元，为光纤玻璃部分中对不同波长的光透过率与周围材料对不同波长的光透过率不同的玻璃部分，其轮廓在不同波长的照明光或混合光照明下成像时，在空芯微结构光纤的端面图像中能被识别，具备可识别度；可采用透射成像或反射成像。

所述结构标记单元，为形状结构在端面图像中具备可识别度，包括空芯微结构光纤包层的增材结构、空芯微结构光纤包层的减材结构，从而增加包层的不对称性，达到可识别的目的。所述空芯微结构光纤包层的增材结构，例如包层增加的管、棒、凸棱等标记物；所述空芯微结构光纤包层的减材结构，例如凹槽、钻孔等标记结构；

所述异构标记单元为对空芯微结构光纤的反谐振微结构单元进行结构调整获得的具备可识别度的反谐振微结构单元；所述异构标记单元，例如壁厚、直径、圆度、方位角、间隙区分于其他反谐振微结构单元的反谐振微结构单元。对于异构标记单元而言，光纤端面除开标记单元以外的部分指异构标记单元替换为该光纤其他反谐振微结构单元的光纤端面结构，即消除“异构”因素的光纤端面。

具有标记单元的空芯微结构光纤呈现不对称性，可以是标记单元本身具有不对称性或者其处于端面图像中的位置破坏了空芯微结构光纤端面对称性；例如刻槽标记或凸棱，其外轮廓呈与光纤端面对称性不匹配的形状，如三角形，从而破坏光纤端面的旋转对称性；又例如外轮廓为圆形的玻璃丝标记，虽然其外轮廓具备完美对称性，但是当玻璃丝标记处于空芯微结构光纤端面对称轴及对称中心以外的位置时，则破坏了空芯微结构光纤端面对称性。

(3) 对于步骤(2)标识的各反谐振微结构单元，从步骤(1)获得的空芯微结构光纤的端面图像中分离各空芯反谐振微结构单元相应的端面图

像，进行几何参数提取，判断所述空芯微结构光纤几何均匀性。

判断所述空芯微结构光纤几何均匀性，具体可为以下方式之一或组合：

其一、判断各反谐振微结构单元各自的几何结构规整性，所述几何结构规整性用于表征反谐振微结构单元与理论设计的反谐振微结构单元之间的差异，包括但不限于反谐振微结构单元的圆度、尺寸、厚度是否符合理论设计标准或与理论设计标准的差异。

其二、判断各反谐振微结构单元之间的几何结构一致性，所述几何结构一致性用于表征各反谐振微结构单元之间的几何结构差异，包括但不限于各微结构之间的尺寸差异、厚度差异、方位角差异以及相对位置差异。

其三、判断各反谐振微结构单元各自的几何结构稳定性，所述几何结构稳定性用于表征反谐振微结构单元在不同位置截取端面之间的差异，包括但不限于反谐振微结构单元端面之间的圆度差异、尺寸差异、厚度差异、方位角差异以及相对位置差异。

理论上，空芯反谐振光纤的反谐振微结构单元具备较完美的对称性，一般用于通信的空芯微结构光纤的横截面结构关于中心旋转对称，典型地，空芯反谐振光纤具有完美对称性的圆形外轮廓。对称的结构设计具备较低的理论损耗。然而对称的结构空芯微结构光纤在制作和工艺调试过程中，各反谐振微结构单元难以区分，例如当端面检测发现某些反谐振微结构单元自身的结构规整性不佳时，很难确认是预制棒中哪一反谐振微结构单元在拉丝成型过程中的工艺控制不佳；同样的，端面图像检测后，发现多个反谐振微结构单元出现不一致，很难判断是哪一个或者几个反谐振微结构单元结构不理想，调整工艺需要大量时间摸索；在多次不同位置的端面检测过程中，难以将不同的反谐振微结构单元对应起来，观察不同位置同一反谐振微结构单元的变化。

因此使空芯反谐振光纤的端面具备不对称性，从而标识各对称的反谐振微结构单元对于空芯微结构光纤端面检测意义重大，使得端面检测可以

用于检测或监测空芯反谐振光纤的几何均匀性，既可以用于光纤的工艺反馈调整，又可以用于产品质量控制。

本发明提供的空芯微结构光纤，具有标记单元，其端面除开标记单元以外的部分呈现几何对称性，所述空芯微结构光纤外轮廓为圆形；而具有标记单元的空芯微结构光纤端面呈现不对称性。

所述标记单元，在空芯微结构光纤的端面图像中其轮廓具备可识别度，可以是折射率标记单元、波长标记单元、结构标记单元、或异构标记单元；

所述折射率标记单元，为光纤玻璃部分中材料折射率与其周围材料折射率不同的玻璃部分，由于折射率与周围材料的折射率不同，其轮廓在透射光或反射光成像时，在空芯微结构光纤的端面图像中能被识别，具备可识别度；

所述波长标记单元，为光纤玻璃部分中对不同波长的光透过率与周围材料对不同波长的光透过率不同的玻璃部分，其轮廓在不同波长的照明光或混合光照明下成像时，在空芯微结构光纤的端面图像中能被识别，具备可识别度；

所述结构标记单元，为形状结构在端面图像中具备可识别度，包括空芯微结构光纤包层的增材结构、空芯微结构光纤包层的减材结构，从而增加包层的不对称性，达到可识别的目的。所述空芯微结构光纤包层的增材结构，例如包层增加的管、棒、凸棱等标记物；所述空芯微结构光纤包层的减材结构，例如凹槽、钻孔等标记结构；

所述异构标记单元为对空芯微结构光纤的反谐振微结构单元进行结构调整获得的可识别度的反谐振微结构单元；所述异构标记单元，例如壁厚、直径、圆度、方位角、间隙区分于其他反谐振微结构单元的反谐振微结构单元。

然而不同于性能主要由芯包折射率剖面决定的实心光纤，空芯微结构光纤的传输性能对于结构、材质敏感，这是由空芯微结构光纤的光传输原

理决定的。空芯反谐振光纤的导光原理可以通过反谐振波导理论和抑制耦合理论来进行阐释。

反谐振波导理论是一束光从一个介质入射到另外一个介质中时，如果介质的尺寸远大于光的波长，此时可以不用考虑光的干涉，总的光功率将有一部分发生透射，而另一部分发生反射。如果介质的厚度与光波长相当，就可以视为一个 F-P 干涉腔，透射光会随着波长相干相长或相消。将这种元件作为波导的限制条件，就会发现，光可以在部分波长下低损耗传输。基于反谐振波导理论，反谐振微结构单元的形状结构，尤其是介质的厚度对于光纤的性能至关重要。

抑制耦合理论是抑制空芯反谐振光纤中的纤芯模式和包层模式发生耦合，一般通过增大纤芯基模与包层模式的有效折射率的差值使其相位失配，从而降低基模的耦合损耗，并且可以通过相反的方法让高阶模式处于高损耗状态，这其中关键在于包层的结构设计。

因此空芯微结构光纤中设置标记单元用来做端面检测标记时，标记单元的类型和位置，对于维持光纤基本性能有重要影响。在纤芯外侧光纤能量分布小于 0.5% 的区域，标记单元的设置对光纤性能影响不明显，即

所述标记单元与光纤结构中心的距离 D ，使得：

$$E_D \leq 0.5\%$$

$$E_D = \int_0^{2\pi} \int_D^R f(r, \theta) r dr d\theta$$

其中， E_D 为光纤横截面上与光纤结构中心距离大于 D 的区域的能量分布占比；对于光纤横截面内以光纤结构中心为极点的极坐标系中的一点，其极径为 r ，极角为 θ ， $f(r, \theta)$ 为光纤横截面的归一化光场分布函数； R 为光纤半径。

实验数据显示，一般标记单元应该设置于与光纤结构中心距离超过纤芯直径区域，这样标记单元带来的影响相比于制作过程中导致的几何结构

上的不均匀对光纤性能的影响小得多，标记单元带来传输损耗性能恶化在10%以内，而制作过程中几何结构的不均匀性一般会带来几何倍数（10—1000 倍）的损耗劣化影响，采用标记单元进行端面检测标有利于改善光纤传输损耗性能。即所述标记单元与光纤结构中心的距离 D 满足： $D \geq d$ ，其中 d 为空芯微结构光纤的纤芯直径。

而异构标记单元，也需要对结构差异进行控制，异构标记单元结构的偏差量应在 0.8%~25%，对于异构标记单元与该光纤其他反谐振微结构单元的差异参数，其在异构单元与其他反谐振微结构单元的差值占其他反谐振微结构单元该参数值的百分比即为异构标记单元结构的偏差量。

特别的：

对于折射率标记单元，其折射率可以高于周围空芯微结构光纤包层的折射率，也可低于周围空芯微结构光纤包层的折射率，但是折射率标记单元与周围空芯微结构光纤包层的最大折射率差值在 0.0005~0.03 之间，其面积占光纤包层面积的 0.002%~2%。

对于波长标记单元，其在工作波长下透过率可以高于周围空芯微结构光纤包层的透过率，也可低于周围空芯微结构光纤包层的透过率，但是其与周围空芯微结构光纤包层的透过率差值应该在 0.1%~1，波长标记单元的面积占光纤包层面积的 0.002%~2%。

对于结构标记单元，其面积应超过光纤包层面积的 0.002%，小于等于 2%。

所述异构标记单元，可通过包括但不限于以下结构的差异进行标记，例如反谐振微结构单元的壁厚、直径、圆度、方位角、间隙等，结构的偏差量应在 0.8%~25%。结构的偏差量是指异构标记单元与其他反谐振微结构单元具有差异的指标的差异程度。

采用上述标记单元参数，以平衡标记单元的可识别度和对光纤光学性能的影响。

以下为实施例：

实施例中，需要标记的空芯微结构光纤端面涉及光纤横截面的归一化光场分布图，如图 1 所示，反谐振微结构光纤的包层包括套管形成的外包层和反谐振微结构单元形成的反谐振包层，套管内壁有 5 个反谐振微结构单元形成的光纤反谐振包层，其内切圆为空芯微结构光纤的纤芯，纤芯直径为 D_{core} ，此实施例的 D_{core} 为 30um，反谐振微结构单元中大管的直径为 $D_{core} \times 105\%$ ，小管直径为 $D_{core} \times 45\%$ ，大管与小管相切嵌套，其相切的切面与套管固定，光纤的结构中心位于各反谐振微结构单元的对称轴延长线上；光纤对称轴（即图 1 中的平黑色实线）上的归一化光场分布图，如图 2 所示。

其中图 1 和图 2 中的点虚线部分表示与光纤结构中心距离超过纤芯直径区域，即距离端面几何中心大于等于 30um 的区域，在此区域范围内定义为光场影响区，此区域外定义为光场非影响区。在光场影响区范围内光场强度占整个光纤截面的 99.93%，光场非影响区范围内光场强度只占整个光纤截面的 0.07%。标记单元处于光场非影响区，对空芯微结构光纤的传输特性无明显影响。

实施例标记单元具体如下：

实施例 1

采用折射率标记单元进行标记，如图 3 所示：空芯光纤包层采用纯二氧化硅材料制备，并在包层内部设置一个高折射率的标记单元，标记单元直径为 3.8um，折射率标记单元与周围空芯微结构光纤包层的最大折射率差值为 0.006，折射率标记单元的面积占光纤包层面积的 0.027%，其中心与光纤结构中心的连线处于两相邻的反谐振微结构单元对称轴之间，靠近其中之一，从而破坏光纤端面的旋转对称性，而呈现不对称性。在显微镜下通过注入透射光观察光纤端面，可清晰辨别出折射率标记单元的位置。

实施例 2

采用波长标记单元进行标记，如图 4 所示：空芯光纤包层采用多组分玻璃材料制备，并在包层内部设置一个折射率相同而透过率不同的标记单元，从而实现标记单元的对可见光的透过率不同于包层其他区域的透过率。标记单元为正方形，其边长为 7.9um，标记单元与周围空芯微结构光纤包层的透过率差值为 23%，标记单元的面积占光纤包层面积的 0.117%，其中心与光纤结构中心的连线处于两相邻的反谐振微结构单元对称轴之间，靠近其中之一，从而破坏光纤端面的旋转对称性，而呈现不对称性。在显微镜下通过打透射光观察光纤端面，由于标记单元的透过率明显低于周围空芯微结构光纤包层的透过率，因此可清晰辨别出标记单元的位置。

实施例 3

采用异构标记单元进行标记，如图 5 所示：空芯光纤包层采用纯二氧化硅材料制备，并采用 5 个反谐振微结构单元来降低光纤的损耗。其中 1 个反谐振微结构单元的小管角度发生偏转 15° ，即方位角差异为 15° ，定义其偏差量为 $15^\circ / 180^\circ = 8.3\%$ ，在显微镜下通过打透射光观察光纤端面，可清晰辨别出方位角发生偏转的反谐振单元的位置。

实施例 1 至 3 提供的空芯微结构光纤，进行光纤端面检测方法，包括以下步骤：

(1) 对空芯微结构光纤的端面进行成像，获得空芯微结构光纤的端面图像；

(2) 根据空芯微结构光纤的端面的不对称性对步骤 (1) 获得的所述空芯微结构光纤的端面图像中的各反谐振微结构单元进行标记，从而标识所述空芯微结构光纤的端面图像中各反谐振微结构单元；

(3) 对于步骤 (2) 标识的各反谐振微结构单元，从步骤 (1) 获得的获得各空芯反谐振微结构单元相应的端面图像，进行几何参数提取，判断所述空芯微结构光纤几何均匀性。

判断所述空芯微结构光纤几何均匀性，具体可为以下方式之一或组合：

其一、判断各反谐振微结构单元各自的几何结构规整性，所述几何结构规整性用于表征反谐振微结构单元与理论设计的反谐振微结构单元之间的差异，包括但不限于反谐振微结构单元的圆度、尺寸是否符合理论设计标准或与理论设计标准的差异。

其二、判断各反谐振微结构单元之间的几何结构一致性，所述几何结构一致性用于表征各反谐振微结构单元之间的几何结构差异，包括但不限于各微结构之间的尺寸差异、方位角差异以及相对位置差异。

其三、判断各反谐振微结构单元各自的几何结构稳定性，所述几何结构稳定性用于表征反谐振微结构单元在不同位置截取端面之间的差异，包括但不限于反谐振微结构单元端面之间的圆度差异、尺寸差异、厚度差异、方位角差异以及相对位置差异。

本领域的技术人员容易理解，以上所述仅为本发明的较佳实施例而已，并不用以限制本发明，凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1.一种空芯微结构光纤端面检测方法，其特征在于，包括以下步骤：

(1)对空芯微结构光纤的端面进行成像，获得空芯微结构光纤的端面图像；

(2)根据空芯微结构光纤的端面的不对称性对步骤(1)获得的所述空芯微结构光纤的端面图像中的各反谐振微结构单元进行标记，从而标识所述空芯微结构光纤的端面图像中各反谐振微结构单元；所述空芯微结构光纤具有标记单元，其端面除开标记单元以外的部分呈现几何对称性；而具有标记单元的空芯微结构光纤端面呈现不对称性；

(3)对于步骤(2)标识的各反谐振微结构单元，从步骤(1)获得的空芯微结构光纤的端面图像中分离各空芯反谐振微结构单元相应的端面图像，进行几何参数提取，判断所述空芯微结构光纤几何均匀性。

2.如权利要求1所述的空芯微结构光纤端面检测方法，其特征在于，所述空芯微结构光纤外轮廓为圆形。

3.如权利要求1或2所述的空芯微结构光纤端面检测方法，其特征在于，所述标记单元，在空芯微结构光纤的端面图像中其轮廓具备可识别度。

4.如权利要求3所述的空芯微结构光纤端面检测方法，其特征在于，所述标记单元为折射率标记单元、波长标记单元、结构标记单元、或异构标记单元；

所述折射率标记单元，为光纤玻璃部分中材料折射率与其周围材料折射率不同的玻璃部分；

所述波长标记单元，为光纤玻璃部分中对不同波长的光透过率与周围材料对不同波长的光透过率不同的玻璃部分；

所述结构标记单元，为形状结构在端面图像中具备可识别度，包括空芯微结构光纤包层的增材结构、空芯微结构光纤包层的减材结构；

所述异构标记单元为对空芯微结构光纤的反谐振微结构单元进行结构调整

获得的具备可识别度的反谐振微结构单元。

5.如权利要求4所述的空芯微结构光纤端面检测方法，其特征在于，所述空芯微结构光纤包层的增材结构，为包层增加的管、棒、和/或凸棱；所述空芯微结构光纤包层的减材结构，为凹槽或钻孔。

6.如权利要求1所述的空芯微结构光纤端面检测方法，其特征在于，步骤（3）判断所述空芯微结构光纤几何均匀性，具体可为以下方式之一或组合：

其一、判断各反谐振微结构单元各自的几何结构规整性，所述几何结构规整性用于表征反谐振微结构单元与理论设计的反谐振微结构单元之间的差异，包括但不限于反谐振微结构单元的圆度、尺寸是否符合理论设计标准或与理论设计标准的差异。

其二、判断各反谐振微结构单元之间的几何结构一致性，所述几何结构一致性用于表征各反谐振微结构单元之间的几何结构差异，包括但不限于各微结构之间的尺寸差异、方位角差异以及相对位置差异。

其三、判断各反谐振微结构单元各自的几何结构稳定性，所述几何结构稳定性用于表征反谐振微结构单元在不同位置截取端面之间的差异，包括但不限于反谐振微结构单元端面之间的圆度差异、尺寸差异、方位角差异以及相对位置差异。

7.一种带标记空芯微结构光纤，其特征在于，具有标记单元，其端面除开标记单元以外的部分呈现几何对称性；而具有标记单元的空芯微结构光纤端面呈现不对称性。

8.如权利要求7所述的带标记空芯微结构光纤，其特征在于，所述空芯微结构光纤外轮廓为圆形。

9.如权利要求7或8所述的带标记空芯微结构光纤，其特征在于，所述标

记单元，在空芯微结构光纤的端面图像中其轮廓具备可识别度。

10.如权利要求 9 所述的带标记空芯微结构光纤，其特征在于，所述标记单元与光纤结构中心的距离 D ，使得：

$$E_D \leq 0.5\%$$

$$E_D = \int_0^{2\pi} \int_D^R f(r, \theta) r dr d\theta$$

其中， E_D 为光纤横截面上与光纤结构中心距离大于 D 的区域的能量分布占比；对于光纤横截面内以光纤结构中心为极点的极坐标系中的一点，其极径为 r ，极角为 θ ， $f(r, \theta)$ 为光纤横截面的归一化光场分布函数； R 为光纤半径；

和/或

所述标记单元与光纤结构中心的距离 D 满足： $D \geq d$ ，其中 d 为空芯微结构光纤的纤芯直径。

11.如权利要求 9 所述的带标记空芯微结构光纤，其特征在于，所述标记单元为折射率标记单元、波长标记单元、结构标记单元、或异构标记单元；

所述折射率标记单元，为光纤玻璃部分中材料折射率与其周围材料折射率不同的玻璃部分；

所述波长标记单元，为光纤玻璃部分中对不同波长的光透过率与周围材料对不同波长的光透过率不同的玻璃部分；

所述结构标记单元，为形状结构在端面图像中具备可识别度，包括空芯微结构光纤包层的增材结构、空芯微结构光纤包层的减材结构；

所述异构标记单元为对空芯微结构光纤的反谐振微结构单元进行结构调整获得的可识别度的反谐振微结构单元。

12.如权利要求 11 所述的带标记微结构光纤，其特征在于，所述空芯微结

构光纤包层的增材结构，为包层增加的管、棒、和/或凸棱；所述空芯微结构光纤包层的减材结构，为凹槽和/或钻孔。

13.如权利要求 11 所述的带标记空芯微结构光纤，其特征在于，所述折射率标记单元与周围空芯微结构光纤包层的最大折射率差值在 0.0005~0.03 之间，其面积占光纤包层面积的 0.002%~2%；

所述波长标记单元，其在工作波长下与周围空芯微结构光纤包层的透过率差值在 0.1%~100%，波长标记单元的面积占光纤包层面积的 0.002%~2%；

所述结构标记单元，其面积占光纤包层面积的 0.002%~2%；。

所述异构标记单元结构的偏差量应在 0.8%~25%。