

带减材标记的空芯微结构光纤、预制棒及拉丝检测方法

技术领域

本发明属于光通信领域，更具体地，涉及带减材标记的空芯微结构光纤、预制棒及拉丝检测方法。

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。

即使空芯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，其与现有的实心光纤具有本质上的区别。空芯微结构光纤的微观立体结构是其导光的基础，为了维持或者形成特定的微观结构需要在拉丝过程中维持通入气体，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 1 所示。这种几何结构上的不均匀将会

极大的影响空芯反谐振光纤的传输损耗。而正是由于这种制造方法相对于现有的实心光纤是颠覆性的，因此无法采用通常实心光纤增加光纤预制棒尺寸的方法来改善几何不均匀性。

发明内容

针对现有技术的以上缺陷或改进需求，本发明提供了带减材标记的空芯微结构光纤、预制棒及拉丝检测方法，其减材标记单元，可在拉丝检测中对各反谐振微结构单元进行标记和识别，对空芯微结构光纤的生产和工作具有指导意义。

按照本发明的一个方面，提供了一种带减材标记的空芯微结构光纤，包括包层空芯套管以及排列并附着在所述包层空芯套管内壁的多个反谐振微结构单元，所述反谐振微结构单元用于形成其内切圆尺寸的空气纤芯区域；所述多个反谐振微结构单元旋转对称；

纤芯外侧设有一个或多个减材标记单元，使得所述空芯微结构光纤的端面结构具有不对称性；

所述减材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；

其中，所述减材标记单元为设置在包层空芯套管的内壁上的沟槽，所述沟槽平行于所述包层空芯套管的轴向布置；或者，所述减材标记单元为设置在包层空芯套管内的通孔，并且所述通孔平行于所述包层空芯套管的轴向布置；

在所述空芯微结构光纤的横截面上，单个所述减材标记单元的外轮廓包围的面积占包层面积的 0.002%~2%。

优选地，所述包层空芯套管的外轮廓为圆形；所述减材标记单元为设置在包层空芯套管的内壁上的沟槽，其外轮廓为矩形的一部分、U 形、V 形或半圆形；或所述减材标记单元为设置在包层空芯套管内的通孔，其外轮廓为圆形、椭圆形、矩形和/或多边形。

优选地，所述带减材标记的空芯微结构光纤，其所述减材标记单元与光纤结构中心的距离 D ，使得： $E_D \leq 0.1\%$ ；所述减材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，所述带减材标记的空芯微结构光纤，其所述减材标记单元处于相邻反谐振微结构单元外轮廓的几何中心与光纤几何中心的连线之间的区域内。

优选地，所述带减材标记的空芯微结构光纤，其所述减材标记单元靠近所述相邻反谐振微结构单元之一。

优选地，所述带减材标记的空芯微结构光纤，其所述减材标记单元为设置在包层空芯套管的内壁上的沟槽，所述减材标记单元位置与所述减材标记单元靠近的反谐振微结构单元附着处之间的弧度为 R_1 ，相邻两反谐振微结构单元附着处之间的弧度为 R_2 ， $R_1/R_2=1/6$ 至 $1/3$ 。

优选地，所述带减材标记的空芯微结构光纤，其所述包层空芯套管内壁具有多个减材标记单元，多个所述减材标记单元具有不同的外轮廓形状、类型和/或面积。

按照本发明的另一个方面，提供了一种带减材标记的空芯微结构光纤的预制棒，包括用于拉丝形成本发明提供的所述带减材标记的空芯微结构光纤的玻璃部件。

按照本发明的另一个方面，提供了一种带减材标记的空芯微结构光纤的拉丝检测方法，其包括以下步骤：

- (1) 将本发明提供的带减材标记的空芯微结构光纤在预设位置截断；
- (2) 对步骤(1)获得的截断后的端面采用透射光或反射光进行成像，获空芯微结构光纤该位置的端面图像；
- (3) 对于步骤(2)获得的端面图像，根据其减材标记单元进行反谐振微结构识别，获得各反谐振微结构单元的图像；
- (4) 对步骤(3)识别获得的反谐振微结构单元的图像进行几何参数提取，判断所述空芯微结构光纤的几何均匀性。

优选地，所述空芯微结构光纤预制棒的拉丝检测方法，其步骤(2)采用显微镜对端面进行成像。

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：

1) 本发明的带减材标记的空芯微结构光纤，其作用在于能快速辨别空芯微结构光纤中的反谐振微结构单元，便于在线控制反谐振微结构单元的大小均匀性，有利于降低空芯光纤的传输损耗。

2) 本发明的带减材标记的空芯微结构光纤，通过减材标记单元，可在拉丝检测中对各反谐振微结构单元进行标记和识别，判断和分析所述空芯微结构光纤的几何均匀性，从而对后续的空芯微结构光纤的预制棒的生产提供借鉴和指导，及时进行工艺调整和改进来控制几何均匀性，可以在预制棒后续制造空芯微结构光纤过程中，保证空芯微结构光纤的几何均匀性。

3) 在空芯微结构光纤的耦合过程中，便于识别不同反谐振微结构单元，从而降低空芯微结构光纤的耦合损耗。

附图说明

图1是无标记的空芯微结构光纤示意图，用来与实施例1进行对比；

图2是本发明实施例1提供带刻槽标记的空芯微结构光纤预制棒的结构示意图；

图3是本发明实施例1提供带刻槽标记的空芯微结构光纤预制棒在拉

丝过程中的压力控制示意图；

图 4 是本发明实施例 2 提供带钻孔标记的空芯微结构光纤预制棒在拉丝过程中的压力控制示意图；

图 5 是本发明实施例 3 提供带钻孔标记的空芯光微结构纤预制棒在拉丝过程中的压力控制示意图。

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-反谐振微结构单元，2-减材标记单元，3-包层空芯套管。

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。

按照本发明的一个方面，提供了带减材标记的空芯微结构光纤，包括包层空芯套管 3 以及排列并附着在所述包层空芯套管 3 内壁的多个反谐振微结构单元 1，所述反谐振微结构单元 1 具有与包层空芯套管 3 的内壁内切的空气纤芯区域；多个所述反谐振微结构单元 1 旋转对称；

纤芯外侧设有一个或多个减材标记单元 2，使得所述空芯微结构光纤的端面结构具有不对称性；

所述减材标记单元 2 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；

优选方案，使得： $E_D \leq 0.1\%$ ；

其中，所述减材标记单元 2 为设置在包层空芯套管 3 的内壁上的沟槽，所述沟槽平行于所述包层空芯套管 3 的轴向布置；或者，所述减材标记单元为设置在包层空芯套管 3 内的通孔，并且所述通孔平行于所述包层空芯套管 3 的轴向布置；

在所述空芯微结构光纤的横截面上，单个所述减材标记单元 2 的面积占包层面积的 0.002%~2%；包层包括空心套管形成的外包层以及反谐振微结构单元形成的反谐振包层。

优选地，所述包层空芯套管 3 的外轮廓为圆形；所述减材标记单元 2 为设置在包层空芯套管 3 的内壁上的沟槽，其外轮廓为矩形的一部分、U 形、V 形或半圆形，所述减材标记单元 2 为设置在包层空芯套管 3 内的通孔，其外轮廓为圆形、椭圆形、矩形和/或多边形。

优选地，所述减材标记单元 2 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，所述减材标记单元 2 处于相邻反谐振微结构单元 1 的几何中心与光纤几何中心的连线之间的区域内，该区域一般呈扇形；所述减材标记单元 2 靠近所述相邻反谐振微结构单元 1 之一，减材标记单元 2 落在此区域内，使光纤端面呈现不对称性，可以实现具有不对称性的光纤端面图像的获取。

优选地，所述减材标记单元 2 为设置在包层空芯套管 3 的内壁上的沟槽，所述减材标记单元 2 的位置与所述减材标记单元靠近的反谐振微结构单元 1 附着处之间的弧度为 R_1 ，相邻两反谐振微结构单元 1 附着处之间的弧度为 R_2 ， $R_1/R_2=1/6$ 至 $1/3$ 。

优选地，所述包层空芯套管内壁具有多个减材标记单元 1，多个所述减材标记单元 1 具有不同的外轮廓形状、类型和/或面积。

按照本发明的另一个方面，提供了一种带减材标记的空芯微结构光纤的预制棒，包括用于拉丝形成本发明提供的所述带减材标记的空芯微结构光纤的玻璃部件。

关于反谐振微结构光纤的几何均匀性检测，目前没有成熟可行的技术方案，本专利构思采用图像法进行端面检测，提取几何特征，来解决几何均匀性检测的问题。图像法检测的难度在于反谐振微结构光纤的端面，理论上具有完美的对称性，难以相互区分。目前已经有一些反谐振微结构光纤具有不对称的端面，例如 CN115185034A，通过一个毛细管内设有圆型嵌套结构，其余毛细管内设有 U 型嵌套结构，从而形成单模、低损耗、结构简单的单偏振空芯反谐振光纤，适用于长距离场景并易于制备。专利 CN113885120A 中提出两层外包层结构的空芯微结构光纤。第一外包层界定了内部未封闭包层外表面；第二外包层为未封闭的，其上有一条贯穿光纤的微通道；第二外包层与第一外包层紧密连接，并界定了内部未封闭包层内表面；毛细管层作为反谐振层附接至第二外包层内表面，并与第二外包层一起界定具有有效半径的纤芯；毛细管层中的毛细管被间隔布置，且相邻的毛细管之间具有间隔；第一外包层可以有效保证光纤的机械可靠性，第二外包层具有未封闭结构，能够极大减小光纤后处理复杂度，并提高光纤的性能，解决了现有反谐振空芯微结构光纤损耗特性与处理复杂性的问题。

以上专利中虽然提出了非对称的空芯微结构光纤结构设计，但是主要是为了解决偏振问题以及光纤传感中空芯光纤后处理问题，均未提出对空芯微结构光纤拉制过程中的几何均匀性控制的解决方案。因此没有考虑过光纤端面成像难度、以及不对称性是否足够明显足以在端面图像上区分反谐振微结构单元。

基于不对称标记的考虑，一个必须要解决的问题是，不对称标记是否会影响空芯微结构光纤的性能、拉丝难度。具体而言，足够明显的减材标

记，需要有足够大的面积，而相对而言更容易影响微结构光纤的传输性能和拉丝制备难度。

通过巧妙的设计，将减材标记单元设置在纤芯外侧光纤能量分布小于 0.5% 的区域内，优选纤芯外侧光纤能量分布小于 0.1% 的区域内，尽可能减小对空芯微结构光纤传输性能的影响。

减材标记单元不能设置在圆形套管外表面，由于套管外表面具有较明显的拉丝张力，不完美的包层会引起光纤拉丝过程中整体变形、传输损耗增加，并会导致减材标记的外轮廓变形，而难以识别，失去标记意义。

减材标记若为封闭标记，即设置在包层空芯套管内的通孔，几乎不影响反谐振微结构单元的拉丝过程，因此几乎不影响光纤传输性能，从这个角度来讲，通孔作为减材标记单元相较于沟槽作为减材标记单元具有理论上更优的传输性能，但拉丝时需要增加通入气流维持外轮廓避免塌陷，而通孔加工难度较为复杂。

减材标记若为开放标记，即沟槽，其需要设置在包层空芯套管的内壁上。同时沟槽会在一定程度上影响拉丝时通入套管内的气流，而其外轮廓亦受到拉丝时通入套管内的气流以及张力影响。因此沟槽的横截面面积以及其所处的位置，对于最终拉丝获得的空心光纤的减材标记单元的识别度有着至关重要的影响。考虑沟槽面积参数，减材标记单元的外轮廓包围的面积占包层面积的 0.002%~2%。这一范围内，一般具有良好的可识别度，并且其位置选择容易明显的看出与反谐振微结构单元之一靠近，从而体现出更明显的不对称性。若沟槽的面积过大，在拉丝张力的影响之下，变形更为严重，同时设置在内壁上与相邻的两个反谐振微结构单元之间的位置差异相对不明显，导致端面图像法识别反谐振微结构单元时产生困难。

优选的方案所述减材标记单元为设置在包层空芯套管的内壁上的沟槽，所述减材标记单元的位置与所述减材标记单元靠近的反谐振微结构单元附着处之间的弧度为 R_1 ，相邻两反谐振微结构单元附着处之间的弧度为 R_2 ，

$R_1/R_2=1/6$ 至 $1/3$ 。

按照本发明的另一个方面，还提供了空芯微结构光纤的预制棒的拉丝检测方法，包括以下步骤：

- (1) 将所述带减材标记的空芯微结构光纤在预设位置截断；
- (2) 对步骤(1)获得的截断后的端面采用透射光或反射光进行成像，获空芯微结构光纤该位置的端面图像；
- (3) 对于步骤(2)获得的端面图像，根据其减材标记单元2进行反谐振微结构识别，获得各反谐振微结构单元1的图像；
- (4) 对步骤(3)识别获得的反谐振微结构单元的图像进行几何参数提取，判断所述空芯微结构光纤的几何均匀性。

优选地，步骤(2)采用显微镜对端面进行成像。

上述方法能快速辨别空芯微结构光纤中的反谐振微结构单元1，便于在线控制反谐振微结构单元1的大小均匀性，有利于降低空芯微结构光纤的传输损耗；同时，在空芯微结构光纤耦合过程中，便于识别不同反谐振微结构单元1，从而降低空芯的耦合损耗。

典型的带减材标记的空芯微结构光纤预制棒，如图2所示，包括反谐振微结构单元1和带刻槽或钻孔形成的通孔的减材标记单元2的包层空芯套管3。所述空芯微结构光纤预制棒由n个反谐振微结构单元1，其中 $n \geq 3$ ，包层空芯套管3上有m个刻槽或钻孔标记， $m \geq 1$ 。

进一步地，所述反谐振微结构单元1由单层或多层负曲率结构的组件构成。

进一步地，钻孔标记为封闭的形状，如圆形、椭圆形、方形等，刻槽标记为非封闭的形状，如非封闭的半圆形、长方形等。

上述的带刻槽或钻孔标记的空芯微结构光纤制备方法，其特征在于，制备步骤如下：

步骤1、制备反谐振微结构单元1：通过母管在高温拉丝炉中拉制成所

需的毛细管；毛细管可根据设计需求进行二次加工，如切削、打磨、焊接等。

步骤 2、制备刻槽或钻孔标记包层空芯套管 3：在包层空芯套管 3 上通过钻孔、研磨、蚀刻、切削等工艺，制备出一个或多个刻槽或钻孔标记。

步骤 3、预制棒堆积：将步骤 1 得到的反谐振微结构单元 1 在步骤 2 得到的带刻槽或钻孔标记包层空芯套管 3 中进行堆叠组装，从而形成带刻槽或钻孔标记的空芯微结构光纤预制棒。

步骤 4、将步骤 3 中的带刻槽或钻孔标记的空芯微结构光纤预制棒直接拉制成空芯微结构光纤，或先拉制成中间预制棒，再套入中间套管中拉成空芯微结构光纤。在拉制过程中通过刻槽或钻孔标记，可以快速分辨光纤中反谐振微结构单元 1 与预制棒中反谐振微结构单元 1 的对应关系，从而通过控制预制棒中反谐振微结构单元 1 内的气压大小，来调节光纤中反谐振微结构单元 1 的大小。

进一步地，所述反谐振微结构单元 1、带刻槽或钻孔的减材标记单元 2 包层空芯套管 3 可以是高纯二氧化硅材质、掺杂石英材质（掺有锗、氟、氯、硼、铝等一种或多种元素）、多组分玻璃材质、塑料材质等。

进一步地，所述空芯微结构光纤具有大于等于 100um 的包层直径。

进一步地，采用本发明方法制备的空芯微结构光纤具备较低的传输损耗，其最低的传输损耗 $\leq 30\text{dB/km}$ ，更优的 $\leq 1\text{dB/km}$ 。

进一步地，采用本发明方法制备的空芯微结构光纤具备较低的熔接损耗，其空芯微结构光纤自熔接损耗为 $\leq 0.5\text{dB}$ 。

以下为实施例：

实施例 1

如图 2 所示，先通过母管制备毛细管，母管经过拉丝炉拉制成毛细管，形成反谐振微结构单元 1，其外径为 10.3mm，壁厚为 0.56mm。再在包层空芯套管 3 的内壁，通过蚀刻和研磨工艺，制备出一个刻槽作为减材标记

单元 2。包层空芯套管 3 尺寸为外径 50mm，内径 35mm；刻槽的减材标记单元 2 为半圆形，其直径为 3.0mm。将 5 根毛细管在带有减材标记单元 2 的包层空芯套管 3 中堆叠成如图 1 所示的带刻槽标记的空芯微结构光纤预制棒。带刻槽标记的空芯微结构光纤预制棒可在拉丝炉中直接拉制成空芯微结构光纤。如果不施加气压，在拉丝时，由于温度的波动，会造成反谐振微结构单元 1 的尺寸不一样，如图 1 所示，其反谐振微结构单元 1 的外径最大偏差为 25%。为此需要通过在反谐振微结构单元 1 里通入不同压力的气体，来使得反谐振微结构单元 1 的尺寸均一。如图 3 所示，通过刻槽减材标记单元，来识别反谐振微结构单元 1 中所需气压的大小， P_0 为常压， P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 分别为反谐振微结构单元 1 中的气压大小，其值分别为 10.3mbar、10.6mbar、11.1mbar、10.4mbar、10.7mbar。拉制成光纤后，其反谐振微结构单元 1 的外径最大偏差为 4.1%，其在 1550nm 处的衰减为 5.1dB/km。此空芯微结构光纤熔接时，可通过刻槽减材标记单元来辨别毛细管方位，从而实现更精准的对接，其最低熔接损耗为 0.48dB。

实施例 2

如图 4 所示，先通过母管制备两种尺寸的毛细管，大毛细管外径 7.9mm，壁厚 0.42mm，小毛细管外径 4.5mm，壁厚 0.44mm。再在包层空芯套管 3 的壁内部，通过钻孔工艺，制备出一个钻孔标记 4。包层空芯套管 3 尺寸为外径 45mm，内径 30mm；钻孔形成的减材标记单元 2 为圆形的通孔，其直径为 2.5mm。将大毛细管和小毛细管通过焊接的方式组装成反谐振微结构单元 1，5 个反谐振微结构单元 1 在带有减材标记单元 4 的包层空芯套管 3 中堆叠成如图 4 所示的带减材标记的空芯微结构光纤预制棒。带减材标记的空芯微结构光纤预制棒可在拉丝炉中可先拉制成中间预制棒，中间预制棒的外径 10mm，再套入外径 18mm 且内径 10.5mm 的中间套管中拉丝。与上一实施例一样，通过在反谐振微结构单元 1 里通入不同压力的气体，来使得反谐振微结构单元 1 的尺寸均一。 P_0 为常压， P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 分

别为反谐振微结构单元 1 中大毛细管中的气压大小，其值分别为 22.1mbar、22.2mbar、22.1mbar、22.4mbar、22.5mbar。P6、P7、P8、P9、P10 分别为反谐振微结构单元中小毛细管中的气压大小，其值分别为 93.1mbar、93.2mbar、93.2mbar、93.7mbar、93.7mbar。拉制而成的空芯微结构光纤，其反谐振微结构单元 1 中大毛细管外径最大偏差为 3.3%，其反谐振微结构单元 1 中小毛细管外径最大偏差为 4.2%，其在 1550nm 处的衰减为 0.42dB/km。此空芯微结构光纤熔接时，可通过钻孔减材标记单元来辨别毛细管方位，通过熔接机旋转功能实现更精准的对接，其最低熔接损耗为 0.36dB。

实施例 3

如图 5 所示，先通过母管制备两种尺寸的毛细管，大毛细管外径 12.4mm，壁厚 0.65mm，小毛细管外径 7.2mm，壁厚 0.55mm。再在包层空芯套管 3 的壁内部，通过钻孔工艺，制备出两个通孔形成两个减材标记单元 2。包层空芯套管 3 尺寸为外径 66mm，内径 40mm；钻孔的减材标记单元 2 为圆形的通孔，其直径为 3.0mm。将大毛细管和小毛细管通过焊接的方式组装成反谐振微结构单元 1，5 个反谐振微结构单元 1 在包层空芯套管 3 中堆叠成如图 5 所示的带减材标记的空芯微结构光纤预制棒。带减材标记单元 2 的空芯微结构光纤预制棒可在拉丝炉中可先拉制成中间预制棒，中间预制棒的外径 12.8mm，再套入外径 20 内径 13.5mm 的中间套管中拉丝。与上一实施例一样，通过在反谐振微结构单元 1 里通入不同压力的气体，来使得反谐振微结构单元 1 的尺寸均一。P0 为常压，P1、P2、P3、P4、P5 分别为反谐振微结构单元 1 中大毛细管中的气压大小，其值分别为 25.2mbar、25.2mbar、25.5mbar、25.8mbar、25.5mbar。P6、P7、P8、P9、P10 分别为反谐振微结构单元 1 中小毛细管中的气压大小，其值分别为 66.5mbar、66.6mbar、66.8mbar、66.8mbar、66.4mbar。拉制而成的空芯微结构光纤，其反谐振微结构单元 1 中大毛细管外径最大偏差为 2.5%，其反谐振微结构

单元 1 中小毛细管外径最大偏差为 2.7%，其在 1550nm 处的衰减为 0.33dB/km。此空芯微结构光纤熔接时，可通过钻孔减材标记单元来辨别毛细管方位，通过熔接机旋转功能实现更精准的对接，其最低熔接损耗为 0.32dB。

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.带减材标记的空芯微结构光纤，其特征在于，包括包层空芯套管以及排列并附着在所述包层空芯套管内壁的多个反谐振微结构单元，所述反谐振微结构单元用于形成其内切圆尺寸的空气纤芯区域；所述多个反谐振微结构单元旋转对称；

纤芯外侧设有一个或多个减材标记单元，使得所述空芯微结构光纤的端面结构具有不对称性；

所述减材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；

其中，所述减材标记单元为设置在包层空芯套管的内壁上的沟槽，所述沟槽平行于所述包层空芯套管的轴向布置；或者，所述减材标记单元为设置在包层空芯套管内的通孔，并且所述通孔平行于所述包层空芯套管的轴向布置；

在所述空芯微结构光纤的横截面上，单个所述减材标记单元的外轮廓包围的面积占包层面积的0.002%~2%。

2.如权利要求1所述的带减材标记的空芯微结构光纤，其特征在于，所述包层空芯套管的外轮廓为圆形；所述减材标记单元为设置在包层空芯套管的内壁上的沟槽，其外轮廓为矩形的一部分、U形、V形或半圆形；或所述减材标记单元为设置在包层空芯套管内的通孔，其外轮廓为圆形、椭圆形、矩形和/或多边形。

3.如权利要求 1 或 2 所述的带减材标记的空芯微结构光纤，其特征在于，所述减材标记单元与光纤结构中心的距离 D ，使得： $E_D \leq 0.1\%$ ；所述减材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。

4.如权利要求 3 所述的带减材标记的空芯微结构光纤，其特征在于，所述减材标记单元处于相邻反谐振微结构单元外轮廓的几何中心与光纤几何中心的连线之间的区域内。

5.如权利要求 4 所述的带减材标记的空芯微结构光纤，其特征在于，所述减材标记单元靠近所述相邻反谐振微结构单元之一。

6.如权利要求 5 所述的带减材标记的空芯微结构光纤，其特征在于，所述减材标记单元为设置在包层空芯套管的内壁上的沟槽，所述减材标记单元的位置与所述减材标记单元靠近的反谐振微结构单元附着处之间的弧度为 R_1 ，相邻两反谐振微结构单元附着处之间的弧度为 R_2 ， $R_1/R_2=1/6$ 至 $1/3$ 。

7.如权利要求 1 所述的带减材标记的空芯微结构光纤，其特征在于，所述包层空芯套管内壁具有多个减材标记单元，多个所述减材标记单元具有不同的外轮廓形状、类型和/或面积。

8.带减材标记的空芯微结构光纤的预制棒，其特征在于，包括用于拉丝形成权利要求 1 至 7 任意一项所述带减材标记的空芯微结构光纤的玻璃部件。

9.带减材标记的空芯微结构光纤的拉丝检测方法，其特征在于，包括以下步骤：

(1)将权利要求 1 至 7 任意一项所述带减材标记的空芯微结构光纤在预设位置截断；

(2)对步骤(1)获得的截断后的端面采用透射光或反射光进行成像，获

得空芯微结构光纤该位置的端面图像；

(3) 对于步骤(2)获得的端面图像，根据其减材标记单元进行反谐振微结构识别，获得各反谐振微结构单元的图像；

(4) 对步骤(3)识别获得的反谐振微结构单元的图像进行几何参数提取，判断所述空芯微结构光纤的几何均匀性。

10.如权利要求9所述的空芯微结构光纤预制棒的拉丝检测方法，其特征在于，步骤(2)采用显微镜对端面进行成像。