

低数值孔径阶跃折射率超大模场光纤的弯曲特性研究*

张开妍¹⁾ 贾琛彬¹⁾ 曹润秋^{1)2)3)†}

1) (国防科技大学前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

2) (国防科技大学南湖之光实验室, 长沙 410073)

3) (国防科技大学高能激光技术湖南省重点实验室, 长沙 410073)

摘要

低数值孔径 (numerical aperture, NA) 超大模场光纤因其在高功率光纤激光领域的重要应用而备受关注。通过针对低 NA (不大于 0.04) 阶跃折射率超大模场光纤的弯曲特性开展数值研究, 分析模式损耗和基模有效模场面积随光纤弯曲半径的变化规律, 揭示不同参数光纤的弯曲控模适用性和基模有效模场面积的提升潜力。研究表明: 对于波长为 1060nm 的光场, 在保证基模 (LP_{01} 模) 低损传输 (弯曲损耗不大于 0.1dB/m) 的前提下, 对于 NA 为 0.04 和 0.03 的光纤, 纤芯直径分别不大于 30 μm 和 35 μm 时, 可通过弯曲的方式抑制 LP_{11o} 模 (弯曲损耗不小于 10dB/m), 基模有效模场面积分别可达到 561 μm^2 和 873 μm^2 ; 而当纤芯直径不大于 50 μm 时, 则可通过弯曲的方式抑制 LP_{11e} 模, 基模有效模场面积分别约为 778 μm^2 和 1176 μm^2 。若将 NA 进一步降低至 0.02, 会导致模式弯曲损耗的大幅增加, 进而使得弯曲控模的方法难以适用, 此时采用直光纤的单模设计, 更能够有效发挥 NA 降低对于基模有效模场面积的提升效果。相关研究对于低 NA 超大模场光纤的设计及其应用具有重要的指导意义。

关键词: 大模场光纤, 低数值孔径光纤, 弯曲损耗, 模场面积

PACS: 42.81.-i, 42.81.Qb, 42.81.Dp, 42.55.Wd

基金: 湖南省大学生创新创业训练计划 (项目编号: S202590002352) 和国家自然科学基金 (批准号: 62475283) 资助的课题。

† 通信作者. E-mail: jq_cao@126.com

第一作者. E-mail: 3111829583@qq.com

1 引言

高功率近衍射极限光纤激光器在近 20 年里经历了突飞猛进的发展, 其输出功率水平现已提升至两万瓦量级, 其应用领域也从早期的通信、传感等领域不断拓展至工业加工、材料处理、生物医药等多个领域。而推动高功率光纤激光器发展的关键技术之一, 就是超大模场光纤技术^[1-6]。超大模场光纤技术是通过超大模场掺杂光纤的设计, 实现基模有效模场面积的增加, 从而抑制非线性效应, 促进

光纤激光器的功率提升。

超大模场光纤技术的核心是在增加基模模场面积的同时，实现光纤激光器的基模输出。这是因为要实现基模模场的增加，不可避免地需要增加纤芯直径，这就会增加光纤中可支持的模式数量，进而提升了基模输出的难度。现阶段，已有弯曲控模^[7-10]、部分掺杂^[11-13]等方法，通过增加高阶模式损耗或基模增益来实现基模传输。但是，现有研究表明：上述方法的模式控制能力也是有限的，如果光纤模式过多，也很难实现基模输出。这就要求超大模场光纤在增加纤芯直径的同时，能够有效控制光纤模式的数量，这就需要降低光纤的 NA。

事实上，低 NA 阶跃折射率超大模场光纤的研究一直备受关注。2004 年，英国南安普顿大学的研究团队就是通过将掺镱光纤的 NA 减低至 0.05 以下，利用 40 μm 的纤芯直径，配合直径约为 20cm 的光纤弯曲，率先实现了光束质量因子 M^2 为 1.4 的千瓦量级光纤激光器的实验验证^[14]；此后，该团队又将掺镱光纤的 NA 降至 0.04 以下（约为 0.038），并利用 35 μm 的纤芯直径和直径约为 32cm 的光纤弯曲，实现了光束质量因子 M^2 为 1.1 的激光输出^[15]。文献[16]和[17]也利用 NA 约为 0.04 的掺镱光纤，分别实现了 3kW 和 4.3kW、 M^2 因子约为 1.3 的激光输出。文献[18]则拉制了 NA 约为 0.034 的掺镱光纤（纤芯直径约为 26 μm ），利用直径为 50cm 的光纤弯曲，实现了千瓦量级、 M^2 因子小于 1.2 的激光输出。文献[19]则将光纤的 NA 进一步降低至 0.03 以下（约为 0.028），从而利用纤芯直径大于 40 μm 的掺镱光纤实现了基模输出（ M^2 小于 1.1）。文献[20]更是利用磷酸盐玻璃将阶跃折射率掺镱光纤 NA 进一步减低至 0.022，利用 32 μm 直径纤芯，实现了超短腔（掺镱光纤长度约为 18cm，无弯曲）单模光纤放大器的实验验证（ M^2 因子小于 1.25）。文献[21]则研制了 NA 低至 0.02、纤芯直径为 50 μm 的掺镱光纤，利用直径为 35cm 的光纤弯曲，实现了 M^2 因子约为 1.1 的激光输出，只是效率较低（35%以下）。

由此可见，随着光纤拉制技术的不断进步，掺杂光纤的 NA 也在不断降低，这为光纤模场面积的进一步提升提供了可能。不过，随着 NA 的降低，光纤对于弯曲的敏感性也会显著增加，目前，尽管针对阶跃折射率光纤弯曲特性已有了较为广泛的研究^[22-27]，但是，针对 NA 较低（0.04 以下）的阶跃折射率光纤弯曲特性的系统研究却非常有限，特别是 NA 进一步降低带来的弯曲控模适用性以及模场面积提升潜力等问题，仍有待进一步的研究。

因此，本文针对低 NA 超大模场阶跃折射率光纤的弯曲特性进行了数值研

究。着重分析了光纤弯曲对于 NA 为 0.02 至 0.04 的超大模场光纤的模式损耗和有效模场面积的影响。通过研究基模损耗和有效模场面积随弯曲半径的变化，揭示了低 NA 超大模场光纤的抗弯曲能力。通过研究不同模式的弯曲损耗，分析了弯曲控模方法对于均匀掺杂低 NA 超大模场光纤激光器的适用性。在此基础上，分析了弯曲控模可实现的基模有效模场面积的提升潜力。相关研究对于低 NA 超大模场光纤的设计及其在高功率光纤激光领域的应用具有指导意义。

2 数值方法简介

如前所述，本文主要针对低 NA 超大模场光纤的两种弯曲特性开展研究，即：模式损耗及基模有效模场面积，这是因为上述两种特性在高功率光纤激光领域的应用中最受关注：前者与模式控制（即：抑制高阶模式以实现基模输出）有关，后者则与非线性效应的抑制有关。不过，要分析模式损耗和有效模场面积，就需要计算光纤模式的传播常数和模场分布。现阶段，数值计算光纤模式较为有效的方法是有限元法^[28]，特别是随着相关数值计算软件（如：COMSOL 软件）的发展，该方法被广泛地应用于光纤模式特性数值研究中。若通过数值计算得到光纤模式的传播常数和模场分布，那么，光纤的模式损耗 α 可由下式计算^[8]，即：

$$\alpha[dB/m] = \frac{20}{\ln 10} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{eff}) \approx 8.686 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{eff}) \quad (1)$$

其中， λ 为工作波长， $\text{Im}(n_{eff})$ 表示模有效折射率的虚部。而有效模场面积 A_{eff} 则可以表示为^[8]：

$$A_{eff} = \frac{[\int |\vec{E}(x,y)|^2 dx dy]^2}{\int |\vec{E}(x,y)|^4 dx dy} \quad (2)$$

其中， $\vec{E}(x,y)$ 为光纤模式的电场分布。

若要考虑弯曲对于光纤模式的影响，目前最为常用，也是被实验研究充分验证的方法，就是将弯曲光纤等效为直光纤，而折射率分布则需要变为等效折射率分布^[23, 25, 29]，即：

$$n_G(x,y) = n(x,y) \left(1 + \frac{x}{R_{eff}}\right) \quad (3)$$

其中， $n(x,y)$ 为未弯曲的光纤折射率分布， x 为沿弯曲径向的横向坐标， R_{eff} 为等效弯曲半径，若考虑弯曲诱导应力对折射率分布的影响，等效弯曲半径与实际弯曲半径 R 的关系可以表示为^[23,26]： $R_{eff} = 1.28R$ 。这里需要注意的是，在数值计

算中,需要引入完美匹配层,以消除数值模型中的计算边界对数值计算的影响^[28]。利用该模型,就可以数值计算光纤弯曲半径的变化,对于光纤模式损耗和模场分布的影响。

在光纤弯曲特性的研究中,最为关注的两个模式就是 LP_{01} 模和 LP_{11} 模。如前所述,超大模场光纤的研究关键之一就在于如何实现基模输出,即:如何实现 LP_{01} 模式的单一模式输出。而弯曲控模是实现该目的的主要方法之一^[7,14,15,18,21]。该方法利用 LP_{01} 模的弯曲损耗较小,而其他高阶模式弯曲损耗相对较高的特性,通过光纤弯曲增加高阶模式的损耗,从而抑制高阶模式,实现光纤激光器的基模输出^[7,8]。前期研究已充分证明^[7,8,14,15,18,21]:在需要抑制的高阶模式中, LP_{11} 模的弯曲损耗是最小的,这就意味着,只要 LP_{11} 模式的损耗足够大,能够满足抑制要求,那么,其他高阶模式也可以被抑制。因此,只需比较 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的弯曲损耗,就可以对能否实现基模输出做出判断。

文献[8]给出了一个弯曲控模评判标准:当 LP_{11} 模式的弯曲损耗大于 10dB/m、 LP_{01} 模式的弯曲损耗小于 0.1dB/m,此时光纤的弯曲半径可实现光纤激光器的高效率基模输出(前者是为了实现高阶模式的抑制,后者则为了保证激光器的输出效率)。这一标准也被广泛地应用于超大模场光纤激光器的设计和研究中^[15,19,30],本文也将采用该标准开展后续的弯曲控模适用性的讨论。同时,本文将主要研究基模(LP_{01} 模)的有效模场面积,这是因为当光纤激光器实现基模输出时,光纤中传输的模式即为 LP_{01} 模,因此, LP_{01} 模的有效模场面积就决定了该激光器中的非线性效应。 LP_{01} 模的有效模场面积越大,越有利于抑制非线性效应,从而,更有利于实现光纤激光器的功率提升^[5]。

3 数值结果及讨论

为了验证本文使用的数值计算方法的有效性,首先利用前期报道的实验结果对本文的数值计算结果进行了验证。文献[17]实验测量了低 NA 的掺镱光纤的基模损耗随弯曲半径的变化(实验中采用的测试波长为 1.3 μm ,以规避镱离子吸收的影响),这为数值结果的校验提供了很好的实验数据。因此,本文结合该文献中给出的折射率分布测试图(见文献[17]中的图 1 红线所示结果,纤芯直径约为 20 μm ,折射率差约为 0.0006),数值计算了该光纤的基模损耗随弯曲半径的变化,计算结果如图 1 所示。计算结果与文献中的实验结果(见文献[17]中的图 2)吻合得非常好,这也验证了本文采用的数值模型及计算方法的有效性。从计算结果中,

可以看出：基模的弯曲损耗随着光纤弯曲半径的减小而单调增加，这主要是由于光纤弯曲导致基模模场进入包层中，从而导致损耗的增加^[8]。

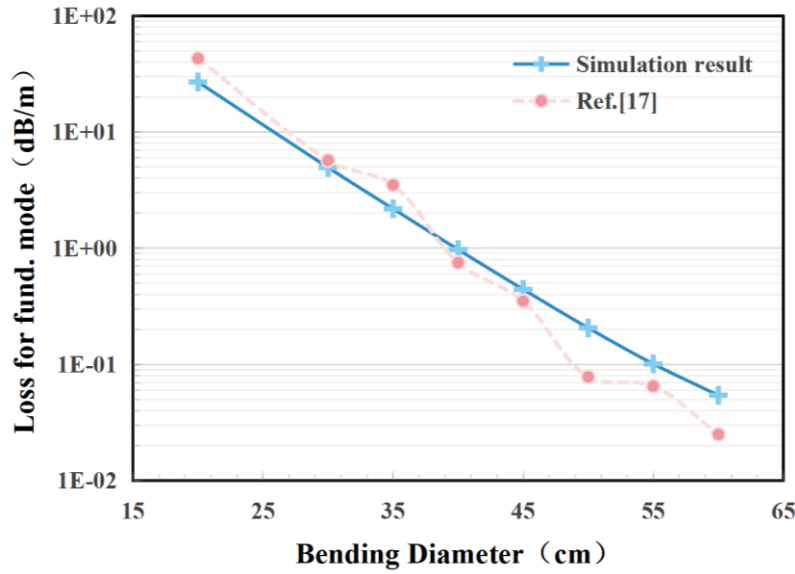


图 1 给定光纤的基模损耗随光纤弯曲直径的变化

Fig. 1. Loss of the fundamental mode as a function of fiber bend diameter for the given fiber.

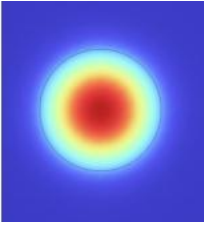
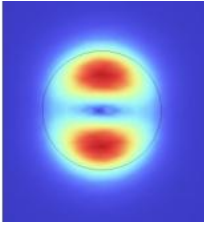
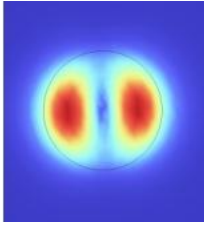
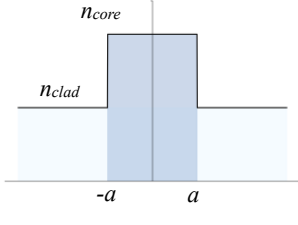
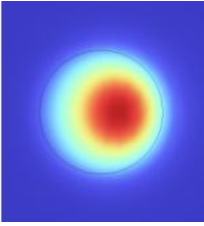
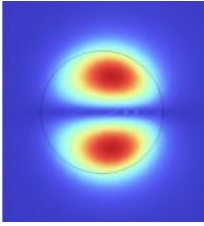
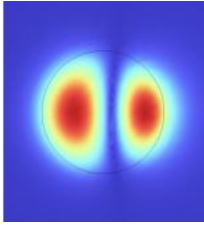
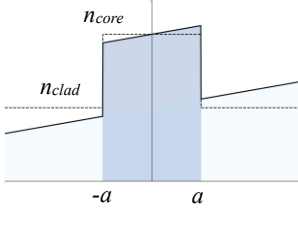
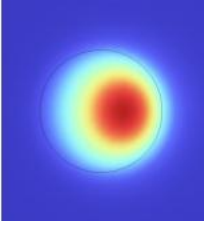
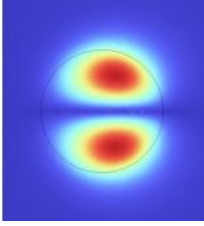
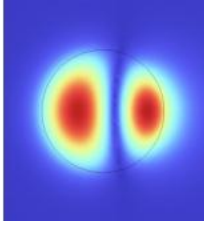
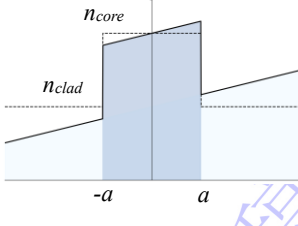
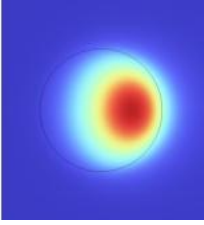
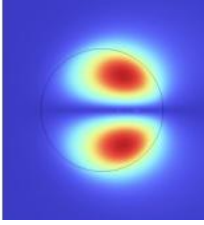
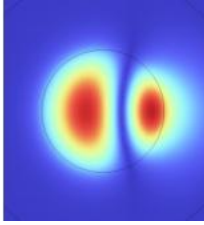
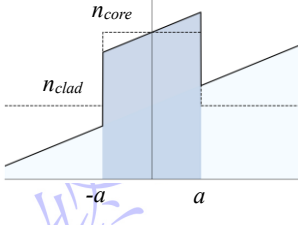
在此基础上，本文将针对 NA 分别为 0.04、0.03 和 0.02 的阶跃折射率光纤开展研究，考虑到现阶段超大模场光纤常用于高功率掺镱光纤激光器的研究，而掺镱光纤的激光波长一般为 1060nm 波段，因此，本文也以波长为 1060nm 的光场为例，研究弯曲对于低 NA 阶跃折射率光纤模式特性的影响。

3.1 NA为0.04的光纤

首先针对 NA 为 0.04 的弯曲光纤开展研究，表 1 和图 3 分别给出了弯曲对于光纤模场形态、光纤模式损耗以及基模有效模场面积的影响。这里需要注意的是： LP_{11} 模式包含两个简并模式，即 LP_{110} 和 LP_{11e} 模，由于两个模式的模场分布不同，弯曲对于两个模式的影响不同（见表 1），对应的弯曲损耗也有所区别（见图 3）。由于 LP_{110} 模的弯曲损耗相对更小^[23]，因此，只要 LP_{110} 模损耗能够达到抑制要求，则 LP_{11e} 模也自然可以满足抑制要求，此时 LP_{11} 模就可以被充分抑制。

表 1 纤芯直径为 $40\mu\text{m}$ 、NA 为 0.04 的光纤模场形态随等效弯曲半径（直光纤、35cm、25cm 和 15cm）的变化以及折射率等效图

Table. 1. Mode field distribution of the $40\text{-}\mu\text{m}$ -core fiber with NA of 0.04 as a function of effective bend radius (straight, 35cm, 25cm, and 15cm), together with the corresponding equivalent refractive-index profiles.

R_{eff}	LP_{01}	LP_{11o}	LP_{11e}	折射率图
直 光 纤				
35cm				
25cm				
15cm				

从图 3 可以看出，四种光纤的模式损耗随等效弯曲半径的变化都表现出相同的趋势，即：随着弯曲半径的减小，模式的损耗单调增加。当然，这一趋势已被广泛认知，由于弯曲导致模场能量进入到包层中，且包层中的模场随着弯曲半径的减小而增加（见表 1），从而导致了模式损耗的增加。不过，从图 3(a)中可以看出： $20\mu\text{m}$ 纤芯直径对应的两个 LP_{11} 模式的损耗，要远大于其他光纤。这主要是因为对于 $20\mu\text{m}$ 直径的纤芯，其归一化频率 V 约为 2.37，此时，纤芯只能支持基模传输，无法有效支持 LP_{11} 模式传输，这就使得 LP_{11} 模式的光场进入到包层中，导致 LP_{11} 模式损耗的增加，事实上，数值计算得到 LP_{11} 模式的高损耗也表明该模式无法在光纤中传输，这也与光纤的单模特性是吻合的。

图 3 还给出了不同光纤的基模有效模场面积随等效弯曲半径的变化，从图中可以看出：20 μm 纤芯对应的基模有效模场面积的变化趋势也与其他光纤不同，其模场面积随着弯曲半径的减小而增加。事实上，前期文献已有相关结果的报道^[8]，这主要是由于该光纤为单模光纤，对于模场的约束较弱，弯曲更容易导致 LP_{01} 模的光场进入到包层中，从而导致基模有效模场面积的增加。图 2 给出了基模模场分布随弯曲半径的变化，可以看出：当等效弯曲半径较大（大于 25cm）时，基模能够较好地约束在纤芯中，相应的，弯曲对于基模有效模场面积的影响也相对较小；但是，随着弯曲半径的减小（小于 25cm 时），基模模场随弯曲半径的变化更加显著，相应的，越来越多的基模模场进入到包层中，基模有效模场面积也随之增加。

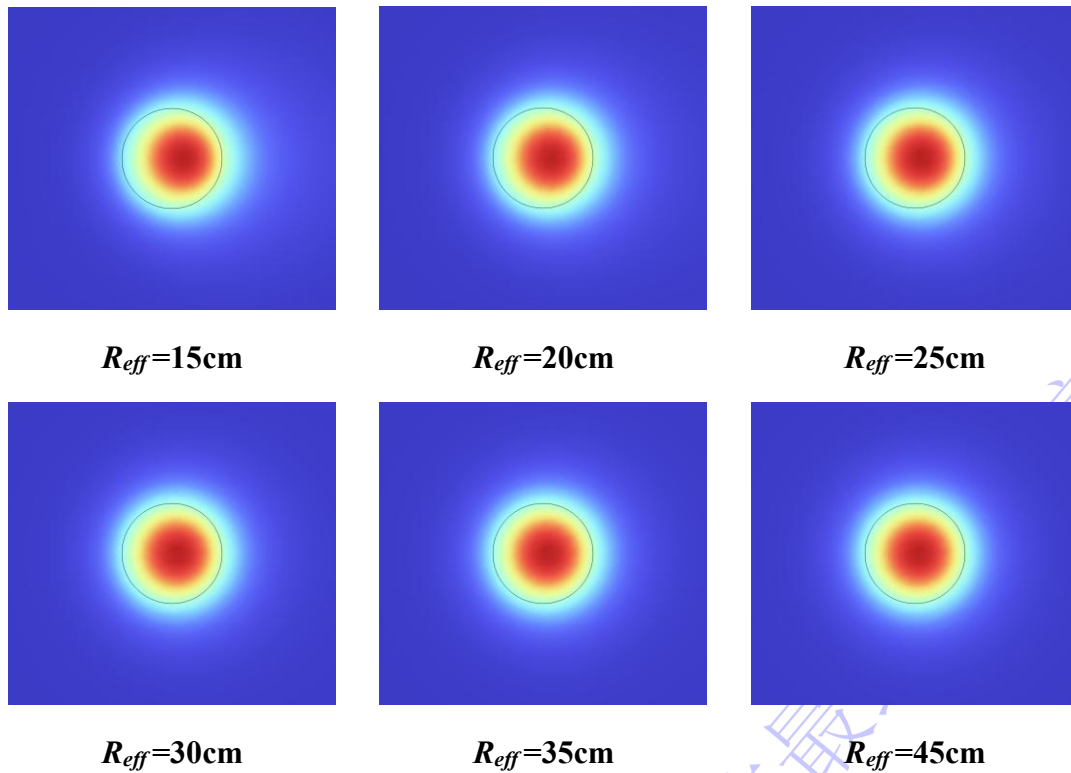


图 2 纤芯直径为 20 μm 、NA 为 0.04 的光纤模场形态随等效弯曲半径的变化

Fig. 2. Mode field distribution of the 20- μm -core fiber with NA of 0.04 as a function of effective bend radius.

但是，这里需要注意的是，尽管弯曲半径的减小会增加基模有效模场面积，但是，模式的弯曲损耗也随之增加，从图 3(a)中可以看出：若使 LP_{01} 模的弯曲损耗小于 0.1dB/m，需要等效弯曲半径需大于 20cm，对应的基模有效模场面积则应小于 381 μm^2 。

相比之下，随着纤芯直径的增加，归一化频率也随之增加，光纤也由单模变为少模或多模，相应地，对于模式的约束能力也随之增强。从图 3 可以看出：

随着纤芯直径的增加，相同弯曲半径对应的模式弯曲损耗随之减小，这也表明：光纤的抗弯曲能力随着纤芯的增加而有所增强。光纤约束能力的增强，也影响了基模有效模场面积随弯曲半径的变化，从图 3 可以看出：与 20 μm 芯径不同，此时基模有效模场面积随弯曲半径的减小而单调减小。这是由于纤芯对基模的约束能力显著增强，即使对于较小的弯曲半径，基模仍能够较好地约束在纤芯中（如表 1 所示，对于 40 μm 的芯径，即使采用 15cm 的等效弯曲半径，基模模场仍能够较好地约束在纤芯中），此时，即使弯曲会导致基模模场出现显著畸变，基模模场仍较好地约束在纤芯中（而不会显著进入到包层中），因此，基模有效模场面积将随着弯曲半径的减小而减小。

不过，从图 3 中还可以看出：随着纤芯的增加， LP_{11} 模式损耗与 LP_{01} 模式之间的差别也在不断缩小。这会带来一个新的问题，就是 LP_{11} 模式的抑制难度增加。如前所述，光纤弯曲的一个重要应用，就是光纤激光器的模式控制。按照前面提到的弯曲控模标准，如果增益光纤采用 30 μm 的纤芯直径（见图 3(b)），利用 15cm 的等效弯曲半径，可将 LP_{11o} 模的损耗提升至约 10dB/m，同时，将 LP_{01} 模的损耗控制在约 0.1dB/m，从而能够满足弯曲控模要求，此时，对应模场面积约为 560 μm^2 。

但是，图 3(c) 的计算结果表明：40 μm 直径的光纤只能够有效抑制 LP_{11e} 模（等效弯曲半径应约为 15cm，见图 3(c)），但是， LP_{11o} 已经很难有效抑制。对于 60 μm 纤芯直径的光纤（见图 3(d)），也面临相同的问题，且 LP_{11o} 模式的损耗更加接近 LP_{01} 模，因此，也更加难以抑制。不过，文献[21]提出了一种巧妙的方法，就是采用“二维弯曲”来提升 LP_{11} 模式的抑制效果，即：在两个相互垂直的平面内进行光纤弯曲（详见文献[21]的图 7），这样，前一个弯曲平面内难以抑制的 LP_{11o} 模，即为后一个弯曲平面内的 LP_{11e} 模，从而使得两个平面内的弯曲半径仅需有效抑制 LP_{11e} 模，就可以实现 LP_{11} 模式的抑制，进而降低了模式控制的难度。

从图 3(c) 和图 3(d) 可以看出：若采用“二维弯曲”的方式，纤芯直径为 40 μm 的光纤仅需 15cm 的等效弯曲半径，就可以有效抑制 LP_{11e} 模，从而实现基模输出，相应的有效模场面积为 720 μm^2 ；对于 60 μm 纤芯直径的光纤，则可采用 12cm 的等效弯曲半径，实现 LP_{11} 模的控制（但是，此时的 LP_{01} 模的损耗约为 0.27dB/m，未能严格满足低于 0.1dB/m 的控模要求，这可能影响光纤激光器的效率），相应的有效模场面积约为 811 μm^2 。从图 3(b) 也可以看出：对于 30 μm 纤芯直径的光纤，采用“二维弯曲”的方式，可以将等效弯曲半径提升至 20cm，有效模场面积也增加为 573 μm^2 。这也体现出二维弯曲的优势：不仅可以降低弯曲控模的难度，还可

以提升有效模场面积，从而有利于非线性效应的抑制。

不过，这里需要注意的是，尽管二维弯曲有效解决了 $40\mu\text{m}$ 和 $60\mu\text{m}$ 芯径光纤的弯曲控模问题，但是，数值结果表明：将纤芯直径从 $40\mu\text{m}$ 增加到 $60\mu\text{m}$ ，弯曲控模所能实现的有效模场面积仅从 $720\mu\text{m}^2$ 增加至 $811\mu\text{m}^2$ （提升 12.6%），远小于纤芯面积的增加（增加 2.25 倍）。这主要是因为纤芯直径较大的光纤，其模场面积对于弯曲半径的变化更为敏感。从图 3(b-d)可以明显看出：纤芯直径越大的光纤，有效模场面积随纤芯直径的变化越快。当等效弯曲半径从 40cm 减小到 10cm ， $60\mu\text{m}$ 光纤的模场面积从 $1416\mu\text{m}^2$ 减小到 $757\mu\text{m}^2$ （减小了 47%），而 $40\mu\text{m}$ 与 $30\mu\text{m}$ 直径纤芯的模场面积则分别从 $861\mu\text{m}^2$ 和 $586\mu\text{m}^2$ 减小到 $646\mu\text{m}^2$ （减小 25%）和 $543\mu\text{m}^2$ （减小 7%）。正是由于 $60\mu\text{m}$ 光纤基模有效模场面积的迅速衰减，影响了弯曲控模所能够实现的基模有效模场面积的提升，从而极大地弱化了纤芯增加在非线性抑制方面的提升效果。

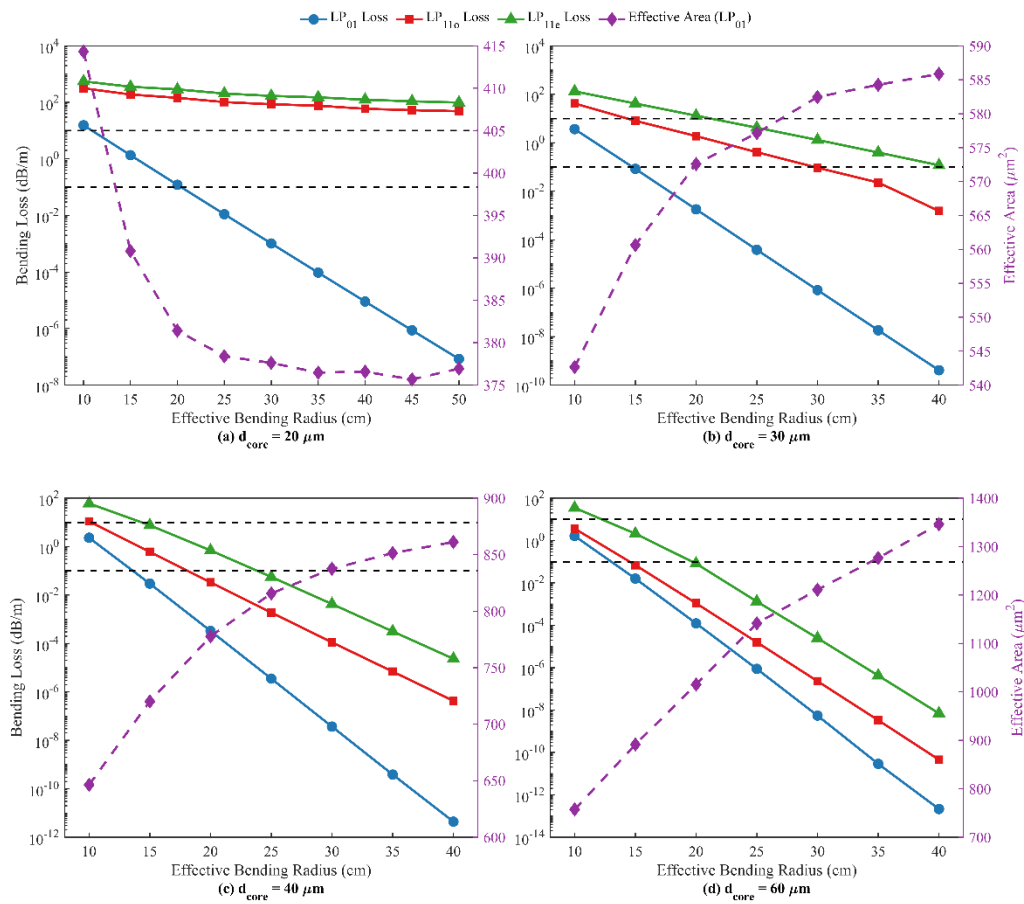


图 3 NA 为 0.04 时芯径分别为 20、30、40 和 $60\mu\text{m}$ 的光纤的 LP_{01} 和 LP_{11} 模式的弯曲损耗与基模有效模场面积

Fig. 3. Bending losses of LP_{01} and LP_{11} modes and effective areas of LP_{01} for the fibers with 20-, 30-, 40-, and $60\text{-}\mu\text{m}$ -core diameters and core NA of 0.04.

图 4 给出了采用不同弯曲方式所需的最大等效弯曲半径和相应的基模有效模场面积，从图中可以看出：若采用传统的“一维弯曲”方式（即：需要抑制 LP_{11e} 模），那么，只有纤芯直径不大于 $30\mu\text{m}$ 的光纤，才有望满足弯曲控模的要求，相应的，模场面积只能达到 $561\mu\text{m}^2$ 。若采用“二维弯曲”的方式，能够满足弯曲控模要求的纤芯直径可以提升至接近 $50\mu\text{m}$ ，相应地，模场面积也可以达到 $778\mu\text{m}^2$ 。

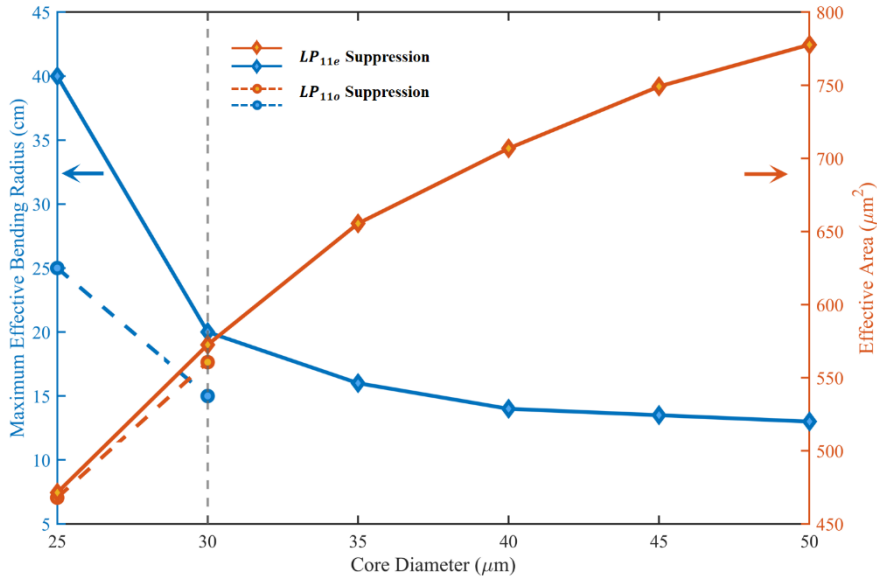


图 4 NA 为 0.04 条件下，芯径变化时不同弯曲方式所需的最大等效弯曲半径及对应的基模有效模场面积

Fig. 4. Maximum effective bending radius required for different bending schemes and the effective areas of LP_{01} as the core diameter varies with NA of 0.04.

3.2 NA为0.03的光纤

图 5 给出了 NA 降低至 0.03 时，不同纤芯直径光纤的计算结果。此时，对于纤芯直径为 $20\mu\text{m}$ 的光纤，仍只能够支持单模传输，但是，与 NA 为 0.04 的光纤不同的是，此时的归一化频率有所下降 ($V=1.78$)，这也意味着纤芯对于光纤约束能力的下降。这也在图 5(a)中有所体现： LP_{01} 模的弯曲损耗较图 3(a)的结果显著增加，若要实现小于 0.1dB/m 的损耗，等效弯曲半径需要大于 72cm 。不仅如此， LP_{01} 模对应的模场面积也显著增加，即使采用 72cm 的等效弯曲半径，其模场面积也可达到接近 $600\mu\text{m}^2$ 。事实上，相较于 NA 为 0.04 的结果，NA 降至 0.03 可使模场面积得到显著增加。这也表明：由于纤芯约束能力的下降， LP_{01} 模的光场更容易扩散进包层中。

不过，随着纤芯直径的增加，归一化频率 V 也随之增加，纤芯对于光场的约

束能力也随之增强，相应地，各个模式的损耗也相应减少。从图 5 可以看出：如果纤芯直径增加至 $30\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ 和 $60\mu\text{m}$ ， LP_{01} 模损耗达到 0.1dB/m 所需要的等效弯曲半径分别减小至约 39cm 、 32cm 和 29cm 。同时，通过对比图 3 的结果，可以发现：NA 的降低，尽管不能够提升不同模式弯曲损耗之间的差别，但是，由于模式损耗的整体提升，也在一定程度上提升了弯曲控模方法的适用性。从图 5(c) 可以看出：对于纤芯直径为 $40\mu\text{m}$ 的光纤，当等效弯曲半径为 41cm 时， LP_{11e} 模的损耗就可以达到 10dB/m ，满足了“二维弯曲”所需的 LP_{11} 模的抑制要求；而此时 LP_{01} 模式的损耗不足 0.01dB/m ，有利于保证激光器的高效输出，有效模式面积也可达到 $1007\mu\text{m}^2$ 。不过，此时的弯曲半径较大，不利于系统的紧凑性。如果将等效弯曲半径进一步减小至 32cm ，也可以将 LP_{01} 模的损耗控制在 0.1dB/m 量级，同样能够满足“二维弯曲”的控模要求，只是有效模场面积有所下降，降低为 $987\mu\text{m}^2$ 。

当然，如果进一步减小等效弯曲半径为 27cm ， LP_{11o} 模式也有望被抑制，此时也可使用“一维弯曲”的方法，只是此时的 LP_{01} 模式损耗会增加至约 0.5dB/m ，这会对激光器效率产生一些影响，有效模场面积也进一步减低至 $974\mu\text{m}^2$ 。不过，相比 NA 为 0.04 时所对应的 2dB/m 的 LP_{01} 模式弯曲损耗（见图 3(c)，对应于 10dB/m 的 LP_{11o} 模式损耗），已经有了显著改善。

不过，对于纤芯直径为 $60\mu\text{m}$ 的光纤，降低 NA 对于弯曲控模效果的提升却并不显著。从图 5(d) 可以看出：对于 $60\mu\text{m}$ 的纤芯直径，采用 27cm 的等效弯曲半径，也有望抑制 LP_{11e} 模，因此，也可以采用“二维弯曲”抑制模，只是相应的 LP_{01} 模式的损耗约为 0.24dB/m 。这也意味着，对 LP_{11} 于 $60\mu\text{m}$ 直径的纤芯，即使将 NA 降至 0.03 ，仍无法通过“二维弯曲”满足弯曲控模要求，即：在保证 LP_{01} 模损耗不大于 0.1dB/m 的条件下，实现不小于 10dB/m 的 LP_{11} 模式损耗。同时，此时的模场面积约为 $1258\mu\text{m}^2$ ，与 $40\mu\text{m}$ 的 $1007\mu\text{m}^2$ （对应于 41cm 弯曲半径）相比，也仅提升了约 25% ，对于基模有效模场面积的提升仍较为有限。

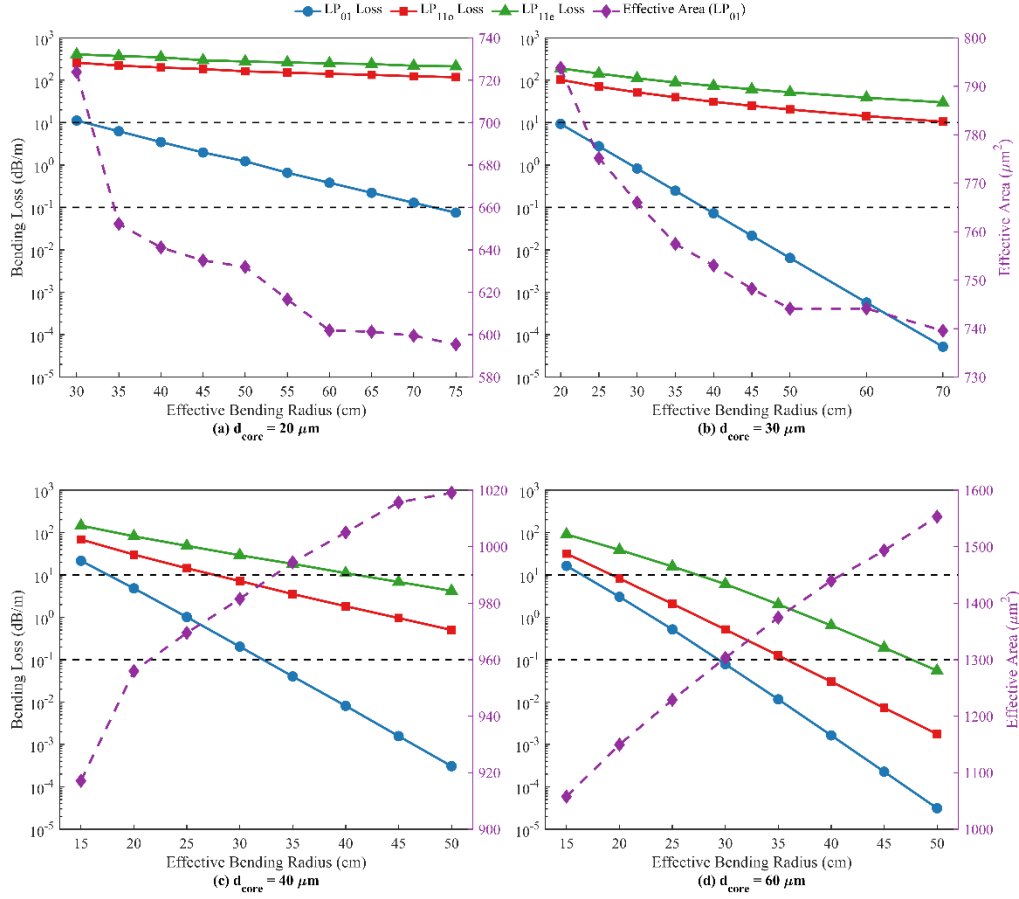


图 5 NA 为 0.03 时芯径分别为 20、30、40 和 60 μm 的光纤的 LP_{01} 和 LP_{11} 模式的弯曲损耗与基模有效模场面积

Fig. 5. Bending losses of LP_{01} and LP_{11} modes and effective areas of LP_{01} for the fibers with 20-,30-,40-, and 60- μm -core diameters and core NA of 0.03.

此外，从图 5 还可以看出：当纤芯直径为 30 μm 时，尽管此时的光纤并非单模光纤（归一化频率 V 约为 2.667），但是，其基模有效模场面积仍随着光纤弯曲半径的减小而增加，这同样是由于弯曲导致的基模模场外溢所致。不过，减小弯曲半径并非是增加基模有效模场面积的有效方法，从图中可以看出：即使将有效弯曲半径从 70cm 减小至 39cm，有效模场面积也仅从 740 μm^2 提升至 750 μm^2 ；进一步减小弯曲半径，则会导致过大的基模损耗。此外， LP_{11} 模式的损耗也比较大，这是因为光纤的归一化频率接近 LP_{11} 模的截止条件，从而使得 LP_{11} 模对于光纤弯曲非常敏感。

图 6 给出了 NA 为 0.03 时，不同弯曲方式下所需的最大等效弯曲半径及对应的基模有效模场面积。其中对于芯径为 30 μm 的光纤，采用“一维弯曲”进行控模时，可采用的最大等效弯曲半径可达 70 cm（也可见图 5(b)），一维弯曲控模适用的最大芯径可提升至 35 μm （相较于 NA 为 0.04 时的 30 μm ，见图 3），对应的

基模有效模场面积约为 $875\mu\text{m}^2$ 。采用“二维弯曲”时，满足弯曲控模要求的最大芯径仍为 $50\mu\text{m}$ ，相较于 NA 为 0.04 时没有明显提升，但是，对应的基模有效模场面积则可提升为 $1176\mu\text{m}^2$ 。

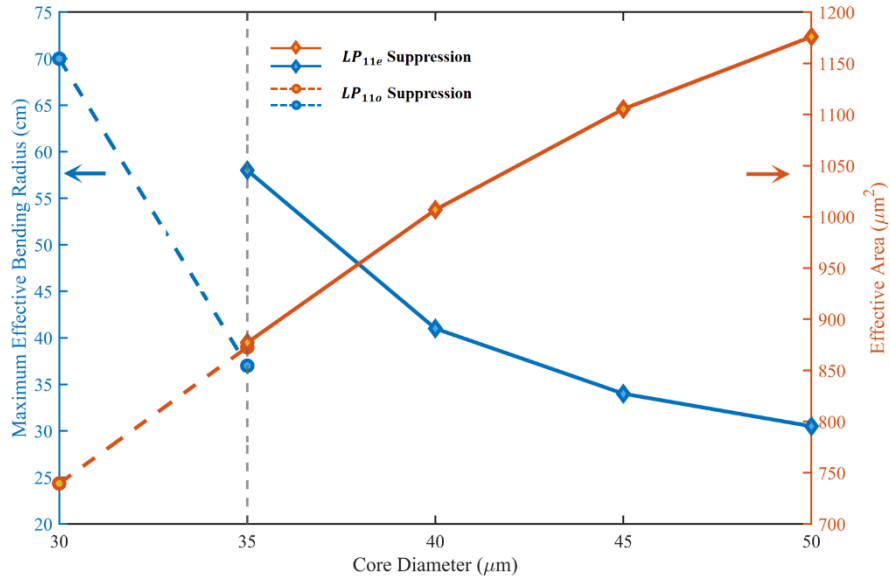


图 6 NA 为 0.03 条件下，芯径变化时不同弯曲方式所需的最大等效弯曲半径及对应的基模有效模场面积

Fig. 6. Maximum effective bending radius required for different bending schemes and the effective areas of LP_{01} as the core diameter varies with NA of 0.03.

3.3 NA为0.02的光纤

图 7 则给出了 NA 降至 0.02 的计算结果。图 7(a)给出了纤芯直径为 $40\mu\text{m}$ 的计算结果，需要注意的是：此时归一化频率约为 2.37，只能够支持 LP_{01} 模式的传输。同时，该光纤的归一化频率与芯径为 $20\mu\text{m}$ 、NA 为 0.04 的光纤（见图 3(a)）相同，两者对比，可以揭示对于相同归一化频率的单模光纤，纤芯直径对弯曲损耗的影响。

通过对比图 7(a)和图 3(a)，可以看出： $40\mu\text{m}$ 直径纤芯的 LP_{01} 模式损耗较 $20\mu\text{m}$ 纤芯直径有了显著增加，不过，需要将等效弯曲半径增加至 125cm，才可实现小于 0.1dB/m 的损耗，这表明：对于相同归一化频率的光纤，纤芯直径的增加会显著增加光纤的弯曲损耗。这一点也可以从图 3(b) ($30\mu\text{m}$ 、0.04NA)、图 5(c) ($40\mu\text{m}$ 、0.03NA) 和图 7(b) ($60\mu\text{m}$ 、0.02NA) 的结果对比中看出来：三种光纤同样具有相同的归一化频率，但是， $60\mu\text{m}$ 纤芯直径的弯曲损耗显然更大，要实现小于 0.1dB/m 的 LP_{01} 模式损耗，等效弯曲半径需要达到 93cm 以上，这比 $30\mu\text{m}$ 和 $40\mu\text{m}$ 直径纤

芯对应的 15cm 和 32cm 要大得多。同样的，图 3(c) (40 μm 、0.04NA) 和图 7(c) (80 μm 、0.02NA) 的对比，也可以看出这一点，即：对于归一化频率相同的光纤，纤芯直径越大，模式损耗对于弯曲越敏感。

不过，通过上述比较，还可以发现：在相同的归一化频率下，尽管纤芯直径的增加显著增强了弯曲损耗，但是， LP_{01} 模式的模场面积也得到了显著增加。从图 7 中可以看出：对于 40 μm 、60 μm 和 80 μm 的纤芯直径，模场直径可以增加至 1500 μm^2 、2200 μm^2 和 2800 μm^2 以上，这主要是得益于纤芯直径的增加。这就意味着：降低 NA 确实是提高模场面积的有效手段，但是，在实际应用中，考虑降低 NA 对于弯曲损耗的影响，也是非常必要的。

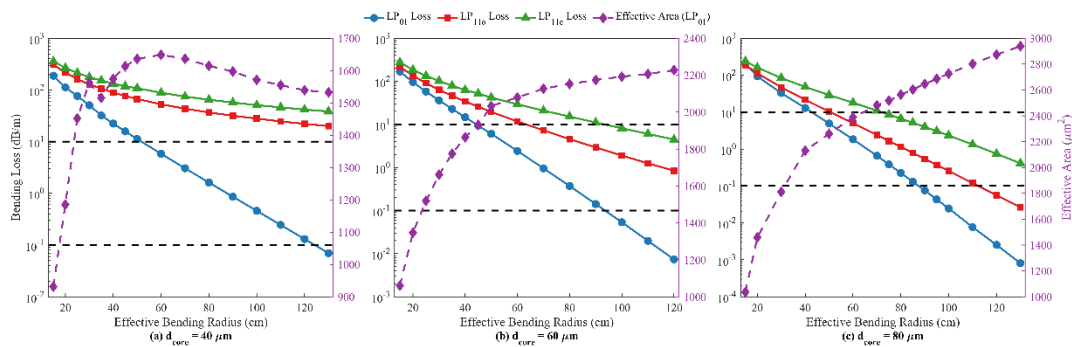


图 7 NA 为 0.02 时芯径分别为 40、60 和 80 μm 的光纤的 LP_{01} 和 LP_{11} 模式的弯曲损耗与基模有效模场面积

Fig. 7. Bending losses of LP_{01} and LP_{11} modes and effective areas of LP_{01} for the fibers with 40-, 60-, and 80- μm -core diameters and core NA of 0.02.

同时，从图 7(a)中还可以看出：此时的基模有效模场面积随弯曲半径的变化不再是单调的，这也是由于基模模场随弯曲半径的变化导致的。图 8 给出了基模模场分布随等效弯曲半径的变化，从图中可以看出：当等效弯曲半径大于 60cm 时，尽管弯曲半径的减小会使得一部分基模模场偏移进包层中，但是，基模模场的主要能量仍能够约束在纤芯中，此时，模场向包层的偏移导致了模场面积的增加；当等效弯曲半径降至 60cm 以下，更多的基模模场偏移进包层中，不过，由于此时纤芯内的模场被进一步压缩，从而导致了基模有效模场面积的下降；当等效弯曲半径减小至 30cm 时，偏移进包层的能量进一步增加，其对基模模场有效面积的影响逐渐占据主要地位，这种纤芯和包层影响权重的转变，导致了基模模场有效面积的局部突变（见图 7(a)），不过，进一步减小弯曲半径，偏移进包层的基模模场也会被压缩，进而导致了基模有效模场面积的进一步减小。事实上，基模损耗随弯曲半径减小的单调增加（见图 7(a)），也很好地佐证了基模模场不断向

包层偏移，而且，从图 7(a)还可以看出：当等效弯曲半径减小至 50cm 时，基模损耗已大于 10dB/m，此时，已经难以满足光纤对于低损传输的应用需求。

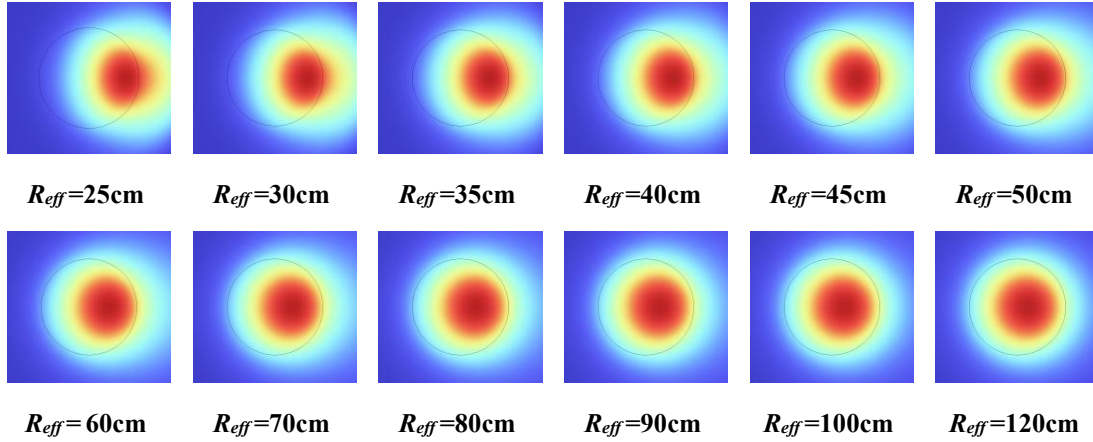


图 8 纤芯直径为 40 μm 、NA 为 0.02 的光纤模场形态随等效弯曲半径的变化

Fig. 8. Mode field distribution of the 40- μm -core fiber with NA of 0.02 as a function of effective bend radius.

同时，从图 7(a)还可以看出：当等效弯曲半径大于 90cm（对应于基模损耗小于 1dB/m）时，基模有效模场面积随等效弯曲半径的变化相对较小，仅从 1539 μm^2 增加至 1597 μm^2 ，这也是由于纤芯对于基模光场的约束相对较好。不过，随着等效弯曲半径的进一步减小，基模模场偏移进包层的能量占比随之增加，基模有效模场面积随弯曲半径的变化则会变得更加显著（见图 7(a)）。

通过将图 7(b)与图 5(c)和图 5(d)进行比较，还可以进一步揭示 NA 降低对不同模式弯曲损耗差别的影响。对比图 7(b)和图 5(c)，可以看出：在归一化频率相同的情况下，将 NA 从 0.03 降低至 0.02， LP_{01} 模式弯曲损耗与两个 LP_{11} 模式的差别有所下降。从图 7(b)可以看出：对于 60 μm 纤芯直径的光纤，当 LP_{11e} 和 LP_{11o} 模式的弯曲损耗达到 10dB/m 时， LP_{01} 模式的弯曲损耗分别约为 0.1dB/m 和 2dB/m，均显著高于 40 μm 纤芯直径的结果（ LP_{01} 模式损耗分别为 0.01dB/m 和 0.5dB/m，见图 5(c)）。这主要是因为 60 μm 直径纤芯中 LP_{01} 模式弯曲损耗的增加，弱化了其与 LP_{11} 模式弯曲损耗的差别。

不过，通过对比图 7(b)和图 5(d)，还是可以看出：在保持纤芯直径不变的条件下，降低 NA 对于增加模式弯曲损耗之间的差别还是有帮助的。若采用 60 μm 的纤芯直径，对于 NA 为 0.02 的光纤，则有望满足“二维弯曲”的控模标准，当等效弯曲半径约为 93cm 时， LP_{11e} 模的损耗约为 10dB/m， LP_{01} 模的损耗约为 0.1dB/m。但是，问题在于：在实际应用中，由于光纤激光器在紧凑性和便携性方

面的需求，一般不会采用如此大的弯曲半径。而当纤芯直径增加到 $80\mu\text{m}$ （见图 7(c)），模式差别已经无法满足弯曲控模的要求。上述结果表明：对于 NA 为 0.02 的少模光纤，尽管在纤芯直径不大于 $60\mu\text{m}$ 的情况下，可以满足弯曲控模的要求，但是，过大的弯曲半径极大影响了其在实际激光器设计中的应用，这也意味着：弯曲控模的方法对于 NA 为 0.02 的少模光纤已经不是一个好的选择；同时，较大的基模弯曲损耗也表明：该 NA 的光纤更适合以直波导的方式应用到实际激光器系统中（比如：超短腔光纤激光器^[20]），当然，缺少了弯曲控模的帮助，就要求此时的纤芯不应过大（对于 1060nm 的波长，纤芯直径应不大于 $40\mu\text{m}$ ，相应的基模有效模场面积约为 $1536\mu\text{m}^2$ ），以确保光纤的归一化频率能够满足基模传输。

4 结 论

围绕超大模场光纤在高功率光纤激光领域的应用，针对低 NA 阶跃折射率超大模场光纤的模式弯曲特性，开展了数值研究。着重研究了 NA 不大于 0.04 光纤中的模式损耗（ LP_{01} 模和 LP_{11} 模）和基模有效模场面积随弯曲半径的变化。研究表明：纤芯直径的增加，会减小模式的弯曲损耗，但是，也会弱化不同模式弯曲损耗之间的差别，这不仅会影响弯曲控模方法的适用性，也会影响模场面积的提升；同时，NA 的降低能够有效增加模场面积，也能够一定程度上提升弯曲控模方法的适用性，但是，弯曲损耗也会随之增加，这使得采用较大的弯曲半径，才能够满足弯曲控模对于 LP_{01} 模的低损要求，这对于弯曲控模方法的实际应用会产生一定的影响。

数值结果表明：在波长为 1060nm 的光场条件下，对于单模光纤，采用直径为 $20\mu\text{m}$ 、NA 为 0.04 的纤芯，利用等效弯曲半径不小于 20cm 的光纤，可以将 LP_{01} 模的损耗控制在 0.1dB/m 以下，此时基模有效模场面积可达到 $381\mu\text{m}^2$ ；但是，进一步增加纤芯直径或降低 NA，尽管模场面积能够得到有效提升，但是，所需要的弯曲半径也大幅增加，这也使得此时光纤更适用于直波导结构的应用。

如果光纤为少模光纤，则需要弯曲控模以实现光纤激光器的基模输出。对于 NA 为 0.04 的少模光纤，纤芯直径小于 $30\mu\text{m}$ 光纤可采用传统的“一维弯曲”实现高阶模式的抑制，对应的模场面积可达到 $561\mu\text{m}^2$ ；若采用“二维弯曲”的方法，则可将纤芯直径增加至接近 $50\mu\text{m}$ ，此时所需的等效弯曲半径为 13cm，相应的基模有效模场面积约为 $800\mu\text{m}^2$ 量级。若将 NA 降为 0.03，一维弯曲控模适用的纤

芯直径可提升至 $35\mu\text{m}$ ，等效弯曲半径约为 37cm ，模场面积可达到 $873\mu\text{m}^2$ ；但是，对于二维弯曲控模适用的纤芯直径的提升并不显著， $60\mu\text{m}$ 直径纤芯仍无法满足控模要求，不过，如果允许 LP_{01} 模的损耗达到 0.24dB/m ，则仍可采用等效半径为 27cm 二维弯曲法进行控模，模场面积约为 $1258\mu\text{m}^2$ ；但是，当 NA 进一步降为 0.02 时，弯曲控模法已经难以适用，需要采用其他方法（如：部分掺杂法等）实现光纤激光器的基模输出。

这里需要说明的是：本文研究是基于波长为 1060nm 的光场开展的，对于其他波长的光场可采用相同的数值方法进行研究，不过，本文得到的物理规律对于其他波长是同样适用的，只是具体的设计方案（如：满足弯曲控模标准的纤芯直径和弯曲半径等参数）会有所变化。此外，本文数值结果的实验验证工作，也有待后续研究开展。本文的研究对于低 NA 超大模场掺杂光纤的设计及其在高功率光纤激光领域的应用具有指导意义，数值结果对于超大模场传能光纤（用于高功率激光传输）的设计也具有参考价值。

参考文献

- [1] Nilsson J, Payne D 2011 *Science* **332** 921
- [2] Zervas M N, Codemard C A 2014 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **20** 219
- [3] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A 2013 *Nat. Photonics* **7** 861
- [4] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** B63
- [5] 周军, 何兵, 漆云凤, 杨依枫, 沈辉, 孟俊清 2024 中国激光 **51** 1101021
Zhou J, He B, Qi Y F, Yang Y F, Shen H, Meng J Q 2024 *Chin. J. Lasers* **51** 1101021
- [6] Glick Y, Pincha J, Kansal I, Windeler R, Lukonin V, Monberg E, Lamb E S, Bansal L, Nicholson J W 2024 *Opt. Express* **32** 16688
- [7] Koplrow J P, Kliner D A V, Goldberg L 2000 *Opt. Lett.* **25** 442
- [8] Li M-J, Chen X, Liu A, Gray S, Wang J, Walton D T, Zenteno L A 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 3010
- [9] Li J, Wang J, Jing F 2010 *J. Electromagn. Waves Appl.* **24** 1113
- [10] Hu Z, Young J T, Menyuk C R, Hu J 2026 *Opt. Continuum* **5** 636
- [11] Marcianite J R 2009 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **15** 30
- [12] Marcianite J R, Roides R G, Shkunov V V, Rockwell D A 2010 *Opt. Lett.* **35** 1828
- [13] Gausmann S, Antonio-Lopez J E, Anderson J, Wittek S, Eznavesh S, Jang H-J, Habib M S, Cook J, Richardson M C, Amezcua Correa R, Schülzgen A 2020 *J.*

- Lightwave Technol. **38** 1953
- [14] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, Nilsson J 2004 Opt. Express **12** 6088
- [15] Jain D, Jung Y, Barua P, Alam S, Sahu J K 2015 Opt. Express **23** 7407
- [16] Beier F, Hupel C, Nold J, Kuhn S, Hein S, Ihring J, Sattler B, Haarlammert N, Schreiber T, Eberhardt R, Tünnermann A 2016 Opt. Express **24** 6011
- [17] Beier F, Hupel C, Kuhn S, Hein S, Nold J, Proske F, Sattler B, Liem A, Jauregui C, Limpert J, Haarlammert N, Schreiber T, Eberhardt R, Tünnermann A 2017 Opt. Express **25** 14892
- [18] Midilli Y, Ortaç B 2020 J. Lightwave Technol. **38** 1915
- [19] Kong F, Dunn C, Parsons J, Kalichevsky-Dong M T, Hawkins T W, Jones M, Dong L 2016 Opt. Express **24** 10295
- [20] Kotov L, Akbulut M, Chavez-Pirson A, Zong J, Peyghambarian N 2019 Proc. SPIE **10897**, Fiber Lasers XVI: Technology and Systems San Francisco, California, United States, 2019 108970X
- [21] Xu W, Lin Z, Wang M, Feng S, Zhang L, Zhou Q, Chen D, Zhang L, Wang S, Yu C, Hu L 2016 Opt. Lett. **41** 504
- [22] Marcuse D 1976 J. Opt. Soc. Am. **66** 311
- [23] Schermer R T, Cole J H 2007 IEEE J. Quantum Electron. **43** 899
- [24] Fini J M 2007 Opt. Lett. **32** 1632
- [25] Schermer R T 2007 Opt. Express **15** 15674
- [26] Velamuri A V, Patel K, Sharma I, Gupta S S, Gaikwad S, Krishnamurthy P K 2019 J. Lightwave Technol. **37** 3544
- [27] 郑斯文, 刘亚卓, 罗晓玲, 王丽辉, 张娜, 张晶晶, 金传洋, 徐丙立, 屈强, 陈玲 2021 物理学报 **70** 224214
Zheng S W, Liu Y Z, Luo X L, Wang L H, Zhang N, Zhang J J, Jin C Y, Xu B L, Qu Q, Chen L 2021 Acta Phys. Sin. **70** 224214
- [28] Selleri S, Vincetti L, Cucinotta A, Zoboli M 2001 Opt. Quantum Electron. **33** 359
- [29] Heiblum M, Harris J H 1975 IEEE J. Quantum Electron. **11** 75
- [30] 沈骁, 李婴婴, 杨涛, 郑加金, 张祖兴, 韦玮 2022 光学学报 **42** 2006005
Shen X, Li Y Y, Yang T, Zheng J J, Zhang Z X, Wei W 2022 Acta Opt. Sin. **42** 2006005

Study on the bending characteristics of low-numerical-aperture step-index ultra-large-mode-area fibers^{*}

Zhang Kai-Yan¹⁾ Jia Chen-Bin¹⁾ Cao Jian-Qiu¹⁾²⁾³⁾ [†]

1) (College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

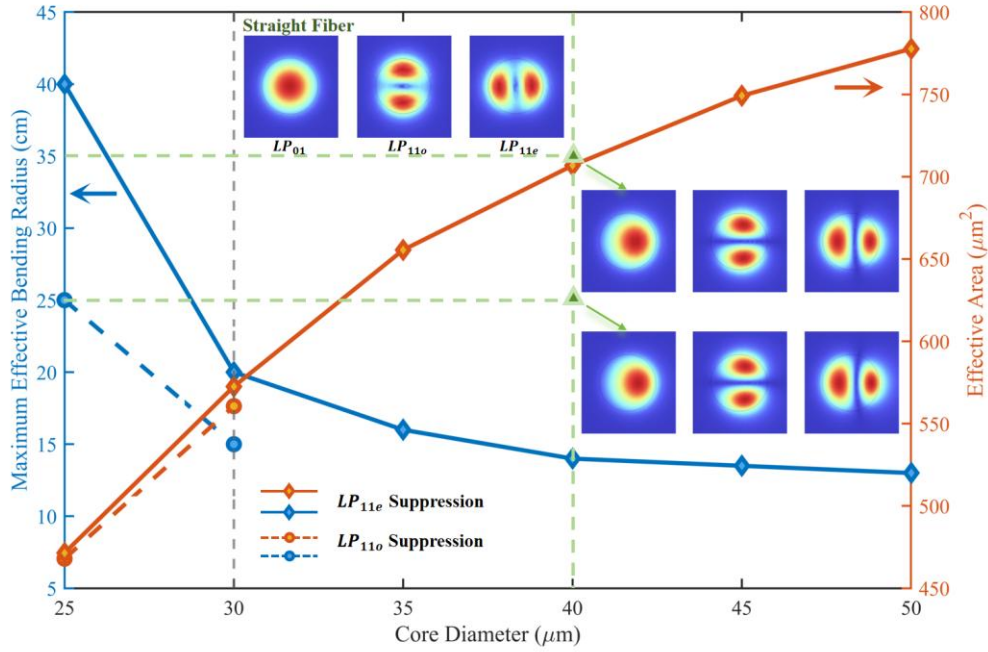
2) (Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

3) (Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract

Low-numerical-aperture (NA) step-index ultra-large-mode-area fibers are of considerable interest for high-power fiber lasers because lowering NA enlarges the effective area of the fundamental mode and suppresses nonlinear effects. However, it also increases bending sensitivity and thus limits the applicability of bend-induced mode control. In this work, a systematic numerical investigation is carried out on step-index fibers with low NA values of 0.04, 0.03, and 0.02. The bending losses of LP_{01} and LP_{11} modes for different core diameters are calculated by using the finite-element method combined with the equivalent refractive-index model, and the variation of the effective area of the fundamental mode is analyzed. The results show that, corresponding to the wavelength of 1060 nm, for fibers with NA of 0.04 and 0.03, bend-induced mode control is feasible within appropriate core-diameter ranges. For core diameters no larger than $30\mu\text{m}$ and $35\mu\text{m}$, respectively, LP_{11} mode can be effectively suppressed with a bending loss of not less than 10 dB/m, while the effective area can reach $561\mu\text{m}^2$ and $873\mu\text{m}^2$ respectively. When the core diameter is up to $50\mu\text{m}$, only LP_{11e} mode can be suppressed by bending, and the corresponding effective area is approximately $778\mu\text{m}^2$ and $1176\mu\text{m}^2$ respectively. Further reducing NA to 0.02 enlarges the effective area, but

the sharply increased bending losses make bend-induced mode control impractical. In this case, straight-fiber single-mode design is more suitable for exploiting the mode-area advantage brought by low NA. These results reveal the trade-off between mode-area scaling and bending sensitivity, and can provide theoretical guidance for the design of low-NA large-mode-area doped fibers.



Keywords: large-mode-area fibers, low numerical aperture fibers, bending loss, mode area

PACS: 42.81.-i, 42.81.Qb, 42.81.Dp, 42.55.Wd

* Project supported by Hunan Students' innovation and entrepreneurship training program (Grant Nos. S202590002352) and National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62475283).

† Corresponding author. E-mail: jq_cao@126.com
The first author. E-mail: 3111829583@qq.com