

生物质颗粒破碎过程的二维有限随机分裂模型

郭强，陈雪莉，刘海峰

(华东理工大学煤气化教育部重点实验室，上海200237)

摘要：在有限随机分裂模型的基础上，建立针对生物质颗粒破碎的二维有限随机分裂模型。模型通过考察生物质颗粒不同方向力学强度的差异以及子颗粒和母颗粒最小质量比等参数，对生物质颗粒的破碎过程进行数值模拟。通过对模拟结果和实验结果比较，发现二者具有良好的吻合性，表明二维有限随机分裂模型可合理描述生物质颗粒的破碎过程。

0引言

生物质的粉碎是生物质利用过程中的一个重要环节。预测物质破碎后其粒径分布的模型中，颗粒破碎过程的描述主要分为瞬时破碎和连续破碎两类，而物料在粉碎机械中的破碎过程属于后者^[1]。

1941年，文献[2, 3]提出了固体颗粒破碎的随机理论，认为颗粒的破碎是离散随机过程，母颗粒破裂成一定数目的子颗粒的概率与母颗粒的大小无关。

1988年，ChengZ等^[4]

在Kolmogorov理论上提出了线性分裂过程的自相似性理论。E.Ben-Naim等^[5]

在保证有稳定输入的基础上，利用随机理论对破碎过程进行模拟，解决了输入函数的时间依赖性问题。

其他研究者^[6-8]

则在动力学演化方程基础上对Kolmogorov的离散随机过程用详细的数学模型进行描述，把Kolmogorov理论中粒径分布的演化从随破裂代数改为随时间变化，该理论经文献[9, 10]的发展开始应用于计算气流式雾化过程的液滴粒径分布；ZhouWX等^[11]

用类似方法提出了液滴的随机分裂模型，而文献[12, 13]则在文献[11]的模型基础上进一步提出有限随机分裂模型。然而，上述所研究的颗粒或液滴在宏观上均表现出各向同性，颗粒或液滴的分裂过程都属于一维分裂。考虑到生物质颗粒空间结构显著的各向异性，本文在有限随机分裂模型的基础上，建立描述生物质颗粒破碎过程的二维有限随机分裂模型。

1二维有限随机分裂模型

1.1模型的基本假定

根据生物质颗粒外形的针状特性，假定生物质颗粒形状为高度和宽度均为、长度为Y的长方体。颗粒整体密度均匀，不随粒径的减小而变化。如图1所示，生物质颗粒沿横向(垂直纹理)和纵向(平行纹理)两个方向进行破裂，依照Kolmogorov串级破碎理论，假设一个生物质颗粒破裂后生成两个子颗粒。

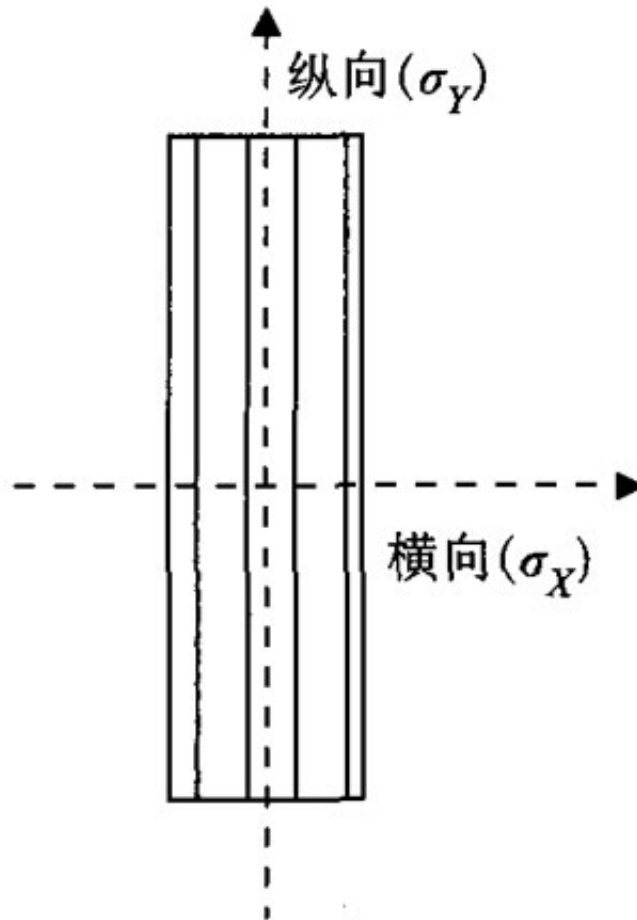


图 1 生物质颗粒破裂方向

Fig. 1 The breakup directions of biomass particle

由于生物质颗粒破碎时表现出的各向异性，生物质颗粒发生破碎的方向与生物质颗粒的长宽比以及两个方向上的材料强度相关。生物质颗粒破碎过程中，颗粒破碎后子颗粒和母颗粒的质量比 m 服从 $[m, 1-m]$ 的均匀概率分布，其中 $0 < m < 0.5$ 。当生物质颗粒的平均宽度小于实验颗粒平均宽度时，破裂停止。

1.2模型中的相关参数

模型中的颗粒进行计算的初始粒径和实验中原料进入粉碎机的初始粒径保持一致。对于单个生物质颗粒，横向和纵向的破碎概率分别为 P_x 和 P_y ，横向和纵向的破碎概率比为 K 。生物质在横向和纵向方向上机械性能存在较大差异，这主要是因为生物质中作为主要骨架的纤维素在形成过程中的方向性以及材料内部的管状结构使其在空间结构上存在各向异性。粉碎过程中，在横向方向上，如图2a所示，由于生物质材料中纤维素材料的韧性，刀片在接触颗粒时会造成颗粒的变形，颗粒的破裂是内侧弯曲而外侧拉伸的过程，因此横向方向上抵抗颗粒破碎的是横纹抗压强度和顺纹抗拉强度的共同作用。

在纵向方向上，如图2b所示，当刀片和生物质颗粒接触时，颗粒最先受到的主要是剪切力，因此抵抗颗粒破碎的主要为抗剪强度，而在出现裂纹后，随着刀片的切入，变为纵向方向的劈裂过程。然而在此模型中，由于粉碎机刀片具有相对较高的转速(24000r / min)，刀片与生物质颗粒的接触时间较短，故认为生物质颗粒破碎过程中材料强度不发生变化。

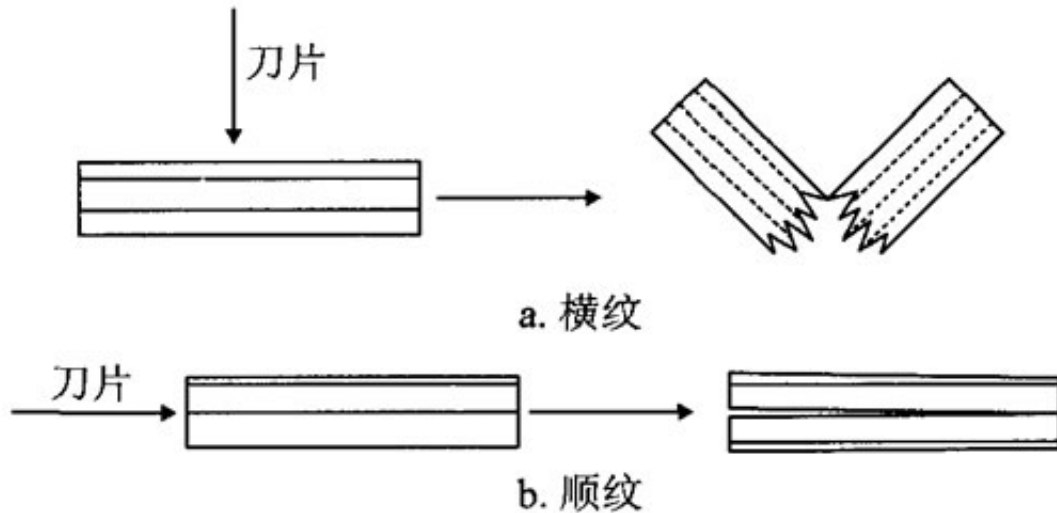


图 2 生物质颗粒在不同方向的破裂

Fig. 2 The breakup of biomass particle in different directions

生物质的抗剪强度主要与材料所承受的最大作用力和断裂面面积相关^[14]，如式(1)所示：

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (1)$$

式中， σ ——材料强度； A ——断裂面的面积； N ——材料所承受的最大作用力。

设横向破裂时的材料强度为 σ_x ，纵向破裂时的材料强度为 σ_y ，同时假定颗粒的长、宽、高分别为 y 、 x 、 x 。若横向和纵向两个方向受到相同的作用力 F

时,则颗粒仅受材料强度影响时沿横向方向的破碎概率:

$$P_{X,\sigma} = \frac{F}{x^2 \sigma_X} \quad (2)$$

颗粒仅受材料强度影响时沿纵向方向的破碎概率:

$$P_{Y,\sigma} = \frac{F}{xy\sigma_Y} \quad (3)$$

则横向和纵向因材料强度差异造成的破碎概率比:

$$P_\sigma = \frac{P_{X,\sigma}}{P_{Y,\sigma}} = \frac{y\sigma_Y}{x\sigma_X} = a \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} \quad (4)$$

式中, a ——单个颗粒的长宽比。

此外,因为长宽差异造成的接触概率比:

$$P_a = \frac{y}{x} = a \quad (5)$$

故生物质颗粒横向和纵向发生破裂的总的概率比 K 的表达式为:

$$K = P_a P_\sigma = a^2 \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} = ca^2 \quad (6)$$

式中, c ——纵向和横向的材料强度之比。

1.3模型计算过程

模拟初始,以原料进入粉碎机的粒径作为第一代破碎颗粒,按照颗粒在两个方向上不同的破碎概率确定发生颗粒发生破裂的方向,进行随机位置的破裂,得到的子颗粒为第二代颗粒。将第二代颗粒宽度的平均值与实验值进行比较。若符合收敛条件则停止计算,否则第二代颗粒继续进行破裂,以此类推,直至结果收敛,此时所获得的颗粒即作为粉碎得到的最终颗粒。将此时的颗粒依照宽度进行分级,求取不同范围内颗粒所占的体积分率,由于假定颗粒密度不变,所以体积分率和质量分率相等,从而获得粒径分布。调整 c 和 m 值,利用最小二乘法比较实验与模拟结果,从而获得最优结果。

2模拟结果分析

2.1实验

实验中所使用的原料为松木、豆秸、稻秆和芦苇4种生物质，其中松木来源于上海某家具厂，豆秸、稻秆和芦苇均来自上海市南汇区。实验所用的粉碎机为天津泰斯仪器有限公司生产的Fw177型微型植物粉碎机，转速24000r/min，粉碎效果为60~200目。松木、豆秸、稻秆和芦苇4种生物质原料进入粉碎机的平均初始粒径分别为60mm×10mm，100mm×7mm，100mm×6mm和100mm×10mm。生物质粉碎前均为自然风干，其含水量见表1。

表1 生物质原料的含水率

Table 1 The moisture contents of biomass materials

| 生物质 | 含水率/% |
|-----|-------|
| 松木 | 9.3 |
| 豆秸 | 11.7 |
| 稻秆 | 13.0 |
| 芦苇 | 12.1 |

生物质原料经粉碎机3min粉碎后，筛分为0.300~0.425mm、0.180~0.300mm、0.150—0.180mm、0.106~0.150mm及0.083~0.106mm5个不同的粒径范围。最后，通过计算不同粒径范围内的质量分率，获得颗粒的粒径分布(表2)。

表2 实验范围内不同生物质颗粒的平均宽度

Table 2 The average width of different kinds of biomass particles

| 生物质 | 平均宽度/mm |
|-----|---------|
| 松木 | 0.145 |
| 豆秸 | 0.142 |
| 稻秆 | 0.143 |
| 芦苇 | 0.153 |

颗粒长和宽的测量方法主要按照如下定义：颗粒的宽度定义为颗粒投影图像的相距最近两平行线间的距离，垂直其方向定义为长度方向。粉碎停止后，利用显微镜对随机抽取的300个生物质颗粒进行拍照，测量其获得的颗粒图像，按照相应的放大比例获得颗粒宽度的真实值，计算其粉碎后的平均宽度。

2.2模拟

基于前文的假设，对生物质颗粒的破碎过程进行模拟计算。设定初始生物质颗粒的数量为105个，以颗粒的宽度作为筛分粒径，当颗粒平均宽度小于实验值时，计算停止，然后计算不同粒径范围内的颗粒数量以及单个颗粒的体积，求出颗粒总体积及体积分率。由于假设颗粒密度不随粒径发生变化，故对于同一种生物质而言，体积分率和质量分率相等。经过计算，式(6)中的颗粒材料强度之比 c 值如表3所示，而颗粒破碎过程中，子颗粒和母颗粒的最小质量比 m 值见表4。

表 3 生物质不同方向的材料强度之比 c 值

Table 3 The ratio of material strength in two directions

| 生物质 | c |
|-----|-------|
| 松木 | 0.012 |
| 豆秸 | 0.006 |
| 稻秆 | 0.003 |
| 芦苇 | 0.001 |

表 4 生物质破碎时的子颗粒和母颗粒最小质量比

Table 4 The minimum mass ratio of a sub-particle to the parent particle during breakup

| 生物质 | m |
|-----|-------|
| 松木 | 0.303 |
| 豆秸 | 0.269 |
| 稻秆 | 0.224 |
| 芦苇 | 0.207 |

由表3可知，尽管生物质颗粒存在各向异性，但对同一种生物质而言，在其破碎过程中，两个方向破碎后产生的子颗粒和母颗粒的最小质量比 m 一致，说明颗粒发生破裂的位置受颗粒两个方向上的绝对长度的影响并不明显。然而对于不同的生物质， C 值越小，材料各向异性越强， m 值越小，分裂后产生的颗粒大小差距越大。这是因为生物质材料各向异性越强，生物质颗粒的针状特性越明显，颗粒发生破碎的范围越大。图3为0.180 ~ 0.300mm粒径范围内，借助显微镜所测得的4种生物质颗粒的平均长宽比 am 与 m 的关系，线性拟合后如式(7)所示，相关系数 $R > 0.99$ 。

$$m = -0.023a_m + 0.372 \quad (7)$$

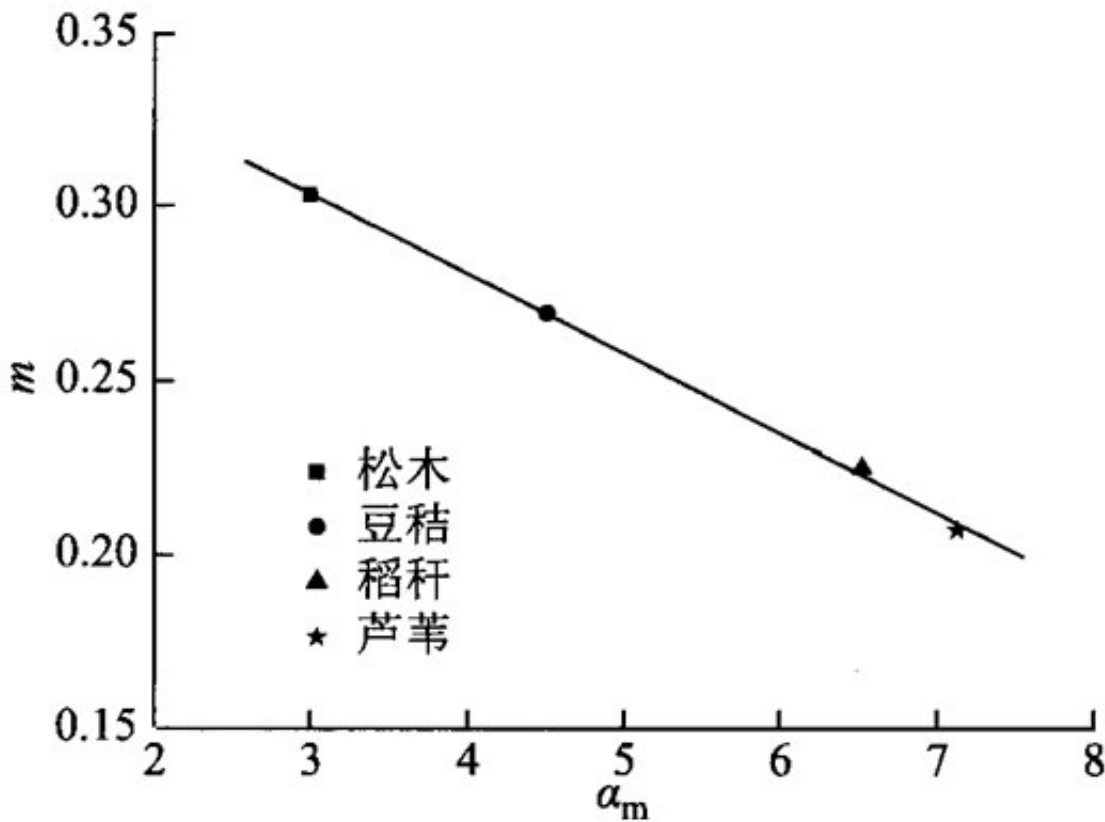


图3 生物质颗粒平均长宽比 a_m 和 m 之间的关系

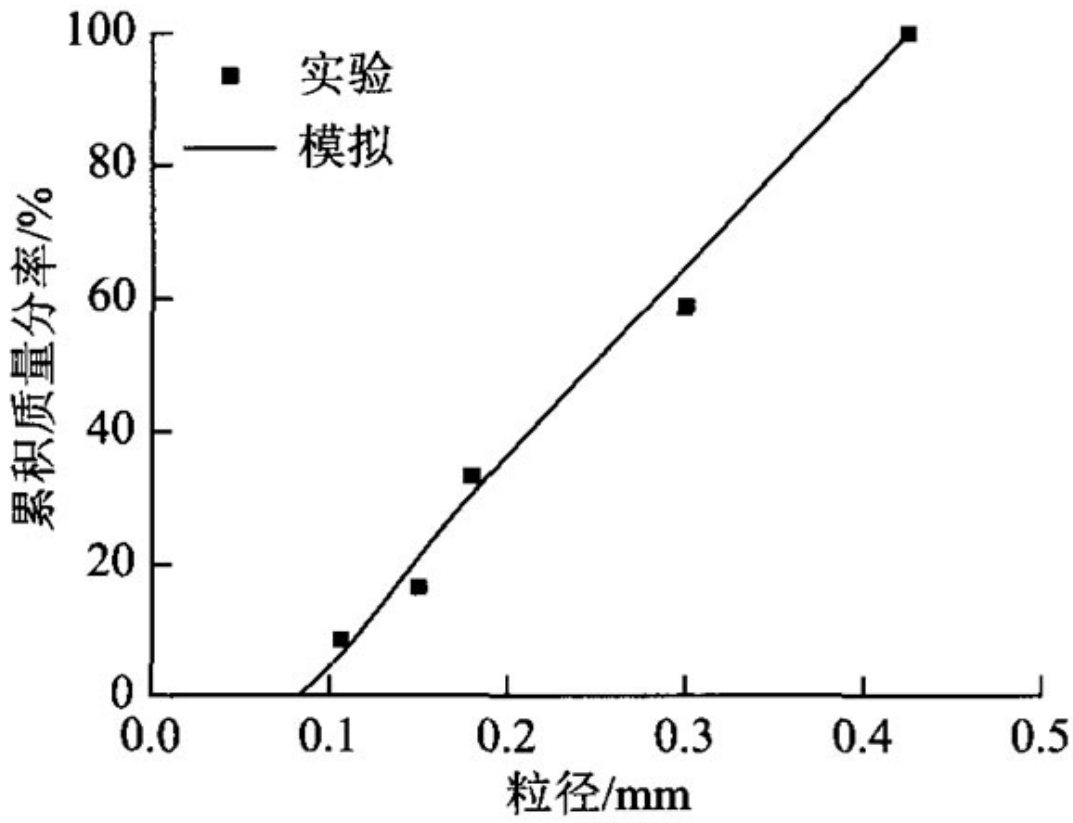
Fig. 3 The relationship between a_m and m

从图3可看出，生物质材料各向异性越强，不同方向强度差异越大，破碎后所得到的颗粒外形更加细长。因此对于粒径(颗粒宽度)相等的生物质颗粒，各向异性越强，其颗粒长度也越长。若颗粒和刀片发生接触后所分裂出的最小的子颗粒的大小一定，那么更加细长的颗粒发生随机破裂的位置范围就越广，即 m 值越小，所以 m 值随着 c 值的减小而减小是合理的。

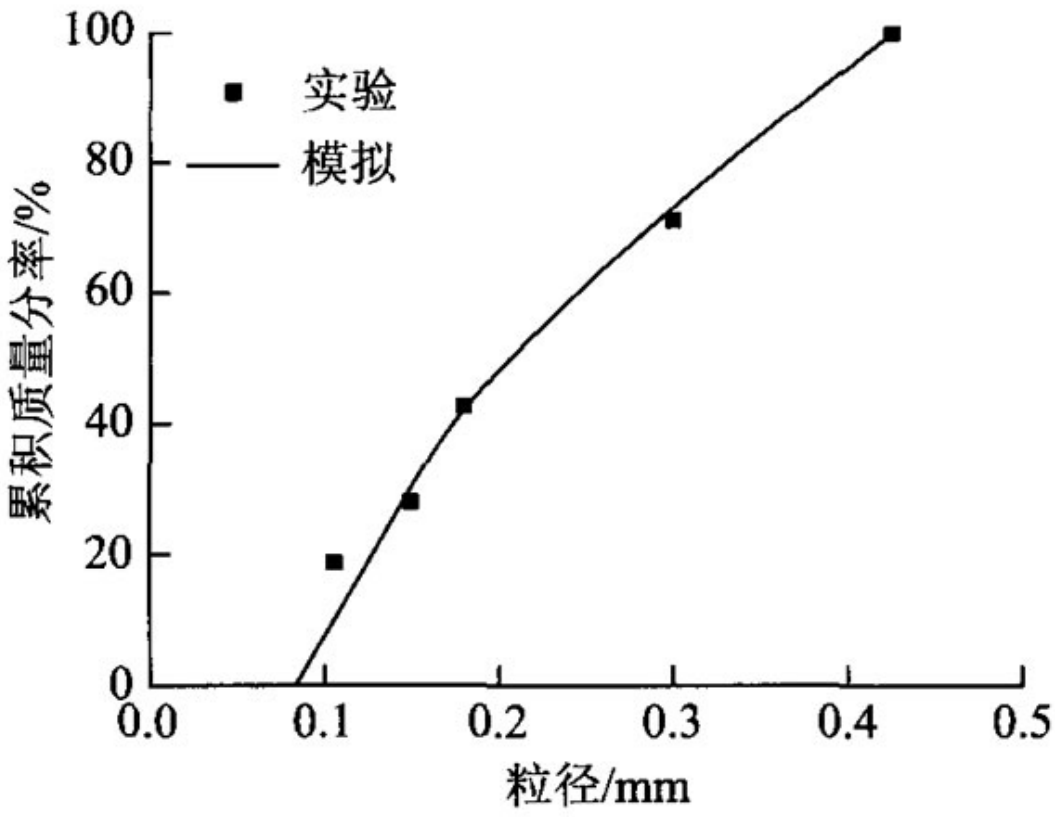
2.3 模拟结果和实验结果比较

从图4可看出，4种生物质粒径分布的模拟结果和实验结果较为吻合。根据文献[15]所述，木材遭受破坏时存在的5种强度分别为：抗劈强度、顺纹抗剪强度、横纹抗拉强度、横纹抗压强度以及顺纹抗拉强度，其强弱关系为：抗劈强度<横纹抗拉强度<顺纹抗剪强度<横纹抗压强度<顺纹抗拉强度。在松木颗粒的破碎过程中，纵向方向破裂近似劈裂过程，而横向方向则是近似处于横纹压缩和顺纹拉伸两者之间。由文献[16]中所提出关于松木强度的实验值可知，松木的抗劈强度为 $4.998 \times 10^{-3} \text{N} / \text{m}^2$ ，横纹抗压强度为 $0.3224 \text{N} / \text{m}^2$ ，顺纹抗拉强度为 $1.0780 \text{N} / \text{m}^2$ 。

，所以松木颗粒在破碎过程中，两个方向上的材料强度之比应在0.0046—0.0150之间，而在模拟结果中，松木纵向和横向的材料强度之比为0.012(见表3)，恰好在这个范围之内，因此二维有限随机分裂模型可对松木颗粒的破碎过程进行模拟。而对于其他3种生物质，尽管难以测试其材料强度，进而验证 c 值的准确性，但由于其他3种生物质均为一年生草本植物，在其生长过程中，细胞的分裂主要是沿其生长方向(即纵向方向)，横向方向分裂有限，这使其纤维结构的各向异性更加明显，所以 c 值和松木相比偏小也较为合理。



a. 松木



b. 豆秸

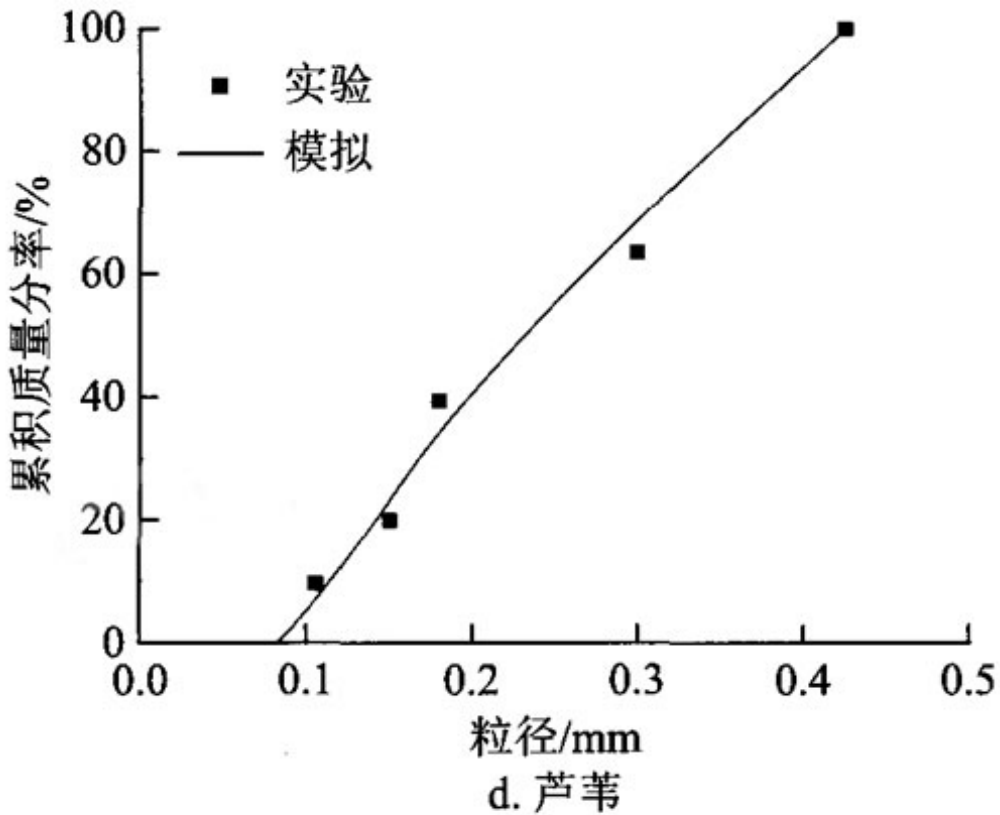
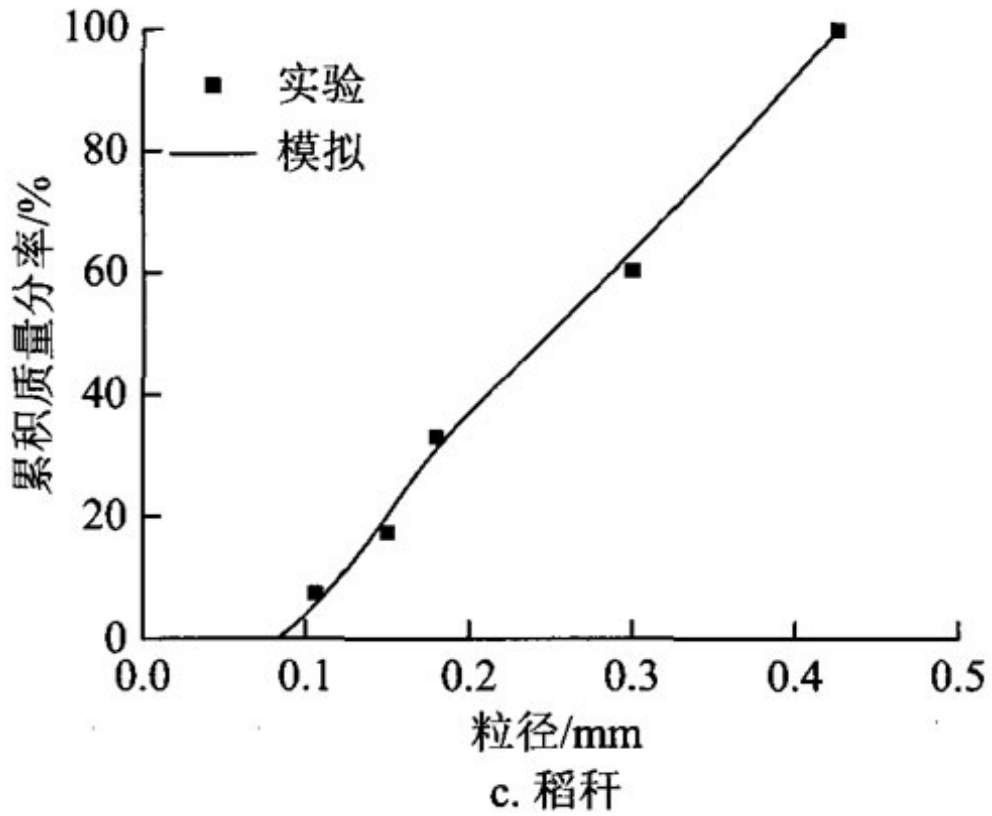


图4 4种生物质颗粒的粒径分布

Fig. 4 The particle size distributions of biomass particles

3结论

1)结合生物质材料空间结构各向异性所导致材料强度在不同方向上的差异,在有限随机分裂模型的基础上,建立了描述各向异性生物质颗粒破碎过程的二维有限随机分裂模型,对生物质颗粒的破碎过程进行数值模拟。

2)松木、豆秸、稻秆和芦苇4种生物质颗粒粒径分布的模拟结果和实验结果具有良好的吻合性,表明通过对模型中参数的确定,二维有限随机分裂模型可对生物质粉碎后的粒径分布进行合理的预测。

3)模型中各项参数物理意义明确,其中C值的结果表明二维有限随机分裂模型可对生物质材料的各向异性进行合理描述。颗粒在破碎时,两个方向上的m值的一致性说明对于同一种生物质颗粒,发生破裂的位置受颗粒长度和宽度绝对值的影响并不明显;但对于不同的生物质,材料的各向异性越强,针状特性越明显,颗粒发生随机破裂的位置范围越大,分裂产生的子颗粒的大小差距也越大。

[参考文献]

[1]Ast'm J A.Statistical models of brittle fragmentation[J].Advances in Physics , 2006 , 55(3-4) : 247-278.

[2]Kolmogorov A N.On the 10g-norml distribution of particles sizes duing breakup process[J].Dokl Akad Nnk , 1941 , SSSR XXXI(2) : 99-101.

[3]Lefebvre A H.Atomization and sprays[M].New York : Hemisphere Publishing Corporation , 1989.

[4]Cheng Z , Redner S.Sciling theory of fagmentMion[J].Physicl Review Letters , 1988 , 60(24) : 2450-2453.

[5]Ben-Naim E , Krapivsky P L.Fragmentation with a steady source[J].Physics Letters A , 2000 , 275(1-2) : 48-53.

[6]Ernst M H , Szmmel G.Fragmentation kinetics[J].Journal of Physics A : Mathematical and Generl.1993 , 26(22) : 6085-6091.

[7]Treat R P.On the similaity solution of the fragmentation equation[J].Journal of Physics A : Mathematical and General , 1997 , 30(7) : 2519-2543.

[8]Huang J , Guo X , Edwards B F , et al.Cut-of model and exact general solutions for fragmentation with mass loss[J].Jounal of Physics A : Mathematicl and

General , 1996 , 29(23) : 7377-7388.

[9]Gorokhovski M A , Saveliev V L.Anlyses of Kolmogorov ' S model of breakup and its application into Lagrangian computation of liquid sprays under air-blast

atomization[J].Physics of Fluids , 2003 , 15(1) : 184-192.

[10]Apte S V , Gorokhovski M , Moin P.LES of atomizing spray with stochastic modeling of seconday breakup[J].Intenational Journal of Multiphase Flow , 2003 , 29(9) : 1503-1522.

[11]Zhou W X , Zhao T J , Wu T , et al.Application of fractal geomety to atomization process[J].Chemical Engineeing Jounl , 2000 , 78(2-3) : 193-197.

[12]龚欣, 刘海峰, 李伟锋, 等.气流式雾化过程的有限随机分裂模型[J].化工学报, 2005, 56(5) : 786-790.

[12]Gong Xin , Liu Haifeng , Li Weifeng , et al.Finite stochastic breakup model of air-blast atomization process[J].Journl of Chemical Indusy and Engineeing(China) , 2005 , 56(5) : 786-790.

[13]Liu H F , Gong X , Li W F , et al.Prediction of droplet size distribution in sprays of preilming air-blast atomizers[J].Chemical Engineering Science , 2006 , 61(6) : 1741-1747.

[14]Womac A R , Yu M , Igathinathane C , et al.Shearing characteristics of biomass for size seduction[A].ASABE[C] , St Joseph , 2005.

[15]Heywood H.Numeicl deinitions of particle size and shape[J].Chemistry nd Industy , 1937 , 56(7) : 149 - 154.

[16]Kollmann F F P , Cote W A.木材学与木材工艺学原理—实体木材[M].北京：中国林业出版社，1991.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/131040.html>