

超高压下灵芝孢子的应力分析

杨燕勤^{1,2} 潘家祯¹ 崔宁¹

(1. 华东理工大学 化工机械研究所,上海 200237; 2. 上海师范大学 机电学院,上海 201418)

摘要 在本研究前期采用超高压超临界撞击流方法制备破壁灵芝孢子的基础上,为进一步提高破壁率,利用有限元软件对灵芝孢子在超高压下的应力分布进行了分析,得到最大应力值与加载压力之间的关系。根据灵芝孢子的构造特点,将其简化为带有加强筋的双层壁容器,得到结构在超高压下的应力分布。结果显示:加载压力与最大应力值成正比;应力最大值出现在孢壁的中部;载荷承受面与孢壁间加强筋连接处应力集中,最容易受破坏;采用血球计数法统计,在加载压力 300 MPa,温度 130 ℃,撞击靶距 10 mm 及保压时间 1 h 的工艺条件下,灵芝孢子的破壁率为 88.48%。

关键词 灵芝;孢子;几丁质;超高压;有限元

中图分类号 TQ 46

文章编号 1007-4333(2005)03-0073-04

文献标识码 A

Stress analysis of *Ganoderma lucidum* spore at hyper high pressure

Yang Yanqin^{1,2}, Pan Jiazhen¹, Cui Ning

(1. East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Shanghai Normal University, Shanghai 201418, China)

Abstract In preliminary work, we succeeded in preparing sporoderm-broken *Ganoderma lucidum* spores through hyper high pressure supercritical impinging streams method. In order to improve sporoderm-broken ratio, stress analysis of *Ganoderma lucidum* spore at hyper high pressure was studied by finite element analysis. The relation between the greatest stress and pressure was obtained. *Ganoderma lucidum* spore was made into a double-layer wall with retaining ribs according to its structure feature. The stress intensity distribution of the structure at hyper high pressure was obtained. The analysis shows that the greatest stress was proportion to pressure. Highest values occurred at middle position of the walls. The joint of load walls and retaining ribs was thus readily destroyed. And the result of evaluation is well consistent with that of experiment. The technology conditions were confirmed as: working pressure 300 MPa, heating temperature 130 ℃, holding time 1 h, and impinging distance 10 mm. On these technology conditions, the sporoderm-broken ratio is 88.48% by blood count method.

Key words *Ganoderma lucidum*; spore; chitin; hyper high pressure; finite element

灵芝亦名赤芝^[1],其子实体灵芝孢子的药用价值已经由临床实践证明。在扫描电镜下灵芝孢子呈卵圆形,顶端平截或钝圆锥形,孢子 5.6 μm × 8.5 μm,孢壁双层,两层间有小棘(图 1)。Coleman^[2]研究灵芝孢壁构造时认为,几丁质内孢壁的存在使得孢子难以萌发。结构复杂、坚硬且耐酸碱的孢壁影响了孢子内含物的释放,限制了对其生物活性成分的提取,生物利用率低。陈体强^[3]等曾提取灵芝孢

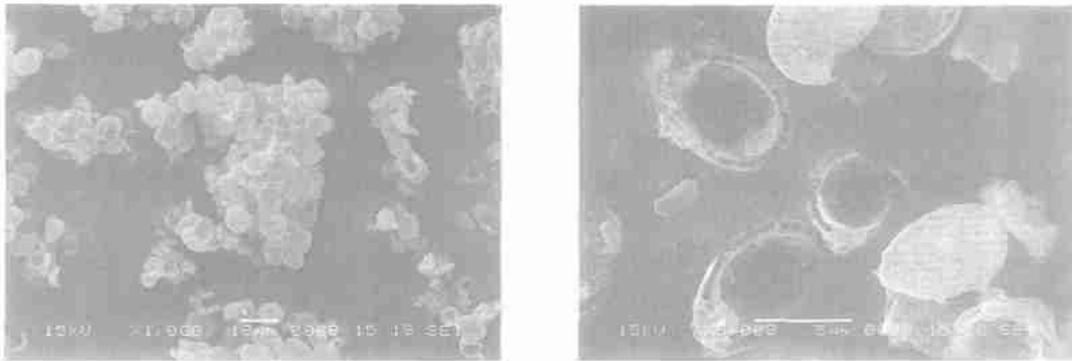
壁成分,几丁质的红外光谱特征与对照样品蟹壳几丁质基本一样。无机元素构成以 Si (19.01%)、Ca (24.31%) 为主,掺入几丁质使得孢壁更加结实坚硬。Liu Xin^[4]等研究表明,灵芝孢子破壁后化学成分更易提取,有利于人体吸收利用孢内有效成分。

目前,国外多用高压气流法破壁,其设备一次性投资大且易损坏。采用酶法破壁率达 42%^[5],还有超声波和低温冷冻破壁等,但成本高、破壁率相对较低。

收稿日期: 2004-11-10

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(02103);上海市科委纳米基金资助项目(0243nm107)

作者简介: 杨燕勤,讲师,在职博士研究生,主要从事高压射流技术研究。



(a) (b)
图1 扫描电镜不同放大倍数下破壁灵芝孢子形貌

Fig. 1 Micro-morphology of sporoderm-broken *Ganoderma lucidum* spores under SEM

撞击流粉碎技术已用于超细炸药、超细涂料的制备。本研究曾用自行研制开发的超高压超临界撞击流粉碎试验系统,制备破壁灵芝孢子,取得了较为满意的效果^[6]。为进一步提高破壁率,有必要分析灵芝孢子在超高压下的应力分布,但是破壁是在瞬间完成的,难以进行直接观测。笔者借助计算机的数值模拟,通过有限元分析,得到孢壁结构在超高压下的应力分布及最大应力值与加载压力之间的关系。

1 超高压超临界撞击流技术破壁灵芝孢子

撞击流 (Impinging Streams, IS) 的概念于 20 世纪 60 年代初由 Elperin^[7] 首先提出并进行试验。此项技术用于固体物料的超细粉碎,基本原理是使混有固体物料的高压(通常大于 200 MPa)流体通过喷嘴加速,形成高速射流,带动其中的固体颗粒做高速运动,然后与靶板(超硬材料,如金刚石或宝石)或相反方向的另一股射流形成高速强烈撞击^[8],碰撞的结果导致产生 1 个狭窄的高压、高速湍流区。在此区域内,相间或颗粒之间的碰撞、互磨产生的挤压力和剪切力使流体中的固体物料被细化。

根据撞击流技术的原理,将含有灵芝孢子的超临界二氧化碳加以 200 MPa 以上的超高压,通过 0.1 mm 的喷嘴喷射到硬质合金靶子上,通过旋风分离器收集产物^[6]。扫描电镜观察,孢壁结构被破坏(图 1)。采用血球计数法统计灵芝孢子的破壁率,在加载压力 300 MPa,温度 130℃,撞击靶距 10 mm 及保压时间 1 h 的工艺条件下,其破壁率为 88.48%。

2 超高压下灵芝孢子的应力分析

2.1 孢壁在超高压作用下产生的应力

在超高压下,颗粒处于三向压缩状态,内部产生

极大的三向应力与其平衡。通过喷嘴后,压力突然释放,颗粒内部的高应力使其突然膨胀破裂。在超高压的驱动下,物料经过喷嘴喷射出,获得极高的超音速动能,撞击到靶子上造成了极好的超细粉碎效果。该技术应用在具有韧性细胞壁的灵芝孢子的破壁上更有独特的优势。颗粒在外力的作用下,其内部的原生裂纹将沿着晶界的解理面等弱面扩展,而引起粉碎。

2.2 超高压下孢壁应力分布的数值模拟

1) 孢壁结构简化及有限元模型的建立。

ANSYS 软件是一个基于有限元法的计算机程序。可通过前处理、计算求解和后处理来求解结构的应力分布。应用 ANSYS 软件分析孢壁应力分布之前,首先简化灵芝孢子的实际结构,然后在其前处理中建立孢子的计算模型,输入材料的物性参数,划分网格,形成孢子的有限元模型。建模的原则是使问题直接、清晰和便于求解,需要时可将结构拆分与合并。网格划分的原则是既保证求解精度,又提高计算速度。孢子的有限元模型建立后,加上载荷与边界条件进行求解。求解后,在后处理过程中,提取所需数值和图形结果。

根据灵芝孢壁的显微形态及构造特点,将其简化为带有加强筋的双层壁容器。根据结构的对称性,可取 1/4 进行分析计算(图 2)。由于内、外壁及



图2 有限元模型的单元图

Fig. 2 Finite element model

壁间小棘是破壁的关键部位,壁间有加强筋的作用,分别选择壳(shell)单元和杆(bar)单元。

参照几丁质中加入纤维材料的力学特性,取孢壁弹性模量 $E = 130 \text{ GPa}^{[9]}$, $\mu = 0.3^{[10]}$ 。

2) 载荷和边界条件的选择。

因孢子相当小,自重忽略不计,仅分析介质压力造成的应力。孢壁在超高压作用下产生的内应力,可简化成在孢子内、外壁上分别加压,其取值为 200、210、220、230、240、250、260、270、280、290 和 300 MPa。边界条件为对称边界条件(symmetry

B. C)。

3) 计算结果的后处理。

图 3(a)、(b)分别是在内压 300 MPa 作用下内、外壁的应力分布;(c)、(d)分别是在外压 300 MPa 作用下内、外壁的应力分布;(e)、(f)分别是在内外压 300 MPa 同时作用下内、外壁的应力分布。在其他压力值作用下,应力分布相似,只是数值差异。可见,无论是内压或外压分别作用,还是内外压同时作用,也无论是内壁还是外壁,中间部位应力数值最大,最容易受破坏,这与试验结果基本一致。

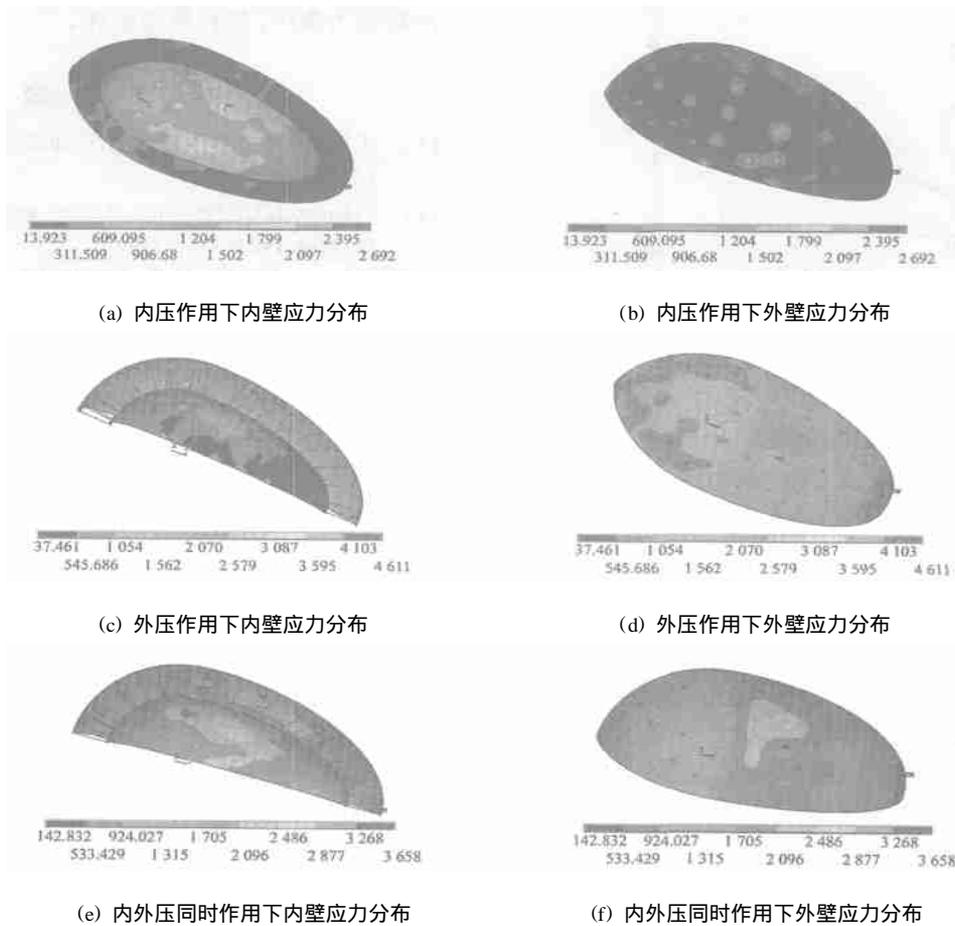


图 3 不同加压方式下灵芝孢子内外壁的应力分布

Fig. 3 Stress distribution of endosporium or exosporium under different pressure

3 分析与讨论

1) 加载压力 P 的影响。

内压、外压和内外压分别为 200、210、220、230、240、250、260、270、280、290 和 300 MPa 作用时,节点最大应力值见图 4。可见,随着加载压力 P 的增大,灵芝孢子节点最大应力值明显上升,与加载压力

P 近似成正比关系。

影响灵芝孢子破壁率的因素较多,在确定主要因素的正交试验中,得到加载压力是重要因素。由正交试验结果可以得到不同加载压力下的灵芝孢子粉平均破壁率 r_m ,其关系曲线见图 5。随着加载压力 P 的增大,灵芝孢子粉平均破壁率 r_m 明显上升,与加载压力 P 近似成正比关系。目前,由于试验装

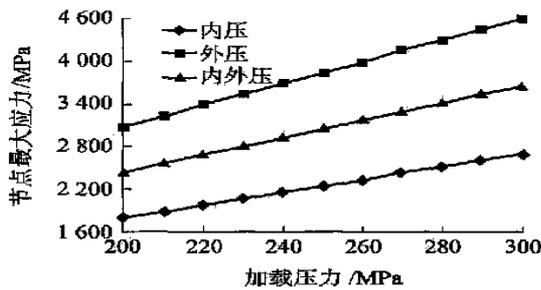


图4 不同压力作用下节点最大应力

Fig. 4 Maximal stress of nodes under different pressure

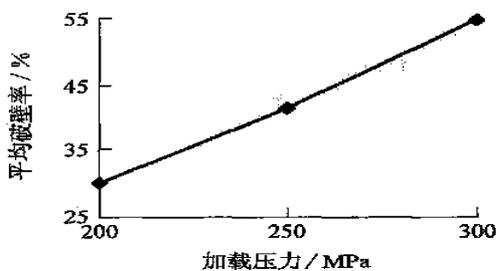


图5 加载压力与平均破壁率关系曲线

Fig. 5 Relation between loading pressure P and Sporoderm broken rate r_m

置构造所限不可能无限制地增大加载压力,一般选择加载压力为 300 MPa。可以看出,数值模拟与试验结果较吻合。

2) 应力分布特点。

如图 3(a) 所示,在内压作用下,孢壁中间应力值较大,内壁与加强筋连接处有极大值;与之相似,图 3(c) 外压单独作用及 (e) 内外压同时作用时,孢壁中间应力在外壁与加强筋连接处有极大值,即产生应力集中。在外力的作用下,其内部的原生裂纹将沿着晶界的解理面等弱面扩展,从而引起粉碎。

3) 讨论。

由于孢壁在超高压撞击流的作用下,所受到的外力相当复杂,有射流对颗粒的冲击作用,有颗粒之间以及与管壁之间的摩擦剪切作用,有颗粒相互之间以及颗粒与靶物之间的冲击作用等。这些作用都

能引起孢子破壁,对于哪种是引起颗粒粉碎的最主要最有效作用这个问题,国内外学者看法不一,本文主要分析孢子在超高压下的应力问题。

4 结论

本研究利用有限元软件对灵芝孢子在超高压下的应力分布进行了分析,得到最大应力值与加载压力之间的关系及结构在超高压下的应力分布。结果显示,加载压力与最大应力值成正比,应力最大值出现在孢壁的中部,载荷承受面与孢间加强筋连接处出现应力集中,最容易受破坏。

参考文献

- [1] 王祖农. 微生物学词典[M]. 北京:科学出版社,1990. 184
- [2] Coleman L C. Structure of spore wall in *Ganoderma*[J]. Bot Gaz,1927(83):43~60
- [3] 陈体强,李开本. 灵芝、紫芝担孢子及其孢壁的超微结构[J]. 福建农业学报,1998,13(4):33~38
- [4] Liu Xin, Yuan Jianping, Chung Cheekeung, et al. Antitumor activity of the sporoderm broken germinating spores of *Ganoderma lucidum*[J]. Cancer Letters, 2002, 182: 155~161
- [5] 蒋家新,赵澎涛,王新辉. 灵芝孢子酶法破壁的研究[J]. 食品科学,1996,17(4):19~22
- [6] 崔宁,潘家祯,王鲁敏. 超高压超临界撞击流技术制备破壁灵芝孢子粉[J]. 华东理工大学学报,2004,30(6):698~701
- [7] 伍沅译. 撞击流反应器:原理和应用[M]. 北京:化学工业出版社,1996
- [8] 李凤生. 超细粉体技术[M]. 北京:国防工业出版社,2000
- [9] Julian F V, Vincent. Arthropod cuticle: a natural composite shell system [J]. Composites: Part A: applied science and manufacturing, 2002, 33:1311~1315
- [10] 谢尔登 R P. 聚合物复合材料[M]. 陈义芳,顾文华,孙载坚,等译. 北京:轻工业出版社,1989