

文章编号: 1000-8055(2007)12-2089-05

粒子分离器叶片涂层冲蚀磨损的数值模拟

邓 瑛, 闫晓军, 聂景旭

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 以叶片涂层为对象, 研究其冲蚀过程中损伤的演化过程. 首先进行了流场计算. 其次通过对单个固体颗粒冲蚀过程的模拟, 提出了“碰撞有效影响区域”的概念, 使得多个固体颗粒连续冲蚀数值模拟得以实现. 接下来通过模拟“碰撞有效影响区域”内材料受到固体颗粒连续冲蚀的过程获得材料的抗冲蚀磨损性能. 最后, 将流场数据和涂层抗冲蚀磨损性能参数相结合来模拟叶片涂层的冲蚀过程, 指出了涂层的薄弱区域并进行了寿命预测.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 粒子分离器; 冲蚀; 磨损; 叶片; 涂层; 光滑粒子流体动力学方法; 寿命预测

中图分类号: V231.9

文献标识码: A

Numerical simulation of erosion and abrasion of separator blade coating

DENG Ying, YAN Xiao-jun, NIE Jing-xu

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The damage evolution of blade coating in the erosion process was studied. Firstly, the flow field was measured; secondly, the erosion process of single solid particles was simulated to propose the concept “Effective erosion region”, allowing to simulate numerically the erosion process of multiple solid particles. Next, the erosion resistance performance of coating materials in the “Effective erosion region” was simulated. The results show the weak coating region and provide life prediction by simulating the erosion process of blade coating with the flow field data and erosion resistance performance parameters.

Key words: aerospace propulsion system; separator; erosion; abrasion; blade; coating; smoothed particle hydrodynamics (SPH) method; life prediction

固体粒子冲击或冲刷造成材料的损耗是工业生产中很多机器设备、零部件损坏/报废的重要原因, 磨损所造成的能源和材料消耗是十分惊人的. 在航空工业领域, 磨损每年造成的损失为 134 亿美元^[1]. 特别在航空发动机工作过程中, 吸入沙粒对叶片的冲蚀磨损不仅直接导致了发动机性能的下降, 严重时还可能引起严重的飞行事故. 此外, 国内对于航空发动机叶片寿命设计, 主要考虑的

是高、低周疲劳以及蠕变引起的损伤, 而未考虑磨损、外物打伤、腐蚀等造成的损伤, 使得在一些情况下, 在试验器上得到的叶片寿命长于外场使用寿命. 因此, 考虑磨损及外物打伤对发动机叶片寿命的影响, 将会提高叶片寿命预测的精度.

本文以发动机粒子分离器叶片涂层为对象, 研究固体颗粒对其的冲蚀磨损过程. 目前, 人们广泛使用了数值模拟方法对冲蚀过程进行研究, 研

收稿日期: 2006-11-15; 修订日期: 2007-01-31

基金项目: 国家自然科学基金(50205002); 航空科学基金(02C51031); 全国优秀博士学位论文作者专项资金(200351)

作者简介: 邓瑛(1980-), 男, 云南昭通人, 博士, 主要从事强度、振动及可靠性方面的研究.

究过程分为两个步骤,首先对两相流流动进行模拟,其次为材料冲蚀性能方面的研究.

材料的冲蚀磨损表现为带粒气流和材料发生相互作用的过程,因此人们对材料冲蚀磨损过程的研究首先体现在对两相流流动的模拟上^[2].在该方面的研究取得了一定的进展,但是其在预测材料冲蚀过程时需要引入由冲蚀试验得出的经验公式,这使得该方法对试验数据依赖性很大.

另一方面,对材料冲蚀理论的研究虽然取得了一定的进展,提出了相关的冲蚀假设,但是在模拟材料的冲蚀过程时,由于需要大量的计算资源,使得对多个固体颗粒冲蚀过程的模拟难以实现.因此,直接使用数值模拟的方法获得部件及部件涂层的使用寿命有相当大的难度,并且要对现有假设进行验证也难以进行.

最后,由于在两相流和材料冲蚀研究中均存在困难,目前只能分别将其用于部件寿命预测,使得难以准确地模拟部件的冲蚀磨损过程并进行寿命预测.

本文的研究主要针对对冲蚀过程缺乏有效数值模拟方法的现状而展开.提出了新的方法以研究冲蚀磨损过程.其思路如下:首先进行了叶片流场的模拟,获得固体颗粒的冲蚀初始状态;其次对材料冲蚀过程进行模拟,利用数值方法获得涂层的抗冲蚀磨损性能参数.最后,将流场数据和材料冲蚀性能数据相结合进而模拟叶片涂层的冲蚀磨损过程.针对冲蚀磨损的特点,在计算中引入了 SPH(Smooth particle hydrodynamics)方法并和有限元结合建立叶片和涂层模型.通过计算发现,虽然 SPH 方法在描述大变形时有很大的优势,但是在相同的计算条件下,其计算时间长于有限元方法,通过和有限元方法混合建模,既能克服 SPH 方法占用计算资源的不足又能克服有限元方法难以描述冲蚀过程的不足^[3-4].

本文使用 ESI 公司的 Pam_Crash 对冲蚀过程进行模拟.

1 研究思路和方法

本文研究思路如下:由于冲蚀磨损是因固体颗粒对材料的冲击而发生的,颗粒的特性,如粒子质量、速度、撞击角度决定着损伤的形成和演化过程,故首先对叶片流场进行计算,以获得固体颗粒冲蚀的初始状态.另一方面,还须考虑材料本身抵抗冲蚀的能力.接下来通过数值方法模拟获得材料的抗冲蚀磨损性能.由于对多个固体颗粒连续

冲蚀过程的模拟将占用大量的计算资源,很难进行构件的冲蚀模拟.在对单个固体颗粒碰撞过程进行研究后,本文提出了“碰撞有效影响区域”的概念.由于“碰撞有效影响区域”的尺寸远远小于构件,因此可对该区域内材料进行多个固体颗粒连续冲蚀过程的模拟,进而获得材料的抗冲蚀性能.在此基础上同流场数据相结合可模拟涂层冲蚀过程.

冲蚀过程非常复杂,要建立和实际相一致的模型十分困难.针对粒子分离器叶片的工作环境,进行如下假设:

- (1) 沙粒成分为 SiO₂,粒子形状为球形,半径为 100 μm.
- (2) 假设沙粒具有很好的跟随流动特性.
- (3) 假设发动机始终工作在同一工作状态.
- (4) 沙粒冲蚀在涂层不同位置所形成的损伤相互独立.

按照思路,本文首先进行了叶片流场的模拟.流场计算条件如表 1 所示.

表 1 流场计算条件		
Table 1	Initial conditions for flow computation	
	进口初始状态	出口状态
总压/ Pa	101 300	—
静压/ Pa	—	90 600
总温/ K	293	—
进口速度 Mach	0. 203 37	—

在完成叶片流场计算后进行涂层材料冲蚀性能的计算结果如图 1 所示.首先研究“碰撞有效影响区域”的大小.为此进行了单个固体颗粒碰撞过程的模拟,除了对碰撞影响区域的大小进行研究外,由于试验可给出材料受撞击后的形变等数据,故可以对计算模型参数进行修正,验证 SPH 方法的计算精度并对相关理论加以验证,如涂层和叶片的分离假设等.关于单个粒子碰撞的计算已经完成,详细内容可参见文献[5].根据计算结果,以碰撞点为圆形,两倍粒子半径以外的涂层区域不会受到碰撞的影响,所以认为“碰撞有效影响区域”为 2 倍粒子半径.并以此为依据建立多个固体颗粒连续冲蚀模型.

在模拟多个固体颗粒冲蚀过程时,选择涂层材料在不同冲蚀角度、冲蚀速度下的脱落规律作为评价材料抗冲蚀磨损性能高低的依据.选择冲蚀角度分别为 30°,50°,70°,90°的冲蚀过程进行

模拟,其中 50 的冲蚀模型如图 2 所示;材料参数与文献[5]中的相同.现阶段模拟 50 个固体颗粒的连续冲蚀过程.

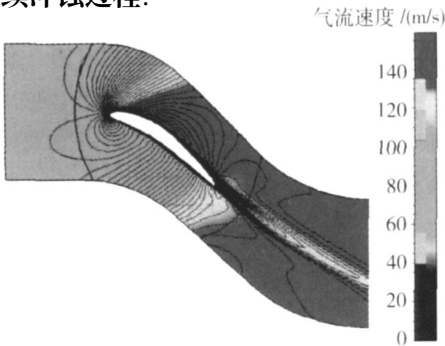


图 1 叶片中部速度等高线云图
Fig. 1 Velocity contour of flow field

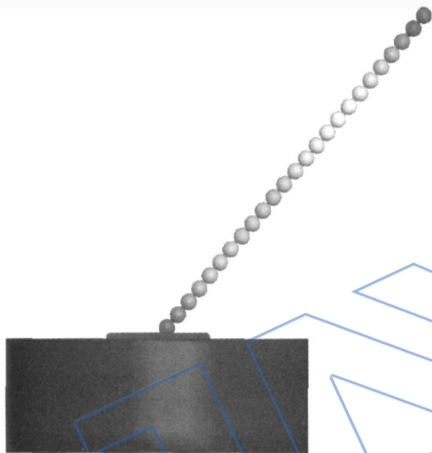


图 2 冲蚀角度为 50° 的模型
Fig. 2 Erosion model of 50 degree impact

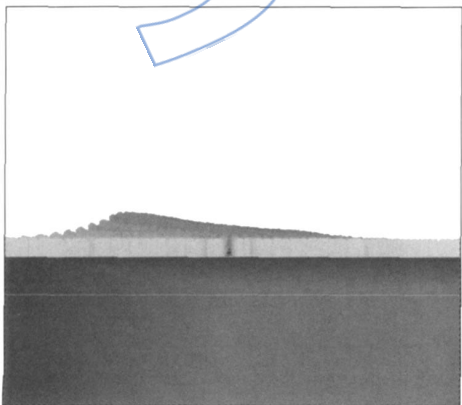


图 3 固体颗粒冲蚀磨损后的涂层变形
Fig. 3 Deformation of damaged coating surface

图 3 为 50 个固体颗粒冲蚀涂层后涂层的变形图.计算得到涂层材料的抗冲蚀磨损性能如图 4~图 6 所示,为了和实验数据进行对比对数据进行了单位化.其中图 4 为涂层脱落量——冲蚀粒子质量计算曲线;图 5 为涂层脱落量——冲蚀粒

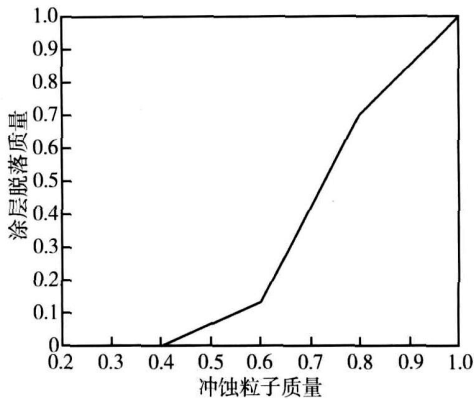


图 4 涂层脱落量——冲蚀粒子质量计算曲线
Fig. 4 Relationship between coating removal and particle mass

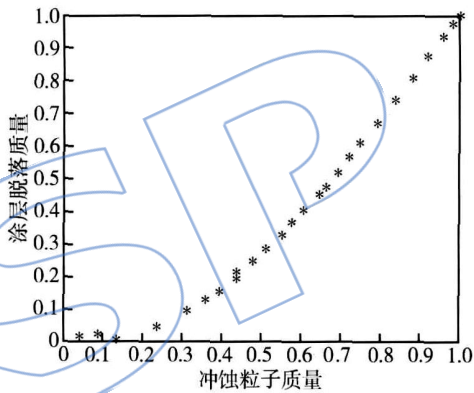


图 5 涂层脱落量——冲蚀粒子质量实验曲线
Fig. 5 Relationship between coating removal and particle mass

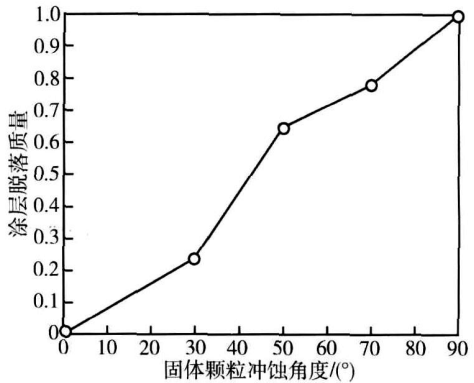


图 6 涂层脱落量——冲蚀角度曲线
Fig. 6 Relationship between coating removal and attack angle

子质量实验曲线.从图中可以看出,两组曲线的趋势接近并且该方法能模拟出冲蚀过程所特有的“冲蚀孕育期”(在该时间段中材料几乎不发生流失).从图 6 可知涂层脱落量先随着冲蚀角度的增加而增加,在冲蚀角度为 90 时达到最大值,这同脆性材料的冲蚀规律一致.

在完成冲蚀角度对冲蚀性能影响的研究后,接下来进行冲蚀速度和冲蚀性能间关系的研究.对流场数据分析后发现,粒子冲蚀速度分布范围很宽.如要对所有冲蚀速度进行模拟需要大量的计算时间,因此,本文通过计算冲蚀速度为 68, 100 m/s 下材料冲蚀性能,并将之代入已有经验公式(1)中^[1,6].通过求出该公式中的未知数,从而获得冲蚀速度对冲蚀性能的影响.

$$\varepsilon = A \cdot V^n$$

(1)

其中 ε 为冲蚀率,它定义为

$$\varepsilon = \text{材料脱落量} / \text{冲蚀粒子重量}$$

(2)

在公式(1)中 A 为常数, V 为固体颗粒的速度, n 为指数系数.

2 计算结果

通过将流场数据和材料冲蚀性能相结合模拟了叶片涂层受到固体颗粒冲蚀下涂层损伤的演化过程.通过逐步增加冲蚀粒子数目得到冲蚀粒子质量同涂层脱落质量间曲线,并在涂层脱落质量不再增加时停止模拟.此时冲蚀粒子数目为 6×10^6 个.图 7 所示为 6×10^6 个固体颗粒冲蚀叶片涂层后涂层脱落情况.图中使用了“涂层脱落率”来表示叶片上不同部位涂层的损失情况.其定义

为:某区域内已经脱落的涂层质量与冲蚀前该区域内涂层总重量的比值.在预测叶片涂层寿命时选用了两种浓度的含沙气流.其中浓度为 53 mg/m³ 的含沙气流来自美国军标,而粒子浓度 200 μg/m³ 为通常情况下大气中固体颗粒的含量.

在不同空气浓度中工作时叶片涂层脱落情况如表 2 所示.通过图 7 可知,叶片涂层受到沙粒冲蚀磨损规律如下:(1)叶片前缘和后缘涂层脱落量相对较大.(2)叶片压力面的涂层冲蚀量比吸力面的要大.并得出,叶片在沙粒含量为 53 mg/m³ 的空气中工作了大约 0.81 小时后,或者在沙粒含量为 200 μg/m³ 的空气中工作 228 小时后,局部部位涂层磨损严重,而被冲蚀掉的涂层质量为涂层总质量的 1.9%,说明大部分涂层仍然完好.

本文对受沙粒冲蚀磨损下叶片涂层损伤的演化规律进行了计算并对叶片涂层寿命进行了预测.可以看出,本文提出的利用 SPH 方法和有限元混合建模,并通过模拟多个固体粒子连续冲蚀过程得到涂料冲蚀性能参数,最终获得叶片涂层冲蚀磨损过程的数值方法,通过实验数据对计算结果进行修正后,可用来模拟部件的冲蚀磨损过程并预测部件使用寿命.

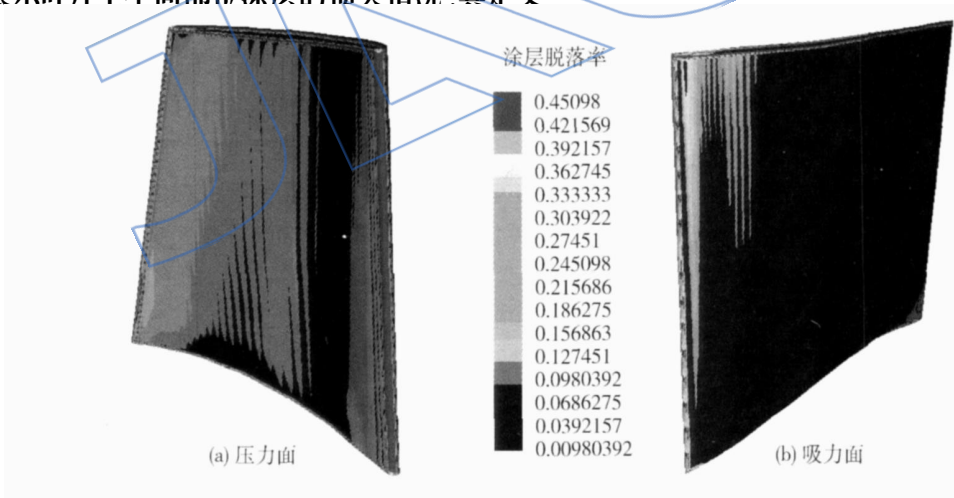


图 7 6×10^6 粒子冲蚀后涂层冲蚀率云图

Fig. 7 Change of blade Surface by 6 million particles impact

表 2 冲蚀沙粒质量同涂层损失量表

Table 2 Coating mass loss rate with mass of solid particle

工作时间/h	沙粒密度 53 mg/m ³	0.002	0.03	0.2	0.27	0.54	0.81
	沙粒密度 200 μg/m ³	0.46	9.1	46	76	152	228
沙粒质量/g		0.109 6	2.192	11	18.3	36.52	54.78
压力面涂层质量损失/10 ⁻⁴ g		1.37	24.3	97.5	133	161	162
吸力面涂层质量损失/10 ⁻⁴ g		0.67	10.7	39.5	50	60	60
涂层损失质量占涂层总质量百分比/%		0.018	0.31	1.2	1.6	1.9	1.9

3 结 论

在已有研究的基础上,本文将流场数据和材料冲蚀模拟结合起来对发动机零/部件冲蚀磨损寿命进行预测:既考虑了流场中冲蚀粒子的飞行轨迹,又采用数值方法获得了材料的冲蚀性能,从而使得该方法能方便应用于零/部件冲蚀磨损寿命的预测,并可较为真实的模拟了叶片的冲蚀过程.这也使得该方法可用于冲蚀理论的验证.

叶片冲蚀磨损的研究还处于起步阶段,还有很多工作需要进行,如建立冲蚀磨损试验台,开展材料冲蚀磨损理论方面的研究,研究多个粒子冲蚀磨损造成的损伤耦合和叠加,考虑沙粒大小、形状对冲蚀磨损的影响,考虑环境温度对冲蚀磨损的影响以及获得高应变率下材料的动态性能数据等.

致谢:非常感谢 ESI Group 中国公司对本文工作的软件支持!

参考文献:

[1] 孙家枢. 金属的磨损[M]. 北京:冶金工业出版社,1992.

[2] 鲁家华,凌志光. 燃气透平叶片冲蚀的数值模拟与试验研究的发展[J]. 能源技术,2001,22(2):47-52.

LU Jiahua, LING Zhiguang. The development of numerical simulation and experimental research in blade erosion of gas turbine[J]. Energy Technology, 2001, 22(2):47-52.

[3] Woytowitza P J, Tichman R H. Modeling of damage from multiple impacts by spherical particles [J]. Wear, 1999, 223-235:120-133.

[4] 闫晓军,张玉珠,聂景旭. 空间碎片超高速碰撞数值模拟的 SPH 方法[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(3):351-354.

YAN Xiaojun, ZHANG Yuzhu, NIE Jingxu. Numerical simulation of space debris hypervelocity impact using SPH method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(3):351-354.

[5] 邓瑛,闫晓军. 固体颗粒冲蚀下叶片涂层损伤的 SPH 方法模拟[C] //中国航空学会动力分会发动机结构强度与振动专业委员会第十二届学术会议文集. 成都:中国航空学会动力专业分会,2004:148-152.

[6] 何奖爱,王玉玮. 材料磨损与耐磨材料[M]. 沈阳:东北大学出版社,2001.