

中国核科学技术进展报告

（第五卷）

——中国核学会2017年学术年会论文集

第 10 册

- ▲ 核测试与分析分卷
- ▲ 核安全分卷

中国原子能出版社

中国核科学技术进展报告

(第五卷)

——中国核学会 2017 年学术年会论文集

第 10 册

核测试与分析分卷

核安全分卷



中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国核科学技术进展报告. 第五卷, 中国核学会 2017
年学术年会论文集. 第 10 册, 核测试与分析、核安全 /
中国核学会主编. — 北京 : 中国原子能出版社, 2018. 4
ISBN 978-7-5022-8809-9

I. ①中… II. ①中… III. ①核技术—技术发展—研
究报告—中国 IV. ①TL—12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 016051 号

内 容 简 介

中国核学会 2017 学术双年会于 2017 年 10 月 16—18 日在山东省威海市召开。会议主题为“安全、绿色、和谐、发展”。大会共征集论文 1 400 篇, 经过专家审稿, 评选出 701 篇较高水平论文收录进《中国核科学技术进展报告(第五卷)》, 报告共分为 10 册, 并按 26 个二级学科设立分卷。

本分册为核测试与分析和核安全分卷。

中国核科学技术进展报告(第五卷) 第 10 册

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
策划编辑 付 真
责任编辑 付 凯
特约编辑 刘思岩
装帧设计 赵 杰
责任校对 冯莲凤
责任印制 潘玉玲
印 刷 保定市中画美凯印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 890 mm×1240 mm 1/16
印 张 38 字 数 1154 千字
版 次 2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-8809-9 定 价 120.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

中国核学会 2017 年 学术年会大会组织机构

大会名誉主席 王寿君

大会主席 顾 军

执行主席 李冠兴

大会副主席 (按姓氏笔画排序)

王 森 刘永德 孙汉虹 余剑锋 张延克 张维岩
祖 斌 贺 禹 赵 军 康克军 詹文龙 雷增光

高级顾问 丁中智 马栩泉 王乃彦 王大中 张国宝

杜祥琬 陈佳洱 胡思得 钱绍钧 穆占英

学术委员会

主 任 李冠兴

副主任 叶奇蓁 邱爱慈 陈念念 赵志祥 程建平

成 员 (按姓氏笔画排序)

王贻芳 卢文跃 叶国安 司胜义 田佳树 华跃进
张永学 张志俭 张志忠 张金带 李建刚 杨华庭
陈炳德 陈森玉 罗志福 罗顺忠 姜 宏 赵宏卫
赵振堂 唐传祥 柴国早 彭先觉 曾毅君 樊明武
潘传红 潘自强

组委会

主 任 雷增光

常务副主任 于鉴夫

副 主 任 王 志 庄火林

委 员 (按姓氏笔画排序)

丁有钱 马文军 王丽瑶 王国宝 石金水 帅茂兵
朱科军 刘 伟 刘亚强 孙 晔 李景烨 苏艳茹
张 建 张 勇 杨海峰 陈东风 陈怀璧 陈 伟
胡绍全 郑卫芳 段旭如 郝朝斌 黄 伟 彭太平
解新芳 魏素花

秘书处

主 任 秦昭曼

副主任 徐若珊 张 玮 黄海英

成 员 (按姓氏笔画排序)

于清妍 王 宇 王 凯 叶 琦 龙 云 刘世伟
孙俊燕 张宝珠 李 钢 李小禹 李 静 沈 莹
杨 爽 苏明煜 杜婷婷 陈 旭 陈晓鹏 胡 静
耿庆云 秦子淇

主办单位 中国核学会

承办单位 中国核工业建设集团公司

协办单位 中国核工业集团公司 国家电力投资集团公司
国家核电技术公司 中国广核集团有限公司
清华大学 中国工程物理研究院
中国科学院 中国华能集团公司
中国大唐集团公司

技术支持单位 各专业分会及省级核学会、哈尔滨工业大学(威海校区)

专 业 分 会 铀矿地质分会、铀矿冶分会、核能动力分会、核材料分会、同位素分离分会、核化学与放射化学分会、辐射防护分会、核化工分会、核物理分会、计算物理分会、粒子加速器分会、核电子学与核探测技术分会、脉冲功率技术及其应用分会、核聚变与等离子体分会、辐射物理分会、辐射研究与应用分会、同位素分会、核农学分会、核医学分会、核技术工业应用分会、核情报分会、核技术经济与管理分会、核测试与分析分会、核安全分会、核工程力学分会、铀系物理与化学分会

省级核学会 北京市核学会、湖南省核学会、江西省核学会、广东省核学会、四川省核学会、浙江省核学会、湖北省核学会、福建省核学会、黑龙江省核学会、陕西省核学会、辽宁省核学会、甘肃省核学会、山西省核学会、吉林省核学会、新疆自治区核学会、安徽省核学会、河南省核学会、江苏省核学会、上海市核学会、天津市核学会、贵州省核学会、山东省核学会

中国核科学技术进展报告

(第五卷)

总编委会

主任 李冠兴

副主任 叶奇蓁 邱爱慈 陈念念 赵志祥 程建平

委员 (按姓氏笔画排序)

王贻芳	卢文跃	叶国安	司胜义	田佳树
华跃进	张永学	张志俭	张志忠	张金带
李建刚	杨华庭	陈炳德	陈森玉	罗志福
罗顺忠	姜宏	赵红卫	赵振堂	唐传祥
柴国旱	彭先觉	曾毅君	樊明武	潘传红
潘自强				

编委会办公室

主任 于鉴夫 潘启龙

副主任 王志 李涛 秦昭曼 谭俊

成员 (按姓氏笔画排序)

王丹	王朋	王笑	左浚茹	付凯
付真	李新邦	刘岩	孙凤春	宋翔宇
朱彦彦	肖萍	张关铭	张书玉	张宝珠
赵志军	赵明	胡晓彤	秦子淇	徐若珊
韩霞	蒋焱兰			

核测试与分析分卷

编委会

主任 彭述明

副主任 龚建

委员 (按姓氏笔画排序)

马文军	王学武	叶国安	安竹	杨华庭
沈兴海	郝樊华	彭太平	黑东炜	滕君锐

核安全分卷

编委会

主任 刘华

副主任 柴国早 赵华 陈炳德 张作义

委员 (按姓氏笔画排序)

马豪	王晓玲	牛文华	史强	孙金龙
刘天舒	刘新华	刘福东	李春	李思凡
李肇华	杨堤	杨志超	初起宝	张玮
张巧娥	依岩	周志伟	郑艳华	赵树峰
顾志杰	郭建兵	郭秋菊	陶书生	童节娟
曾志	简斌			

前 言

《中国核科学技术进展报告(第五卷)》是中国核学会 2017 学术双年会优秀论文结集。

2015 年以来,中国核科学技术领域亮点频出,喜讯不断:中国三代压水堆核电“华龙一号”全球首堆示范工程穹顶吊装圆满完成;全球首条高温气冷堆燃料元件生产线投料生产;北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII)建成;大亚湾实验测得最精确的反应堆中微子能谱;国际热核聚变实验堆超热负荷第一壁原型件率先通过国际权威机构认证;国际首座微堆低浓化成功实施;用于激光核物理研究的 OPCPA 超高峰值功率激光系统处于国际同类装置领先水平;玲龙一号(ACP100)模块式小型堆全球首个通过 IAEA 安全审查;中国先进大型铀纯化转化生产线建成投产;自主化核级数字化仪控系统平台“和睦系统”研制成功与规模化应用……

以上所取得的成绩首先得益于中国共产党的坚强领导。习近平总书记 2015 年对核工业创建六十周年重要批示指出,“要坚持安全发展、创新发展、坚持和平利用核能,全面提升核工业的核心竞争力,续写我国核工业新的辉煌篇章。”总书记的重要批示确立了核工业发展新的指导思想,开启了核工业发展的新时代。其次,得益于成千上万中国核科技工作者顽强拼搏、锐意进取、不畏挫折、无私忘我的工作精神,正是广大核科技工作者勇于登攀、勇于创新,才攻克了一个又一个科技难关,不断推动中国核科技事业蓬勃发展,推动核行业向前进步。

中国核学会 2017 学术双年会于 2017 年 10 月 16—18 日在山东省威海市召开,由中国核工业建设集团公司承办。会议主题为“安全、绿色、和谐、发展”。学术年会报告分为大会报告、分会场口头报告和张贴报告;同期举办核医学科普讲座、“高温气冷堆与四代核能”高端论坛、青年论坛、妇女论坛等多层次的专题论坛。年会发布了中国核学会“2015—2017 年度中国十大核科技进展”和《宣传绿色核能 建设美丽中国——科普行动宣言》;进行了优秀论文及团队贡献奖颁奖活动。来自核能动力、铀矿地质、核材料、核安全等 20 多个分会的 84 篇论文获得中国核学会 2017 年学术年会优秀论文奖。核工程类专业工程教育认证、核专利信息服务两个团队获得团队贡献奖。

大会共征集论文 1 400 篇,经过专家审稿,评选出 701 篇较高水平论文收录进《中国核科学技术进展报告(第五卷)》公开出版发行。《中国核科学技术进展报告(第五卷)》分

为 10 册,并按 26 个二级学科设立分卷。

《中国核科学技术进展报告(第五卷)》顺利结集、出版与发行,首先感谢中国核学会全体分支机构和 22 个省级(地方)核学会的鼎力相助;其次感谢总编委会和 26 个(二级学科)分卷编委会全体同仁的严谨作风和治学态度;再次感谢中国核学会秘书处和出版社工作人员,在文字编辑和校对过程中做出的具体贡献。

《中国核科学技术进展报告(第五卷)》编委会
2018 年 3 月 10 日

核测试与分析
Nuclear Measurement and
Analysis Society

球形燃料元件磨损测试装置的 DEM 数值模拟研究

李自强,刘马林,刘小雪,张凯红,赵宏生

(清华大学核能与新能源技术研究院,北京 100084)

摘要:在高温堆运行的过程中,燃料元件不可避免地发生摩擦、碰撞而产生损耗。因此,研究球形燃料元件的摩擦磨损行为具有重要意义。本文采用 DEM 数值模拟方法对测量球形燃料元件磨损性能的装置进行模拟分析,为该装置装球量、转速等工艺参数的优化提供指导。

关键词:高温气冷堆;球形燃料元件;磨损测试;离散元方法模拟分析

第四代核能系统在安全性、核燃料利用率和防止核扩散方面提出了更高的要求,其中基于模块式设计的高温气冷堆被认为是最有希望满足第四代核能系统的堆型之一。根据燃料元件的形状不同,高温气冷堆分为球床式高温气冷堆和棱柱状高温气冷堆。球床式高温气冷堆相对于棱柱状高温气冷堆的优势之一是可采用不停堆换料和燃料多次循环再利用^[1]。

在整个高温堆燃料元件循环过程中,燃料元件不可避免地发生摩擦、碰撞而产生损耗。因此,对于球床式高温气冷堆在运行过程中球形燃料元件磨损行为的研究具有重要意义^[2]。

1 燃料元件运动分析

在 10 MW 高温气冷堆运行过程中,堆芯内燃料球绝大部分时间均处于静止状态,在堆芯内部的球流运动属于重力驱动下的缓慢颗粒流。缓慢的稠密流,由于多体间的相互作用,使运动具有随机性、间歇性,且在宏观上表现出流动的不连续性,每个球的运动经历静止—运动—再静止的过程。燃料元件的运动主要表现为在燃料元件装卸系统的管道中的运动以及在堆芯内部的流动。在堆运行过程中,球与球之间、球与管道及设备之间不可避免的出现碰撞和摩擦现象。因此,这种摩擦主要表现为石墨与不锈钢、石墨与石墨之间的摩擦^[3]。

球形燃料元件由包覆燃料颗粒弥散在基体石墨中制成直径约 50 mm 的燃料区,再在燃料区外面均匀地包裹一层约 5 mm 厚的基体石墨外壳(即无燃料区)。由于摩擦发生在燃料元件表面,且元件表面是石墨材料,所以,可认为球形燃料元件的摩擦行为主要由元件表面基体石墨的摩擦行为决定^[4,5]。本文以 10 MW 高温气冷堆用球形燃料元件相同的原料及相同工艺制造的基体石墨球为对象表征燃料元件磨损性能。

2 燃料元件磨损机理分析

在球流运动中,球和球之间可能会出现滑动和滚动两种情况。球与球之间出现碰撞和摩擦现象是以切削作用为主的磨料磨损。影响燃料球磨损率的直接原因为碰撞过程中石墨材料表面之间的作用力。这种情况下磨料磨损的主要机理为微观切削磨损及微观断裂磨损。

在上述分析的基础上,从陈志鹏等人的 SEM 实验可以得到以下结论:通过对燃料元件基体石墨球磨损后的形貌观察表明,大部分磨损划痕均较浅,且相比磨损前的表面形貌磨损表面未出现大量新的凹坑,划痕集中的区域在高倍放大条件下反而呈现出更加均匀光滑的形貌。磨损后的形貌说明在

作者简介:李自强(1976—),男,北京人,工程师,从事核材料研究

基金项目:国家重大科技专项基金资助项目(ZX06901)

实验条件下燃料元件基体石墨球的磨损属于磨料磨损,摩擦表面未发生明显的黏着和塑性变形,这与前文对于堆内燃料球之间磨损机理的分析结果相一致^[6-8]。在磨料磨损中,磨损量由公式表示为^[9]:

$$\text{磨损量} = \frac{W}{H_v} AL \quad (1)$$

式中, W ——载荷; H_v ——表面的硬度; A ——沟槽的截面积; L ——长度。

$$\text{磨损率} = \frac{W}{H_v} AV \quad (2)$$

式中, V ——速度。

3 燃料元件磨损检测装置

10 MW 高温气冷堆燃料元件在堆芯平均停留时间 1 115.9 天^[10],若正常的工作状况水平下对其进行可靠性验证,要耗费很长的试验时间。而燃料元件输送过程中,单个燃料元件循环过程总耗时仅 9.8 s^[11]。尽管不锈钢管对燃料球与石墨材料之间的磨损相比具有较高的磨损率^[12,13],但与堆内球流运动相比时间太短,磨损量太小,忽略了球与管道之间的磨损因素。

在高温堆燃料球形元件行业领域内,采用卧式磨损筒装置加速验证验证试验方法检测元件磨损性能^[14]。高温堆燃料元件磨损测试装置(图 1)由滚筒、电机、计时装置和控制器、防尘罩、减震架等组成^[15,16]。该装置的筒体内部光滑,筒壁中的石墨球之间的摩擦模拟燃料球之间碰撞的摩擦。筒体内壁镶嵌有一肋板结构,肋板平行轴向方向,其长度与筒体内壁长度相等。增加肋板结构的目的在于促进基体石墨球之间在滚筒内进行充分摩擦,提升石墨球自转速度。在磨损测试装置转动过程中,石墨球受力情况是随时间变化而变化的。

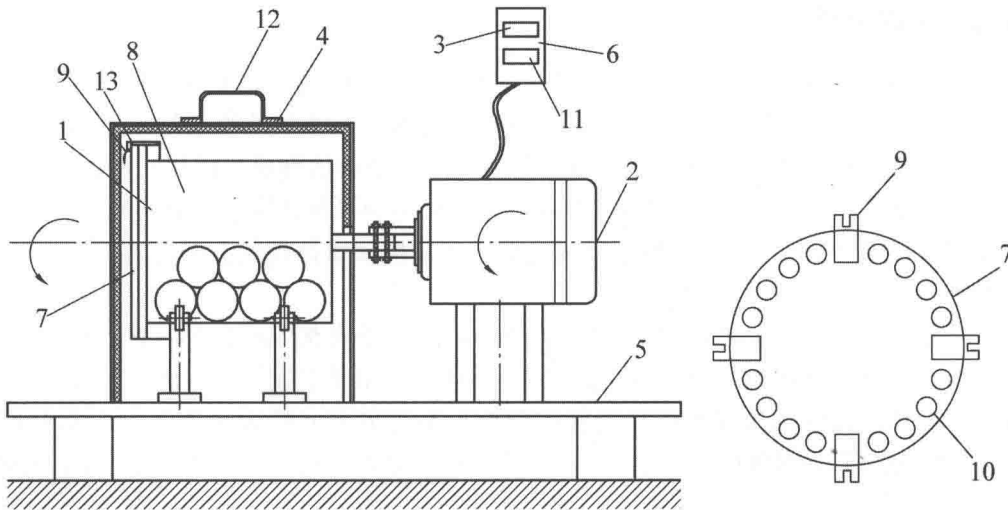


图 1 高温堆燃料元件磨损测试装置

1—滚筒;2—电机;3—计时装置;4—防尘罩;5—减震架;6—控制器;7—筒盖;8—筒体;
9—装卸扳手;10—排尘孔;11—显示装置;12—防尘罩提手;13—锁扣

4 磨损装置模拟计算模型

在高温堆燃料元件磨损测试过程中,元件与元件及元件与磨损筒内壁间力的作用无法精确测量,而实验研究方法周期长,成本高。随着计算机技术快速发展,采用数值模拟方法可以快速、低成本的建立模型进行模拟^[17,18]。离散元方法(DEM, Discrete Element Method)是用于求解分离复杂离散系统的运动规律与力学特性的一种新型数值方法。它的主要原理是将研究对象划分成很多独立的单元,利用单元间接触模型和牛顿第二定律,根据每个时刻单元间的相互接触模型计算接触力以及其他的运动参数,从而得到每个时间步长所有单元的受力和运动参数。再根据每个单元的微观运动即可得

到整个宏观体系的运动规律。该方法的核心是相互接触模型,本文采用 DEM 软件来实现数值模拟,采用的 Hertz-Mindlin 接触模型。在 H-M 接触模型中,法向力 F_n 是法向重叠量 δ_n 的函数,可由如下公式求得:

$$F_n = \frac{4}{3}E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

式中: E^* , R^* 分别为等效弹性模量和等效接触半径,且有:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1 - v_i^2)}{E_i} + \frac{(1 - v_j^2)}{E_j} \quad (4)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \quad (5)$$

式中: E_i 、 v_i 、 R_i 和 E_j 、 v_j 、 R_j 分别是接触颗粒的杨氏模量、泊松比和半径。

而切向力 F_t 则取决于切向重叠量 δ_t 和切向刚度 S_t , 由下式可得:

$$F_t = -S_t \delta_t \quad (6)$$

其中,

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^*} \delta_n \quad (7)$$

$$\frac{1}{G^*} = \frac{1 - v_i}{G_i} + \frac{1 - v_j}{G_j} \quad (8)$$

式中: G^* 为等效剪切模量, G_i 、 G_j 为接触颗粒的剪切模量。

此外,法向和切向的阻尼力则可分别表达为:

$$F_n^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_n m^*} v_n^{\text{rel}} \quad (9)$$

$$F_t^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_t m^*} v_t^{\text{rel}} \quad (10)$$

式中: β 、 S_n 、 m^* 分别为阻尼比、法向刚度和等效质量, v_n^{rel} 、 v_t^{rel} 分别为法向和切向相对速度, 分别表示为:

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \quad (11)$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^*} \delta_n \quad (12)$$

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \quad (13)$$

另外切向力受库仑摩擦 $\mu_s F_n$ 限制, 其中 μ_s 是静摩擦系数。还需要考虑滚动摩擦, 它通过在接触表面施加一个力矩来考虑。 $\tau_i = -\mu_r F_n R_i \omega_i$, 其中 μ_r 是滚动摩擦系数, R_i 是接触到质心的距离, ω_i 是物体在接触点处单位角速度矢量。对于任一颗粒在颗粒体系中所受的力和力矩即为以上力和相应力矩的总和, 分别用于计算颗粒的平动和转动加速度。

基于上述实验装置分析, 采用的转鼓几何结构如图 2 所示。

对于燃料元件磨损测试而言, 在磨损装置和颗粒物性确定后, 影响磨损最主要的参数是参与磨损的元件数量和磨损装置的转速两个物理量。离散单元法的仿真结果可以为摸清磨损装置本身的最佳工作条件提供理论指导。本模拟中颗粒物性如弹性模量等均采用文献推荐值, 其他具体模拟参数如表 1 所示。

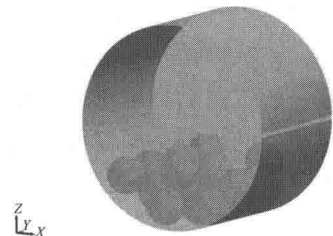


图 2 转鼓几何结构

表 1 模拟参数

参数	数值
颗粒直径	60 mm
颗粒密度	1.72 g/cm ³
颗粒数量	(16~24) 个
转鼓速度	(10~150) r/min
转鼓尺寸	φ230 mm×220 mm

5 模拟结果与分析

5.1 磨损装置转速的影响

模拟分析了在高温堆燃料元件磨损测试过程中,在装填元件数量相同的情况下,磨损装置不同的转速对元件角速度的影响。对磨损装置的转速为 10~150 r/min 的转速范围进行分析,图 3 为磨损装置不同转速下的元件平均角速度,对该数据进行局部多项式曲线拟合,得到拟合式(14)。

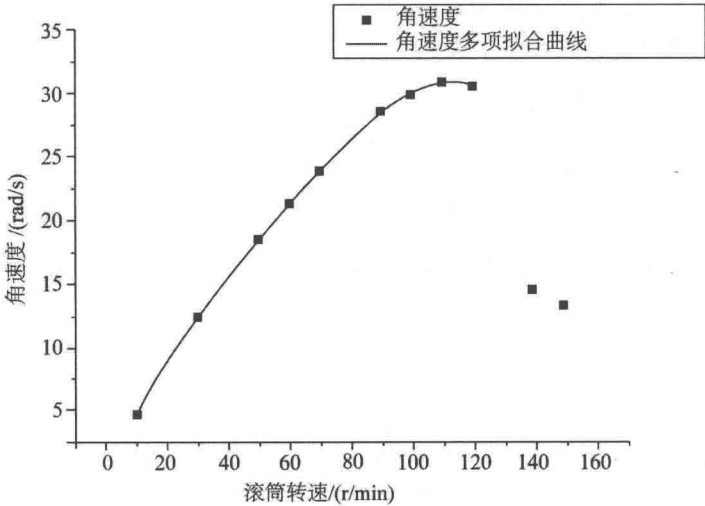


图 3 磨损装置不同转速下的元件平均角速度

$$y = -3 \times 10^{-07} x^4 + 6 \times 10^{-05} x^3 - 0.0059 x^2 + 0.551x - 0.2663 \tag{14}$$

如图 3 及多项式拟合方程(14)所示,开始时颗粒转动角速度随着磨损装置转速增加时线性增加,当磨损装置转速在 100~120 r/min 时,获得的元件平均角速度较大,而转速大于 120 r/min 时,元件平均角速度明显下降。

5.2 填装元件数量的影响

模拟分析了在高温堆燃料元件磨损测试过程中,在磨损装置转速不变的情况下,装填的元件数量对元件角速度的影响。假设分别装入 16、18、20、22、24 个元件进行分析,图 4 为不同数量燃料元件的平均角速度数据,并对该数据进行多项式曲线拟合,分别得到如下所示拟合方程(15)。

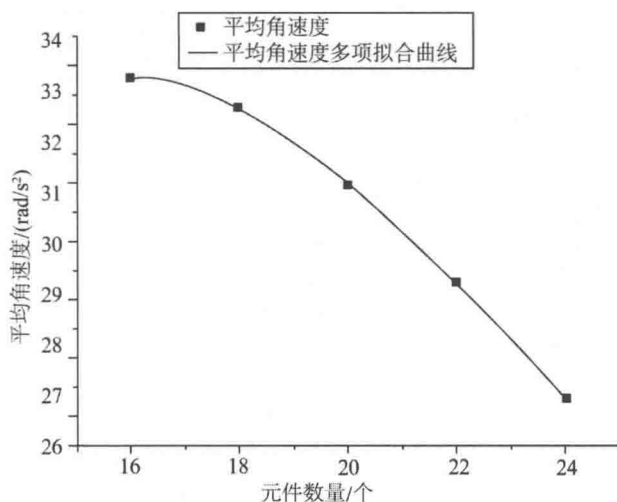


图4 不同数量元件的平均角速度拟合曲线图

$$y = -0.0014x^4 + 0.1168x^3 - 3.737x^2 + 52.633x - 240.07 \quad (15)$$

图5为不同数量燃料元件的角速度之和数据,并对该数据进行多项式曲线拟合,分别得到如下所示拟合方程(16)。

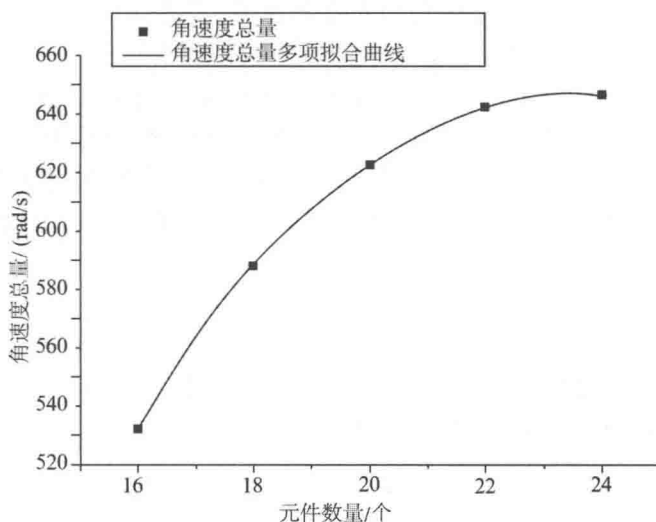


图5 不同数量燃料元件角速度之和拟合曲线图

$$y = -0.0213x^4 + 1.7562x^3 - 56.127x^2 + 831.06x - 4197.6 \quad (16)$$

如图4、图5及所拟合的多项式方程所示,随着元件数量的增加,燃料元件平均角速度在单调递减;而随着元件数量的增加,燃料元件角速度之和却呈现增加趋势。

图6是对图5不同数量燃料元件的角速度之和所拟合的多项式方程进行求导,得到不同数量燃料元件的总角加速度数据,对该数据进行多项式曲线拟合,得到如下所示拟合方程(17)。

$$y = 0.0766x^3 - 4.5214x^2 + 84.491x - 479.83 \quad (17)$$

如图6及所拟合的多项式方程(17)所示,随着元件数量的增加,元件平均角加速度越来越小。当元件数量达到24个时,角加速度增量最小。

6 结论

在高温堆燃料元件磨损测试过程中,元件的磨损量与划痕长度成正比,而磨损率与磨损速度成正比。模拟研究了参与磨损的元件数量和磨损装置的转速对元件角速度的影响,并进行理论分析,同时基于模拟结果得出了磨损装置提高元件角速为需要进一步重点关注的方向。通过上述分析,可以得

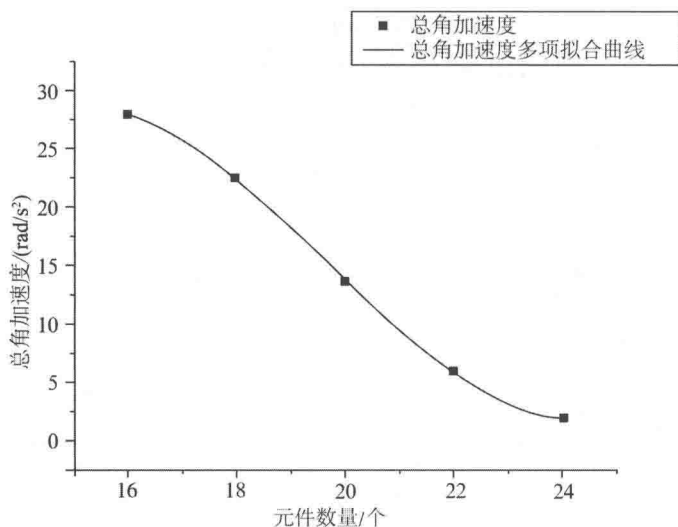


图6 不同数量燃料元件的总角加速度拟合曲线

出结论:

(1) 在高温堆燃料元件磨损测试过程中,在装填元件数量相同的情况下,当磨损装置转速由10~150 r/min逐渐增加时,元件平均角速度值先逐渐递增,当磨损装置转速在100~120 r/min时,获得较大的元件平均角速度和元件角速度之和,而后开始明显下降;

(2) 在磨损装置转速不变的情况下,装填不同数量的元件可以影响元件角速度的大小,随着元件数量从16~24个逐渐地增加,元件平均角速度单调递减;而燃料元件角速度之和却在增加;而角加速度增量逐渐变小;当元件数量达到24个时,燃料元件角速度之和最大,加速度增量最小。

以上结论可以看出离散单元法数值模拟可以为探索和优化球形燃料元件磨损装置本身的操作参数提供改进建议。

致谢

感谢国家重大科技专项对本工作的大力支持。本项研究得到清华大学核能技术研究院新材料研究室包覆组和性能组同志的大力协助,谨致衷心感谢。

参考文献:

- [1] 卢银娟, 杨宇, 石侠民. 球床模块式高温气冷堆的研究及发展现状[J]. 核电站, 2002, 11: 1-8.
- [2] 雒晓卫, 于溯源, 盛选禹, 等. IG-11 石墨在不同气氛中的磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25: 173-177.
- [3] 雒晓卫, 于溯源, 盛选禹, 等. 温度对 10 MW 高温气冷堆用石墨摩擦性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2004, 24: 402-405.
- [4] Taozhu S X L J W, Sheng L. Static Friction Coefficient of Graphite metal Friction Couples [J]. Lubrication Engineering, 1999, 3: 005.
- [5] 雒晓卫, 于溯源. 三种反应堆用石墨摩擦性能比较[J]. 高技术通讯, 2001, 11 (5): 97-100.
- [6] H. Zaidi, D. Paulmier, and J. Lepage. The influence of the environment on the friction and wear of graphitic carbons II. gas coverage of wear debris[J]. Applied Surface Science, 1990, 44: 221-233.
- [7] D Paulmier and H zaida. The friction coefficient of hydrogenated surfaces of polycrystalline graphite[J]. Vacuum, 1990, 41 (4-6): 1314-1316.
- [8] 辛礼兵. 磨损机理的研究与探讨[J]. 安徽职业技术学院学报, 2006, 5 (4): 11-14.
- [9] T. S. Eyre. 磨损机理[M]. 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House.
- [10] 唐春和. HTR-10 燃料元件的制造和发展趋势[J]. 核标准计量与质量, 2006, 3: 001.
- [11] 曾凯, 沈鹏, 都东, 等. 球床堆燃料元件循环系统任务剖面的建立[J]. 核动力工程, 2011, 32 (4): 10-13.

- [12] 周湘文, 易子龙, 卢振明, 等. 球床式高温气冷堆堆内的石墨材料[J]. 炭素技术, 2012, 31 (006): 9-13.
- [13] 陈志鹏, 雒晓卫, 于溯源. 输送速度对高温气冷堆燃料装卸系统提升段石墨球磨损性能的影响[J]. 原子能科学技术, 2012, 46 (S): 853-858.
- [14] 陈文华, 柴新, 潘骏, 等. Weibull 寿命型产品可靠性加速验证试验方法[J]. 浙江大学学报, 2001, 35: 5-8.
- [15] 李自强, 张凯红, 赵宏生, 等. 一种石墨球磨损设备及磨损速率测量方法[P]: 中国, ZL 2011 1 0159647. 5. 2013-06-12.
- [16] 钟文发, 经荣清, 罗经宇, 等. 高温气冷堆球床模拟研究[J]. 核科学与工程, 1993, 13 (2): 110-118.
- [17] 左华亮, 杨志军, 刘隆祉. UO₂ 燃料芯核振动分选机的模型仿真与分析[J]. 原子能科学技术, 2001 (2): 38-43.
- [18] 王福林, 尚家杰, 刘宏新, 等. DEM 颗粒体仿真技术在排种机构研究上的应用[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44 (2): 110-114.

DEM Numerical Simulation of Wear Testing Equipment for HTR Spherical Fuel Elements

LI Zi-qiang, LIU Ma-lin, LIU Xiao-xue, ZHANG Kai-hong, ZHAO Hong-sheng
(Institute of Nuclear and New Energy Technology of Tsinghua University, Beijing, China, 100084)

Abstract: In the process of HTR operation, fuel elements are inevitably worn because of friction and collision. Therefore, the study of friction and wear behavior of spherical fuel elements is significant. In this paper, both of the instrument and method for spherical fuel element wear behavior measurement were studied. In this paper, the DEM numerical simulation method was used to simulation and analyses the measuring wear properties of spherical fuel elements plant, which is very important for optimization of measurement parameters and recommended rotation velocity and Filling quantity of fuel elements numbers.

Key words: high temperature gas-cooled reactor; fuel elements; wear testing; DEM simulation