

固体火箭发动机装药结构完整性分析的基础问题及研究展望

固体火箭发动机(Solid Rocket Motor, SRM)主要由固体推进剂制成的药柱、燃烧室、喷管(含推力方向控制装置)和安全点火装置四大部分组成,由于SRM具有结构简单、便于装载,而且适于长期贮存等优点,已成为战略和战术导弹武器系统的主要动力装置和核心部件。因此,分析全寿命周期内(生产、贮存、运输、弹射、点火发射等)不同使役载荷下SRM的结构完整性,对于确保武器装备的使用可靠性和安全性具有重要意义,也是进行武器装备贮存延寿的基础性工作。

1. SRM装药结构完整性分析的基本内涵

针对SRM装药结构完整性分析,从工程的角度出发,其核心问题是评估结构的完整性,确定SRM装药结构在全寿命周期内不同使役载荷下的薄弱部位和相应的失效机制。由于固体推进剂药柱的力学响应更易受到外界载荷作用的影响,且通常属于低强度、低模量、对安全性要求较高的材料,因此,推进剂药柱一般是SRM装药结构最薄弱的部位,其变形破坏情况倍受关注。此外,发动机内部由外向内依次形成了壳体/绝热层、绝热层/衬层和衬层/推进剂3个粘接界面,粘接界面也是SRM装药结构的薄弱部位之一,需要关注其脱粘情况。综上,工程上SRM装药结构完整性分析是,保证在全寿命周期内不同使役载荷作用下,药柱内通道表面及其它部位不发生裂纹,药柱外表面及两端与衬层或绝热层界面不发生脱粘,药柱内表面及尾端不发生过大的变形而堵塞内通道或喷管,防止药柱发生自燃(陈汝训. 固体火箭发动机设计与研究(上)[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1991.)。

结合工程实际需求,SRM装药结构完整性分析的核心科学问题是,合理建立和验证评估装药结构失效或破坏的判据,即准确给出表达式的具体形式(式(1)),并通过有效手段检验该表达式在不同使役载荷工况下的有效性。

$$C_{\max} \leq [C] \quad (1)$$

式中, C_{\max} 为装药结构不同部位在使役载荷作用下发生变形时的最大应力/应变等表征力学响应特性的物理参量的最大值; $[C]$ 为装药结构不同部位在使役载荷作用下的承载极限。其中, $[C]$ 的数值多通过试验测试方法确定,而 C_{\max} 的数值一般利用试验测试和有限元数值计算相结合的方法确定。因此,为了利用式(1)准确评估SRM装药结构的完整性,主要涉及以下四个关键问题,相互之间的关系如图1所示:

(1)准确确定 $[C]$ 的数值。首先提取全寿命周期内推进剂药柱和粘接界面等装药结构薄弱部位承受的使役载荷谱,载荷主要分为单一载荷、叠加载荷和序贯载荷。其中,单一载荷以机械载荷为主,主要包括率/温载荷、压强载荷、力/热循环载荷和自重/加速度载荷。叠加载荷包括机械载荷之间的相互叠加以及机械载荷与长期贮存老化引发的化学作用之间的叠加。其次,分析推进剂药柱和粘接界面等装药结构薄弱部位在上述使役载荷谱作用下的失效机理,以该失效机理为基础,开展表征薄弱部位受力状态和失效特征的材料级和结构件级模拟试验;

(2)提高式(1)的合理性和准确性。根据装药结构薄弱部位的模拟试验获得的力学响应变化规律,以国家和行业标准为基础,分别确定表征推进剂药柱和粘接界面等典型薄弱部位在不同使役载荷作用下承载极限的物理

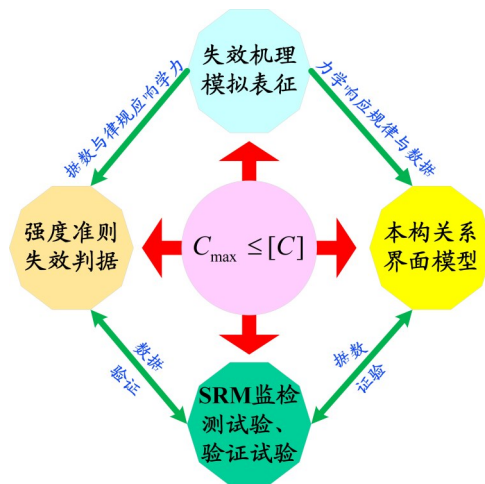


图1 SRM装药结构完整性评估的基础问题及相互关系

参量 $[C]$ 及其数值,例如最大抗拉强度、最大伸长率等。再以推进剂药柱和粘接界面的粘弹性特性、率温相关特性等力学特性为基础,综合物理参量 $[C]$ 在不同使役载荷作用下的变化规律,选用合适的理论建立相应的强度准则和失效判据。其中,所建准则和判据应能有效反映全寿命周期内不同使役载荷类型的影响,例如可通过耦合老化模型的方法以描述长期贮存引发的化学作用;

(3)准确计算得到 C_{max} 的数值。在连续介质力学框架下分别选用与固体推进剂和粘接界面材料(绝热层和衬层)的力学响应变化规律相匹配的本构理论,以及与壳体/绝热层、绝热层/衬层和衬层/推进剂三界面的力学响应变化规律相匹配的界面模型理论,通过公式推导、模型参数确定和有限元数值离散等过程完成相应本构关系的建立和数值计算应用;

(4)准确测定 C_{max} 的数值。搭建相应的试验系统,包括试验平台设计、载荷施加方式和传感器选取及布局等;同时,试验系统可以用于检验式(1)所述装药结构失效或破坏的判据的有效性,也可在材料级和结构件级试验验证的基础上,进一步利用缩比SRM(或装药结构试验器)、全尺寸SRM的试验以验证所建固体推进剂和粘接界面材料的本构关系以及粘接界面模型的有效性。

2. SRM装药结构完整性分析的研究展望

2.1 失效机理、模拟表征的研究展望

目前,针对固体推进剂药柱和装药结构粘接界面的基本失效模式和典型失效机理,国内外研究者通过开展大量的研究已形成了一些共识性的结论,例如推进剂内部固体填充颗粒与基体粘接界面发生的“脱湿”损伤、固体填充颗粒的断裂和基体撕裂,如图2所示(《固体火箭技术》,2019,42(1):72-77),装药粘接界面发生的内聚破坏、界面破坏和混合破坏,如图3所示(《宇航学报》,2023,44(4):566-579),以及长期贮存时推进剂内部基体黏合剂网络结构发生的氧化交联、降解断链,粘接界面发生的组分迁移等(《固体火箭技术》,2022,45(2):229-236)。但有关率温压、应力/应变状态等因素对典型装药配方下损伤演化过程和损伤程度的影响规律认识还不统一,甚至部分结论存在相互矛盾之处,严重影响了对药柱和粘接界面失效机理的正确认识。今后可重点开展能反映多因素影响或叠加载荷作用的原位加载损伤监检测模拟表征试验系统的设计研制研究,通过动态实时获得加载过程中的结构损伤重构图像,以验证相关结论和研究方法的可靠性。

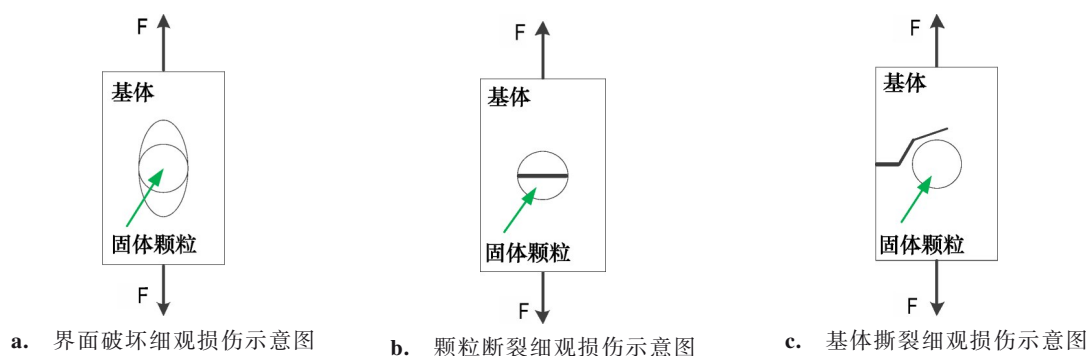


图2 复合固体推进剂的三种基本失效机理示意图

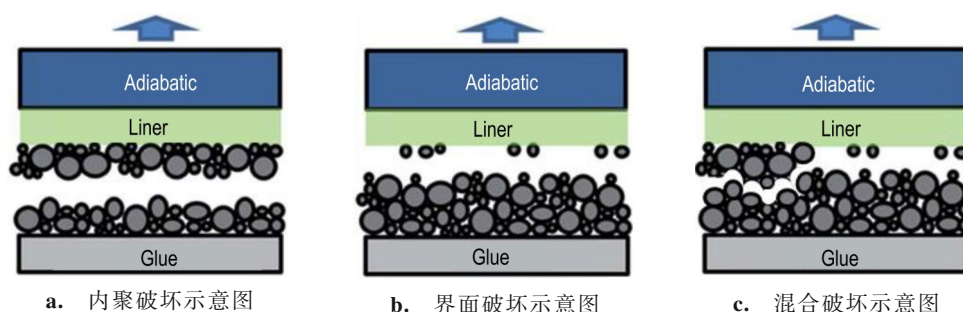


图3 SRM装药结构粘接界面的三种基本失效模式示意图

目前基于标准哑铃型固体推进剂试验件的松弛试验、圆柱型推进剂试验件的压缩试验、板条试验件的拉伸试验(*Iran Polym J*, 2016, 25(6): 515-524)以及标准矩形试验件的拉伸试验(含能材料, 2022, 30(11): 1090-1098)等模拟表征试验方法, 大多数仅能反映典型工况下典型装药结构的关键部位的力学响应状态, 而且通常以单一载荷工况的研究为主, 存在长贮力(机械载荷)-化(化学作用)耦合载荷和序贯载荷等复杂条件下模拟表征手段匮乏和模拟表征不充分的问题, 今后可借鉴其它粘弹性材料和粘接界面结构的性能测试方法以攻克上述难题。此外, 固体推进剂和粘接界面微CT观测试验(*推进技术*, 2022, 43(9): 210394; *Propell Explos Pyrot*, 2022, 47(10): e202200106), 拉剪、双轴拉伸、双轴压缩和围压等载荷下固体推进剂的力学性能试验, 如图4a~4b所示(*Propell Explos Pyrot*, 2022, 47(5): e202100267; *Polym Test*, 2023, 119: 107922; *Def Technol*, 2021, 17(5): 1764-1774)以及改变预置裂纹长度和加载角度的矩形试验件的拉伸试验, 如图4c所示(*兵工学报*, 2020, 41(11): 2234-2242)等模拟表征试验方法属于新设计的非标试验, 突破了GJB 770B-2005标准、JANNAF标准和QJ 2328A-2005标准等的规定范围, 亟需通过专家会评等方式对上述试验进行有效性考核和验证, 检验与装药结构力学响应的相关性、一致性, 包括试验件的优化指标是否合理、力学性能参数的确定方法是否可行等, 从而形成指导性的标准规范。

2.2 强度准则和失效判据的研究展望

固体推进剂药柱和装药结构粘接界面的失效破坏, 是其细观结构内部损伤出现并不断累积直至宏观裂纹形成和扩展的过程, 同时受到加工过程和前序加载历史等因素引起的初始损伤的影响。

针对固体推进剂和装药结构粘接界面的损伤判据研究现仍处于起步阶段, 以强洪夫课题组为代表的研究者虽通过使用图像处理和数据统计的方法给出了典型装药配方下的初始损伤数值(*推进技术*, 2022, 43(9): 210394), 并利用试验测试和数值计算相结合的方法分析了“脱湿”损伤的临界阈值、建立了相应的数学模型(*固体火箭技术*, 2020, 43(3): 265-270; *Propell Explos Pyrot*, 2022, 47(10): e202200079), 但确定初始损伤数值和损伤临界阈值等的

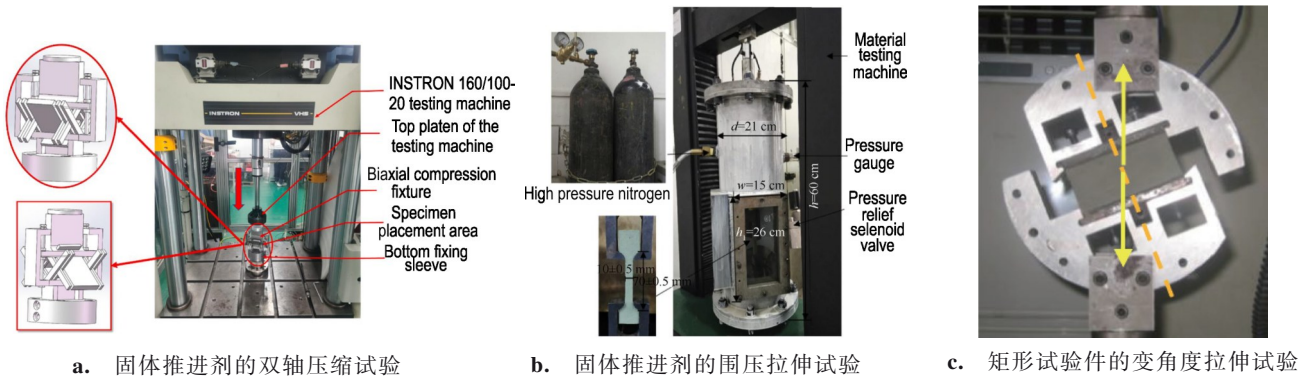


图4 固体推进剂和装药结构粘接界面的典型非标模拟表征试验装置图

方法存在区别,甚至受到测试参数遴选随机性的影响。今后可通过大幅增加试验数量以扩大数据范围,并综合应用大数据分析和数据驱动等方法给出更为精确的初始损伤数值和更为合理的失效判据表达式。

针对固体推进剂的强度准则研究,主要以单轴加载强度为主,并适当考虑了率温和贮存老化等因素的影响(含能材料,2019,27(4):274-281),同时在双轴强度准则、拉剪强度准则和围压加载下准则建立方面取得了突破,获得了如图5所示的典型强度极限包络(Def Technol,2018,14(S1):457-462;Def Technol,2022,18(4):618-625),今后可在修正完善现有双剪统一强度理论等的基础上进一步获得如图6所示的三维应力空间的强度极限包络面;其次,与强度极限相对应的伸长率的失效包络也长期局限于单轴加载(宇航学报,2021,42(12):1571-1578),今后可从失效理论层面开展重点研究,进而建立三轴加载下的伸长率失效判据,最终与建立的强度准则共同形成完整的判据体系。而目前针对装药结构粘接界面的强度准则研究,多参考QJ 2038.1A-2004等标准以粘接强度、断裂能为参量进行构建,并通过进行失效包络平移的方法分析率温等因素的影响(Polym Test,2022,115:107755),今后可开展SRM装药结构破坏极限试验以验证所建准则方法的有效性。此外,如何在强度准则和失效判据中考虑序贯载荷的作用也是今后重点关注的方向之一。

针对固体推进剂和装药结构粘接界面的断裂准则或判据研究,仍主要参考传统的K准则、J准则和COD准则等断裂理论和分析方法(火炸药学报,2023,46(7):561-588;Propell Explos Pyrot,2022,47(5):e202200046),是否能够完全反映粘弹性材料的断裂特点及率温相关的界面粘接特性,需开展进一步讨论,而利用弹性-粘弹性对应原理的思想将传统的断裂理论进一步拓展至粘弹性领域可能是一条重要的途径,国外的Schapery等研究者(Int J Fracture,1984,25:195-223)已进行了相关探索。

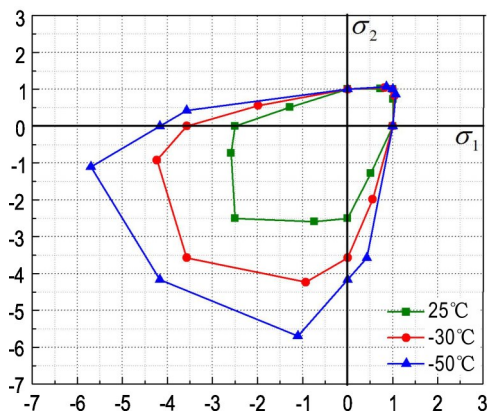


图5 固体推进剂的双轴强度主应力平面的极限包络线

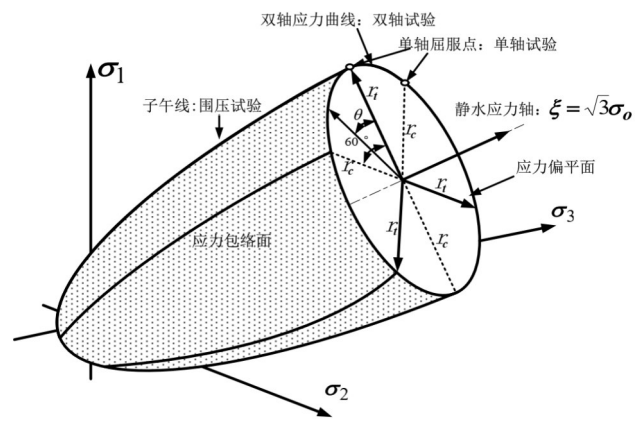


图6 三维应力空间下固体推进剂的强度极限包络面

2.3 本构关系和界面模型的研究展望

自20世纪六七十年代开始,针对固体推进剂的本构关系,以Swanson和Xu为代表的国内外研究者持续开展了大量研究,从宏观和细观角度分别建立了多个模型,实现了对推进剂力学响应由弹性到线粘弹性再到非线性特性的描述(含能材料,2016,24(4):403-416),并完成了所建本构关系在有限元数值计算中的应用。但随着SRM装药结构承受的外载荷水平的提升和载荷类型的多样化,以及装药结构复杂程度和装填比等的提高,给推进剂的本构关系研究和装药结构粘接界面模型研究带来了新的挑战,今后可重点关注以下几个方面:

(1) 高压强、高建压速率和高装填比耦合条件下固体推进剂的本构关系研究。上述条件使得推进剂的变形程度和损伤程度都大幅提高,呈现出更明显的几何非线性和材料非线性,需在现有的粘弹性、超弹性本构理论框架下进一步合理引入损伤演化函数,以反映压强、高应变率和大变形对推进剂宏观力学性能劣化的综合影响;

(2) 长贮蠕变条件下固体推进剂的本构关系研究。该条件下的本构关系形式与传统的松弛型粘弹性本构关系存在区别,因此,原有的本构关系构建方法、模型离散化和三维增量形式的推导方法等不再适用,需要针对推进剂的粘弹性蠕变变形曲线特性,遴选合适的本构理论框架,并引入反映应力水平、蠕变过程、老化作用影响的累积损伤函数,同时给出本构关系进行有限元数值计算的具体方法;

(3) 考虑泊松比的固体推进剂本构关系研究。随着变形程度增大,固体推进剂逐渐由近似不可压缩材料转变为可压缩材料,其泊松比发生明显下降,而泊松比的微小变化将会对点火建压等工况下推进剂药柱的变形仿真结果产生显著影响。因此,为提升应用本构关系开展数值仿真计算的精确性,可利用数字图像相关法(DIC)或体积膨胀法等方法建立经历不同贮存时间的固体推进剂在率温压不同载荷条件下泊松比随加载程度变化的数学模型,并引入到推进剂的本构关系中;

(4) 装药结构粘接界面的率温相关和老化相关界面模型研究。目前,一般使用内聚力模型(CZM)描述粘接界面变形时的损伤演化,但大量试验结果表明粘接界面的力学响应特性明显受到率温因素和老化时间的影响。因此,今后可在传统CZM的基础上通过直接与其它粘弹性本构模型、老化模型相耦合或将CZM参数表示为率温相关和老化相关函数的方式建立率温相关和老化相关的CZM,以提升固化降温、点火建压、长期贮存等载荷工况下装药结构粘接界面变形仿真结果的精度;

(5) 综合固体推进剂本构关系、装药结构粘接界面模型以及推进剂和装药结构的强度准则、失效判据,研发兼顾计算效率和精度的适用于SRM装药结构完整性分析的专属仿真计算平台,以突破目前商业有限元软件的局限。

2.4 SRM监检测试验的研究展望

SRM监检测试验在直接确定使役载荷工况下装药结构典型部位应力/应变数值,以及验证固体推进剂和装药结构的粘接界面强度准则、失效判据和本构关系、界面模型等方面发挥着重要的作用。今后可重点关注以下几个方面的研究:

(1) 为降低试验成本,常通过装药结构试验器的性能测试表征全尺寸SRM在不同使役载荷下的结构响应和失效特性,但目前结构试验器的设计水平处于工程经验性摸索阶段,今后可进一步完善基于相似准则方法的结构试验器设计技术;

(2) 固化降温、温度循环、温度冲击、振动和过载条件下装药结构试验器的监检测试验,难度相对较低,已开展了

大量研究(宇航学报,2023,44(4):566-579)。但点火建压作为考核SRM结构完整性和使用可靠性的最后载荷工况,目前还缺乏较为可行的结构响应和失效特性的监检测试验方法。2009年,国外首次报道了应用冷态冲击试验系统模拟开展SRM点火建压过程的研究(AIAA-2009-5171),而国内近年来也针对感度相对较低的端羟基聚丁二烯(HTPB)复合固体推进剂装药的结构试验器进行了相关探索性研究,典型试验装置如图7所示(南京理工大学学报,2023,47(1):8-15)。从安全性角度和测试精度角度出发,可重点完善基于液体介质的冷态冲击试验方法,包括试验标准的拟制、试验过程安全防控手段的设计、试验结果的有效性分析和试验结果的应用条件等;

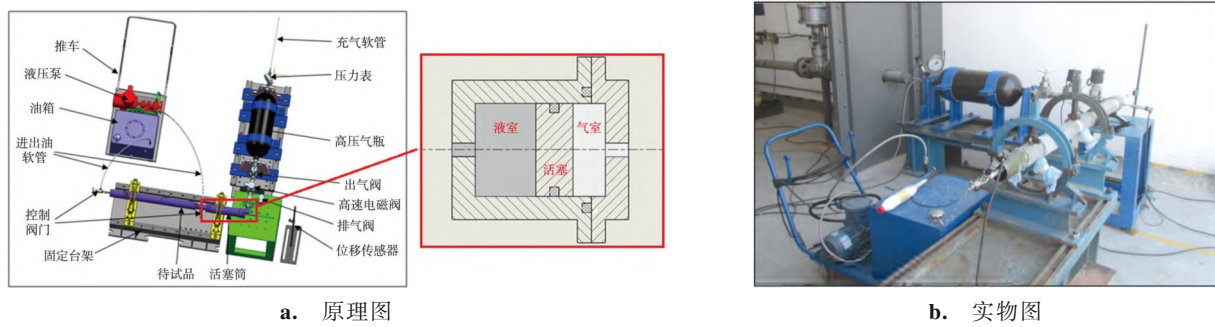


图7 SRM装药结构试验器的典型冷态冲击试验系统图

(3)在完善单一载荷工况下装药结构试验器力学响应监检测试验系统和试验方法的前提下,尽快形成可分析多因素耦合条件、叠加载荷条件和序贯载荷条件影响的试验系统和试验方法,尤其是亟需在理论层面上突破考虑长贮力(机械载荷)-化(化学作用)耦合载荷作用的试验系统的设计方法;

(4)在持续推进新型监检测技术和测试元器件研发的同时,需对现有测试手段进行梳理归纳,包括传感器的遴选指标、标定方法和布局形式等,以形成适用于特定使役载荷工况、典型装药结构形式下SRM力学参数精确测试的集成系统,并在兼顾试验成本的前提下,应用该系统获取更多的测试参量类型和试验数据;

(5)综合固体推进剂试验件、粘接界面结构试验件和装药结构试验器的试验测试数据,以及全尺寸SRM的部分在线监检测试验数据,可形成针对典型配方和装药结构形式的结构响应性能数据库,从而为现有SRM的结构完整性精确评估和寿命评定以及新型SRM的装药结构设计研发提供坚实的数据和模型支持。

3. 结语

SRM的装药结构完整性分析既有非常明确的工程应用背景需求,又涉及到粘弹性材料和粘接界面的失效机理、模拟表征、强度准则、失效判据、本构关系、界面模型和监检测技术等多个基础性问题的研究,难度大,需综合应用试验测试、理论分析和数值仿真相结合的研究策略,同时需要时刻关注材料力学、界面力学、损伤力学、实验力学等学科领域的最新研究成果,及时将其应用于SRM的装药结构完整性分析研究中,为相关问题的解决提供有力的技术支撑。此外,人工智能、机器学习、数据驱动等信息化和智能化手段的出现和发展,给SRM装药结构完整性分析带来了新的研究思路,也可在今后研究中进行关注。

强洪夫, 王哲君
 火箭军工程大学
 e-mail: Qiang@263.net
 e-mail: wangbintai@126.com