

文章编号: 1000-8055(2008)08-1536-05

SolidWorks 二次开发在燃面计算中的应用

熊文波¹, 刘 宇¹, 谢 侃¹, 廖 慧²

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;

2. 北京机电院高技术股份有限公司, 北京 100027)

摘 要: 以 SolidWorks 二次开发接口为基础, 探讨了参数化设计在固体火箭发动机装药燃面计算中的应用. 通过不同的药柱建模方法实现了固体药柱的装药计算, 发展了一种更为简单准确的燃面计算方法. 计算结果表明, 理论计算和试验结果吻合得较好, 能够较好地模拟固体药柱的燃烧过程, 可以满足工程计算上的需要, 为固体装药的燃面计算提供了新的思路和方法.

关 键 词: 固体火箭发动机; 装药计算; SolidWorks 二次开发

中图分类号: V430; TP391.72

文献标识码: A

Application of SolidWorks API of grain burning surface calculation

XIONG Wen-bo¹, LIU Yu¹, XIE Kan¹, LIAO Hui²

(1. School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Beijing Machinery and Electricity Institute Limited Company, Beijing 100027, China)

Abstract: The application of parameterization in grain burning surface calculation of solid rocket motor was investigated based on SolidWorks application programming interface. A simpler and more accurate grain burning surface calculation method was developed while grain burning surface calculation was achieved through different modeling methods for the burning process of grain. The results show that this calculation method is feasible and highly precise. The calculation results match the experiment results, so this calculation method is suitable for actual engineering calculation. Some new ideas and methods for grain burning surface calculation were also proposed.

Key words: solid rocket motor; grain burning surface calculation;
second exploitation of SolidWorks

固体火箭发动机的燃面计算主要是计算燃面面积随肉厚的变化关系. 由于装药燃面的变化实质上决定了发动机压强和推力的变化, 所以装药燃面的计算精度直接影响到内弹道性能的预估和发动机的设计. 在高性能导弹需求的牵引下, 固体装药逐渐向复杂造型和高装填密度发展, 因此燃面计算已经被越来越多的研究人员所重视. 目前

来说燃面计算一般有燃面解析法、作图法和通用坐标法等^[1-2], 但是这些计算方法或多或少存在某种缺陷. 比如解析法需要获得各个阶段的曲面方程, 曲面相贯的投影方程等等, 其计算难度相当大; 作图法存在对三维复杂装药计算的局限性; 通用坐标法虽然通用性较好, 但是对于复杂装药定义繁琐. 为了研究药柱的燃面计算, 需要突破传统

收稿日期: 2007-07-13; 修订日期: 2007-11-23

作者简介: 熊文波(1982-), 男, 湖南溆浦人, 博士生, 主要从事航空宇航推进理论与工程研究.

计算方法的束缚,充分应用计算机软件技术的发展产生一种新的计算方法.

SolidWorks 是一套基于 Windows 平台的 CAD/CAE/CAM/PDM 的桌面集成系统,在 Windows 环境下可以实现全参数化的三维实体造型.它同时为用户提供了强大的二次开发接口和大量的应用程序界面(API),因此可以通过对这些 API 对象以及方法和属性的操作,来实现 SolidWorks 功能扩展和定制.目前 SolidWorks 二次开发技术已经广泛应用于各行各业的参数化设计,不仅提高了设计效率,而且可以实现其他功能的定置^[3].因此可以充分利用 SolidWorks 强大的三维建模能力以及内置的 API 函数,将其应用于固体药柱的燃面计算.本文通过对 SolidWorks 进行二次开发,探讨了 SolidWorks 环境下实现燃面计算的方法.该燃面计算方法是在遵循“几何燃烧定律”的基础上利用 SolidWorks 的建模方法,获得不同肉厚下药柱的实体造型,然后利用其内置提取面积函数,获得实际产生的燃面面积,实现药柱的燃面计算^[4-8].计算结果表明该计算方法可以很好的实现大多数药柱的燃面计算,且具有较高的计算精度.

1 药柱建模方法

药柱的燃烧是一个相当复杂的过程,但是为了简化计算,一般可以做这样的假设:

- 1) 药柱遵循“几何燃烧定律”;
- 2) 不计燃烧室压强对药柱结构完整性的影响.

有了这些假设之后,可以建立药柱在燃烧过程中的模型. SolidWorks 的建模方法很多,但是概括来说可以归纳为单实体的建模和多实体的布尔运算建模,因此药柱的建模也可以通过这两种方法来实现.

1.1 单实体的建模

该建模方法多适用于结构简单、模型特征燃面较少的药柱.如图 1(a) 是内外孔和端燃的管装药,在 SolidWorks 下可以通过图 1(b) 中的草图旋转而成.为了模拟该药柱的燃烧过程,可以对草图中的燃烧肉厚 e 进行相应的驱动,以此来改变模型的形状.

该建模方法简单适用,对构型简单的药柱有较好的计算精度,但是存在一个明显的不足就是在燃面推移的过程中会出现奇异点,需要提前判断才能实现拓扑结构的建模.此外,对于结构复杂的药型采用该方法计算较为复杂,且建模速度较慢.

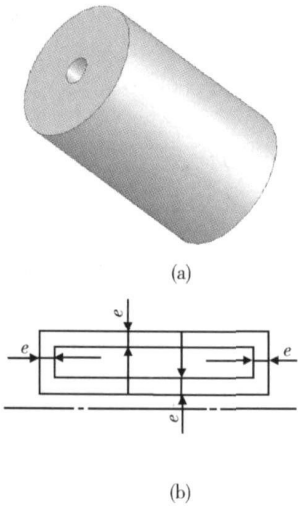


图 1 单实体建模
Fig. 1 Building model with single body

1.2 多实体的建模

药柱的燃烧还可以认为是在原有药柱的基础上不断地削减.因此只需要单独地建立原有药柱模型(药柱外廓)和燃烧过程中产生的燃面模型(药柱内廓),将药柱外廓和药柱内廓做布尔减运算后得到的就是燃烧过程中的药柱模型.该方法较为通用,可以以此建立任何药柱在燃烧过程中的模型,且不受形状的影响.图 2(a) 为内孔燃烧的管装药,可以先建立药柱的模型,燃烧是内孔向外不断地推移的过程.根据该燃面特点,单独再建立内孔的燃面模型(如图 2(a)).通过不断地驱动药柱内孔外径的大小所生成的燃面实体与药柱外廓做布尔减操作即是药柱在燃烧过程的模型(如图 2(b)).

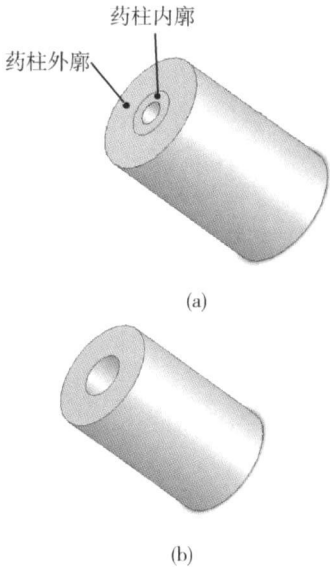


图 2 多实体建模
Fig. 2 Building model with multiply bodies

该方法一个最大的优点是可以适应比较复杂的燃面计算,通用性较好,且建模的速度也有所保证.

2 燃面提取方法

药柱的燃烧模型建立之后,需要准确地提取燃面的面积. SolidWorks 内置的 API 函数中有许多与获取面积相关的函数. 比如 Face2::GetArea(), 是获得指定面的面积函数. 应用该函数时, 可以首先对每个面的属性进行标注, 然后对整个模型进行面遍历, 累加属于燃面属性的面, 或者剔除不属于燃面属性的燃面, 就可以获得模型的燃面总面积.

另外也可以由 API 函数获取生成特征面的面积, 如 Feature::GetFace(). 在多实体建模中, 为了获得燃面, 只需要获取布尔减运算生成的特征中所有面, 然后获取这些面的面积并进行累加即是燃烧过程中所产生的燃面.

此外, 还可以间接地获取燃面面积. 比如通过获取燃烧过程中模型的体积变化, 如 Body2::GetMassProperties(). 在肉厚取得很小的情况下, 燃面可以用变化的体积除以肉厚近似得到, 不过该方法相对上述的两种方法精度较低.

总之 SolidWorks 中有很多实用的 API 函数供用户选择, 如何根据具体药柱模型采取运算速度更快而又能满足一定计算精度要求的提取燃面面积的算法是一个值得深入探讨的问题.

3 单实体建模算例

为了验证 SolidWorks 二次开发用于燃面计算的准确程度, 对图 3 中的星孔装药进行装药计算. 取药柱的外径为 200 mm, 药柱肉厚为 60 mm, 星角数为 6, 长度为 300 mm. 采用 SolidWorks 二次开发提取不同肉厚 (e) 下的燃面面积 (A_b), 计算结果如图 4 所示.

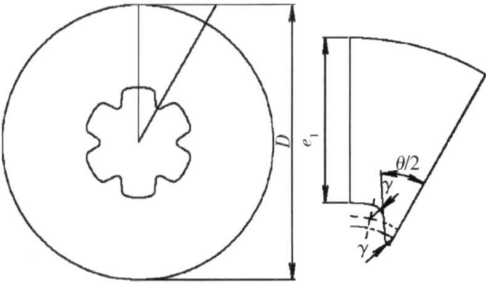


图 3 星孔装药模型
Fig. 3 Model of star type grain

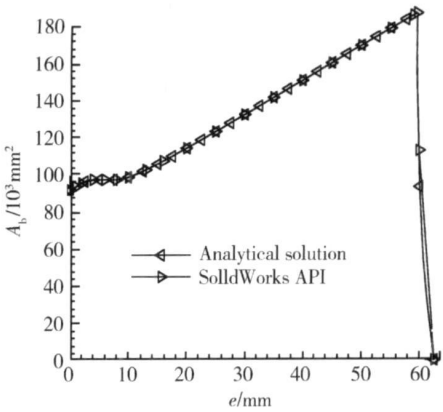


图 4 采用 SolidWorks 二次开发计算的燃面与解析解比较
Fig. 4 Comparison between SolidWorks API and analytical solution

从图中可以看出该计算方法跟解析解吻合得很好, 几乎没有任何误差, 这同时也说明了 SolidWorks 对面积统计功能的精度很高, 完全可以用于固体装药的燃面计算.

4 多实体建模算例

4.1 药柱模型

图 5 为某型号单室双推力发动机的药柱, 采用自由装填尾部点火. 圆筒段的后部分无包覆层, 形成一圆柱凸台, 同时为了适应外部壳体尺寸的需要, 在尾部有一锥形凸台, 另外在药柱两侧去掉了部分包覆层对称地开了两个槽, 组成一级药柱; 头部为二级药柱, 采用另外的装药, 6 根金属丝均布贯穿整个药柱. 发动机工作时, 一级药柱通过圆柱和锥形凸台加开槽面以及嵌金属丝燃烧实现大燃面, 而二级药柱的稳定燃烧为 6 根金属丝所产生的锥面 (4 个大锥面 + 2 个小锥面) 组成, 从而实现单室双推力. 根据金属丝燃烧机理, 嵌金属丝后, 沿金属丝燃速增加 K 倍, $K = r_i / r_0$, 式中 r_i 为沿金属丝的燃速, r_0 为药柱的燃速. 为了简化计算, 将沿金属丝的燃烧假设为锥顶角为 2θ 的锥体, 在整个燃烧过程中, 认为 K 是一个不随燃烧室压强变化的常量. 且假设金属丝一露出, 在燃气中即熔化并随即以此为顶点形成新的锥体.

该药柱模型较为复杂, 在燃烧过程中会产生很多的燃面, 如果采用之前介绍的几种燃面计算方法有各自的复杂性. 根据介绍的药柱建模方法, 采用了多实体的布尔减运算来模拟药柱的燃烧过程.

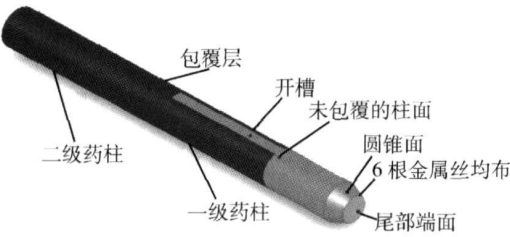


图 5 嵌金属丝药柱模型

Fig. 5 Model of grain embedded metal wires

4.2 燃面模型简化

由“几何燃烧定律”,各燃面的燃烧情况可以简化为如下:

凸台面(如图 6)由 4 部分组成,尾部端面,圆锥面,未包覆的圆柱面和在未包覆分界点形成的球弧面,整个燃面属于减面燃烧。另外随着肉厚 e 的推移,将存在圆锥凸台消失(最后退化为圆柱)和尾部端面消失(最后退化为圆锥)两种情况,这在程序中可以预先判断。当燃烧肉厚 e 等于装药半径时,未包覆的凸台面完全消失。

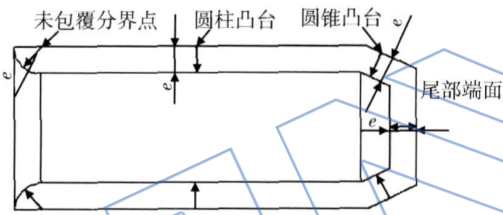


图 6 凸台面的燃烧

Fig. 6 Burning surface of taper stage

开槽面燃烧按照肉厚分为两段情况,当燃烧肉厚 e 如图 7(a)所示时,整个燃面将由三段圆弧组成,中间段圆弧面是开槽处未包覆的柱面燃烧后的燃面,整个燃面为增面燃烧;当燃烧肉厚 e 如图 7(b)所示时,整个燃面为减面燃烧,可简化为两段圆弧组成。另外在槽底处将形成不断扩大的槽底环形曲面(它是一个绕装药轴线旋转的环形曲面的一部分)及部分球面,如图 8 所示。

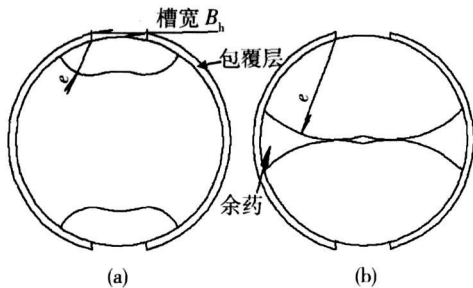


图 7 开槽面的燃烧

Fig. 7 Burning surface of groove

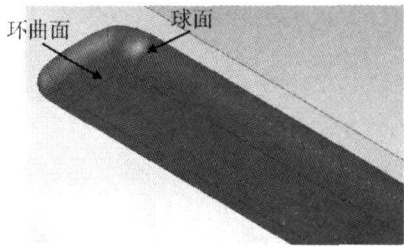


图 8 槽底面的燃烧

Fig. 8 Burning surface of groove

金属丝的燃烧按照沿金属丝的等距扩张而形成锥坑面(如图 9(a)),为增面燃烧,大大增加了装药的燃面,这正是在固体推进剂内嵌入金属丝的根本目的。从简化角度考虑可以把 K 当作常量来处理。由于部分燃面跟金属丝平行,所以当燃面等距扩张到金属丝时,暴露在高温燃气中的整段金属丝将熔化,从而在该处形成了一个类似漏斗的燃面,并随后将以金属丝直径熔化形成的空腔为中心扩张燃烧,形成如图 9(b)所示的燃面,为增面燃烧。

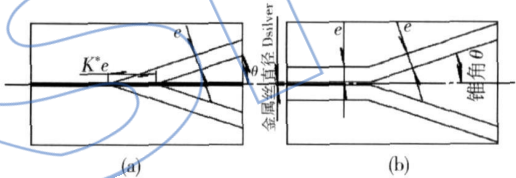


图 9 金属丝的燃烧

Fig. 9 Burning surface of metal wire

4.3 计算结果

利用该燃面计算方法对上述嵌金属丝复杂装药进行燃面计算,再采用瞬时平衡压强法确定出瞬时平衡压强 p_c 和肉厚 e 的相互关系,然后通过燃速计算公式确定肉厚 e 和时间 t 的相互关系,从而建立了 p_c 和 t 的变化关系,最后利用推力计算公式得到推力 F 随时间 t 的变化关系曲线。图 10 是计算得到的燃面 A_b 随肉厚 e 的变化曲线,图 11、图 12 是药柱初温分别为 50°C 和 -40°C 时计算与试验的推力(F)—时间(t)曲线图。

从图中可以看出该计算方法较好地模拟了嵌金属丝药柱的整个燃烧过程,采用 SolidWorks 二次开发计算所得的发动机性能跟实验结果吻合得较好,具有较高的计算精度。由于程序所建立的过渡段内弹道计算模型作了一定简化,以致忽略了燃烧室压强对药柱结构完整性的影响,导致过渡段的计算结果比试验结果偏小,这些问题需在以后的研究中继续完善。

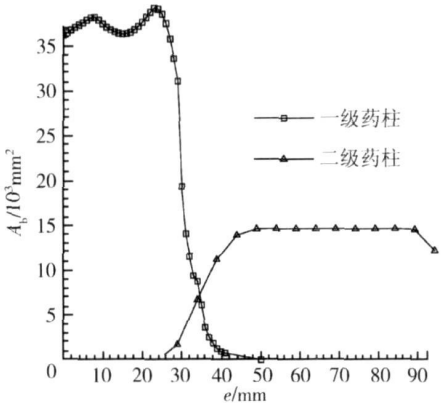


图 10 药柱 A_b - e 曲线

Fig. 10 A_b - e curves of grain embedded metal wires

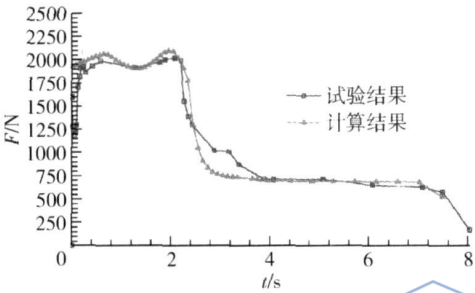


图 11 初温为 50 °C 时计算与试验的 F - t 曲线对比

Fig. 11 Comparison between calculated and experimental data at $t_0 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

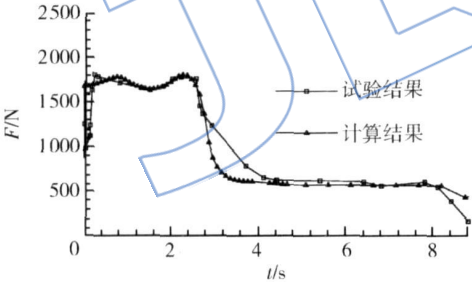


图 12 初温为 -40 °C 时计算与试验的 F - t 曲线对比

Fig. 12 Comparison between calculated and experimental data at $t_0 = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$

5 结 论

通过对 SolidWorks 的二次开发,扩展了燃面计算的新思路.文中通过对不同药柱的燃面计算,表明了该方法实现的装药计算具有较高的精度,计算结果与理论解和试验结果基本吻合,为其他相关的装药计算提供了借鉴,也为 SolidWorks 二次开发方法提供了参考.

参考文献:

[1] 王元有. 固体火箭发动机设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.

[2] Dunn S S, Coats D E. 3-D grain design and ballistic analysis using the SPP97 code[R]. AIAA- 3340, 1997.

[3] 江洪, 魏峰. SolidWorks2003 二次开发基础与实例教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

[4] 于胜春, 赵汝岩, 周红梅, 等. 基于 Pro/E 特征造型技术的固体发动机装药燃面计算[J]. 固体火箭技术, 2005, 28 (2): 108-111.

YU Shengchun, ZHAO Ruyan, ZHOU Hongmei, et al. Burning area regression simulation and calculation of solid rocket motor grains based on Pro/E feature modeling technology [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2005, 28(2): 108-111. (in Chinese)

[5] 董新刚, 陈林泉, 侯晓. 基于 PRO/E 平台下的固发装药 CAD 软件[C] // 2002 年中国宇航学会固体推进专业委员会年会论文集(上). 昆明: 中国宇航学会, 2002: 109-114.

[6] 杨石林, 富婷婷, 李健, 等. 基于 SolidWorks 平台嵌金属丝药柱装药计算[C] // 中国宇航学会固体火箭推进第 22 届年会论文集. 成都: 中国宇航学会, 2005: 62-65.

[7] 熊文波, 刘宇, 杨劲松, 等. 基于 SolidWorks 二次开发的嵌金属丝药柱燃面计算[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(12): 1400-1403.

XIONG Wenbo, LIU Yu, YANG Jinsong, et al. Burning Surface calculation for grain embedded metal wires based on SolidWorks API[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(12): 1400-1403. (in Chinese)

[8] 熊文波, 刘宇, 杨劲松, 等. 某嵌金属丝药柱主要装药设计参数的影响[J]. 固体火箭技术, 2008, 31(1): 38-42.

XIONG Wenbo, LIU Yu, YANG Jinsong, et al. Effects of main grain design parameters of an embedded metalwire grain[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2008, 31 (1): 38-42. (in Chinese)