

便携式双传感器夜视镜壳体可靠性分析与设计

孟 瑞, 邱亚峰

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 便携式双传感器夜视镜是一种应用于军事作战中的重要仪器, 而作为其核心零部件——壳体, 必须保证在复杂作战环境下不会发生过量变形及应力集中, 以免造成仪器失效。从选择该仪器壳体材料和建立模型着手, 考虑夜视镜壳体上所受其他零部件给予的等效压力及弯矩, 对其在 2 种极端的环境下进行仿真分析, 得到 -30°C 及 70°C 两种情况下壳体所受最大应力及应变, 并分析是否能够满足使用要求。

关键词: 有限元法; 双传感器; 夜视镜壳体; 应力应变

中图分类号: TN22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2014)10-0791-05

Reliability Analysis and Design of the Shell Based on Portable Dual Sensor Night Vision Goggles

MENG Rui, QIU Ya-feng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Portable dual sensor night vision goggles are important instruments in military operations. As its core component, the shell must avoid excessive deformation and stress concentration in complex operational environment in order to prevent equipment failures. This article introduced how to select the instrument shell material and build the modeling. Taking into account the equivalent pressure on night vision goggles the shell suffered from other components, the paper gives simulation analysis under two extreme conditions, simulating its biggest stress and strain at -30°C and 70°C , and analyzing whether to meet the requirements.

Keywords: finite element method, dual sensor, night vision goggles' shell, stress-strain

0 引言

便携式双传感器夜视镜是一种高精密侦察仪器, 主要应用于军事领域, 一般装有微光探测器和红外探测器^[1], 它们以光电器件为核心部件, 由光学、电子、机械结合而成^[2]。目前美军各军种特种部队以及警方的特种战术小组已有广泛应用, 配备该种仪器可显著提高士兵态势感知能力以及在恶劣观察条件下的能见度。

通常情况下军队工作环境比较复杂, 深山、林地、冰雪高原、烈日炎炎的荒漠都是他们经常进出的地域, 从零下二三十度至四五十摄氏度, 这对夜视镜的质量也提出了苛刻的要求, 必须保证其不受温度变化的影响。鉴于便携式双传感器夜视镜对于国防事业的重要性, 在使用过程中一旦有差错发生将会造成无法估量的损失^[3], 因此提出对其壳体结构进行热应力分

析, 确保使用过程中温度的变化不会给其带来超出许用范围的变化。壳体结构一般厚度尺寸相对面内尺寸小很多, 温度剧烈变化会给她带来形体上的微小变化, 壳体构成了便携式双传感器夜视镜的主体骨架, 壳体内外主要安装有轻型红外探测器、微光探测器、目镜、图像融合板、降噪板等主要零件。为了获得稳定、清晰的图像, 要保证在双传感器夜视镜壳体设计中对重要表面的尺寸、几何形状、相互位置等提出很严格的公差要求之外还必须保证使用过程中光轴的定位。

1 系统组成及其基本参数

双传感器夜视镜系统示意图如图 1, 其主要零部件包括: ①前壳体; ②后壳体; ③三代微光像增强器与 CCD 耦合配富士 CF75HA-1 F1.8/75 mm 镜头, 基本参数: 焦距 75 mm, 光圈 F 值为 1.8。④KIRO 709A

收稿日期: 2014-06-11; 修订日期: 2014-07-23.

作者简介: 孟瑞 (1989-), 男, 江苏邳州人, 在读硕士研究生, 研究机械设计理论以及 CAD/CAE。

通讯作者: 邱亚峰 (1966-), 男, 副教授, 主要从事光学仪器的结构设计和相关系统设计。

基金项目: 江苏省产学研联合创新基金。

红外镜头配备非制冷焦平面（320×240，25 μm）探测器，基本参数：焦距 75 mm，光圈 F 值为 1.0。⑤目镜模组型号：P100X-002-GM，基本参数：视场角 33.9°，出瞳距离 52 mm，出瞳直径 7 mm，畸变（ $\delta y'$ ）≤1.5%。⑥电源：订制容量 10000 mA·h，电压 6.0 V，放电倍数 C 为 0.25 的聚合物锂电池。⑦微光与红外同相融合电路板^[4]、降噪板、薄膜按钮等。

2 有限元法分析的重要性

有限元法是一种离散型的思想，用较简单的问题代替复杂问题后再求解，是目前 CAE 工程分析系统中使用最多、分析计算能力最强、应用领域最广的一种方法。ABAQUS 是一种功能十分强大的工具软件，基本满足各种工程应用的分析功能需要。在新产品早期研发阶段，工程师通过 ABAQUS 可以对产品设计和制造过程中可能会出现的各种问题进行预测和仿真，从而在设计阶段就对零件中有问题部位作出适当修改，这样即缩短研发周期，又降低产品研发成本，还提高产品质量^[5]。

ABAQUS 最大的特点在于单元种类达 433 种，可模拟任意几何形状，提供更多的选择余地，并能深入反映细微的结构现象和现象间的差别。ABAQUS 还具有强大的热分析功能，可对传导、辐射和对流进行瞬态或稳态分析，在热分析的基础上，ABAQUS 还可以方便地处理各种顺序和万全热固耦合的问题，解决力学和热响应及其耦合问题^[6]，进而分析热载荷和机械载荷的影响。

3 模型的建立及材料选择

3.1 三维建模

依据该特定功能系统内包含的零部件的精确尺寸及图像融合板与轻型红外探测器的配合方式，结合外形美观、结构匀称、方便携带等方面要求，建立该夜视镜实体模型。考虑到成品夜视镜内部零件的互换

性及其便于安装性，采用对分式设计，该种设计的缺陷在于同轴性较整体式壳体差一些而且对其加工精度要求高^[7]。

建模基本要求：①保证其性能的前提下尽量做到结构简单、重量较轻，便于携带及使用，而且结构要合理，便于加工。②满足强度要求，做得样品可靠性高，即基本无故障地发挥其规定的功能。③还要考虑装配时的对心性和前后壳体紧密结合，具有一定的密封性。④外形轮廓美观大方，结构匀称，避免过度的突出物。其结构图及装配示意图如图 2。

3.2 材料选择

聚甲醛（POM）塑料是继尼龙之后发展的又一优良树脂品种，具有优良的综合性能。POM 具有高的刚度和硬度、极佳的耐疲劳性和耐磨性^[8]、较小的蠕变性和吸水性、较好的尺寸稳定性和化学稳定性、良好的绝缘性等，是一种性能优良的工程塑料，在低温下仍有很好的抗蠕变特性、几何稳定性和抗冲击特性，各项性能类似与金属，在国外被称为超钢、夺钢。另外聚甲醛可长期置于 100℃的环境中工作，因此便携式双传感器夜视镜壳体结构选用聚甲醛棒体作为其加工材料。

便携式双传感器夜视镜属于高精密仪器，主要用于野外作战及实验，因此对于其加工材料选择也是一个重要的环节，选材是否恰当，特别是一台机器中关键零件的选材是否恰当将直接影响到产品的使用性能、使用寿命及制造成本。选材不当，严重的可能导致零件的完全失效。选材主要依据有：①质轻，②化学稳定性好，③易切削加工，④加工后的表面光洁度高，⑤温度剧烈变化不会对其性能造成很大的影响，⑥经济性，等等。精密仪器常采用材料中的塑料恰恰具有这些性能，选用聚甲醛作为加工材料。

表 1^[9]是几种常用塑料的基本属性参数包括：弹性模量、泊松比、密度、熔点、导热系数、比热容。

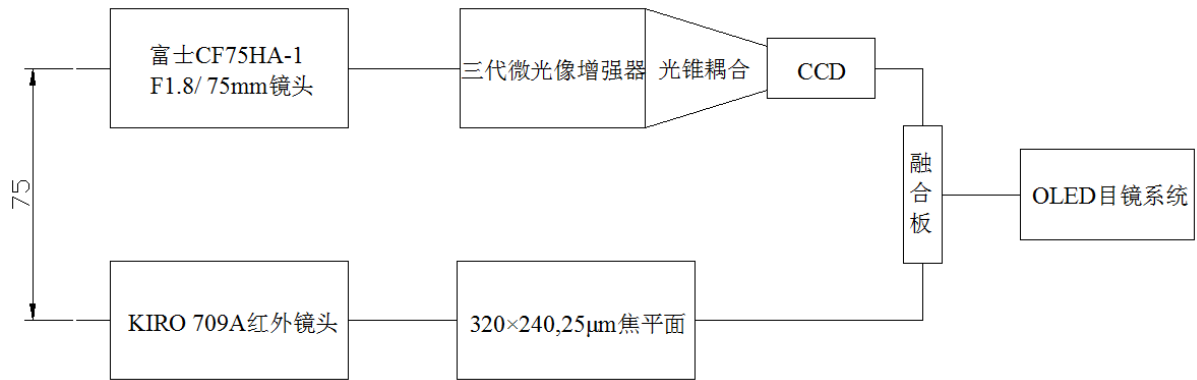
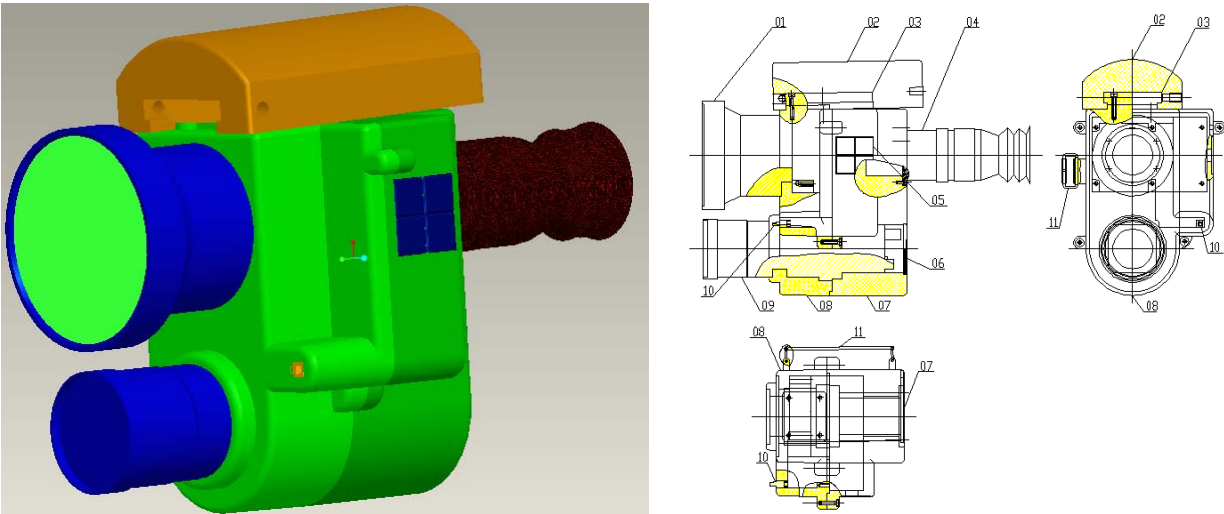


图 1 双传感器夜视镜系统示意图 Fig.1 The double sensor night-vision goggles system diagram



01.红外镜头 02.电池 03.电池安装底座 04.目镜 05.薄膜按钮 06.端盖
07.后壳体 08.前壳体 09.微光镜头 10.开关 11.手持把手

图 2 夜视镜的结构图及装配示意图 Fig.2 Night vision goggles structure diagram and assembly diagram

表 1 几种常用塑料的基本属性参数 Table 1 The basic properties' parameters of several commonly used plastics

材料名称	弹性模量 E / (GPa)	泊松比 ν	密度 ρ / (g/cm ³)	熔点 $T_m/^\circ\text{C}$	导热系数 K / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容 C / (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)
聚乙烯	0.7~1.4	0.4	0.92~0.95	140	0.4	—
ABS 树脂	0.2	0.394	1.03~1.07	175	0.18	9.5~13.0
尼龙 1010	1.07	0.34~0.35	1.04~1.06	205	0.16~0.46	—
尼龙 66	8.3	0.28	1.14~1.15	259	0.23	—
聚氯乙烯	2.9~3.4	0.32	1.35~1.4	212	0.16	—
聚甲醛	2.6	0.38569	1.39~1.43	175	0.3	9.9
聚丙烯	1.32~1.42	—	0.91	164~170	0.12~0.17	—

4 等价线性静力及处于极寒及高温环境下的稳定性分析

4.1 理论基础

该仪器受力主要来自自身各零部件的重力及外界环境温度变化带来的热应力，静力分析可以计算那些固定不变的惯性载荷对结构的影响（如重力），重力又是线性的，因此适用于线性静力学分析。

4.1.1 线性静力学

线性静力学的理论是基于材料弹性力学理论和有限元理论发展起来的，简单来讲就是首先建立模型划分网格（即为具有材料属性的很小的单元体），其次对这些单元体每个节点进行力学分析，然后利用这些单元体间的关系将这些离散的单元体结合为一体形成矩阵，最后对建立起来的矩阵求解得到所需的参数。此理论应用广义胡克定理：

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z) \right] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} \left[\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z) \right] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} \left[\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y) \right] \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}, \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： E 为正弹性模量； G 为剪切弹性模量； ν 为泊松比。这 3 个弹性常数中只有 2 个是独立的，它们之间服从 $G=E/2(1+\nu)$ 的关系。

4.1.2 热应力

热应力是指由于构件受热不均匀而存在着温度差异，各处膨胀变形或收缩变形不一致，相互约束而产生的内应力。本文研究的仪器壳体会随外界温度的变化会使得结构产生相应的热应力，热应力的作用是

一个叠加的过程,随着温变幅度的变化而被放大,与结构原有的内部应力相互作用,破坏结构的稳定性,进而影响仪器的可靠性。对于塑性材料,热应力不会导致构件断裂,但交变热应力有可能导致构件发生疲劳失效或塑性变形累积。所以有必要结合仪器壳体所受的等价值线性静力对该壳体模型在极寒和高温2种特殊工况下进行应力应变分析,假定仪器内部存在温差分布 ΔT ,材料的热膨胀系数为 α_T ,则该仪器会产生相应的膨胀量 $\alpha_T \times \Delta T$, (1)式即转化为:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z) \right] + \alpha_T \Delta T \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} \left[\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z) \right] + \alpha_T \Delta T \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} \left[\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y) \right] + \alpha_T \Delta T \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}, \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

4.2 有限元分析

4.2.1 模型简化

一般情况下 proe 中建立的模型特征导入 ABAQUS 软件中会给网格划分带来不便,这就要求在建模的过程中考虑到该问题,在不影响整体性能及刚度的前提下需要对模型进行适当修改,如去除倒圆角、倒角、非装配孔、装饰性零部件、不必要的压槽等等。便携式双传感器夜视镜壳体简化图如图3。

将简化的模型导入 ABAQUS 中,将必要的参数输入(即为表1的弹性模量、密度、泊松比、导热系数、比热容、等效力和等效面载荷等)。一般情况下塑料材料的线性热膨胀系数随着温度的变化而变化,

聚甲醛材料的线性热膨胀系数参照表2^[10]。

表2 聚甲醛材料的线性热膨胀系数

Table 2 The Linear thermal expansion coefficient of

POM material	
温度范围	数值/(10 ⁻⁵ /°C)
-40~29°C	10.4
29~60°C	12.2
60~104°C	13.7

4.2.2 -30°C情况下的结构稳定性分析

便携式双传感器夜视镜在-30°C的工况下,外壳在受到其他零件给予的压力,弯矩等会产生形变,同时由于低温作用,壳体材料会产生相应的收缩,进而产生内部应力,图4是模拟该工况下壳体的等效应力应变云图。从图上可以看出,壳体上承受最大的最大应力为34.5 Pa 远远小于材料屈服抗拉强度63 MPa,最大形变处为1.18e⁻⁴ mm,该值相对于红外焦平面阵列元与红外镜头之间的最小距离17 mm 而言可以忽略不计,所引起的光轴夹角该变量为:

arcsin (1.18e⁻⁴/17), 约等于(4.0e⁻⁴)°, 远远小于许用值0.1°的偏差。

4.2.3 70°C情况下的结构稳定性分析

同理,当该双传感器夜视镜在70°C的工况下时,依据应力应变云图(见图5)得,最大应力为61.6 Pa 远远小于其屈服抗拉强度63 MPa,最大形变处为2.34e⁻⁴ mm 该值相对于红外焦平面阵列元与红外镜头之间的最小距离17 mm 而言可以忽略不计,所引起的光轴夹角该变量为:

arcsin (2.34e⁻⁴/17), 约等于(7.9e⁻⁴)°, 远远小于许用值0.1°的偏差。

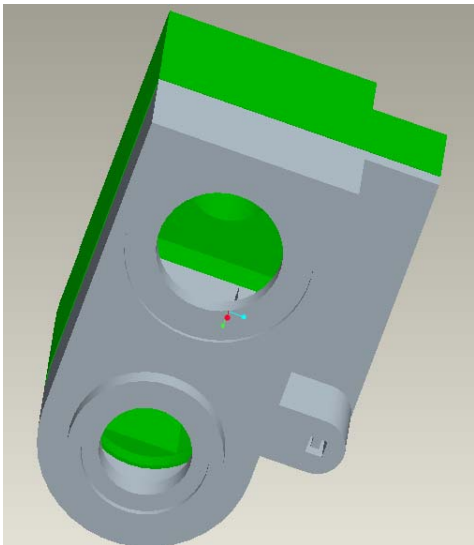


图3 夜视镜壳体简化图



Fig.3 The simplified diagram of NVG' s shell

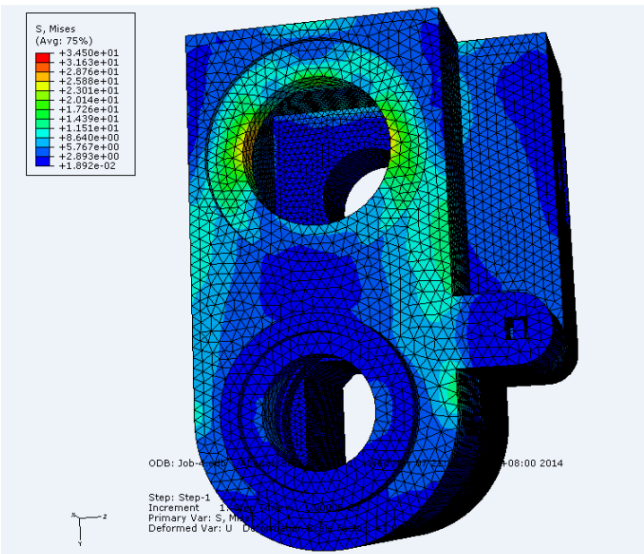


图4 -30℃下的应力应变云图

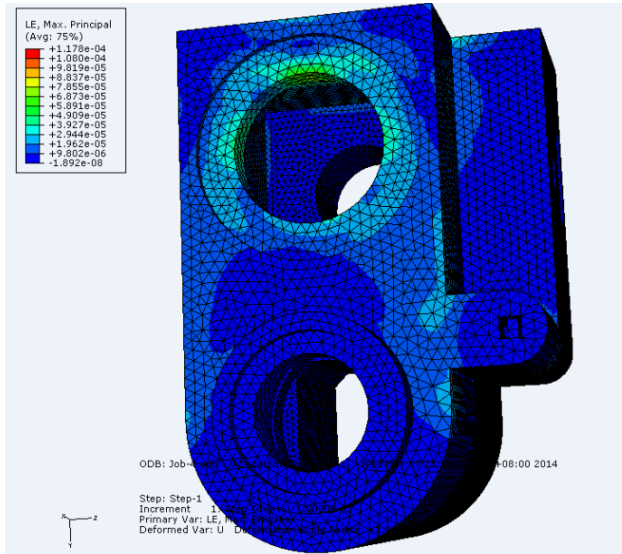


Fig.4 The stress and strain nephogram of 30 degree below zero

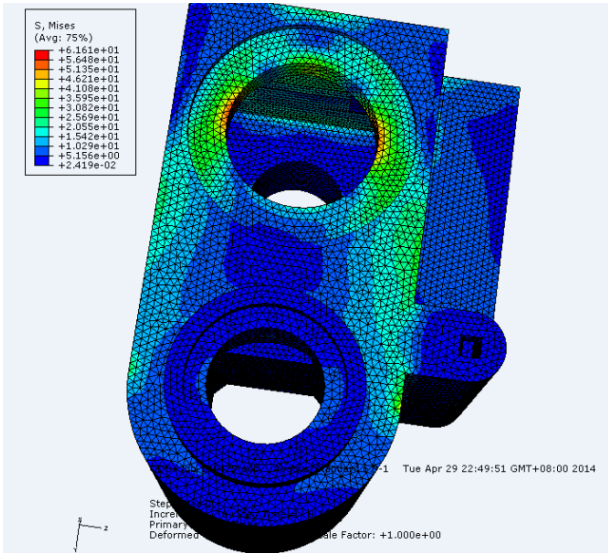


图5 70℃下的应力应变云图

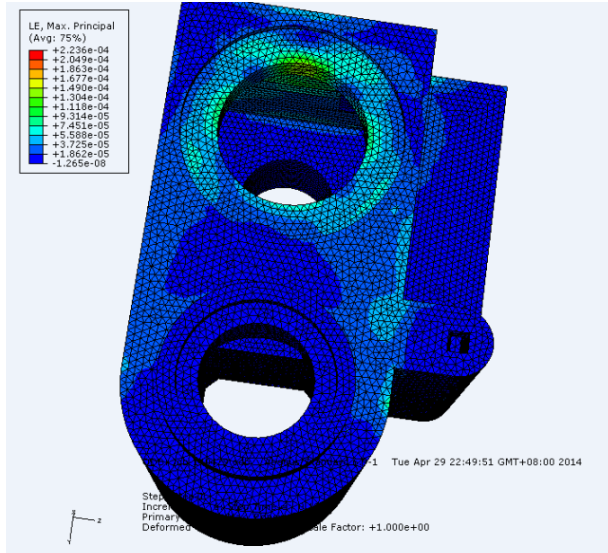


Fig.5 The stress and strain nephogram of 70 degrees above zero

5 总结

基于有限元法的便携式双传感器夜视镜热应力分析结果，可以得出该壳体能够满足使用要求，各项指标均在许用范围之内，温度的剧烈变化不会导致其功能性失效，本文从结构的稳定性方面着手，验证了结构的可靠性，但对于该壳体的设计来讲并不是最优化的，后续工作会从散热、密封、尽可能地减轻重量及壳体内部空间重新规划来优化该仪器，改善其性能，获得理想的壳体模型。

参考文献：

[1] 陈钱. 红外图像处理技术现状及发展趋势[J]. 红外技术, 2013, 35(6): 311-318.
[2] 陈映苹. 我国军用夜视仪器可靠性分析研究[J]. 光电子技术, 2003(3): 68-70.

[3] 姜小波, 刘发. 斯特林制冷机可靠性研究综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2000(5): 38-42.
[4] Schnitzler A D. Low light performance of visual system[R]. National Technical Information Service. 1971(AD725831): 55.
[5] ABAQUS 有限元分析软件在机械行业中的应用[J]. 机械工业信息与网络. 2006(2): 44-45.
[6] 陈艺, 张子军, 潘明. 结构优化设计&有限元分析在机械设计中的应用—ABAQUS 分析桁架结构[J]. 现代农业装备, 2007(3): 40-45.
[7] 杨陆奕. 壳体设计原则在 SCM 变速器中的应用[J]. 上海汽车, 2008(4): 17-21.
[8] BENABDALLAH H, OLENDER D. Finite element simulation of the wear of polyoxymethylene in pin-on-disc-configuration[J]. Wear, 2006, 261: 1213-1224.
[9] 张玉龙, 石磊. 实用通用塑料手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
[10] 中塑在线. 塑料原料参数库[EB/OL]. <http://www.21cp.com>.