

文章编号:1006-9941(2008)06-0703-05

PBX 部件机械加工过程中的夹持变形预测

唐维,李明,张丘,黄交虎,赵永忠,刘维,赵小东

(中国工程物理研究院化工材料研究所,四川绵阳621900)

摘要:高聚物粘结炸药(PBX)部件机械加工过程中的夹持变形直接影响着炸药部件的加工质量。利用既定的基于修正时间硬化理论的蠕变模型,模拟不同结构PBX部件在不同夹持力下的夹持变形。球壳在真空吸附下型面上各点的变形量随纬度增加而增加,方向与径向呈一定夹角;三爪卡盘夹持PBX部件时,最大变形和最大应力都出现在与卡盘爪子接触的区域,且内型面变形量较外型面略小。与千分尺测PBX空心半球真空吸附下顶点变形的试验数据比较,模型在前20 min内具有较高的准确性和可靠性,之后仿真结果大于试验数据,60 min内最大误差不超过10%。

关键词:材料力学;机械加工;高聚物粘结炸药(PBX);蠕变模型;修正时间硬化理论

中图分类号: TJ55; O34

文献标识码: A

1 引言

武器装备技术的发展使得炸药件的形状变得复杂,形位尺寸精度要求也大大提高。机械加工作为复杂炸药零部件成型的重要手段,研究该过程中高聚物粘结炸药(PBX)的夹持变形情况对于优化工艺参数、提高产品质量具有现实意义。研究^[1-2]表明,目前广泛运用的PBX因粘结剂的存在常温下都能表现出明显的蠕变行为,这为数值模拟以预测炸药部件的夹持变形带来了困难。

文献[3]采用各向同性线弹性模型率先对PBX部件机械加工过程中的变形、温度和切削力等进行了数值模拟,为PBX仿真提供了有益的参考和可行的方法,但线弹性模型不能真实反映炸药材料的蠕变特性。张双寅等^[1]、潘颖等^[2,4]认为基体的蠕变是PBX蠕变的主要根源。丁雁生等^[5]提出由两弹簧和两粘壶组成的四元件流体模型能较好地解释PBX中聚合物的蠕变特性。李明等^[6]对TATB基PBX进行了研究,认为7级Prony级数模拟的蠕变柔量函数与试验叠合曲线能很好地吻合,但用于有限元仿真该Prony级数的参数值确定较为困难。在某奥克托今基PBX 15次单轴压缩蠕变试验基础上,研究^[7]表明基于修正时间硬化理论的蠕变模型能够很好地表征PBX的短时蠕变特性,模型具有紧凑的数学表达式和较少的待定参数,

适合工程运用;通过进一步研究^[8],利用正态分布小概率原理^[9]最终确定了模型通用参数并进行了简单应用。本文采用该蠕变模型对不同结构(空心半球、球壳和圆环)的奥克托今基PBX在不同夹持力(真空吸附、三爪卡盘夹持)下的变形情况进行模拟,并通过千分尺测顶点变形试验对模型在工程应用中的可靠性进行验证。

2 基于修正时间硬化理论的PBX蠕变模型

基于时间硬化理论的Norton-Bailey蠕变规律^[10-13],蠕变应变率的一般表达式为 $\dot{\epsilon}_{cr} = f(\sigma, t, T)$ 。由于蠕变试验通常测得的是应力 σ 、环境温度 T 以及总应变 ϵ 与时间的关系,于是演化出了修正时间硬化理论(modified time hardening theory-MTHT)^[14],该理论认为在给定的应力和温度条件下,从应力一开始其蠕变应变 ϵ_{cr} 仅决定于时间。理论中的描述与我们对PBX材料的蠕变特性认识相符,根据定义,其数学表达式为时间硬化理论表达式的积分修正,一般表达式为 $\epsilon_{cr} = \int \dot{\epsilon}_{cr} dt = g(\sigma, t, T)$,综合考虑蠕变的影响因素,假定PBX材料的各向同性,具体表达式如式(1)所示。

$$\epsilon_{cr} = \int \dot{\epsilon}_{cr} dt = C_1 \sigma^{C_2} t^{C_3+1} e^{-\frac{C_4}{T}} / (C_3 + 1) \quad (1)$$

式中, C_1 为修正因子, C_2 、 C_3 和 C_4 分别为应力、时间和温度的相关系数;并且 $C_1 > 0$, $C_2 > 0$, $C_3 < 0$; σ 为应力,MPa; t 为时间,s。

某型奥克托今基PBX的单轴压缩蠕变试验研究^[7-8]表明,基于修正时间硬化理论的蠕变模型能够很好地表征该PBX的短时蠕变特性,采用正态分布小概率原理求得的模型通用参数见表1^[8]。表中参数仅适

收稿日期:2008-03-06;修回日期:2008-06-16

基金项目:武器装备预先研究(No. 426030403),中物院化材所所长基金(No. 626010922)

作者简介:唐维(1981-),男,硕士,主要从事PBX机械加工研究。

e-mail: Will_Ton@126.com

用该奥克托今基 PBX, 其它炸药模型参数需开展类似工作求取, 本研究仅以该奥克托今基 PBX 作为研究对象。

表 1 某奥克托今基 PBX 蠕变模型通用参数

Table 1 Universal creep model parameters of a HMX based PBX

C_1	C_2	C_3	C_4
1E-5	0.45477	-0.69529	0

Note: parameters (C_1, C_2, C_3 and C_4) in the Table are all dimensionless factors.

3 PBX 机械加工中的夹持变形预测

真空吸附和卡盘夹持是 PBX 机械加工中最为常见和重要的两种夹持方式。忽略机床主轴旋转对 PBX 部件的变形影响, 仅考虑夹持力和夹持时间, 利用上述既定修正时间硬化理论蠕变模型预测两种夹持方式下不同结构(空心半球、球壳和圆环)某奥克托今基 PBX 部件在恒定边界条件下的夹持变形, 并通过变形试验验证模型应用于工程实际的可靠性。

3.1 真空吸附 PBX 部件

3.1.1 有限元模型的建立和边界条件的确定

采用 SOLID185 单元及公式(1)和表 1 确定的蠕变模型建立 PBX 部件(外径 $S\Phi 100$ mm 内径 $S\Phi 80$ mm 空心半球)三维有限元模型并划分网格。模型外表面施加 1 个标准大气压(0.101325 MPa)的表面压力, 内表面施加 5.325×10^{-3} MPa 表面压力(真空负压 0.096 MPa)。

吸盘采用硬铝 2A12(LY12)材料, 炸药和铝的摩擦系数为 0.3 ~ 0.5^[15], 试验测得该奥克托今基 PBX 与硬铝 2A12 的静摩擦系数 μ 为 0.461。根据公式(2)公式(3)可计算出吸盘和 PBX 部件间的正压力(空心半球 764 N, 球壳 761.6 N)和最大静摩擦力(空心半球 352.2 N, 球壳 351 N), 可见在装夹吸附过程中接触面产生滑移困难, 为此假设并施加有限元模型与吸盘接触的面内节点各向 0 位移约束, 至此有限元模型及边界条件确定完毕。

$$N = p_1 S_1 - p_2 S_2 \quad (2)$$

$$f_s = \mu N \quad (3)$$

式中, N 代表正压力, p_1, p_2 分别表示外界压强和内部压强, S_1, S_2 分别代表外型面和内型面在机床转轴径向上的最大截面面积, f_s, μ 分别表示最大静摩擦力和静摩擦系数。

3.1.2 千分表测 PBX 空心半球顶点变形试验

为确定蠕变模型的计算精度和验证模型的工程可

靠性, 采用千分表测量真空吸附下空心半球(外径 $S\Phi 100$ mm 内径 $S\Phi 80$ mm, 试验装置如图 1 所示)3600 s 内顶点的变形位移情况, 然后卸载并置该部件于标准工作平台, 测试顶点回复情况。整个试验过程中顶点的位移变化试验曲线如图 2 所示。



图 1 千分表测顶点位移

Fig. 1 Micrometer gauge measuring peak displacement

3.1.3 PBX 空心半球计算结果与试验数据比较

计算空心半球静态吸附 3600 s 后卸载 3600 s 的吸附变形情况, 顶点随时间的变形位移情况如图 2 仿真曲线所示。真空吸附初期的前几分钟, 顶点因蠕变明显所以变形较快, 1000 s 时达到约 0.01 mm, 之后的变形比较平缓, 在 3500 s 左右达到约 0.015 mm; 卸去载荷后, 变形迅速回落到 0.012 mm 左右, 之后 3600 s 变形回复缓慢。试验数据则表明吸附 3600 s 顶点变形量约为 0.014 mm, 卸载瞬间变形回落到 0.013 mm 左右, 之后回复缓慢。另外试验之前测得空心半球的实际高度为 50.112 mm, 试验结束时为 50.100 mm, 自由放置 6h 后测得其高度为 50.105 mm, 24 h 后高度回复到 50.110 mm, 残余变形很小。

上述结果表明, 计算和试验的数据基本吻合, 特别是在吸附夹持初期阶段的前 20 min, 之后仿真计算的数据比试验结果略大, 60 min 内最大误差不超过 10%。造成这种误差的原因主要有: 不同批次炸药件的蠕变特性个体差异较大; 夹持状态下的 PBX 部件主要受压缩应力, 但同时有拉伸/剪切应力等, 而模型侧重于反映 PBX 的压缩蠕变。总的来说, PBX 部件在机械加工过程中从夹持到加工完成一般只需要十几分钟到几十分钟不等, 仿真和试验的比较表明模型用于模拟机械加工过程中 PBX 部件的夹持变形具有较高的精确性和可靠性, 可用于预测不同结构和受力的 PBX 短时夹持变形。

3.1.4 真空吸附 PBX 球壳的变形预测

球壳结构及尺寸如图 3 所示, 按类似 3.1.1 的方法确立有限元模型边界条件, 模拟真空吸附下该球壳

1800 s 内的变形情况。发现顶点区域的整体变形最大,呈现向与吸盘的接触面靠近而逐渐减小的趋势,最大变形约 0.012 mm。如图 3 所示,以球心为起始点,每隔纬度 15° 选定一个节点并输入其径向和切向变形位移,再根据矢量求和的方式求出所示各点最大变形位移的大小和方向,令各点的最大变形矢量和该点的径向方向成如图夹角 θ 。经数据整理,各点随时间变化的变形位移矢量大小和方向夹角 θ 分别如图 4、图 5。

由图 4 可以看出,球面上各点的变形位移矢量大小各自随真空吸附时间的增加而逐渐增大,1800 s 时,0° 节点的最大变形约 0.0015 mm,15° 节点约 0.006 mm,30° 节点约 0.009 mm,其余 45°、60°、75° 及 90° 节点的最大变形比较接近,集中在 0.012 mm 左右,并且 75° 和 90° 节点的变形曲线基本重合,表明该结构球壳纬度 75° 以上区域最大变形情况基本相同;综合比较各纬度节点的变形情况发现随纬度的增加变形量逐渐增大。由图 5 可以发现,球面各纬度节点的变形位移矢量方向夹角 θ 在吸附初期的前几分钟呈迅速增大的趋势,之后趋于稳定,基本不变化,这表明各纬度节点的变形位移方向基本恒定,不随时间明显变化,这为监控和检验该结构炸药部件吸附加工过程中的变形情况提供了参考;稳定后各纬度节点(0° 节点起始至 75° 节点)的方向夹角分别约为 20°、21.5°、

18.5°、15°、10.5° 和 5°,基本表现出随纬度增大变形位移矢量与径向的方向夹角减小的趋势。

3.2 三爪卡盘夹持 PBX 部件

3.2.1 有限元模型的建立和边界条件的确定

与 3.1.1 类似,采用 SOLID185 单元及公式(1)和表 1 确定的蠕变模型建立 PBX 圆环(外径 $\Phi 160$ mm、内径 $\Phi 130$ mm、长度 55 mm)的三维有限元模型并划分网格。三爪卡盘采用 45 号钢,试验测得该奥克托今基 PBX 与 45 号钢的静摩 μ 擦系数为 0.417。按单爪 200 N 计,根据公式(2)公式(3)可计算出卡盘爪子和 PBX 部件间的最大静摩擦力为 83.4 N,由于三爪卡盘具有自定心的优点,因此夹持力产生的切向分量很小,接触面产生滑移困难,为此假设并施加接触面内节点各向 0 位移约束。

3.2.2 三爪卡盘夹持 PBX 球壳的变形预测

模拟单爪 200 N、400 N 及 600 N 下,图 3 所示球壳的夹持变形情况(假定夹持力恒定),图 6、图 7 分别是单爪 600 N 夹持 1800 s 的球壳应力云图和变形位移矢量图。图 6 可以看出,卡盘爪子与炸药部件接触的区域变形最为明显,最大变形约 0.218 mm,卡盘爪子之间的区域由于挤压的原因变形也比较明显,最大在 0.18 mm 左右,球壳顶部变形较小;从图 7 来看,卡

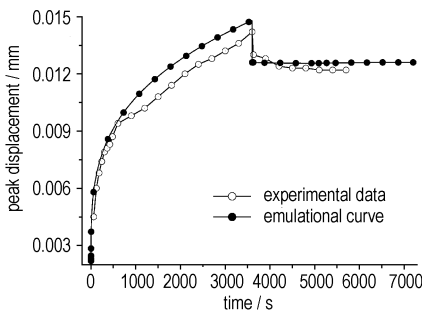


图 2 空心半球顶点位移变化图
Fig. 2 Peak displacement of the hollow hemisphere

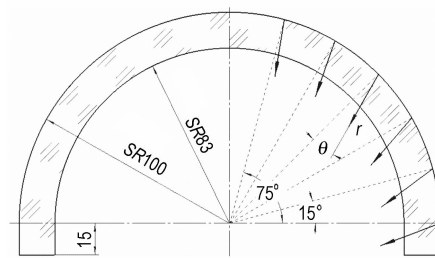


图 3 球壳结构示意图
Fig. 3 Structure scheme of spherical shell

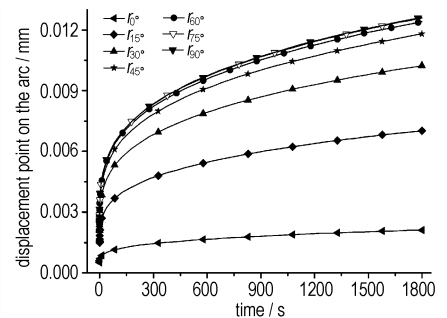


图 4 球壳各点变形位移矢量大小
Fig. 4 Deformed displacement vector sizes of points on spherical shell

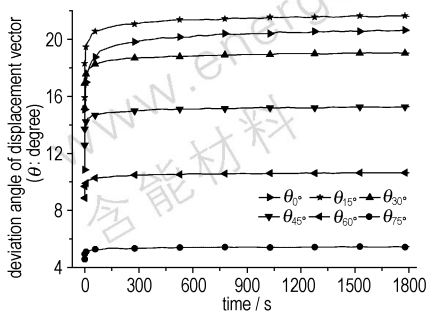


图 5 球壳各点变形位移矢量方向夹角
Fig. 5 Deformed displacement vector included angles of points on spherical shell

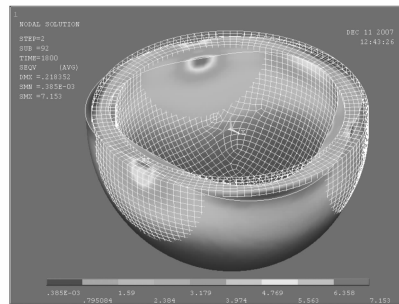


图 6 单爪 600 N 球壳应力云图
Fig. 6 Stress contour at 600 N per claw

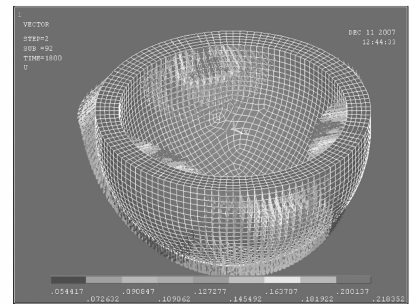


图 7 单爪 600 N 球壳变形位移矢量图
Fig. 7 Deformed displacement vector at 600 N per claw

爪接触区域的应力值最大,最大约 7.15 MPa,其它地方较大的应力值出现在卡爪之间的内型面上,约 5.5 MPa,这是由于内型面上有较大压缩应力的缘故,与该型 PBX 的拉伸强度(约 8 MPa)和压缩强度(40 MPa左右)相比,单爪 600 N 的夹持力不会破坏该 PBX 球壳。纵观三组夹持力下的夹持变形情况,单爪 200 N 时的最大应力值约为 2.65 MPa,400 N 时在 4.95 MPa 左右,出现的位置与单爪 600 N 时类似。

图 8 是单爪 200 N、400 N 及 600 N 三种夹持力下夹持处随时间变化的径向变形情况,图中空心图例表示内型面径向变形,实心图例表示外型面径向变形(下同)。可以看出,在三爪卡盘的夹持力作用下,前 300 s 左右的径向变形因蠕变明显^[7-8]变化较快,之后趋于平缓,1800 s 时,三组夹持力状态下的径向变形分别在 0.1 mm、0.15 mm 和 0.21 mm 左右;同时,同一

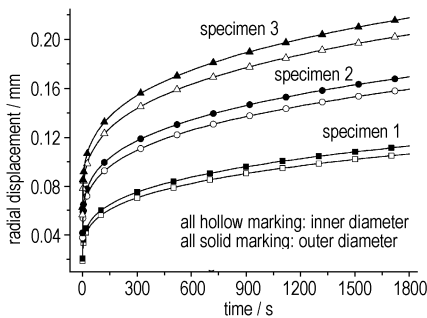


图 8 卡盘夹持时球壳内外型面受力处径向变形
Fig. 8 Internal and external radial displacements when chuck clamping

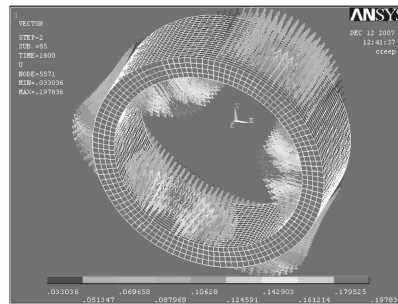


图 9 单爪 650 N 时圆环变形位移矢量图
Fig. 9 Deformed displacement vector of annulus at 650 N per claw

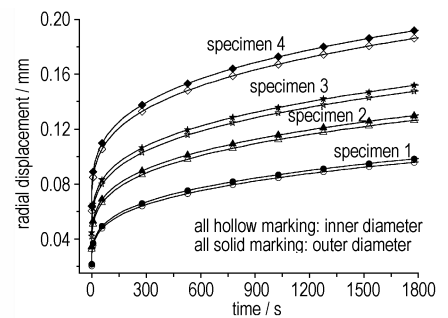


图 10 圆环内外环面受力处径向变形
Fig. 10 Internal and external radial displacements of annulus

图 10 为各组夹持力下圆环受力处内环面和外环面的最大径向变形,从单组曲线来看,各夹持力状态下内环面和外环面的径向变形都随时间逐渐增大,其中夹持初期的前 300 s 变化迅速,这与 PBX 部件蠕变特性^[7-8]的认识吻合,之后逐步增加,1800 s 时,单爪 220 N 夹持力的内外环面径向变形约为 0.09 mm,350 N 和 450 N 时的分别在 0.12 mm 及 0.145 mm 左右;可以发现,每种夹持力下内环面的径向变形总是小于相应的外环面变形,差值因夹持力的增大而呈逐渐增加分布且在 0.01 mm 左右;综合比较各组曲线可以看出,随卡盘夹持力的增加,对应的径向变形呈增大趋势。

4 结论

真空吸附球壳类炸药部件时,型面上各点变形位移方向通常不指向球心,而是与径向呈一定角度,并且在结构边界条件不改变时基本保持恒定;纬度 75°以

夹持力下,内型面的变形比外型面的小 0.005 ~ 0.01 mm 不等;随夹持力的逐渐增大,球壳夹持处径向变形呈逐渐增大趋势。

3.2.3 三爪卡盘夹持 PBX 圆环的变形预测

采用 3.2.1 建立的有限元模型和确定的边界条件模拟三爪卡盘单爪 220 N、350 N、450 N 及 650 N 四组夹持力下 1800 s 内圆环炸药部件的蠕变和变形情况(假定夹持力恒定),图 9 是单爪 650 N 时的变形位移矢量图,与夹持球壳类似,最大变形出现在卡爪和圆环的接触区域,方向指向靠近圆环轴线,约为 0.197 mm,卡盘爪子之间区域也有较大变形,方向主要呈现为远离轴线,最大在 0.16 mm 左右;计算出的应力状况显示,最大应力出现在卡爪与圆环的接触区域,单爪 650 N 时约 9.8 MPa,卡盘爪子之间区域应力值也较高,约 6.5 MPa,均为达到该型炸药的破坏强度。

上区域变形大小基本相同;三爪卡盘夹持 PBX 部件(球壳类、圆环类等)时,最大应力和最大变形位移均出现在炸药部件与卡盘爪子接触的区域,变形方向指向转轴轴心;炸药部件卡盘爪子之间区域也有较大的应力和变形,变形方向远离转轴轴心;应力和变形均随卡盘夹持力的增大而增大,并且受力区域内型面的变形总在一定程度上小于外型面。

基于修正时间硬化理论的蠕变模型可预测不同结构 PBX 部件在不同夹持力下的夹持变形情况,模型在 20 min 内具有较高的准确性和可靠性,之后仿真结果大于试验数据,60 min 内最大误差不超过 10%,优化模型及参数需要进一步开展工作。

参考文献:

- [1] 张双寅. 聚合物基复合材料蠕变及其与疲劳断裂的关系[J]. 复合材料学报, 1987, 4(2): 1-9.

ZHANG Shuang-yin. Creep properties and their relationships to frac-

- ture and fatigue of composite materials[J]. *Acta Materialia Sinica*, 1987, 4(2): 1-9.
- [2] 潘颖, 丁雁生, 蔡瑞娇, 等. 刚性粒子填充高聚物粘弹性细观损伤显微观察[J]. *北京理工大学学报*, 2000, 1: 125-128.
PAN Ying, DING Yan-sheng, CAI Rui-jiao, et al. Microscopic Observations on the Mesoscopic Damage in the Polymer Bonded Solid Particulate[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2000, 1: 125-128.
- [3] Zhao Xiao-dong, Bai Ping, Li Ming, SHI Zheng-jun, Huang Shang-cheng. Experimental and Numerical Investigation into Maching Parameters for Cutting Forcers and Temperatures of PBX[C]//Theory and Practice of Energetic Materials[C]. Beijing, Science Press, 2005: 338-342.
- [4] 潘颖, 丁雁生, 蔡瑞娇, 等. PBX 聚合物基复合材料蠕变损伤一维模型[J]. *兵工学报*, 2000(2): 123-127.
PAN Ying, DING Yan-sheng, CAI Rui-jiao, et al. One-Dimensional Creep-Damage Model of Plastic Bonded Explosives[J]. *Acta Armamentarii*, 2000(2): 123-127.
- [5] 丁雁生, 潘颖, 蔡瑞娇, 等. PBX 材料的蠕变损伤本构关系[J]. *含能材料*, 2000, 8(2): 86-90.
DING Yan-sheng, PAN Ying, CAI Rui-jiao, et al. The Creep-damage Constitutive Relation of PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2000, 8(2): 86-90.
- [6] 李明, 温茂萍, 何强, 等. TATB 基高聚物粘结炸药的蠕变特性研究[J]. *含能材料*, 2005, 13(3): 150-154.
LI Ming, WEN Mao-ping, HE Qiang, et al. The Compressive Creep Behavior of PBX Based on TATB[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(3): 150-154.
- [7] 唐维, 李明, 温茂萍, 等. 基于修正时间硬化理论的 PBX 蠕变模型[J]. *含能材料*, 2008, 16(1): 34-37.
TANG Wei, LI Ming, WEN Mao-ping, et al. PBX Creep Model Based on Modified Time Hardening Theory[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(1): 34-37.
- [8] 唐维, 李明, 庞海燕, 等. 修正时间硬化理论的 PBX 蠕变模型及其应用[J]. *火炸药学报*, 2007, 30(6): 1-4.
TANG Wei, LI Ming, PANG Hai-yan, et al. Creep Model based on Modified Time Hardening Theory of PBX and Its Application[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(6): 1-4.
- [9] 齐民友, 刘禄勤, 龚小庆, 等. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 56-62.
QI Min-you, LIU Lu-qin, GONG Xiao-qing, et al. Probability and Mathematical Statistics[M]. Beijing: High Education Press, 2002: 56-62.
- [10] Stephan Schoft, Josef Kindersberger, Helmut Löbl. Reduction of Joint Force by Creep in High Current Joints[C]//Proceedings of the 21th Conference on Electrical Contacts 2002, Switzerland; Zurich Press, 2003: 406-412.
- [11] Chandenduang C., Becker A. A. Boundary element formulation for two-dimensional creep problems using isoparametric quadratic elements[J]. *Computers and Structures*, 2003, 81(16): 1611-1618.
- [12] Jahed Hamid, Bidabadi Jalal. An axisymmetric method of creep analysis for primary and secondary creep[J]. *The International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2003, 80(9): 597-606.
- [13] Ogbonna N., Fleck N. A., Cocks A. C. F. Transient creep analysis of ball indentation[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1995, 37(11): 1179-1202.
- [14] Soare S., Bull S. J., O'Neil A. G., et al. Nanoindentation assessment of aluminium metallisation; the effect of creep and pile-up[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 177-178: 497-503.
- [15] 李德晃. 炸药作业的事故控制[M]. 绵阳: 《强激光与粒子束》杂志社, 2001: 89-92.
LI De-huang. Accidents controlling of operating explosives[M]. Mianyang: Journal Press of High Power Laser and Particle Beams, 2001: 89-92.

Prediction for Clamping Deformation of PBX Parts on Machining Process

TANG Wei, LI Ming, ZHANG Qiu, HUANG Jiao-hu, ZHAO Yong-zhong, LIU Wei, ZHAO Xiao-dong

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Machining is considered as one of the most important procedures as for complicated components of polymer bonded explosives (PBX). A definitive modified time hardening theoretical creep model was used to predict clamping deformations of different structural PBX parts under various clamping forces, which affects cutting accuracy directly. Simulation of vacuum absorbed spherical shell shows that displacements of points on profile increase with latitude, and its vector has an included angle to radial. When camring chuck gripping a PBX parts, both the maximum deformation and stress appear in the contact area, and the value of internal is smaller than that of the external to a certain extent. Comparing simulation of vacuum absorbed hollow hemisphere with experimental data gauged by micrometer, the creep model has a better accuracy and reliability in the first twenty minutes, and the simulational results larger than test later with a less than 10% extent error within an hour.

Key words: material mechanics; machining; polymer bonded explosive; creep model; modified time hardening theory; deformation