

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.05.05

测试装置重量对身管直线度测量精度影响分析

宋珊珊¹, 李剑峰¹, 孙杰¹, 冯忠彬²

(1. 山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东省黄河计量研究院, 山东 济南 250100)

摘 要: 随着复合材料的广泛应用, 复合材料身管直线度测量成为亟待解决的工艺难题, 传统用于钢管直线度测量的装置将会引起较大的复合材料身管直线度测量误差, 为此, 应用 ABAQUS 有限元分析软件对处于不同载荷、不同支撑条件下的复合材料身管变形进行分析, 建立复合材料身管三维有限元模型, 分析得到不等重的测试装置在身管不同支撑条件下引起的复合材料身管变形量大小, 设计相应试验验证有限元分析结果的正确性。结果表明测试装置自重及身管不同支撑条件对复合材料身管直线度测量精度产生重要影响, 因此可以通过改变身管的支撑条件来降低测试装置自重的影响。采用数据拟合得到身管变形量和测试装置重量之间的关系, 为复合材料身管直线度检测系统设计提供理论依据。

关键词: 复合材料身管; 变形量; 测试装置重量; 有限元法

中图分类号: TB33; TB921; TB115

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)05-0023-05

Analysis of Test Equipment Weight Impact on Composite Material Barrel Straightness Measurement Accuracy

SONG Shanshan¹, LI Jianfeng¹, SUN Jie¹, FENG Zhongbin²

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. The Yellow River Institute of Metrology and Research, Jinan 250100, China)

Abstract: With the application of composite materials in the defense industry, the straightness measurement of composite material barrel becomes a technical issue that needs to be solved urgently. Traditional equipment used for steel pipe straightness measurement causes larger errors in composite material barrel straightness measurement. Therefore, finite element analysis software ABAQUS is used to analyze the composite material barrel deformation under different load and different supporting conditions. The three-dimensional finite element model of the composite material barrel is established. The deformation of composite material barrel caused by different weight measuring equipment under different supporting conditions of composite material barrel is obtained. Corresponding test is designed to prove the validity of the finite element analysis results. It is proved that the weight of equipment and the different supporting conditions of barrel have significant influence on the composite material barrel straightness measurement accuracy. Therefore we can reduce the influence of test equipment weight by changing the different supporting conditions of barrel. The relationship between barrel deformation and test equipment weight is obtained by using the method of data fitting, and it provides theoretical basis for the design of straightness measurement system of composite material barrel.

Key words: composite material barrel; deformation; test equipment weight; finite element method

0 引言

常规材料的火炮身管如钢质身管, 因自重大、机动性能差, 且资源消耗大, 不适应可持续发展的战略需求, 制约着其在现代国防工业中的应用。为减少身

管的自身重量和自重弯曲对机动性能与使用精度的影响, 从上世纪 80 年代国内外开始对复合材料在火炮身管上的应用开展研究, 利用复合材料高强度、低密度及一定的耐高温等优势, 将常规的金属材料用复合材料代替。然而, 复合材料弹性模量小、材料成型工艺相对复杂, 工艺过程中易造成轴线弯曲变形, 使发射路径发生改变, 造成射击不准确, 为有效保障武器射击的准确度, 必须对复合材料身管直线度进行高精度测量。

早期用于检测弯曲度的方法有量规检验法、杠杆法、指示器法和光轴法等^[1-2], 随着科学技术的发展,

收稿日期: 2015-07-03; 修回日期: 2015-07-08

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研计划项目(GKY201201)

作者简介: 宋珊珊(1990-), 女, 山东威海人, 硕士研究生, 主要研究方向: 机械系统智能控制与动态检测技术; 李剑峰(1963-), 男, 山东济南人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 绿色制造、机械加工及制造加工过程中的测量与控制。

传统的直线度测量方法已经不能满足需要,研制直线度检测系统对火炮身管直线度进行自动检测已成为发展方向。上世纪 80 年代初,美国和德国就开始研究用于火炮身管质量的光电检测设备^[3],采用传统的光学准直仪和沿炮管移动的定心靶检测身管直线度。国内孙长库等^[4]应用激光线结构光传感器对无缝钢管进行光切,求出光切面中心的空间坐标,通过空间直线拟合和误差评定算法,确定钢管轴线的直线度;王伯平^[5]提出了一种基于遗传算法的计算直线度误差的新方法,该方法满足最小条件原理并采用与最小包容区域法等效的理想包容参考直线计算直线度误差;白宝兴等^[6]设计了一种火炮身管直线度无损检测系统主要由检测器、炮膛爬行器、激光器和准直仪组成,实现自动无损检测;马宏等^[7]采用激光准直和光电探测技术代替传统光学检测方法无损检测火炮身管内膛的直线度误差。吉林大学、四川大学、浙江大学的学者^[8-10]都先后设计了独具特色的身管轴线直线度检测设备。

上述无损检测设备的测试装置自重对金属身管测试精度不会产生影响,然而,对复合材料身管将产生较大影响。复合材料身管变形问题也得到了学术界与工业界的重视,军械工程学院赵金辉等^[11]应用有限元方法建立火炮身管自重弯曲模型和实体模型,求解出身管在重力作用下的弯曲变形量;何忠波等^[12-13]利用 ANSYS 建立太阳照射下身管上下表面温差有限元模型,求解出身管温度场,得出用温度载荷代替辐射载荷求解弯曲度的结论,进而计算出不同温度、温差下的身管弯曲度,同时仿真分析火炮发射时膛内热交换,得出发射后身管温度场,考虑身管自重及热作用影响,进行热结构耦合分析,求出身管发射后不同时刻的弯曲量。

现有针对复合材料身管的研究大都只关注身管直线度检测方法、检测原理、检测装置研制及检测误差分析,尚缺乏测试装置自重对测试误差影响的系统研究,针对这一现状,拟采用有限元法仿真分析与试验研究相结合的方法,研究不同重量、不同身管支撑位置对复合材料身管弯曲变形的影响,进而拟合相应数学公式,为特定测试精度要求的复合材料身管测试装置重量控制提供支持。

1 重量对复合材料身管直线度影响仿真建模

1.1 复合材料身管有限元模型

进行有限元分析时,将身管几何结构简化为旋转体结构,简化局部细节,对于金属材料身管,为降低计算费用,在进行静态有限元分析时简化为轴对称模

型,对于复合材料身管,身管并不是轴对称结构,本文采用三维实体单元建立复合材料身管的有限元模型,如图 1 所示,身管长度 3 ~ 5 m,直径 110 ~ 120 mm,壁厚 2 ~ 5 mm。材料属性如表 1 所示。

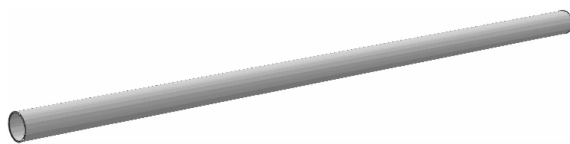


图 1 身管有限元模型

表 1 材料属性表

弹性模/GPa	泊松比	密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
20 ~ 30	0.25	1900

1.2 网格划分

对复合材料身管进行网格划分时采用的单元类型是四结点线性四面体单元 C3D4,单元总数为 125038,结点总数为 39828,当测试装置在驱动装置作用下运动到复合材料身管中间部位时,其自身重量对复合材料身管直线度造成的影响最为严重,为准确得到变形数值,对复合材料身管中间部位的网格进行局部细化,网格划分结果如图 2 所示。



图 2 有限元模型网格划分

1.3 载荷与边界条件

复合材料身管有四个定位台,通过这四个定位台可实现复合材料身管的定位支撑。有限元分析中对身管两端定位台进行定位,约束其 X, Y 方向自由度,在身管内部分别施加 30, 50, 70, 90 N 的体力载荷模拟测试装置重量,改变载荷的施加部位表示测试装置在复合材料身管内移动,载荷与边界条件的施加如图 3 所示。

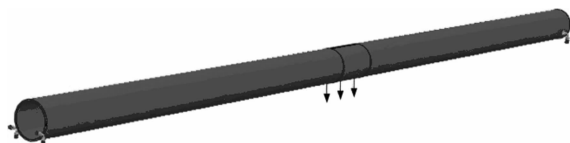


图 3 载荷与边界条件(两端)

1.4 仿真结果

应用 ABAQUS 进行有限元分析计算,其中 30 N 载

荷仿真结果如图 4 所示，从结果云图中可以明显看出，当测试装置位于身管中间部位时其自重对复合材料身管直线度精度影响最为严重。由 30, 50, 70, 90 N 不等重、不同移动位置的测试装置自重所引起的身管中间部分变形量如图 5 所示，各重量的测试装置在整个身管的移动过程中所引起的复合材料身管最大变形量如图 6 所示。

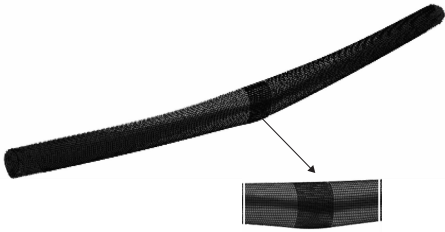


图 4 30 N 载荷身管变形结果

从图 6 中看出随着测试装置在复合材料身管内逐渐移动，身管中间部位的变形量逐渐增大，测试装置移动至身管中间部位时的变形量达到最大值，随着测试装置逐渐远离身管中部，自重对复合材料身管直线度精度影响程度逐渐减小。

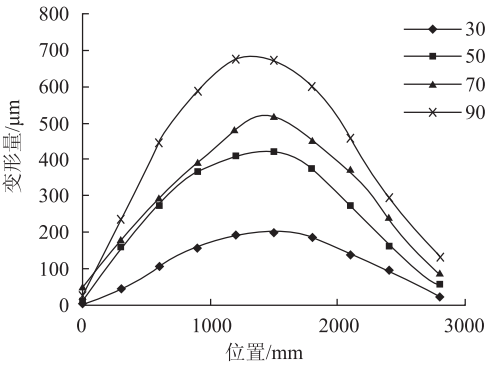


图 5 身管中部变形 - 两端定位仿真

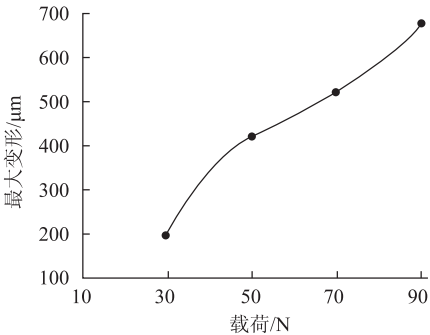


图 6 身管最大变形 - 两端定位仿真

从图 6 可以看出不等重的测试装置自重对复合材料身管变形影响有很大区别，这将直接影响复合材料身管直线度测量精度，在进行复合材料身管直线度自

动检测系统测试装置设计时要遵循轻量化原则，减小测试装置重量，并对测试装置重量自重引起的误差进行补偿。

2 有限元模型实验验证

用 V 型定位块对图 3 所示的身管两端定位台进行定位，分别将不同质量的圆柱体置于复合材料身管内部不同部位，用千分表对身管中间部位变形量进行测量。实验测得不同移动位置的测试装置自重引起的复合材料身管中部变形量与有限元分析变形量对比结果如图 7 所示，图 7 中，实线为仿真结果，与其靠近的虚线为对应的实验结果。不等重的测试装置自重引起的复合材料身管最大变形量实验与有限元对比结果如图 8 所示。

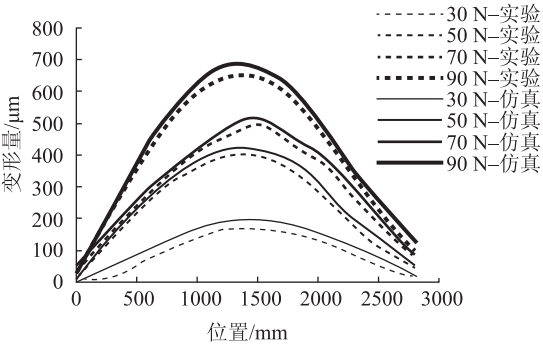


图 7 身管中部变形实验仿真对比(两端)

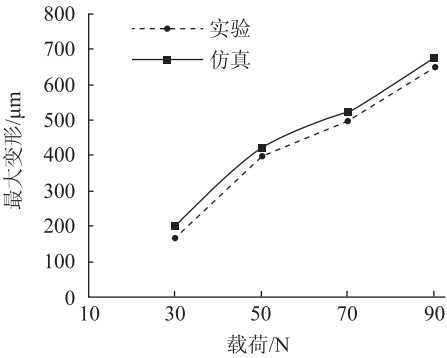


图 8 身管最大变形实验仿真对比(两端)

从图 7、图 8 中看出实验与理论分析结果基本一致，身管中间部位的变形量随着测试装置在身管内的移动逐渐增大至最大值后逐渐减小，当测试装置处于身管中部时，其自重对复合材料身管直线度精度影响程度最严重。

3 不同边界条件下有限元分析与试验验证

将边界条件由图 3 两端定位台支撑换成图 9 中间

两定位台支撑,改变边界条件,其余保持不变,仿真结果如图10,11所示。

实验验证时V型定位块由两端定位变成中间定位,其余实验条件相同,得到的实验测量结果分别如图12,13所示。图12中,实线为仿真结果,与其靠近的虚线为对应的实验结果。

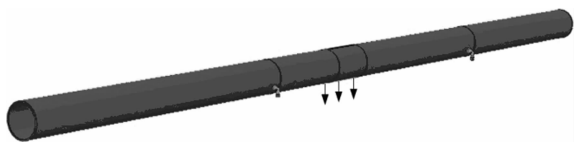


图9 身管载荷与边界条件(中间)

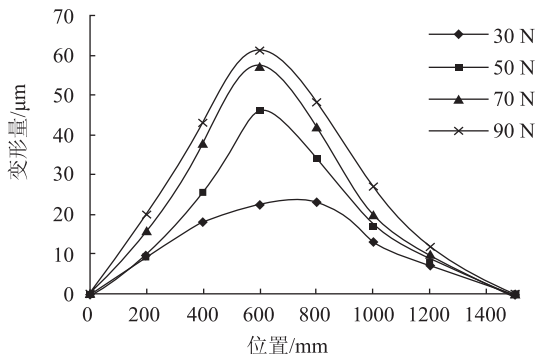


图10 身管中部变形-中间定位仿真

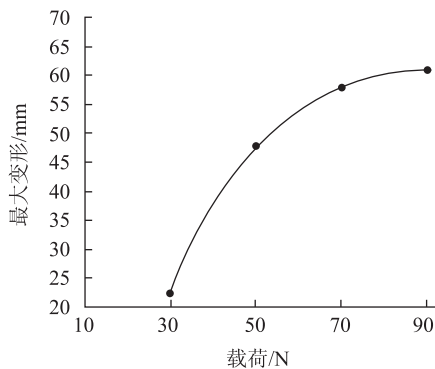


图11 身管最大变形-中间定位仿真

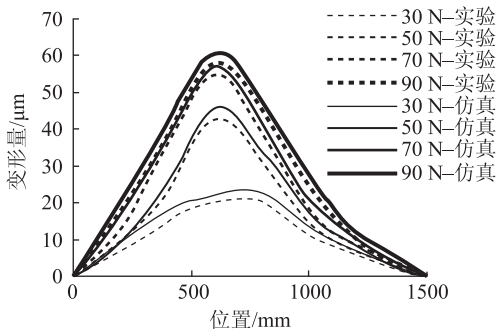


图12 身管中部变形实验仿真对比(中间)

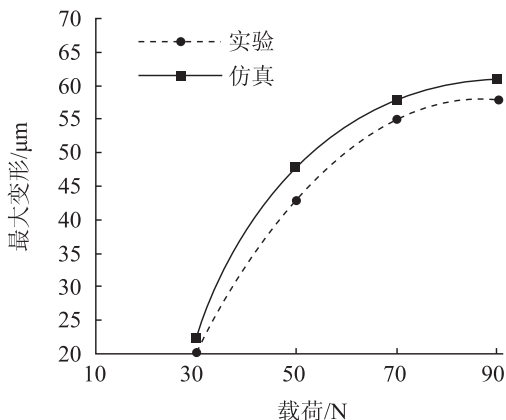


图13 身管最大变形实验仿真对比(中间)

通过变换不同的支撑方式,发现在测试装置重量相同的情况下不同的身管支撑方式可以明显改善因测试装置自重对复合材料身管直线度精度造成的影响,如图14所示。因此支撑方式能直接影响身管直线度自动检测系统测试装置的检测精度,这为身管直线度自动检测系统中复合材料身管定位支撑装置部分的设计提供理论依据。

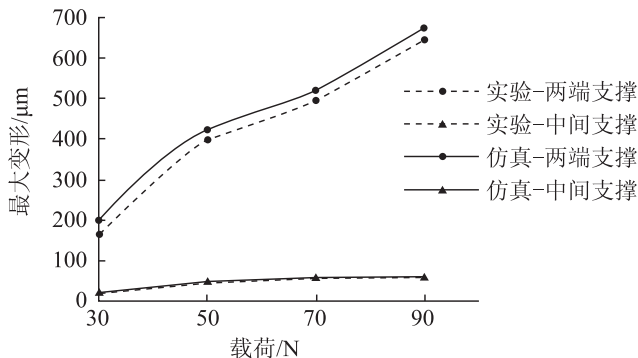


图14 两种支撑方式下的身管变形

4 复合材料身管变形规律

通过实验验证与有限元分析相结合的方式,得到不等重的测试装置对复合材料身管直线度精度造成的干扰大小,研究发现复合材料身管变形量与测试装置重量有明显关系,通过数据进行三次多项式拟合得到复合材料身管两种支撑方式下变形量与检测装置重量之间的关系式(1)两端支撑和(2)中间支撑。拟合曲线图如图15所示。拟合公式为

$$y = 0.0028x^3 - 0.5397x^2 + 40.042x - 585.38 \quad (1)$$

$$y = 0.0001x^3 - 0.0263x^2 + 2.6241x - 33.661 \quad (2)$$

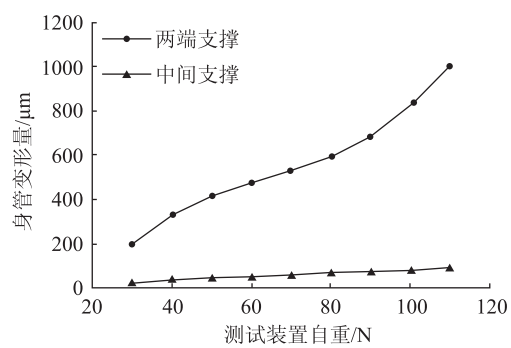


图 15 身管变形规律

5 结论

- 1) 文章通过建立复合材料身管有限元模型计算测量装置自重引起的复合材料身管轴线直线度变形大小, 并通过设计相应试验的方式验证了有限元计算结果的正确性, 结果表明测试装置自重会直接影响身管轴线直线度变形大小, 从而间接影响复合材料身管直线度测量系统测量精度。
- 2) 在测试装置等重的情况下, 身管不同的定位支撑条件对其轴线直线度变形有改善作用, 通过改变身管的定位支撑条件的方式来降低测试装置自重对复合材料身管直线度变形量的影响。
- 3) 通过数据拟合得到的身管轴线直线度变形量与测试装置重量之间的关系, 为复合材料身管直线度检测系统设计提供理论依据, 测试装置设计遵循轻量化原则, 根据关系式得到测试装置自重引起的变形值, 对测试系统进行误差补偿。

参 考 文 献

- [1] 程石, 黄平. 火炮身管直线度检测方法 & 测量元件选择[J]. 国防技术基础, 2007(2): 53-55.
- [2] JournefB, BazinG, BrasF. Conception of an adaptative laser range finder based on phase shift measurement[C] // Proceedings of IECON. New York: IEEE, 1996, 2: 784-789.
- [3] Weck M, SchmidtM. A new method for determining geometric accuracy in the axis of movement of machine tools[J]. Precision engineering, 1986, 8(2): 97-103.
- [4] 孙长库, 尤强, 卢荣胜, 等. 无缝钢管直线度激光视觉在线测量[J]. 计量学报, 2002, 23(3): 174-177.
- [5] 王伯平, 孙大刚, 孔令德, 等. 基于遗传算法的直线度误差的测量[J]. 计量学报, 2004, 25(1): 16-18.
- [6] 白宝兴, 马宏. 火炮身管内膛直线度无损检测系统[J]. 长春理工大学学报, 2002, 25(2): 37-39.
- [7] 马宏, 潘毓学, 车英, 等. 炮管直线度激光检测设备研究[J]. 兵工学报, 2003, 24(2): 261-263.
- [8] 季立江. 炮管轴线直线度检测仪研究[D]. 成都: 四川大学, 2003.
- [9] 叶挺锋. 火炮身管检测技术与系统设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [10] 张诚高. 火炮身管内膛参数综合检测技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [11] 赵金辉, 何忠波, 傅建平, 等. 基于 ANSYS 的身管自重弯曲的有限元计算[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(6): 64-66.
- [12] 何忠波, 赵金辉, 傅建平, 等. 火炮身管温差热弯曲的仿真与计算[J]. 火炮发射与控制学报, 2010(1): 34-38.
- [13] 赵金辉, 何忠波, 傅建平, 等. 火炮发射过程中身管温度场及弯曲度的有限元计算[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(5): 106-109.



中图仪器螺纹综合测量机市场捷报

中图仪器新近推出的螺纹综合测量机在用户市场已呈现出火热反响, 在过去的一个月里捷报频传, 分别中标山东省、新疆、广州、秦皇岛、安徽省等计量院所的螺纹综合测量机项目。

据介绍, 中图仪器研制的螺纹综合测量机是国内唯一一款高精度、高效率检测螺纹量规全参数的设备。性能和精度已媲美欧洲进口的同类机型, 某些方面甚至优于进口。

该公司相关负责人表示: 本土仪器在贴合市场需求方面也优势突出, 例如: 进口设备内含的螺纹标准数据库只有常用的 20 多个标准, 不包含我国的国标 (GB 标准), 中图仪器的数据库目前已有 70 多个标准,

还在持续增加中, 预计到 2015 年底, 会突破 100 个标准。

(孙玉容 报道)



中图仪器螺纹综合测量机实验室