

环保型火炮身管热护套分析与测试

李贵虎 周伟

(山西北方机械制造有限公司 山西 太原 030051)

摘要: 阳光照射会在火炮身管上下表面产生温差而造成弯曲变形, 引起坦克炮和突击炮首发命中率下降, 为提高首发命中率, 现代坦克炮和突击炮上均配置身管热护套, 热护套防护效率是评价热护套结构设计的最主要指标; 为在不降低身管热护套防护效率, 从而提升热护套的环保性能和轻量化水平, 在对典型身管热护套结构、材料分析的基础上, 通过陶瓷纤维布和石墨纸替代石棉布和铝合金板, 针对某身管开展了3种结构热护套防护效率的仿真分析; 对铝板+陶瓷纤维布+石墨纸结构形式的技术方案环保型热护套试制样机进行了质量称量和热防护效率测试, 并将仿真结果与测试结果进行了对比分析, 仿真分析与热护套效率结果接近度较好, 达到了研究所提出的高效率、轻量化和提升环保性目的。

关键词: 热护套; 环保型; 仿真; 测试; 防护效率

0 引言

首发命中率是坦克武器系统最重要的战术技术性能指标之一, 坦克炮受日晒、雨淋等外界气候的影响, 在身管上、下表面产生温差, 造成热弯曲变形, 这种热弯曲变形导致炮口角变化直接影响坦克炮首发命中精度。根据王靖君等可知美国 105 坦克炮身管上、下表面温差为 20℃ 时, 身管弯曲造成的误差达 8 密位。根据罗来科等经仿真分析, 当上下表面温差达到 3K 时, 身管弯曲可达 1mil。

身管热护套是在提高坦克首发命中率的背景下出现的身管附加装置, 是装在火炮身管上的一组套筒或包覆物, 其作用是为了减小身管热弯曲变形, 从而提高火炮首发命中率。樊成军等对美国 M68 型 105 坦克炮无热护套和带热护套时在南偏西 29° 方位对 1000m 处立靶射击, 在最强的阳光下, 每小时发射 1 组 4 ~ 5 发炮弹, 身管平均弹着中心散布仅为带热护套身管的 39%。根据罗来科等研究表明: 身管上下表面温差越大, 身管上下弯曲越大, 当上下表面温差达到 3K 时, 弯曲可达 1mil, 对射击精度影响很大。

对身管热护套的热防护性能, 用防护效率 E1 或者 E2 来表示, 其中:

$$E1 = \frac{\text{裸管炮口挠度} - \text{带热护套身管炮口挠度}}{\text{裸管炮口挠度}} \quad (1)$$

$$E2 = \frac{\text{裸管炮口倾角} - \text{带热护套身管炮口倾角}}{\text{裸管炮口倾角}} \quad (2)$$

身管热护套设计需要关注的不仅仅是效率, 还需要关注质量以及环保特性。质量大会加大坦克炮挠度并影响首发命中率与轻量化水平。环保已逐步被大众所日渐关注, 环保特性也是武器装备当前设计时需要考虑的重要问题。

本文从热护套基本结构与原理出发, 以某坦克炮身管为研究对象, 在不降低身管热护套防护效率的前提下, 提出了环保型身管热护套基本方案并与其

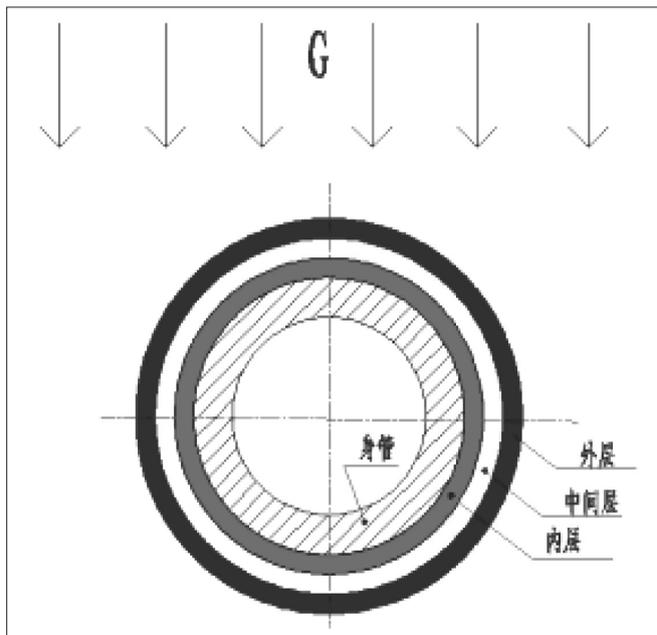


图 1 身管热护套结构简图

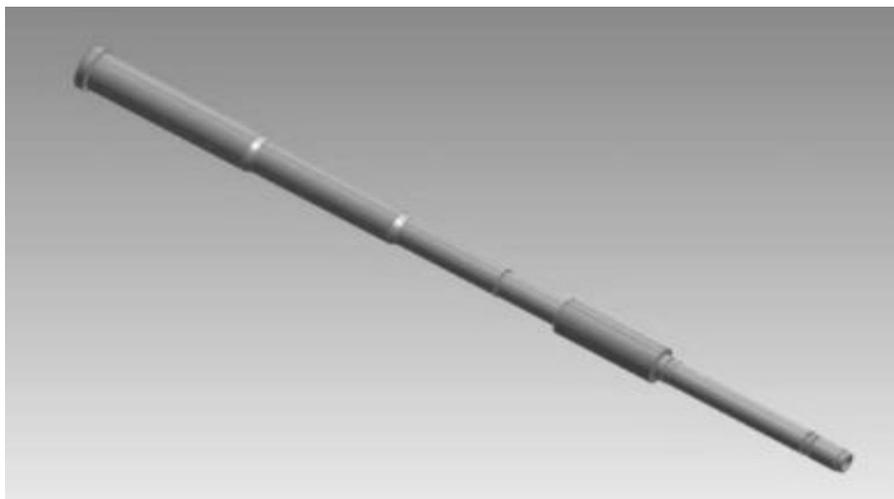


图 2 某身管裸管的三维模型

表1 热护套主要性能对比

型号	热护套种类	质量/kg	炮口挠度/mm	防护效率/%
T72	裸管	—	4.5	—
	导热型热护套	5.38	2.69	41.14
国外 105 坦	裸管	—	2.186	—
	带绝热型热护套	62.2	0.83	62.03
国内 105 坦	铝板空气夹层	6.8	0.57	73.9
	铝板间隙夹层	6.95	0.695	68.2
	铝板 玻璃钢复合	24.86	0.524	76.03
	铝板玻璃钢 空气复合	16.63	0.469	78.55

注：辐照强度 963W/m².min，照射时间 1h

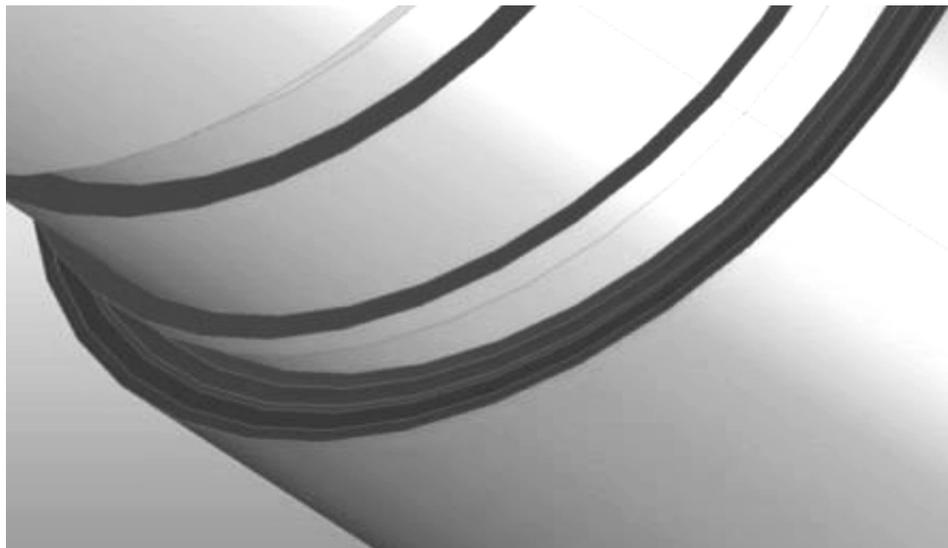


图3 某带热护套身管的三维模型



图4 裸管有限元模型

他2种身管热护套方案一同进行热护套防护效率的热载荷有限元仿真和对比分析，并对环保型身管热护套试制出实物样机进行了试验测试，并将仿真结果与测试结果进行了对比分析。

1 热护套基本结构与作用原理

热护套从作用机理主要是隔热型和导热型、复合型三种类型。

隔热型身管热护套由绝热材料制成，它借助于身管和外界的热交换，从而降低身管局部受热或冷却引起的温度不均匀性，减小身管热变形，比如M1A2主战坦克、勒克莱尔主战坦克均采用两层玻璃纤维增强塑料中间夹泡沫塑料型式制成热护套。

导热型身管热护套由导热材料制成，它借助导热材料的高导热效应使作用在局部的热量迅速传向整体，降低温度分布的不均匀性，然后再同身管进行热交换，从而降低身管的热变形，比如在T72坦克炮上最后一节热护套采用此结构。

复合型身管热护套是由导热材料和隔热材料相间组成的多层结构，它有导热型和隔热型身管热护套的特点，既有均热作用，又有隔热作用，热防护效能良好。典型的复合型热护套由内层、中间层和外层构成，每层均可简化为圆筒，包覆于身管外表面，图1所示为身管热护套的结构简图，内层和外层为导热层一般为铝合金板，中间层为隔热层，一般为空气或石棉布。

复合型热护套按照材质可分为铝板空气夹层热护套（双层铝板夹空气层）、铝板空气间隙热护套（单层铝板+封闭空气）、铝板玻璃钢热护套（双层铝板+玻璃钢板+空气层构成夹层结构）、铝板玻璃钢复合热护套（双层铝板与玻璃钢直接复合）、玻璃钢铝箔复合型热护套（玻璃钢

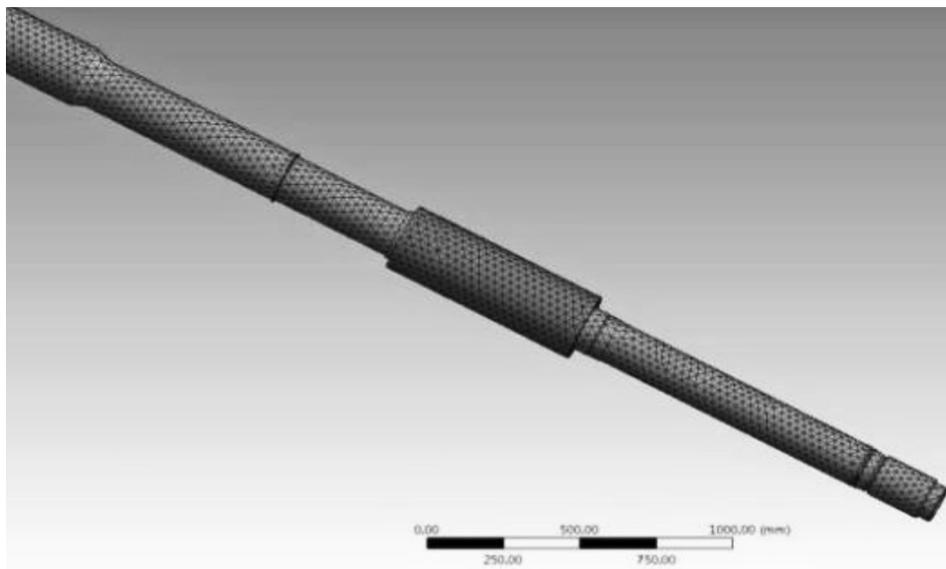


图 5 带热护套身管有限元模型



图 6 某坦克炮裸管热弯曲情况

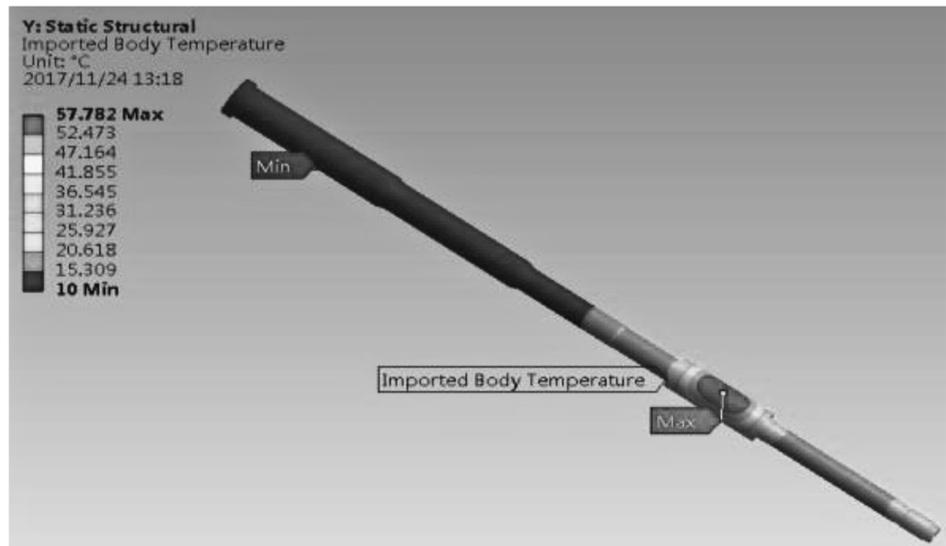


图 7 热护套方案 1 热弯曲情况

和铝箔构成的多层结构)、双层铝板石棉夹层热护套(双层铝板夹石棉布)等。俄罗斯研制的系列坦克炮一般采用空气间隙热护套,如 T72 主战坦克、章鱼自行反坦克炮。我国研制的坦克炮一般采用铝板空气夹层结构,比如 99 主战坦克,典型的的热护套数据见表 1。

通过表 1 可看出,从减轻质量、提高防护效率的角度来看,导热隔热型综合优势明显,尤其是铝板空气夹层结构,但由于采用了双层铝板,质量稍高于导热性热护套,基于质量考虑国内 105 坦克炮主要采用铝板间隙夹层结构。王道宏等基于防冲击波考虑,反坦克炮上采用了双层铝板夹石棉布结构。

2 环保型身管热护套技术方案

某 105 突击炮由于配置了炮口制退器,发射时冲击波较大,采用了双层铝板石棉夹层热护套。但是铝的比重为 2.7,造成热护套质量还较大,而石棉具有致癌性,石棉纤维对多种细胞均会引起细胞染色体的损伤,Yegles 等研究表明将皮细胞与石棉纤维共同孵育后温石棉和青石棉均可致大鼠胸膜间皮细胞染色体数量和结构异常。为进一步减轻质量与提升装备环保性的考虑,拟通过更换材料替换热护套实现轻质量和环保特性提升,其中,身管热护套材料设计上引入了陶瓷纤维替代石棉、引入石墨纸替代铝材料。

陶瓷纤维是以氧化铝和二氧化硅为主要成分的人造矿物纤维,是一种性能优异、纤维状的新型绝热节能材料,广泛应用于工业、民用及国防领域的耐高温、绝热部位,无毒、无害且对环境无不良影响,可完全替代石棉。石墨纸是将高碳鳞片石墨经化学处理、高温膨胀轧制而成的一种材料,导热性好,比重小(1.5)

已广泛应用于消费类电子产品方面。因此，以典型的导热隔热型热护套作为热护套结构形式，构建了 3 种技术方案，配置见表 2，而方案 2 作为环保型身管热护套技术方案的构型方案，有利于减重减小身管挠度提高首发命中率，也有利于提高环保性能。

3 仿真分析情况

3.1 三维模型建立

建立身管及热护套三维模型（见图 2 和图 3）。

3.2 边界条件设定

表 2 身管热护套方案组成

组成	方案 1	方案 2	方案 3
外层	铝合金板	铝合金板	铝合金板
中间层	空气	陶瓷纤维布	空气
内层	铝合金板	石墨纸	石墨纸

表 3 身管和热护套材料热物理性能

名称	比热容 / (J/kg·°C)	导热系数 / (W/m·°C)	弹性模量 / MPa	密度 / (kg/m ³)	泊松比	线膨胀系数 (/°C)	黑度值
炮钢	460	40	2.06 × 10 ⁵	7833	0.3	1.25 × 10 ⁻⁵	—
铝合金	875	144	—	2770	—	—	0.15
空气	1006.4	0.0242	—	1.225	—	—	—
石墨纸	850	1200	—	1500	—	—	0.8
陶瓷纤维	670	0.03	—	128	—	—	—

表 4 热护套防护效率仿真分析结果

技术方案	炮口最大挠度 /mm	防护效率 /%	最高温度 /°C
裸管	2.9855	—	57.782
方案 1	0.82289	72.4	57.788
方案 2	0.75373	74.7	57.821
方案 3	0.78049	73.8	57.798

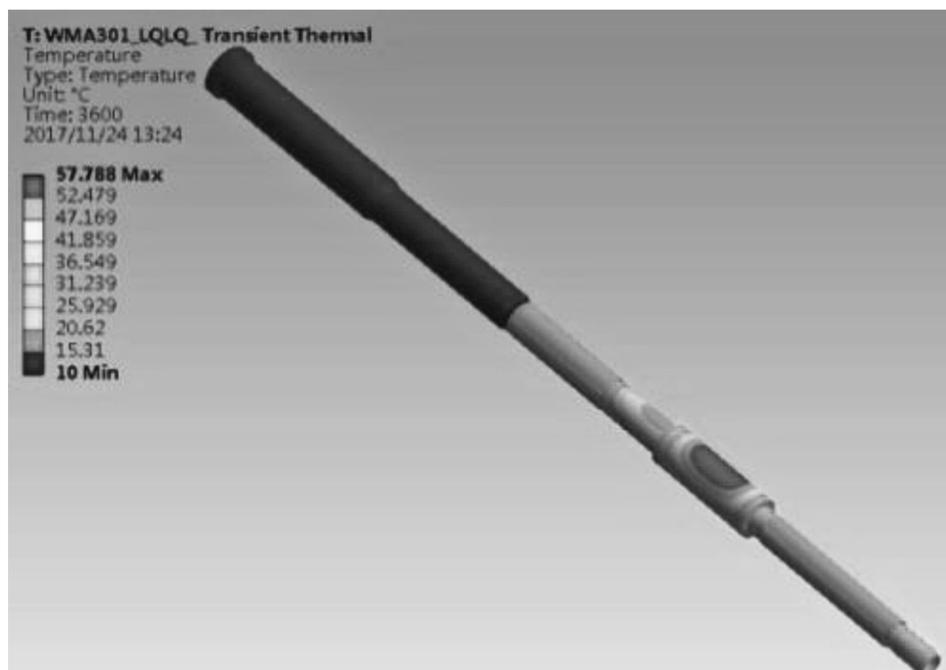


图 8 热护套方案 2 热弯曲情况

设定辐照强度按照 1100W/m²，辐照区域设定在暴露于炮塔外的部分，光照时间设定为 3600s，环境温度为 10℃，火炮炮身初始温度与环境温度一致，空气表面对流系数为 10w/m²，仿真分析时光照以热流密度载荷加载到身管热护套的外表面，并假设光直射身管热护套上表面，身管和热护套材料特性见表 3。

由于坦克炮身管本身向外发射辐射且与环境空气进行对流换热，且内表面与膛内空气进行对流换热，故膛内空气与火炮身管温差不大，因此可忽略其辐射换热。

3.3 求解

将实体模型导入 Ansys Workbench 中的瞬态热分析模块，身管及热护套计算模型划分完网格分别如图 4 和图 5 所示。

3.4 仿真分析结果

对裸管及 3 种技术方案的热护套进行了热弯曲及温度仿真，求得了炮口最大挠度和身管表面温度分布情况，并得出了 3 种热护套的防护效率，详见表 4，其中技术方案 2 效果最为明显，有利于提高首发命中率，热弯曲及温度仿真情况见图 6 ~ 图 13。

4 测试与分析

试制某突击炮的环保型热护套样机，质量称量结果为 6.3kg，参照文献进行热护套效率测试（见图 14），测试结果见表 5 及图 15。

新型热护套比制式热护套（重 6.95kg）轻 0.65kg。对光照 1h 时新型热护套效率仿真值为 74.7%，测试值为 70.00%，测试值与仿真值相对误差为 6.29%，仿真结果与测试值接近度较好，且均高于某坦克炮测试值（见表 1），保持了较高的防护效率，有利于保持较高的首发命中率。挠度的测试值与仿真值的结果偏差较大，主要因素是环境温度、身管起始温度、身管壁厚差、辐

表 5 身管热护套效率测试结果

测试时间	裸管挠度 (mm)	有热护套炮口挠度 (mm)	防护效率 (%)	带护套身管内表面温度		带护套身管外表面温度	
				上 (°C)	下 (°C)	上 (°C)	下 (°C)
0:00	0	0	0	7.4	7.0	7.4	7.1
0:10	2.25	0.61	72.89	36.2	10.4	38.5	10.7
0:20	2.96	0.85	71.28	43.8	13	45	13.4
0:30	3.18	0.92	71.07	46.6	15.3	47.9	15.5
0:40	3.25	1.03	68.31	49.3	17.5	50.4	17.4
0:50	3.28	1.04	68.29	51	19.5	51.9	19.1
1:00	3.3	0.99	70.00	52.9	21.2	53.4	20.4
1:15	3.34	0.98	70.66	55.6	23.5	54.4	22.5
1:30	3.33	0.97	70.87	56.9	25.6	55.6	24.2
1:45	3.3	0.95	71.21	58	27.3	58	27.3
2:00	3.25	0.95	70.77	58.7	28.8	58.6	27

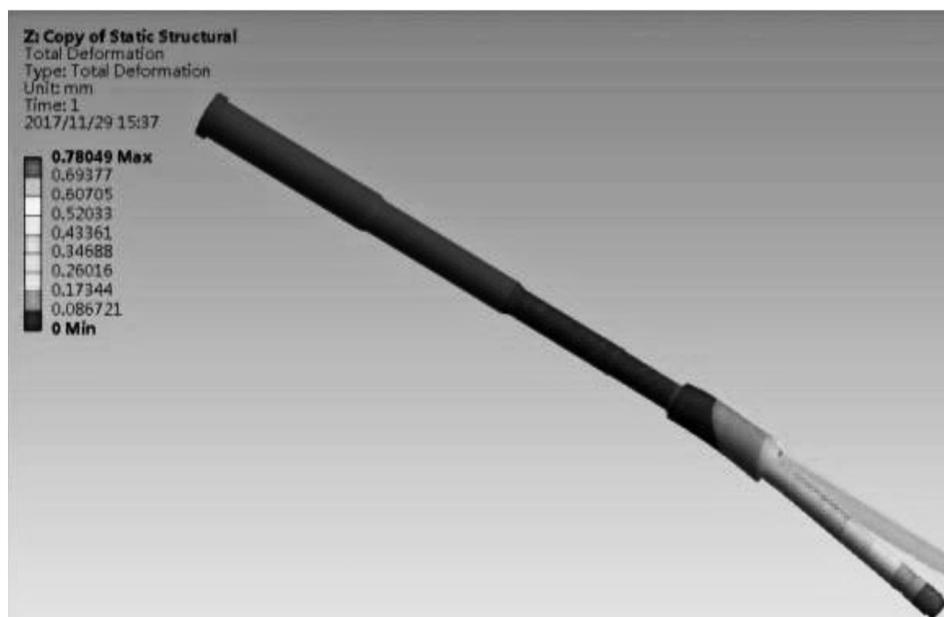


图 9 热护套方案 3 热弯曲情况

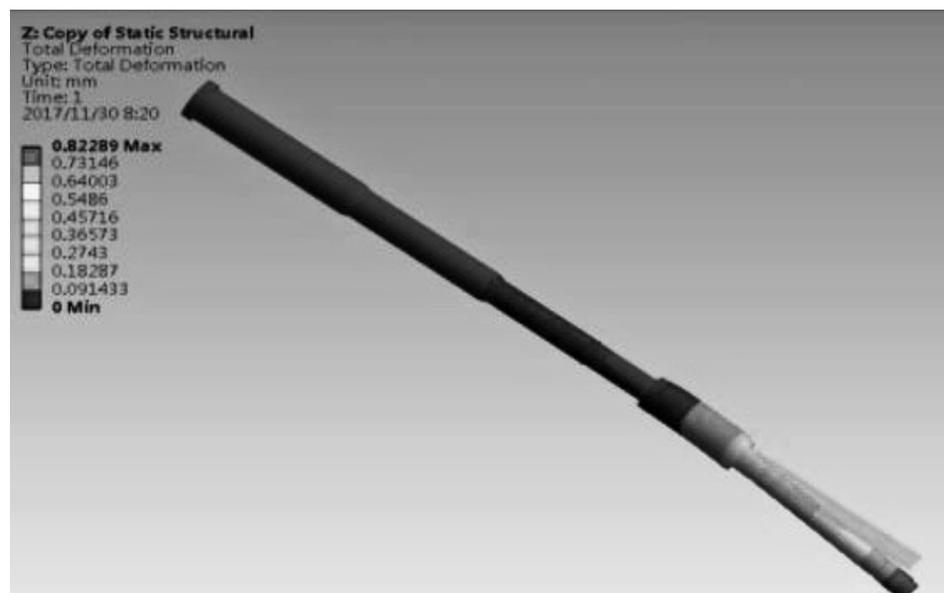


图 10 裸管温度情况

照强度、空气表面对流系数等因素仿真环境与测试环境下条件不一致，但由于仿真与测试是在两个分别独立环境下进行的，因此不影响效率的测试结果。

5 结语

铝板 + 陶瓷纤维布 + 石墨纸结构形式的环保型身管热护套具有防护效率高、轻量化等特性，有利于保持首发命中率，同时具有较好的环保特性，可为坦克炮和反坦克炮、突击炮热护套选型设计提供借鉴。

参考文献：

[1] 王靖君,赫信鹏. 火炮概论 [M]. 北京:兵器工业出版社,1992:85-87.
 [2] 罗来科,宣益民,韩玉阁. 坦克炮管温度场的有限元计算 [J]. 兵工学报,2005,26(1):6-9.
 [3] 曹万有,张文柱,王道宏. 高膛压火炮技术 [M]. 北京:国防工业出版社,1989:177-189.
 [4] 樊成军. 身管弯曲对火炮射击精度影响分析 [D]. 南京理工大学,2002:40-45.
 [5] 罗来科,朱英贵. 坦克炮身管温度变化对射击精度的影响 [J]. 火力指挥与控制,2010,35(3):74-77.
 [6] 谈乐斌,张相炎等. 火炮概论 [M]. 北京:北京理工大学出版社,2014:177-185.
 [7] 王道宏. 现代火炮工程实践 [M]. 北京:国防科学技术委员会,1997:133-151.
 [8] Lu J Keane, MJ Ong T,et al. In vitro genotoxicity studies of chrysotile asbestos fibers dispersed in simulated pulmonary surfactant. Mutat Res[J].1994(320):253.
 [9] Kodama Y,Joreiko CJ,Maness SC,et al. Cytotoxic and cytogenetic effects of asbestos on human bronchial epithelial cells in culture. Carcinogenesis

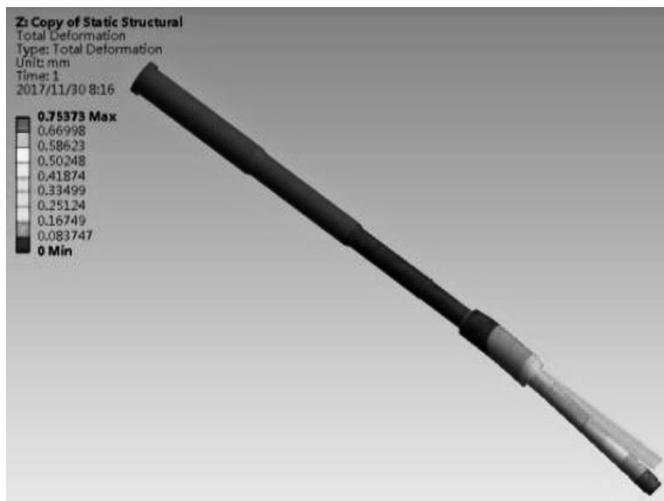


图 11 热护套方案 1 温度情况

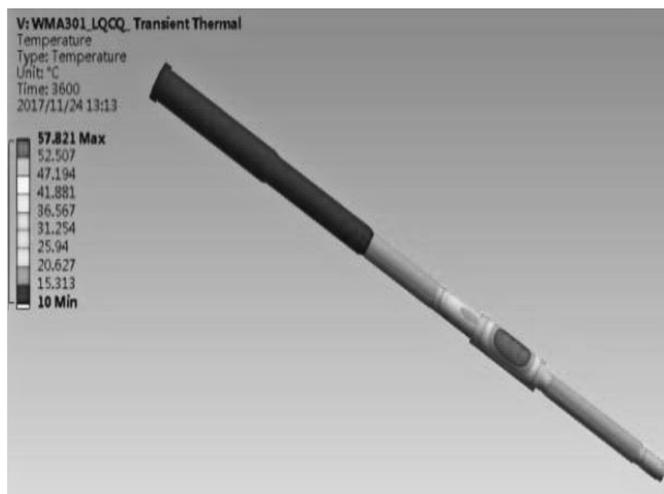


图 12 热护套方案 2 温度情况

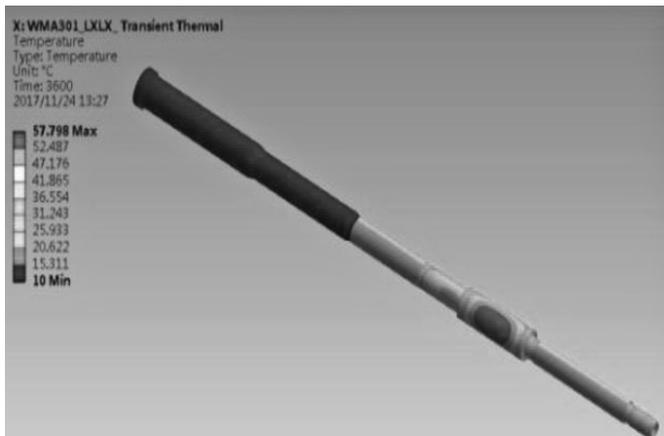


图 13 热护套方案 3 温度情况

[J].1993,14(4):691.

[10]Hart GA ,Kathman LM ,Hesterberg TW. In vitro cytotoxicity of asbestos and man-made vitreous fibers:role of fiber length diameter and composition.Carcinogenesis[J].1994,15(5):971.

[11]Fatma N,Khan SG,Aslam M,et al.Induction of chromosomal

aberrations in bone marrow cells of asbestotic rats.Env iron Res[J].1992(57):175.



图 14 热护套效率测试

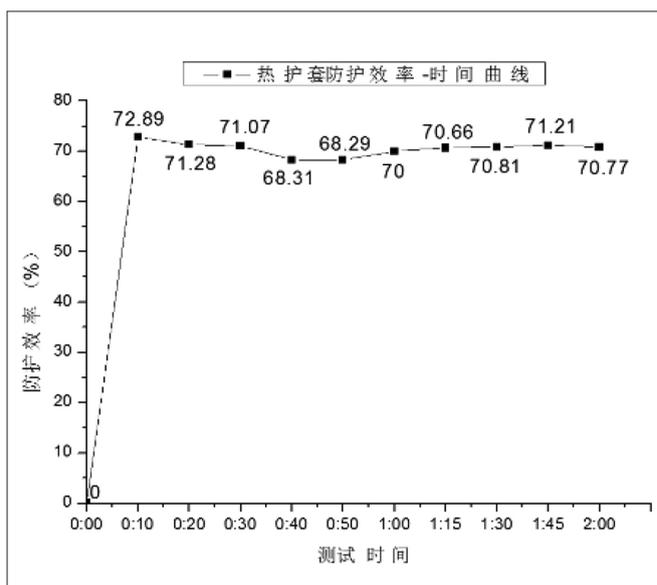


图 15 热护套效率测试

[12]Durnev AD,Dauge-l Dauge NO,Korkina LG,et al. Peculiarities of the clastogenic properties of chrysotile-asbestos fibers and zeolite particles.Mutat Res[J].1993(319):303.

[13]Osgod C and Sterling D. Chrysotile and amosite asbestos induce germ-line aneuploidy in Drosophila.Mutat Res[J].1991(261):9.

[14]Yegles M,Saint-Etienne L,Renier A. Induction of metaphase and anaphase / telophase abnormalities by asbestos fiber in rat pleural mesothelial cells in vitro[J].A m J Respir cell Mol Biol.1993(9):186.

[15]全荣. 陶瓷纤维和绝热技术的开发[J]. 耐火与石灰,2008, 33(6):29-34.

[16]陈美成,王安. 浅谈近年陶瓷纤维在节能环保方面的应用[J]. 河南建材,2018(3):350-351.

[17]第三十一试验训练基地. 坦克炮定型试验规程[S]. 北京: 国防科学技术委员会,1997:13-14.