



内凹六边形负泊松比蜂窝结构弹带挤进过程力学特性

贾雯舒, 曹广群*, 林亚强, 邹利波

(中北大学 机电工程学院, 山西 太原 033000)

摘要: 弹丸挤进身管是一个极其短暂的过程, 伴随着强冲击、高过载和高温的力学环境。在此过程中, 均质黄铜弹带在阳线作用下发生弹塑性变形及损伤破坏, 致使武器身管内表面挂铜现象普遍存在。随着内凹六边形负泊松比蜂窝结构的广泛运用, 结合该结构优良的减载和抗冲击性能, 提出了一种新型内凹六边形负泊松比蜂窝结构弹带, 并建立了弹带挤进身管的有限元模型, 研究了内凹六边形负泊松比蜂窝结构弹带在正装药条件下挤进身管过程中的变形模式与力学特性。研究结果表明: 内凹六边形负泊松比蜂窝型结构弹带能够满足发射时的内弹道性能要求, 与传统均质黄铜弹带相比, 在挤进过程中弹丸运动规律无显著差异; 由于内凹六边形负泊松比蜂窝结构弹带经历了线弹性、平台区和密实化3个变形阶段, 弹带表层有轻微的损伤与断裂, 且与身管内表面贴合较好; 与常规弹带相比能够极大减小弹带挤进时的损伤耗能, 损伤耗能最大值降低了76.9%。内凹六边形负泊松比蜂窝结构弹带能够减少身管内表面挂铜现象的发生, 在一定程度上减少身管表面烧蚀, 提高身管寿命。

关键词: 弹带; 负泊松比结构; 挤进过程; 身管寿命; 有限元

中图分类号: TJ303; O3042 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-499X(2024)04-0063-07

Mechanical Properties of Concave Hexagonal Honeycomb Structure with Negative Poisson's Ratio During Engraving Process

JIA Wenshu, CAO Guangqun*, LIN Yaqiang, ZOU Libo

(School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 033000, China)

Abstract: The engraving process of projectile accompanies the mechanical environment of strong impact, high overload, and high temperature. During this process, the homogeneous brass rotating band undergoes plastic deformation and damage destruction under the action of rifling land, resulting in the copper hanging on the inner surface of the barrel. With the widespread use of the concave hexagonal negative Poisson's ratio honeycomb structure (CHNPRHS), a novel CHNPRHS rotating band was proposed for the purpose of reducing the copper hanging phenomenon, taking advantage of the excellent load reduction and impact resistance of the structure. The finite element model of the rotating band engraving into the barrel was established. The deformation mode and mechanical properties of the CHNPRHS rotating band in the condition of positive propellant were studied. The research results show that the CHNPRHS rotating band satisfies the internal ballistic performance requirements during firing. While the movement of the projectile in the process of engraving is not significantly different from that of the traditional homogeneous brass rotating band. Due to the fact that the CHNPRHS rotating band undergoes three deformation stages of the elastic, plateau, and densification. There is slight damage and fracture on the surface of the rotating band, and it adheres well to the inner surface of the barrel. Compared with the conventional rotating band, the

damage and energy consumption of the rotating band during engraving can be reduced by 76.9%. The CHNPRHS rotating band can decrease the occurrence of copper hanging on the inner surface of the barrel, and reduce the surface erosion of the barrel to some extent, thereby improving the service life of the barrel.

Key words: rotating band; negative Poisson's ratio structure; engraving process; barrel life; finite element method

常规均质弹带的材料为金属黄铜,在弹丸射击过程中,黄铜弹带与身管阳线会发生剧烈摩擦。在摩擦过程中,摩擦表面因黏着磨损而发生了粘连和剥落,磨损的铜颗粒进入内膛表面的微小裂缝中,加速了裂纹的扩展^[1],致使镀层剥落,基体材料暴露在火药燃气作用下,加大基体材料的烧蚀。尼龙弹带能够较好地避免身管内表面挂铜,但存在易变形卡弹,耐久性低,高温下容易老化,且一旦磨损就需要更换,成本较高。因此,在不影响身管武器内弹道的情况下,合理设计弹带的结构,减少弹丸与身管之间的磨损十分重要。

负泊松比结构以其卓越的力学性能,在航空航天、航海、机械自动化、生物医疗以及国防军事等领域得到广泛应用^[2]。在负泊松比结构设计与应用研究方面,LIU等^[3]进行了内凹六边形蜂窝结构的能量吸收特性研究,发现在相同压缩应变下,内凹六边形蜂窝结构相比常规蜂窝结构可以吸收更多的冲击能量,这主要是由于内凹六边形蜂窝结构在发生致密化阶段的临界压实应变提前造成的。文献[4~5]的研究聚焦于内凹负泊松比结构的静态和动态力学性能,以及负泊松比夹芯结构在冲击下的动力响应,探索了负泊松比内凹蜂窝的变形模式和胞元几何特征之间的关系。WANG等^[6-7]提出了一种基于双箭状负泊松比结构的新型悬架缓冲结构设计方法。JU等^[8]提出了一种负泊松比蜂窝轮辐的免充气轮胎,并对其刚度、接触力、蜂窝变形等特性进行研究分析。吴文旺等^[9]对负泊松比结构的力学设计进行了分析,并对其在车辆工程领域的应用进行了详细概述和展望。虞科炯等^[10]基于传统六边形蜂窝结构,对负泊松比蜂窝结构进行合理优化,提出了一种吸能表现更好的正弦曲边负泊松比蜂窝结构。为了降低蜂窝结构最大峰值应力,沈振峰等^[11]提出新型内凹环形(re-entrant circular honeycomb, RCH)结构模型,对照理论计算和有限元结果,得出在相同冲击作用下, RCH型结构的冲击载荷具有良好的一致性,并提出动态经验公式,为负泊松比蜂窝结构的研究提供了新思路。朱建生

等^[12]针对规则六边形蜂窝结构在火炮发射载荷下的抗冲击性能进行了数值仿真,得到负泊松比蜂窝结构具有优异的减载性能和抗冲击性能的结论,对于后续该结构设计应用于火炮领域具有重要意义。

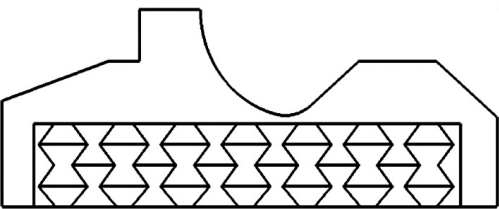
在弹丸挤进身管研究方面, DING等^[13]通过数值计算详细研究了弹丸挤进身管的过程和此过程中均质黄铜弹带受到的破坏。程申申等^[14]研究了不同参数的尼龙弹带结构对挤进的影响,得出尼龙弹带存在化学性质不稳定而无法大量运用的结论。殷军辉等^[15]对弹丸挤进后的均质黄铜弹带的组织演变规律、硬度分布和塑性变形的微观机理进行了研究。邹利波等^[16]对身管坡膛处进行了精细化建模,研究了弹带挤进身管过程中摩擦和温度变化规律,为挤进过程中弹带受力规律提供了较好的研究方法。目前针对弹带的研究主要集中在结构创新和材料创新两大方面,冯可华等^[17]提出了一种新型双层尼龙滑动式复合结构弹带,与传统结构弹带相比有效降低弹带所受应力,提升了旋转弹丸的稳定性。王舜^[18]对两种新型铜合金弹带进行了一系列压力、摩擦磨损试验和数值模拟,分析了性能机理,为开发新型合金弹带提供了重要的参考。邹利波等^[1]开展了挤进过程中圆形蜂窝结构弹带的力学特性研究,与传统结构的黄铜弹带进行了对比。严龙^[19]引入了新型弹带制造工艺,提升了弹带的力学性能。

为了改善弹带的性能,提升身管寿命,本文结合负泊松比结构材料的优良特性设计了一种内部具有内凹六边形负泊松比蜂窝状结构的弹带,建立有限元模型,模拟分析机械载荷下弹丸挤进过程中的变形、应力分布等特性,研究内凹六边形负泊松比蜂窝结构弹带在挤进过程中的变形和切削,获得整个挤进过程中弹丸运动的规律、弹带在挤进过程的力学性能以及弹带被切削的破损变化。

1 弹带结构设计

弹带结构主要有2部分组成:一部分为黄铜材质的二段梯形凸块,其与身管内表面贴合,起密封火药燃气作用;另一部分为内凹六边形负泊松比蜂窝

结构,当该结构受到外力作用时,结构会随内角的减小和对应边的膨胀而发生改变,从而出现负泊松比效应,提高支撑作用。目前内凹六边形负泊松比蜂窝结构种类繁多,文本设计的结构参考文献[8]中分析的 6 种蜂窝结构中力学性能最优的一种蜂窝结构。该弹带结构示意图如图 1 所示。



(a)内凹六边形负泊松比蜂窝结构弹带剖视示意图



(b)内凹六边形负泊松比蜂窝结构弹带

图 1 新型结构弹带
Fig. 1 New structural rotating band

本文仿真所用的内凹六边形负泊松比蜂窝型结构弹带三维结构模型是由设计的二维内凹六边形负泊松比蜂窝结构旋转而得。内凹六边形蜂窝型构造由圆形薄板和连接铰结构组成,如图 2 所示。从平行于轴线方向看,结构长为 14 mm,宽为 2.5 mm,由上下 2 层铝制面板和铝制负泊松比蜂窝芯构成。如图 3 所示,蜂窝胞元角度 θ 为 42° 。负泊松比结构由图 3 所示的 2 层胞元排列的双层蜂窝结构构成。当整体结构受到水平方向的拉力时,每个单元的 I 杆都会受到相同的力,此时整个结构的内凹角 θ 将会展开,随着内凹角 θ 的变大, I 杆也将发生旋转,最终由于膨胀,整体机构产生负泊松比效应。

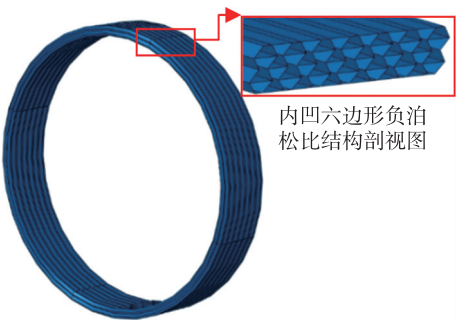
六边形蜂窝结构的有效面内模量可通过梁理论建立^[15],公式如下:

$$E_r=E_s\left(\frac{\delta}{l}\right)^3\frac{\cos\theta}{[(h/l)+\sin\theta]\sin^2\theta}\tag{1}$$

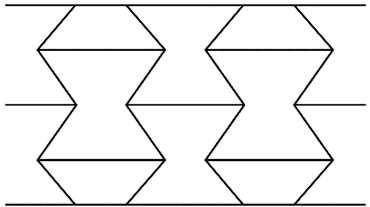
$$E_\Omega=E_s\left(\frac{\delta}{l}\right)^3\frac{(h/l)+\sin\theta}{\cos^3\theta}\tag{2}$$

$$G_{r\Omega}=E_s\left(\frac{t}{l}\right)^3\frac{(h/l)+\sin\theta}{(h/l)^2[1+(2h/l)]\cos\theta}\tag{3}$$

式中: $E_r,E_\Omega,E_{r\Omega}$ 分别为径向、周向和剪切方向的有效模量; h,l,θ 分别为水平单元长度、倾斜单元长度和角度; E_s 为基体材料的弹性模量; δ 为薄板壁厚。蜂窝结构具体尺寸数据如表 1 所示。



(a)弹带中内凹六边形负泊松比蜂窝结构



(b)局部示意图

图 2 内凹六边形负泊松比蜂窝结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of concave hexagonal negative Poisson's ratio honeycomb rotating band

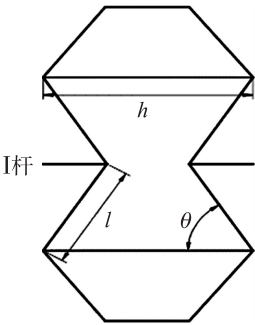


图 3 负泊松比蜂窝结构胞元几何示意图
Fig. 3 Geometry diagram of concave hexagonal negative Poisson's ratio honeycomb structure

表 1 蜂窝结构基本尺寸
Table 1 Basic parameters of honeycomb structure

I 杆厚 /mm	水平单元 长度/mm	倾斜单元 长度/mm	倾斜单元 角度/(°)	薄板壁厚 /mm
0.05	1.72	0.86	42	0.05

对于规则的内凹负泊松比蜂窝结构的相对密度

可以表示为

$$\rho^* = \rho_s \frac{1}{2} \frac{\delta[(h/l)+2]}{l \cos \alpha[(h/l)+\sin \theta]} \tag{4}$$

式中： ρ_s 为基体材料的密度； α 为蜂窝结构节点凹内角的半角，与 θ 关系为 $\theta=2\alpha-90^\circ$ 。

2 有限元模型

基于某中口径火炮实际身管与弹丸结构建立三维模型,采用有限元软件 ABAQUS,建立了弹丸挤进过程的有限元模型,使用 C3D8RT 单元对身管坡膛部分与弹丸进行网格划分。由于在弹带挤进过程中弹带网格会出现较大的变形和破坏,因此采用 ALE 自适应网格来保证挤进过程中网格质量。蜂窝结构采用内凹负泊松比金属材料,在模型中利用完全弹塑性模型来预测蜂窝结构的塑性变形。该材料的参数如表 2 所示。

表 2 材料参数表

Table 2 Material parameters

密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	杨氏模量/GPa	屈服应力/MPa	泊松比
2 700	68	255	0.3

为确保计算的收敛性和准确性,蜂窝结构的有限元网格模型采用 4 节点线性减缩积分壳单元 (S4R),平均尺寸为 0.6 mm,并采用 5 个厚度积分点。

使用 8 节点线性减缩积分四面体单元 (C3D8R) 建立弹带铜质结构的有限元模型,网格尺寸为 0.4 mm。该部分结构力学行为采用 Johnson-Cook 弹塑性模型及其损伤模型^[14]。在有限元模型中,弹带与弹丸之间采用绑定约束条件;弹带外表面与身管内壁、弹丸外表面与身管采用罚函数的面面接触算法。在接触方面,利用接触对的形式来定义模型的接触,为了避免相邻部件之间的硬接触,其中弹带与身管内壁之间采用库仑摩擦模型,摩擦系数设为 0.1^[1]。挤进过程中,弹带内部蜂窝结构的单元网格逐渐被膛线切削并与坡膛内部产生接触,因此弹带采用自接触设置。图 4 为内凹负泊松比蜂窝结构弹带与身管的有限元网格模型。

利用内弹道方程耦合求解挤进过程中弹底压力载荷,以及弹带与身管之间的摩擦力^[11]。弹底压力载荷曲线如图 5 所示,可通过有限元的子程序 VUAMP 在计算中加载。

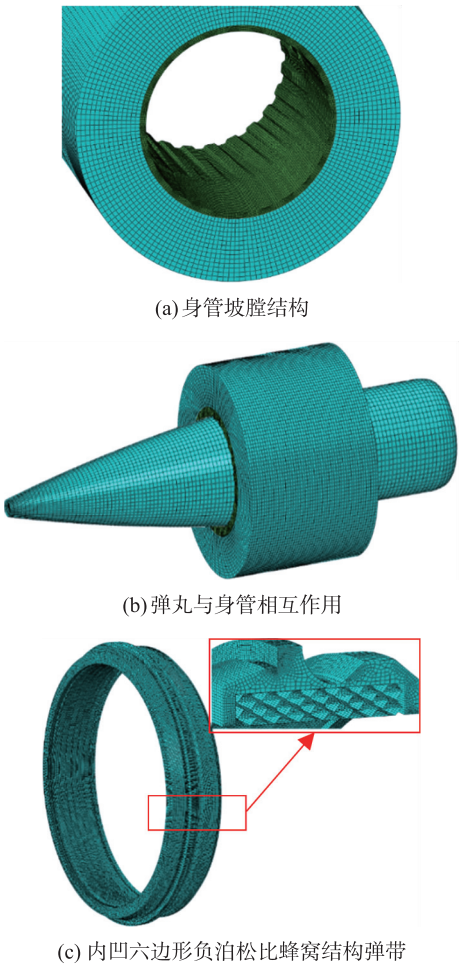


图 4 不同结构的有限元网络模型

Fig. 4 Finite element grid model of different structures

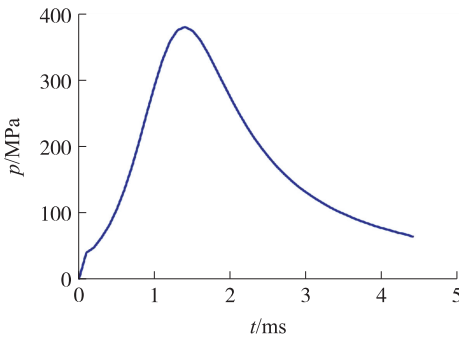


图 5 弹底压力载荷曲线

Fig. 5 Load curve at the bottom of projectile

3 结果分析

对新型内凹六边形负泊松比蜂窝型结构弹带在弹丸挤进身管的过程进行计算。负泊松比结构在受到冲击载荷时会经过线弹性、平台区、致密化 3 个阶段。

负泊松比蜂窝结构受到面内冲击载荷时,会向冲击部位收缩,并增强该区域的局部刚度。同时,这种情况下结构的吸能特性和挤进时的损伤耗能也将有效降低。图6为弹带挤进过程中不同时刻的变形云图,在0.9~1.17 ms间,新型内凹六边形负泊松比蜂窝型结构弹带的前凸及邻近部分均在身管的挤压下逐渐压缩(如图6(a)和图6(b)所示),此时弹带的最大压缩位移分别为0.697 6 mm和1.854 mm;随着弹丸的挤进,弹带内

部的蜂窝结构逐渐被挤压密实,此时弹带达到最大压缩位移为3.059 mm(如图6(c)所示);弹丸完全挤进后与身管阳线接触的弹带部分的蜂窝结构被全部挤压密实。在爆炸载荷作用下,内凹蜂窝结构表现出优异的吸能特性,形成较高的平台应力值(如图6(d)所示)。当发生弹塑性变化时,蜂窝结构在纵向和横向方向上的抗变形能力不同,纵向的抗变形能力大于横向。此时弹带能够与身管内膛紧密接触并被膛线切削。

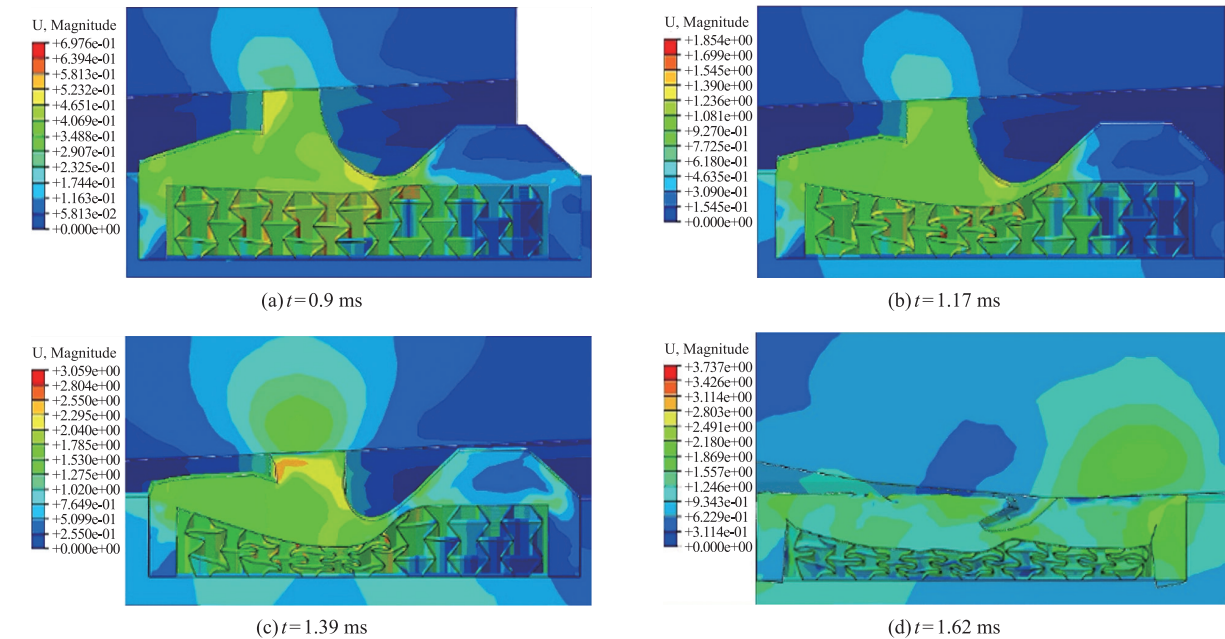


图6 不同挤进时刻,弹带位移云图

Fig. 6 Deformation of rotating band during different times

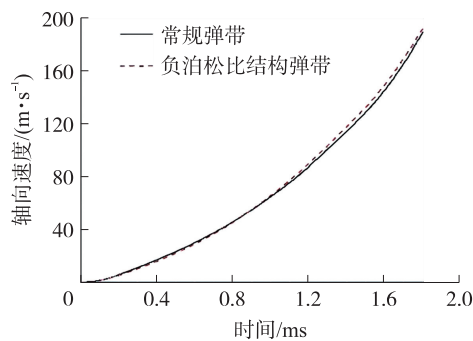
对比常规弹带与新型内凹六边形负泊松比蜂窝结构弹带挤进时的受力变化规律,结果如图7所示。可以发现,二者对应的弹丸挤进时的质心轴向速度和加速度基本一致(如图7(a)和图7(b)所示);两种弹带在挤进过程中质心角位移变化无显著差异(如图7(c)所示)。由此可见,新型内凹六边形负泊松比蜂窝型结构弹带能够满足弹丸射击的初速条件和内弹道性能要求。

随着膛压的逐渐增大,新型内凹六边形负泊松比蜂窝型结构弹带的凸起部分会在挤进过程中被身管挤压变形。在挤进过程中,内凹负泊松比结构在受载作用下能够保持一定的变形刚度,其内部的内凹负泊松比蜂窝结构逐渐被内膛压缩,相应的弹丸在此过程中受到的阻力也逐渐增大,直至完全挤进。挤进过程中膛线导转侧阳线与阴线和非导转侧阳线处的应变变化规律如图8所示,其与常规弹带挤进

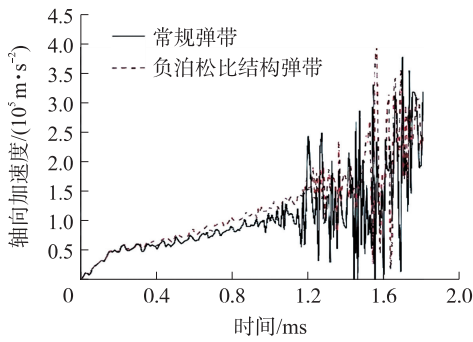
时膛线受力变形情况一致。

常规均质黄铜弹带内部结构与内凹负泊松比蜂窝结构相比,均质弹带会被身管膛线挤压切割而受到破坏,而内凹负泊松比蜂窝结构会在膛线挤压下逐渐压缩,避免大面积结构的破坏,极大地降低了挤进阻力的影响,对比结果如图9所示。图10为弹丸挤进过程中弹带塑性变形能对比。挤进完成后,均质黄铜弹带的塑性变形能约为2 148 J,而内凹六边形负泊松比蜂窝结构弹带的塑性变形能为1 289 J。这是因为在受载过程中,由于结构的特性内凹六边形负泊松比蜂窝结构弹带,整体表现为弹性变形。与常规弹带相比,新型内凹六边形负泊松比蜂窝型结构弹带具有损伤耗能小的优势,损伤耗能最大值降低了76.9%,即在弹丸挤进身管的过程中,新型内凹六边形负泊松比蜂窝型结构弹带在挤进身管过程中损伤较小,

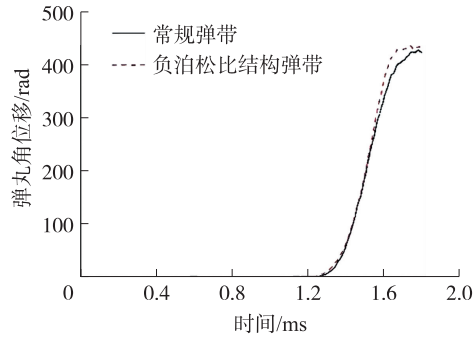
表明弹带表层破坏较小,即身管内膛挂铜较轻。



(a) 挤进过程中弹丸轴向速度



(b) 挤进过程中弹丸轴向加速度



(c) 挤进过程中角位移

图 7 挤进过程中弹丸运动规律

Fig. 7 Projectile motion during the engraving process

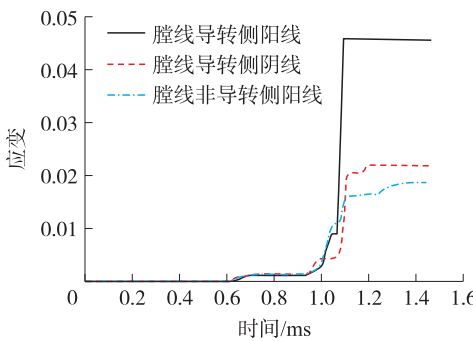


图 8 弹带挤进过程中膛线的应变变化规律

Fig. 8 Variation of strain in rifling during the process of squeeze

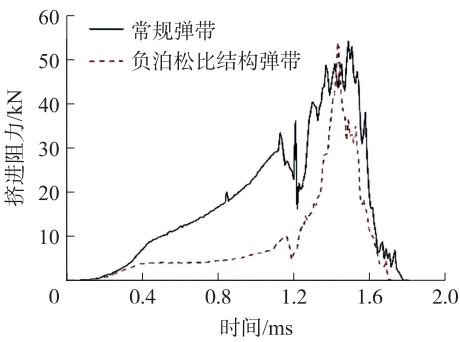


图 9 挤进过程中挤进阻力变化曲线

Fig. 9 Resistance of projectile during the engraving process

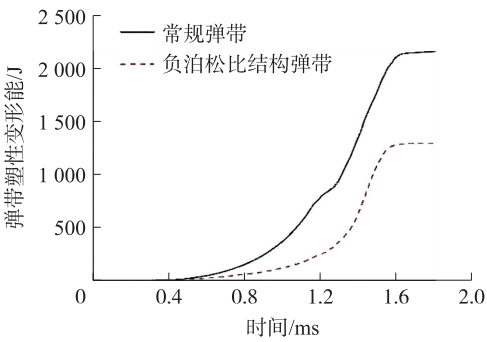
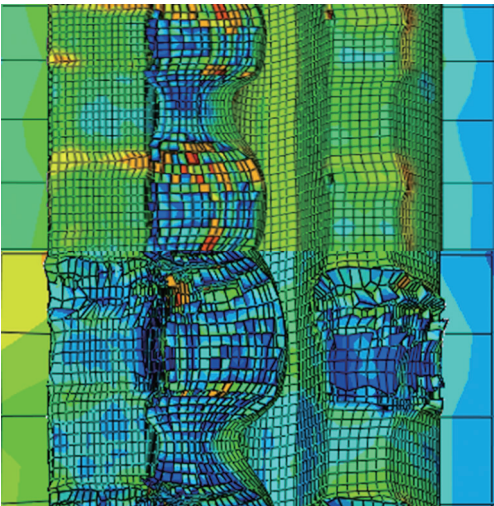


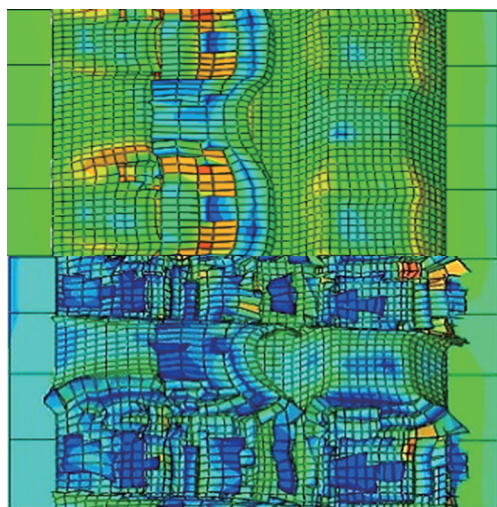
图 10 挤进过程中弹带损伤耗能变化曲线

Fig. 10 Damage dissipation energy of rotating band during the engraving process

图 11 所示分别为挤进初期和挤进完成后两种弹带挤进身管过程中弹带损伤破坏情况,从图 11(a)可以看出,新型内凹六边形负泊松比蜂窝型结构弹带能够保证弹带在弹丸挤进后的完整性;相较于常规弹带的弹丸挤进后可以观察到弹带出现了明显的切削损伤痕迹,即弹带表层被身管阳线切削(如图 11(b)所示)。



(a) 挤进初期和挤进后的内凹六边形负泊松比蜂窝结构弹带



(b) 挤进初期和挤进后的常规均质弹带

图 11 挤进过程中弹带位移云图及其表层损伤破坏情况

Fig. 11 Displacement nephogram of the bomb rotating band and surface damage during the engraving process

4 结束语

基于建立的内凹六边形负泊松比蜂窝结构弹带的弹丸与身管模型,进行挤进过程的有限元计算,得到身管膛腔部分的弹丸挤进运动过程中的弹带受力、运动规律、弹带表层磨损程度变化,与常规均质黄铜弹带对比后得到以下结论:

①所设计的新型内凹六边形负泊松比蜂窝型结构弹带能够保证发射时的内弹道性能要求,且其计算得到的弹丸运动与受力变化规律与常规弹带基本一致;

②新型内凹六边形负泊松比蜂窝型结构的弹带能够极大程度上减小弹带挤进时的损伤耗能,降低产生的铜屑量,提高了身管寿命。

为了设计出更理想的弹带,可以对影响新型内凹六边形负泊松比蜂窝型结构弹带性能较大的因素进行更详细的优化,如其内部结构尺寸、单元排列规律等。本文所研究的新型结构金属弹带对于优化黄铜弹带结构和提高身管寿命都具有一定的意义。

参考文献

- [1] 邹利波,郭张霞,营润基,等. 挤进过程中圆形蜂窝结构弹带的力学特性研究[C]//中国力学大会论文集(第一册). 成都:中国力学学会,2022.
ZOU Libo, GUO Zhangxia, JIAN Runji, et al. Study on mechanical properties of circular honeycomb elastic rotating band during

- extrusion [C]//Congress of China Mechanics (Volume 1). Chengdu: Chinese Society of Mechanics, 2022. (in Chinese)
- [2] 高玉魁. 负泊松比超材料和结构[J]. 材料工程, 2021, 49(5): 38-47.
GAO Yukui. Auxetic metamaterials and structures [J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(5): 38-47. (in Chinese)
- [3] LIU W Y, WANG N L, LUO T, et al. In-plane dynamic crushing of re-entrant auxetic cellular structure [J]. Materials & Design, 2016, 100: 84-91.
- [4] XIAO D B, CHEN X Q, LI Y, et al. The structure response of sandwich beams with metallic auxetic honey comb cores under localized impulsive loading-experiments and finite element analysis [J]. Materials & Design, 2019, 176: 107840.
- [5] LI Y, CHEN Z H, XIAO D B, et al. The dynamic response of shallow sandwich arch with auxetic metallic honey comb core under localized impulsive loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 137: 103442.
- [6] WANG Y L, ZHAO W Z, ZHOU G, et al. Parametric design strategy of an oval cylindrical negative Poisson's ratio jounce bumper for ideal uniaxial compression load-displacement curve [J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61(10): 1611-1620.
- [7] WANG Y L, WANG L M, MA Z D, et al. Finite element analysis of a jounce bumper with negative Poisson's ratio structure [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(23): 4374-4387.
- [8] JU J, KIM D M, LIM K. Flexible cellular solids pokes of an on pneumatic tire [J]. Composite Structures, 2012, 94(8): 2285-2295.
- [9] 吴文旺,肖登宝,孟嘉旭,等. 负泊松比结构力学设计、抗冲击性能及在车辆工程应用与展望[J]. 力学学报, 2021, 53(3): 611-638.
WU Wenwang, XIAO Dengbao, MENG Jiaxu, et al. Mechanical design, impact energy absorption and applications of auxetic structures in automobile lightweight engineering [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(3): 611-638. (in Chinese)
- [10] 虞科炯,徐峰祥,华林. 正弦曲边负泊松比蜂窝结构面内冲击性能研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(13): 51-59.
YU Kejong, XU Fengxiang, HUA Lin. In plane impact performance of honeycomb structure with sinusoidal curved edge and negative Poisson's ratio [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(13): 51-59. (in Chinese)
- [11] 沈振峰,张新春,白江畔,等. 负泊松比内凹环形蜂窝结构的冲击响应特性研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(18): 89-95.
SHEN Zhenfeng, ZHANG Xinchun, BAI Jiangpan, et al. Dynamic response characteristics of re-entrant circular honeycombs with negative Poisson's ratio [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(18): 89-95. (in Chinese)