

doi: 10.7690/bgzd.2023.12.014

转膛自动机弹带二次挤进过程数值模拟

林圣业¹, 黄晨烨¹, 王茂森¹, 苏晓鹏², 戴劲松¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 国营第一五二厂特种装备研究所, 重庆 400071)

摘要: 为研究转膛自动机转膛衬套与身管衬套膛线不等高带来的弹带二次挤进问题, 建立反映膛线高度差的弹带二次挤进过程分析有限元模型。通过数值仿真获得弹带完全挤进转膛衬套和身管衬套的应力、变形和温度; 仿真结果与实弹射击回收的弹带刻痕吻合较好, 说明所建立有限元模型具有一定的可信度。对比转膛衬套采用半高膛线与全高膛线的仿真结果表明: 转膛衬套与身管衬套膛线不等高显著影响弹带挤进过程, 采用半高膛线能使弹带挤入转膛衬套更平稳, 但弹带在二次挤进身管衬套时会产生更强的冲击; 采用全高膛线在弹带挤入转膛衬套时更困难, 但在二次挤进身管衬套时较为平稳。

关键词: 转膛自动机; 弹带挤进; 二次挤进效应; 数值模拟

中图分类号: TJ303 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Secondary Engraving Process of Revolver Automata Cartridge Band

Lin Shengye¹, Huang Chenye¹, Wang Maosen¹, Su Xiaopeng², Dai Jinsong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Special Equipment Research Institute, State-owned No. 152 Factory, Chongqing 400071, China)

Abstract: In order to study the secondary engraving problem caused by the unequal rifling height between the revolver bushing and the barrel bushing of revolver automata, a finite element model reflecting the rifling height difference was established to analyze the secondary engraving process of the belt. Through numerical simulation, the stress, deformation and temperature were obtained when the belt was completely squeezed into the revolver bushing and the barrel bushing. The simulation results were in good agreement with the notch of the belt recovered in live firing, which indicated that the established finite element model had a certain credibility. The simulation results show that the unequal height of the bore liner and the barrel liner has a significant effect on the belt squeezing process. The half-height bore liner can make the belt squeeze into the bore liner more smoothly, but the belt will produce stronger impact when it squeezes into the barrel liner for the second time; Full-height rifling is more difficult when the belt is squeezed into the revolver liner, but it is smoother when the belt is squeezed into the barrel liner twice.

Keywords: revolver automata; band engraving; secondary engraving effect; numerical simulation

0 引言

转膛自动机具有射速高、精度高、可靠性好和结构紧凑等优点, 广泛装备于海、陆、空各军种。从内膛结构看, 转膛自动机的内膛包括转膛体内膛和身管内膛 2 部分, 并采用转膛衬套和身管衬套联接, 明显区别于后坐式、导气式、链式和转管式等其他原理自动机。为保持弹丸在内弹道时期的运动平稳性和气密性, 转膛衬套和身管衬套在交接处的阳线一般采用不等高设计。由于膛线在交接处不连续, 因此, 转膛自动机射击时, 弹带依次挤入这 2 个衬套, 导致弹带挤进过程变得十分复杂, 表现出其他原理自动机所没有的“二次”挤进效应, 直接影响转膛自动机的内弹道特性, 进而影响射击精度、

身管寿命和发射安全性等。目前, 国内外针对转膛自动机弹带挤进过程的研究还不充分, 尚未见关于转膛自动机弹带二次挤进过程研究的公开报道。随着现代转膛自动机不断朝着高射速、高初速、高射击精度等方向发展, 弹带二次挤进效应对其内弹道特性的影响日益突出, 已成为显著影响其作战性能的重要因素; 因此, 迫切需要开展转膛自动机弹带二次挤进过程研究, 为设计满足战技指标要求的高性能转膛自动机提供理论支撑。

近年来, 国内外学者主要采用实验^[1-3]和数值仿真方法^[4-6]开展弹带挤进过程研究。实验方法主要包括准静态实验、动态实验和实弹射击实验。准静态实验通常采用材料试验机或液压机等持续推动弹丸

收稿日期: 2023-08-02; 修回日期: 2023-09-05

基金项目: 基础加强计划重点项目(201XXX135)

第一作者: 林圣业(1987—), 男, 福建人, 博士。

挤进身管，获得准静态下挤进力相对弹丸行程的变化规律；动态实验采用气体炮或其他冲击加载装置撞击弹丸，赋予弹丸初始速度挤进身管，获得动态下挤进力相对弹丸行程的变化规律。以上 2 种实验方法均能模拟发射过程，但与真实发射环境仍有较大差异，由此获得的结果虽有重要参考价值，但不能不加处理地直接应用于指导自动机设计。实弹射击实验能够客观地反映弹带挤进过程的真实情况，但需要研制专用仪器设备，费用高。

随着计算机技术的飞速发展，国内外研究者提出了基于有限元法的弹带挤进过程数值仿真方法。相较于实验方法，数值仿真方法因效费比高、计算精度较好而受到研究者们的青睐，已在多个型号产品分析上获得成功应用，取得了良好效果。如戴涌等^[7]针对某转膛自动机在连发射击条件下异常停射的问题，建立了弹带挤进过程有限元模型，成功模拟了转膛衬套和身管衬套热膨胀卡滞导致自动机停射的过程，为该自动机故障原因分析提供了有效方法；戴劲松等^[8]在此基础上，设计了新型冷却装置，并拓展建立了考虑散热作用的弹带挤进过程有限元模型，分析结果为喷零式冷却装置散热参量控制提供了理论依据；丁传俊等^[9-11]和 Shen 等^[12]建立考虑身管内壁磨损的弹带挤进过程有限元模型，为身管寿命研究奠定了基础。以上研究所形成的建模理论和方法对笔者进一步考虑弹带二次挤进效应具有重要借鉴意义。

笔者针对转膛自动机内膛结构特征，建立了考虑弹带二次挤进效应的有限元模型，通过原理样机开展理论模型验证试验。在此基础上分析转膛衬套和身管衬套高度差对弹带挤进过程的影响。

1 弹带二次挤进过程有限元模型

1.1 转膛自动机内膛结构

如图 1 所示，转膛自动机主要由转膛体、身管、转膛衬套和身管衬套炮箱等组成。转膛体安装于炮箱内，可绕其中轴线回转，运动规律由凸轮曲线槽控制；身管固定于炮箱前部，其后端面与转膛体前端面之间留有缝隙；转膛衬套和身管衬套分别安装于转膛体后部和身管起始部。为保证气密性，转膛衬套阳线的高度一般略小于身管衬套阳线的高度，即 $D_{L1} > D_{L2}$ 。

1.2 有限元模型

采用有限元法建立转膛自动机弹带二次挤进过

程分析模型，如图 2 所示。参照文献[10]的方法，采用 C3D8RT 热力耦合单元生成网格。为防止网格畸变，保证足够的精度和计算稳定性，弹带网格的尺寸控制在 0.2 mm 内。

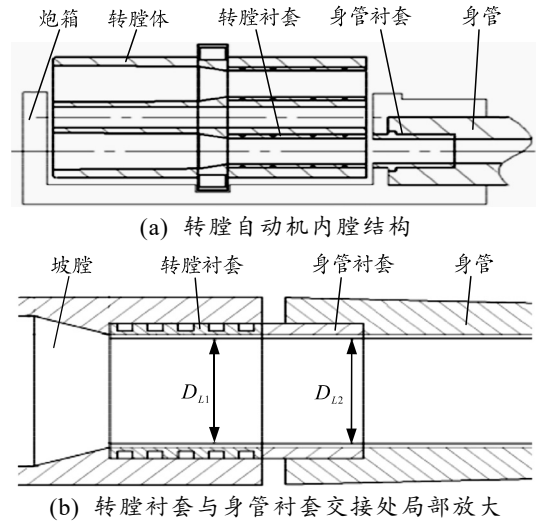


图 1 转膛自动机结构

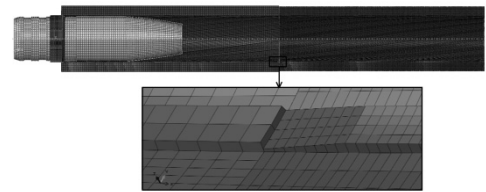


图 2 弹带二次挤进过程分析有限元模型

1.3 材料模型

Johnson-Cook 材料塑性本构模型可以描述金属材料在高变形、高变形率、高温下的塑性变形过程，特别适用于强力作用下的动力学问题；因此，采用 Johnson-Cook 模型及其失效模型：

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n) \left[1 + C \ln(\dot{\varepsilon}_p / \dot{\varepsilon}_0) \right] (1 - \bar{\theta}^m); \quad (1)$$

$$\varepsilon_f^{pl} = (d_1 + d_2 e^{-d_3 \eta}) \left[1 + d_4 \ln(\dot{\varepsilon}^{pl} / \dot{\varepsilon}_0) \right] (1 + d_5 \bar{\theta}); \quad (2)$$

$$\bar{\theta} = (T - T_r) / (T_m - T_r). \quad (3)$$

式中： σ 为等效应力； ε_p 为等效塑性变形； $\dot{\varepsilon}_p$ 为等效塑性变形率； $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考变形率； $\bar{\theta}$ 为无量纲温度； T 为温度； T_r 为环境温度； T_m 为材料熔点； A 、 B 、 C 、 m 和 n 为材料常量； ε_f^{pl} 为等效塑性失效变形； η 为应力三轴度； $\dot{\varepsilon}^{pl} / \dot{\varepsilon}_0$ 为无量纲变形率； $d_1 - d_5$ 为断裂失效参数。

1.4 边界条件

采用经典内弹道计算弹底压力随时间变化的曲线，如图 3 所示。将其作为弹带二次挤进过程有限

元分析的边界条件。

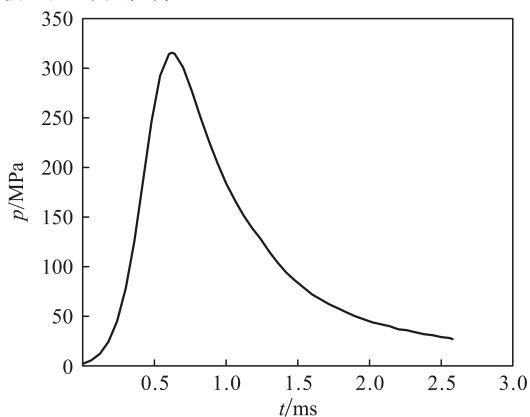


图 3 弹底压力曲线

2 射击试验

由于弹带挤进过程在极短时间内完成，且膛内发射环境具有高温、高压等特点，并伴有物化反应，难以测得弹带应力、变形和温升；因此，笔者在转膛自动机原理样机上开展实弹射击试验，通过对比数值仿真与实弹回收的弹带刻痕来验证理论模型。衬套、弹体与弹带的材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

参数	材料		
	衬套	弹体	弹带
屈服强度 σ_s /MPa	1 374	1 275	260
弹性模量 E /GPa	214	206	100
泊松比 ν	0.29	0.30	0.29
密度 ρ /(kg/m ³)	7 830	7 850	7 870

数值仿真与实弹射击回收的弹带刻痕对比结果如图 4 所示。通过有限元模型仿真得到弹带刻痕与水平轴线的夹角为 7.7°，而实弹射击的角度为 7.45°，相对误差仅为 3.35%，说明所建有限元模型具有一定的可信度。

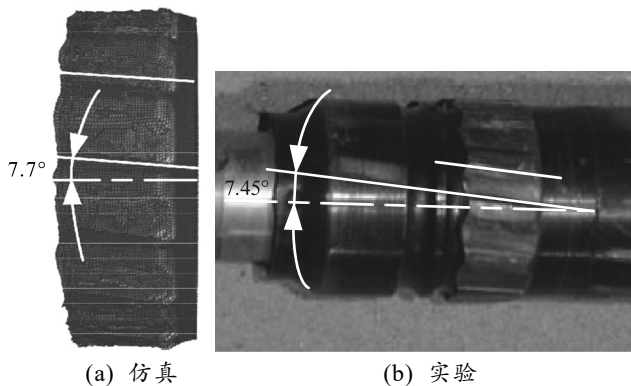


图 4 数值仿真与实弹射击回收弹带刻痕对比

3 膛线高度对弹带二次挤进过程的影响

转膛衬套与身管衬套的膛线高度差会显著影响

弹带挤进过程。转膛自动机在确定身管膛线高度的条件下，转膛衬套通常采用半高膛线和全高膛线 2 种方案，如图 5 所示；因此，本节主要讨论转膛半高膛线与转膛全高膛线对弹带二次挤进过程的影响。

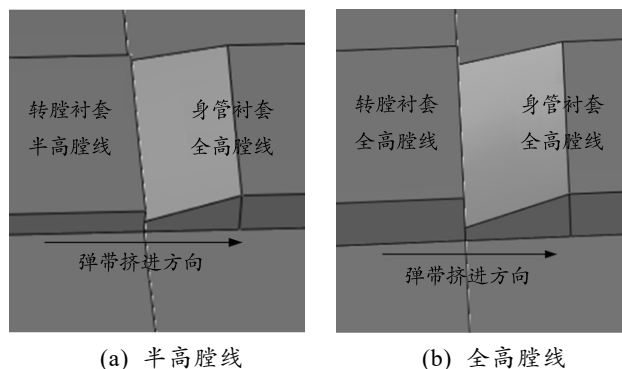


图 5 转膛衬套膛线结构

3.1 半高膛线

转膛衬套采用半高膛线，当弹带完全挤入转膛衬套时，转膛衬套的应力、变形和温度如图 6 所示。从图中可以看出，采用半高膛线时，转膛衬套最大应力为 645.9 MPa，最大变形出现在阳线导转侧，为 0.39 mm，最大温度为 107.8℃。

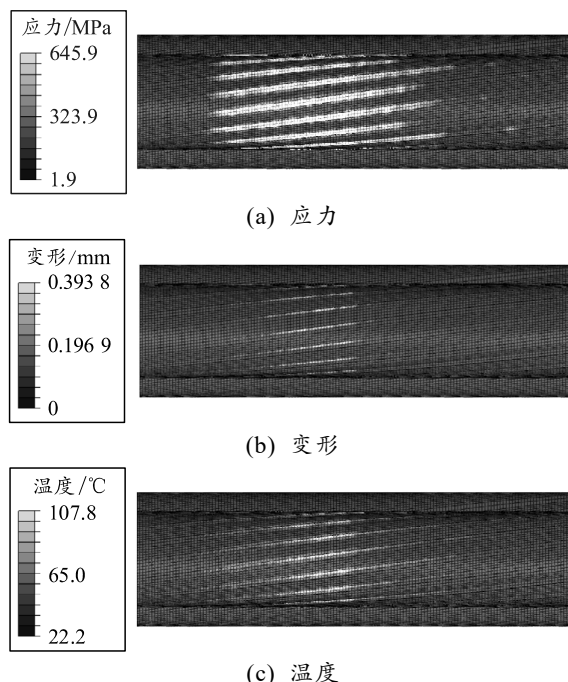


图 6 采用半高膛线时转膛衬套应力、变形和温度

弹带经过转膛衬套后，继续加速挤入身管衬套。当弹带完全挤进身管衬套时，身管衬套的应力、变形和温度如图 7 所示。从图中可以看出，采用半高膛线时，身管衬套的最大应力为 826.0 MPa，最大

变形为 0.65 mm，最大温度达到 283.9℃。

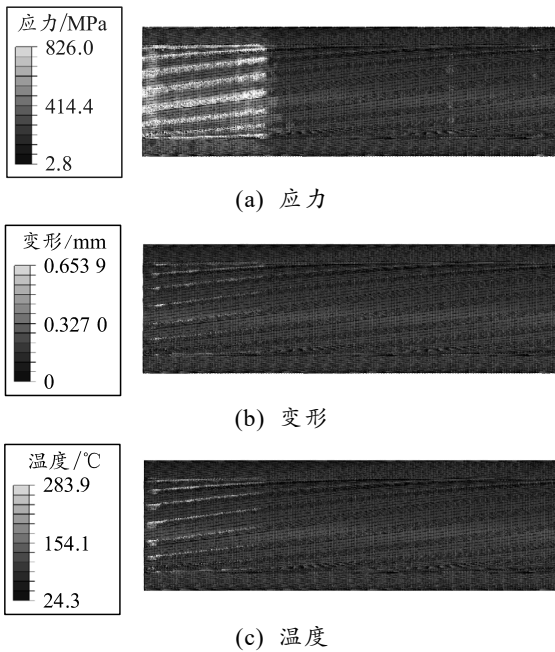


图 7 采用半高膛线时身管衬套应力、变形和温度

3.2 全高膛线

转膛衬套采用全高膛线，当弹带完全挤入转膛衬套时，转膛衬套的应力、变形和温度如图 8 所示，完全挤进身管衬套时，身管衬套的应力、变形和温度如图 9 所示。从图中可以看出，采用全高膛线时，转膛衬套最大应力、最大变形和最大温度分别为 701.9 MPa、0.45 mm、143.5℃；身管衬套的最大应力、最大变形和最大温度分别为 792.2 MPa、0.09 mm、64.9℃。对比转膛衬套采用半高膛线和全高膛线的仿真结果可以看出，弹带完全挤进转膛衬套时，采用全高膛线的最大应力、最大变形和最大温度较采用半高膛线分别增大了 8.67%、15.38%、33.12%；但弹带完全挤进身管衬套时，采用全高膛线的最大应力、最大变形和最大温度较采用半高膛线分别减小了 4.09%、86.15%、77.14%。

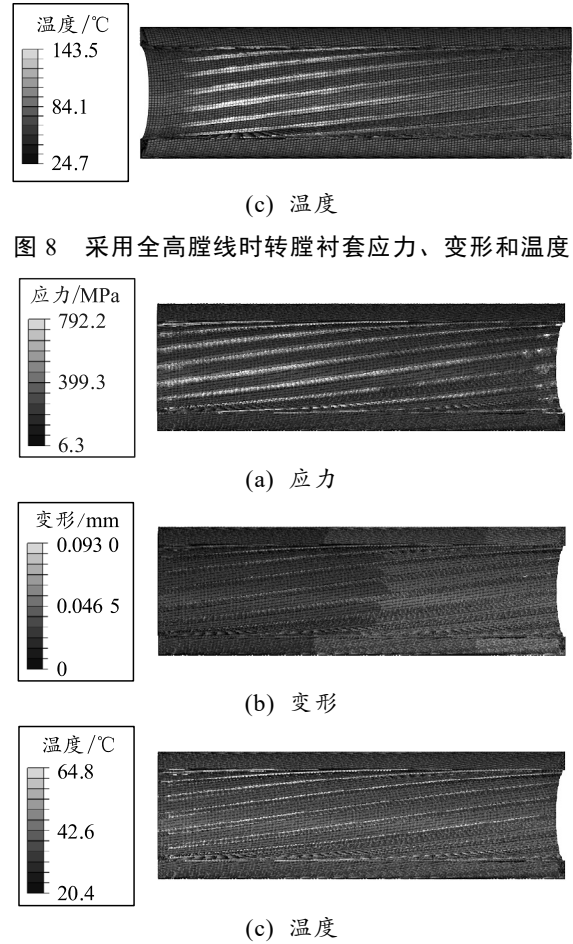
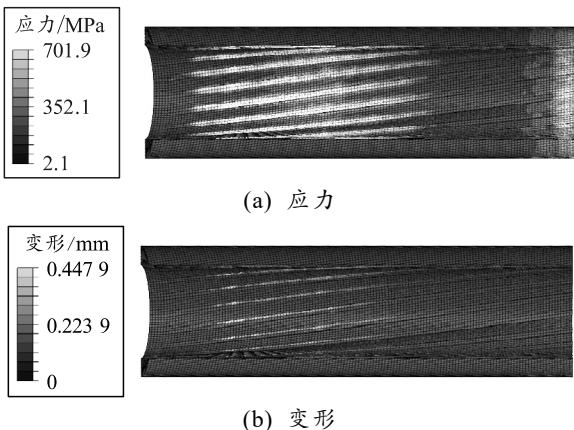


图 8 采用全高膛线时转膛衬套应力、变形和温度

图 9 采用全高膛线时身管衬套应力、变形和温度

转膛衬套采用半高膛线时，转膛衬套最大应力、最大变形和最大温度明显低于采用全高膛线的情况，说明采用半高膛线能使弹带挤入转膛衬套更加平稳；与此同时，当转膛衬套采用半高膛线时，身管衬套最大变形达到 0.65 mm，是采用全高膛线时的 7 倍，因此火药气体的密封性更好。然而，采用半高膛线的缺点是转膛衬套与身管衬套之间存在高度差，导致弹带在二次挤进身管衬套时，产生更强的冲击。对于全高膛线，虽然弹带在挤入转膛衬套时更困难，但是由于 2 个衬套之间没有高度差，弹带在二次挤进身管衬套时较为平稳，而在整个点火发射过程中，火药气体密封性会稍差。

4 结论

根据仿真分析与对比结果，得出如下结论：

- 1) 建立了考虑弹带二次挤进效应的转膛自动机弹带挤进过程分析有限元模型，仿真结果可信度高，为研究转膛衬套与身管衬套膛线高度差对弹带挤进过程的影响提供了有效手段。