文章编号：1003－1251(2025)06－0066－06

石墨烯增强铝基复合电枢在电磁－热－结构多场耦合作用下的损伤机制研究

霍俊文，杜晓明，徐淑姣

（沈阳理工大学 材料科学与工程学院，沈阳 110159）

摘　要： 采用有限元法构建不同石墨烯体积分数的铝基复合材料电枢模型，对服役中电枢温度、应力、应变进行分析，探讨石墨烯体积分数对铝基复合材料电枢在电磁－热－结构场耦合作用下的损伤和变形影响规律。结果表明：与6061铝合金基体相比，铝基复合材料电枢的喉部区域烧蚀在一定程度上得到减轻；石墨烯的加入能够显著降低电枢发射过程的温升，在相同电流激励下提高电枢的炮口速度并且降低电枢在各个方向的变形量；体积分数为0.5%的石墨烯增强铝基复合材料电枢发射出炮口后应力波动更平稳，速度显著增加，受力产生的形变更小。

关　键　词： 铝基复合材料；电枢；多场耦合；损伤机理

中图分类号： TB331　　**文献标志码：** A　**DOI：**10.3969/j.issn.1003－1251.2025.06.010

Damage Mechanism of Graphene-reinforced Aluminum Matrix Composite Armature under Electromagnetic-thermal-structural Multi-field Coupling

HUO Junwen，DU Xiaoming，XU Shujiao

（Shenyang Ligong University，Shenyang 110159，China）

Abstract： The armature models of aluminum matrix composites with different graphene volume fractions were constructed by finite element method. The temperature，stress and strain of armature in service were analyzed，and the effects of graphene volume fractions on the damage and deformation of aluminum matrix composite armature under the coupling of electromagnetic，thermal and structural fields were discussed. The results show that，compared with 6061 aluminum alloy matrix，the ablation of the armature in the throat region is reduced to a certain extent. The addition of graphene can significantly reduce the temperature rise of the armature firing process，increase the muzzle speed of the armature under the same current excitation，and reduce the armature deformation in all directions. The stress fluctuation of graphene reinforced aluminum matrix composite armature with 0.5% volume fraction is more stable，the velocity significantly increases and the deformation caused by force is smaller，after firing from the muzzle.

Key words： aluminium matrix composites；armature；multi-field coupling；damage mechanism

电磁轨道炮是利用电磁力将电枢以2 km/s以上超高速从炮口射出的新概念武器[1－3]，具有初速度高、杀伤力强、可控性好的技术优点，在军事领域有着广阔的应用前景[4－6]。然而，电磁轨道炮发射时需要在极短时间（毫秒级）内通入兆安级大电流，瞬间产生的强磁场会对轨道炮自身及

收稿日期： 2024－12－23

基金项目： 辽宁省应用基础研究计划项目（2023JH2/101300233）；辽宁省教育厅高等学校基本科研项目（JYTZD20230004）

作者简介： 霍俊文（1999—），男，硕士研究生；杜晓明（1976—），通信作者，男，教授，博士。

其周围产生强烈的干扰,运动中的电枢会因为脉冲电流生成焦耳热,使其受到力和热的共同作用而引起失效。目前,电磁轨道炮发射使用电枢通常采用密度较低的 6 系铝合金,但传统的 6 系铝合金电导率不理想,且由于存在大量热稳定性差的析出相,容易出现电枢在发射过程中随温度升高而丧失强化效果的问题。

国内外学者对轨道炮进行了大量研究,Keshtkar 等[7]通过有限元法对不同轨道炮进行分析,得出双转轨道炮能改善轨道炮结构和电感梯度的结论,但没有考虑涡流效应的影响。Rabiei 等[8]研究了不同平顶长度电流和幅值对导轨电磁力的影响,但没有考虑温度及电枢运动带来的影响,结果表明,延长平顶长度会增加炮口速度,但轨道会产生损坏和变形。林庆华等[9-10]建立了多场耦合的瞬态轨道炮模型,采用 Fortrain 源代码及网格构型等求解,结果表明,电枢在高速运动过程中会伴随熔化波效应且存在变形,使速度曲线产生振荡。

以上文献均以铜、铝合金等作为电枢材料进行研究,未考虑材料本身对电枢发射性能的影响。铝基复合材料具有低密度、高导电、高导热、耐磨耐热等优良的物理性能[11-13],有望成为解决电磁发射中电枢失效的可靠材料[14-15]。目前对铝基复合材料在电磁发射系统的电枢上应用的研究极少。张东方等[16]提出了一种利用 Ti_2AlC 增强的新型高导电高耐磨铝基复合材料,但其室温强度低于 280 MPa,不能满足电磁发射需求。高海燕等[17]提出了一种石墨烯增强纳米双连续耐磨铝基复合材料导体,其室温强度低于 280 ~ 367 MPa,磨损率为 3.425×10^{-4} ~ 9.0×10^{-4} $mm^3/(N\cdot m)$,在一定程度上能满足电磁发射需求。

本文采用有限元方法构建不同体积分数石墨烯增强铝基复合材料电枢模型,模拟复合材料电枢在电磁场、温度场和应力场耦合作用下的温度、应力、应变分布规律,揭示电枢在多物理场耦合作用下的变形与损伤机理。

1　计算模型与参数

电磁炮发射系统主要由导轨、电枢、电源和控制系统等部分组成。为便于模拟电枢在发射中的运动行为,忽略电源和控制系统部分,只建立电枢与导轨三维模型。轨道炮导轨长3 000 mm,宽 30 mm,高 15 mm,材料为铜合金;电枢长 50 mm,宽 30 mm,高 40 mm,材料为石墨烯增强的铝基复合材料。表 1 为各部件材料参数。

表 1　各部件材料参数

Table 1　Material parameters of each component

材料参数	铜合金[18]	石墨烯[12]	6061Al[9,18]
密度/($kg\cdot m^{-3}$)	8.96×10^3	1.5×10^3	2.7×10^3
弹性模量/Pa	1.2×10^{11}	1.1×10^{12}	64×10^{10}
泊松比	0.34	0.17	0.33
电导率/($S\cdot m^{-1}$)	5.8×10^7	1×10^9	3.5×10^7
热导率/($W\cdot m^{-1}\cdot℃^{-1}$)	400	4 500	167
比热/($J\cdot Kg^{-1}\cdot℃^{-1}$)	385	1 000	850
热膨胀率/($℃^{-1}$)	1.77×10^{-5}	-7×10^{-6}	2.36×10^{-5}

图 1 和图 2 分别为枢轨有限元模型和电流激励曲线,对枢轨分别进行不同大小的网格划分,为兼顾分析精度和效率,导轨的网格大小是电枢网格的 3 倍,即电枢网格尺寸为 2 mm,导轨网格尺寸为 6 mm。图 3 和图 4 分别为电枢几何参数和电枢取点示意图。由文献[19]可知,梯形电流加载效果最好,电流持续时间为 3.6 ms。计算初始温度为 22 ℃,枢轨间摩擦系数取 0.15,模拟中不考虑材料参数随温度的变化。

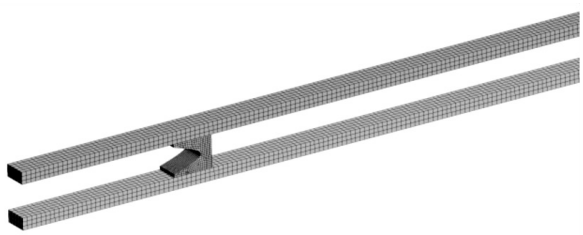


图 1　枢轨有限元模型

Fig. 1　Finite element model of pivot rail

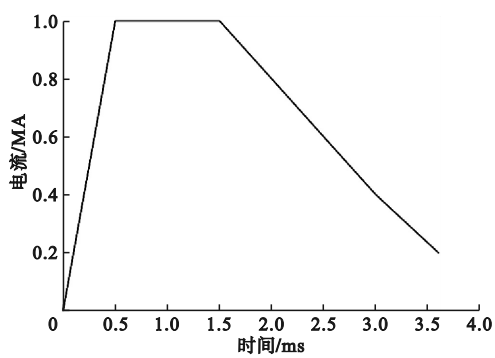


图 2　电流激励曲线

Fig. 2　Current excitation curve

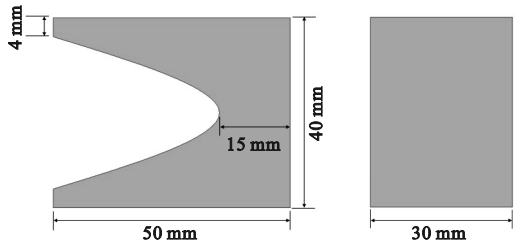


图 3 电枢几何参数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of armature geometric parameters

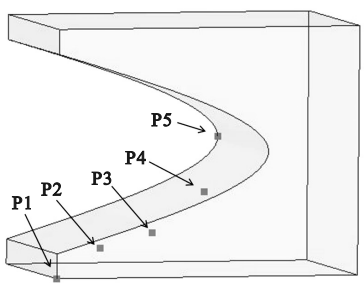


图 4 电枢上取点示意图

Fig. 4 Diagram of taking points on armature

2 模拟结果与讨论

2.1 电磁 – 温度场耦合模拟结果

电磁轨道炮通入电流后会形成导轨 – 电枢 – 导轨电流回路,进而产生电磁力推动电枢沿导轨直线运动[20-22]。此过程中电流流经导体会因导体自身电阻产生焦耳热,虽然枢轨接触面存在摩擦,但因发射时间极短,摩擦产生的热量相对较小。因此,整个发射阶段电流产生的焦耳热是形成温度场的主要因素。

图 5 为 6061 铝合金电枢发射出炮口时(2.1 ms)由电流焦耳热产生的温度场分布。

由图 5(a)可见,电枢上的温度由鞍形表面向内逐渐降低,这是由于在励磁电流趋肤效应和临近效应的影响下,电流主要分布在电枢近表面附近区域,因此焦耳热主要分布在电枢的鞍形曲面上。高温区主要集中在电枢喉部,尤其是电枢喉部两侧附近区域温度最高,这是由于电流流经电枢时容易在边缘集中,使电流密度较大,且电磁场在边缘的梯度也较大,电枢喉部边缘区域温度明显高于其他部位。

图 5(b)为电枢表面从尾翼到喉部不同位置上的温度随发射时间的变化曲线(以电枢原点作为 P1 点,从电枢内部到表面取不同位置点,分别为 P2、P3、P4、P5,见图 4 所示)。由图可知,发射时间在 0.5 ms 之前,电流急剧上升,电枢通电产生的大量焦耳热短时间内来不及扩散,使电枢温升呈直线增加,导致喉部表面温度达到 300 ℃左右。发射时间在 0.5 ~ 1.5 ms时,电流一直处于平台峰值阶段(见图 2),热量生成相比之前稳定,且热量产生速度与扩散速度差值不断变小,电枢表面温度上升趋势有所缓解,电流平沿结束后电枢喉部表面温度达到 760 ℃。发射时间在 1.5 ms 后,电流开始下降,但此时产热仍大于散热,使电枢温度持续增加,导致喉部附近温度在发射结束时达到峰值 900 ℃左右。发射时间在 2.1 ms 之后,电枢发射出炮口,由于处在外界环境中,散热面积增加,电枢温度开始缓慢下降。上述温度变化与文献[23 – 25]中的研究结果一致。

此外,电枢尾翼后端及内部的温度在整个发射过程中处于 50 ~ 150 ℃之间,远低于铝电枢的熔点(600 ℃左右),但是电枢喉部表面(P5 点)温度在发射终点时刻已达到 850 ℃,远超过铝电枢熔点,由此可知电枢喉部表面已经发生烧蚀熔化。

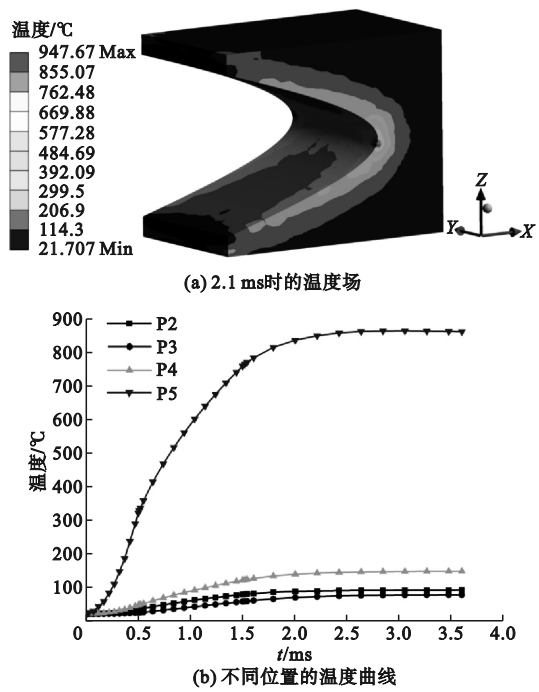


图 5 6061 基体铝合金电枢的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of 6061 based aluminum alloy armature

为研究石墨烯对铝合金电枢抵抗烧蚀能力的影响,构建石墨烯体积分数为 0.5% 和 1% 的两种铝基复合材料电枢模型,并进行电磁发射模拟计算。图 6 为 6061 铝合金和不同石墨烯含量的铝基复合材料电枢经过电磁发射后,电枢上 P5 点温度随时间的变化曲线。

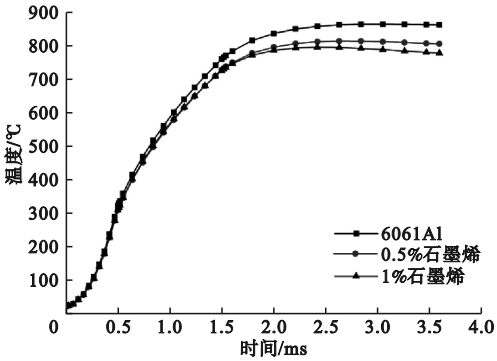


图 6　电枢上 P5 点温度随时间变化曲线

Fig. 6　Curve of temperature of P5 point on armature with time

由图 6 可知,石墨烯对电流平台峰值阶段(0. 5 ms)后的温度变化影响显著,随石墨烯含量的增加,电枢温升在电流平台阶段降低,特别是电流下降段(1. 5 ms 后)及炮口附近温升会有大幅下降,表明石墨烯对电枢的抗烧蚀能力有明显的改善作用,能够改善电枢喉部由于高温引起的熔融烧蚀现象。这是因为石墨烯具有极高的热导率和载流子迁移率,即使在高温下也具有很高的电导率,能够在极短的时间内将热量传输出去。具有高热导率(3 000 ~ 4 000 W/(m·K))的石墨烯提高了复合材料热传导性能。对比 6061 铝电枢和不同石墨烯含量电枢 P5 点温升曲线可知,添加石墨烯可提高材料的热传导性能,降低了温升。

2. 2　电磁 – 温度 – 结构场耦合模拟结果

2. 2. 1　应力分析

为了研究电磁轨道炮发射中电枢在温度场 – 结构场耦合作用下的变形与损伤行为,对电磁轨道炮的温度场 – 结构场耦合进行仿真模拟。图 7 给出了三种不同材料的电枢在 2. 1 ms 时刻(电枢脱离轨道)的应力分布。

由图 7(a)可知,最大应力数值超过铝合金的屈服极限。最大应力出现在电枢喉部区域,应力分布与温度分布趋势相同,呈现出从喉部向尾翼阶梯式下降的分布,与文献[26 – 28]的结果基本一致。发射中电枢的温度非常高,极端的温升现象导致电枢会产生严重的塑性变形。对比图 7(a) ~7(c)可知,喉部区域的峰值应力随石墨烯体积分数的增加而变大,表明石墨烯的加入提高了铝合金基体的强度,有利于抑制电枢的损伤。

石墨烯的加入能够提高电枢的电导率,显著增加同一电流激励下电枢的出口速度,有利于提高电磁轨道炮的能量效率。图8为电磁轨道炮发射系统中电枢上 P5 点(喉部区域)的速度和应力变化规律。

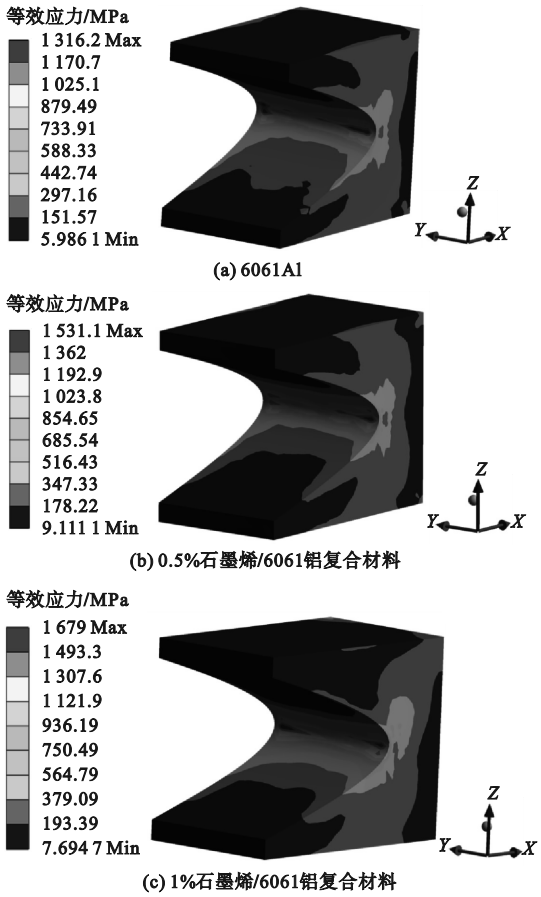


图 7　2. 1 ms 时刻的电枢应力分布

Fig. 7　Stress distribution on the armature at 2. 1 ms

由图 8(a)可知,与 6061 铝电枢相比,随着石墨烯含量的增加,电枢速度曲线无论在电流平沿或下降沿阶段,炮口速度都得到了显著提高。由图 8(b)可知,发射时间在 0. 5 ms 前,由于电磁力急剧增加及应力和热膨胀传递的滞后性,应力在某一时刻呈现阶跃上升的现象。热膨胀传递滞后性由热导率和比热容共同作用引起,热导率决定了电枢内部热量传递的速度,呈现出温度梯度分布,比热容决定了电枢受热响应的速度,呈现出热膨胀的延迟现象,两种因素的共同作用导致热应力的产生和滞后,当电磁力激增后导致应力集中加剧,出现应力阶跃上升现象。发射时间在 0. 5 ms 后,电流处于平台阶段,电枢的温度以及受到的应力不断增加,使其在平台阶段结束后应力达到最大值。发射时间在 1. 5 ms 之后,电流和电磁力迅速下降,电枢内部应力出现短暂波动,从炮口射出瞬间电枢应力急速下降,随后呈现降低趋势。随着石墨烯含量的提高,电枢的强度也不断增加,其在发射过程中的承载能力也得到了提升,对比不

同电枢 P5 点应力可知,随着石墨烯体积分数的增加,峰值应力增加的幅度逐渐变大,而喉部受力面积有所改善,这是因为石墨烯的加入提高了铝基体的强度和模量,使复合材料能够承受更高的载荷。由于电枢的刚性和导热性能也得到了提升,且热膨胀具有滞后性,因此在 1.5 ms 附近呈现内部应力骤升现象。相比石墨烯体积分数为 1% 的电枢,石墨烯体积分数为 0.5% 的电枢应力增加的幅值更低,出炮口之后应力下降更快,波动更平缓。

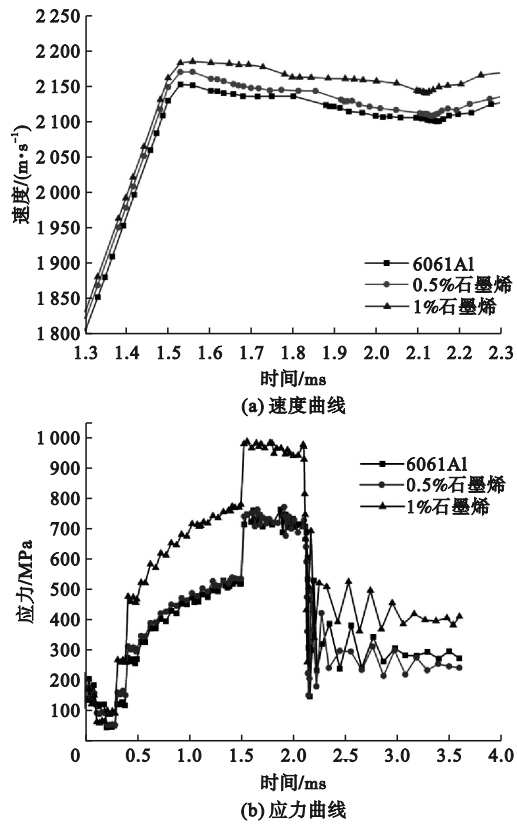


图 8 电枢上 P5 点速度和应力变化曲线

Fig. 8 Velocity and stress curves at P5 point on armature

2.2.2 电枢应变分析

图 9 为电枢发射过程中的应变分布。由图 9(a)~9(b)可知,电枢在各方向上的应变呈现对称分布,应变最大值在喉部边缘附近,且 Y 方向上的变形量大于 Z 方向的变形量,这是由于电磁力在喉部区域密集分布,此处所受应力较大,产生的变形量也最大。虽然 Z 向有电磁力分布,但由于预紧力和导轨电磁力的作用,Z 向电枢的变形量有所减小。由图 9(c)可知,不同体积分数的石墨烯能在一定程度上提高电枢抗变形能力。石墨烯增强铝基复合的电枢在大幅提升速度的同时,在 Y、Z 方向产生的形变有所减小,但其在电流平沿峰值阶段 Y 向产生的形变会增加,石墨烯体积分数为 0.5% 的电枢最大变形量为 0.001 5 mm 左右,石墨烯体积分数为 1% 的电枢最大变形量为 0.005 mm 左右。对比来看,石墨烯体积分数为 0.5% 的电枢变形量较小,在出炮口阶段的变形更加平缓,尤其是 Z 向的变形小于 6061Al 电枢。石墨烯的加入使电枢的导电性更强,在平沿阶段电枢喉部电磁力均匀分布,导致 Y 向产生的变形量较大,在电流下降时电枢韧性更好,使炮口处的形变更小,形变趋势与文献[2,27]结果吻合。因此,石墨烯的添加能有效降低电枢的温升和形变。

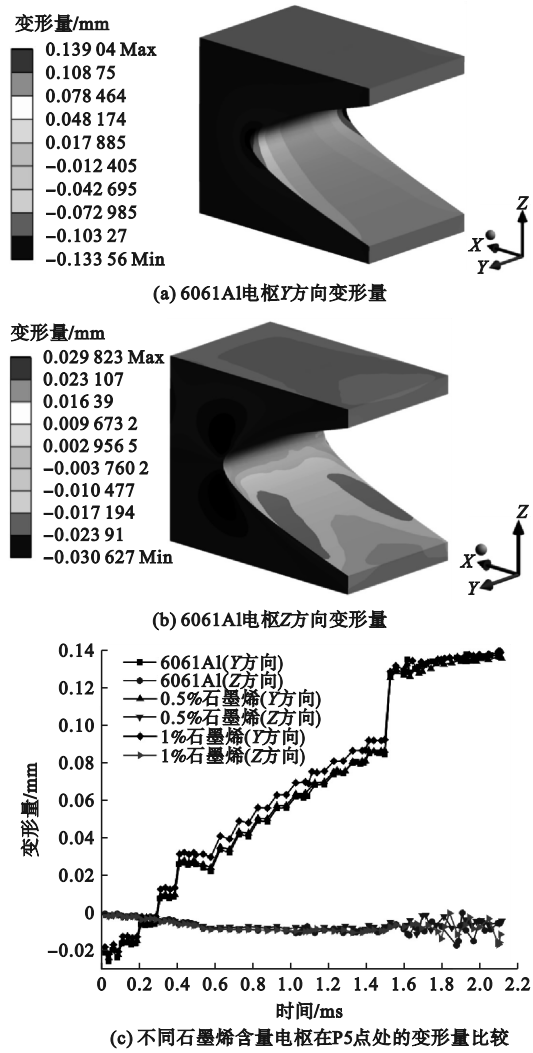


图 9 电枢发射过程中的应变分布

Fig. 9 Strain distribution during armature launching

3 结论

采用有限元方法模拟了石墨烯增强铝基复合材料电枢在电磁场、温度场和结构场耦合作用下的服役行为,研究了石墨烯含量对电枢损伤的影响,得出如下结论。

1)电枢的温升随着石墨烯体积分数的增加而显著降低,与 6061 铝合金基体相比,铝基复合材料电枢的喉部区域烧蚀在一定程度上得到减轻。

2)电枢产生的损伤主要集中在表面,且越靠近喉部越严重,加入 0.5% 的石墨烯能够减轻电枢的损伤破坏,而石墨烯含量增加到 1% 后,电枢的变形损伤反而加剧。

3)体积分数为 0.5% 的石墨烯增强铝基复合材料电枢发射出炮口后应力波动更平稳,速度显著增加,受力产生的形变更小。

参考文献(References):

[1] XING Y C,LV Q G,LEI B,et al. Analysis of transient current distribution in copper strips of different structures for electromagnetic railgun[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2015,43(5):1566 – 1571.

[2] 任师达,冯刚,刘少伟,等. 基于接触特性的四轨电磁发射器电枢结构分析[J]. 弹道学报,2022,34(2):59 – 64,92.
REN S D,FENG G,LIU S W,et al. Armature structure analysis of four-rail electromagnetic launcher based on contact characteristics[J]. Journal of Ballistics,2022,34(2):59 – 64,92. (in Chinese)

[3] HAO S Y,CHEN L,SHI H T,et al. An improved simulation method for modular augmented staged electromagnetic launcher[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2023,51(8):2413 – 2421.

[4] NAGA PRANEETH S R,SINGH B. Investigations on armature jerk for different current pulse and rail geometries in an electromagnetic railgun[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2024,52(4):1486 – 1491.

[5] 李军,严萍,袁伟群. 电磁轨道炮发射技术的发展与现状[J]. 高电压技术,2014,40(4):1052 – 1064.
LI J,YAN P,YUAN W Q. Electromagnetic gun technology and its development[J]. High Voltage Engineering,2014,40(4):1052 – 1064. (in Chinese)

[6] 张博,孟祥欣,王琨,等. 电磁轨道炮发射过程中系统瞬态磁场辐射特性研究[J]. 火炮发射与控制学报,2022,43(4):33 – 37.
ZHANG B,MENG X X,WANG K,et al. Analysis of system transient magnetic field radiative characteristics during electromagnetic railgun launch[J]. Journal of Gun Launch & Control,2022,43(4):33 – 37. (in Chinese)

[7] KESHTKAR A,JAFARI KHORRAMI Z,GHARIB L. Comparison of inductance gradient and electromagnetic force in two types of railguns with two projectiles by finite-element method[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2017,45(8):2387 – 2392.

[8] RABIEI A,KESHTKAR A,GHARIB L. Study of current pulse form for optimization of railguns forces[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2018,46(4):1047 – 1053.

[9] 林庆华,栗保明. 电磁轨道炮瞬态温度场的数值模拟[J]. 工程热物理学报,2017,38(1):149 – 154.
LIN Q H,LI B M. Numerical simulation of transient temperature field in the electromagnetic railgun[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2017,38(1):149 – 154. (in Chinese)

[10] 林庆华,栗保明. 基于瞬态多物理场求解器的电磁轨道炮发射过程建模与仿真[J]. 兵工学报,2020,41(9):1697 – 1707.
LIN Q H,LI B M. Modeling and simulation of electromagnetic railgun launching process based on a transient multi-physical field solver[J]. Acta Armamentarii,2020,41(9):1697 – 1707. (in Chinese)

[11] 李岳,杜晓明,刘凤国. 石墨烯增强 6061 铝基复合材料的组织与力学性能研究[J]. 沈阳理工大学学报,2023,42(2):49 – 55.
LI Y,DU X M,LIU F G. Microstructure and mechanical properties of graphene-reinforced 6061 aluminum matrix composites[J]. Journal of Shenyang Ligong University,2023,42(2):49 – 55. (in Chinese)

[12] 石亚宁,杜晓明,刘凤国. 石墨烯增强铝基复合材料的动态力学性能研究[J]. 沈阳理工大学学报,2022,41(6):74 – 79.
SHI Y N,DU X M,LIU F G. Study on dynamic properties of graphene reinforced aluminum matrix composites[J]. Journal of Shenyang Ligong University,2022,41(6):74 – 79. (in Chinese)

[13] 曹遴,陈彪,贾振东,等. 铝基复合材料研究进展及其航空航天应用[J]. 铸造技术,2023,44(8):685 – 705.
CAO L,CHEN B,JIA Z D,et al. Research progress and aerospace applications of aluminum matrix composite[J]. Foundry Technology,2023,44(8):685 – 705. (in Chinese)

[14] 李沛勇. 高性能铝基复合材料研究进展[J]. 材料工程,2023,51(4):67 – 87.
LI P Y. Research progress in high-performance aluminum matrix composites[J]. Journal of Materials Engineering,2023,51(4):67 – 87. (in Chinese)

[15] 邹昕阳,陈立学,王增基,等. 滑动电接触梯度功能材料电枢熔化磨损特性仿真研究[J]. 电工技术学报,2024,39(19):5947 – 5957.
ZOU X Y,CHEN L X,WANG Z J,et al. Study on melting and wear characteristics of sliding electric contact functionally gradient material armature[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2024,39(19):5947 – 5957. (in Chinese)

[16] 张东方,李惠,李宜彬,等. 一种新型高导电高耐磨铝基复合材料:CN105200252A[P]. 2015 – 12 – 30.

[17] 高海燕,彭朋,吕海洋,等. 石墨烯增强纳米双连续耐磨铝基复合材料导体及制备方法:CN115821123A[P]. 2023 – 03 – 21.

[18] 裴畅贵,刘国志,金寅翔,等. 基于 COMSOL 的电磁发射一体化弹丸动力学分析[J]. 火炮发射与控制学报,2024,45(1):104 – 112.
PEI C G,LIU G Z,JIN Y X,et al. Dynamic analysis of electromagnetically launched integrated projectiles based on COMSOL[J]. Journal of Gun Launch & Control,2024,45(1):104 – 112. (in Chinese)

[19] 耿轶青,刘辉,马增帅,等. 电磁轨道炮枢轨的动态焦尔热特性[J]. 高电压技术,2019,45(3):799 – 804.
GENG Y Q,LIU H,MA Z S,et al. Armature and rail's dynamic joule heating characteristic of the electromagnetic railguns[J]. High Voltage Engineering,2019,45(3):799 – 804. (in Chinese)

[20] ZHANG Y J,QIN W N,RUAN J J. Variable mapping method with nonmatching meshes in 3-D finite-element analysis of coupled electromagnetic-structural fields[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2015,43(5):1288 – 1292.

[21] CAO B,GE X,GUO W,et al. Analysis and calculation of rail transient temperature during electromagnetic launch[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2017,45(7):1443 – 1447.

(下转第 79 页)