

# 电磁轨道炮轨道表面功能化和防护

陈景源<sup>1</sup>,汪笑鹤<sup>2</sup>,刘彬<sup>1</sup>,蒋师昌<sup>1</sup>

(1.江苏科技大学 材料科学与工程学院,江苏 镇江 212000;  
2.中国华阴兵器实验中心 武器装备环境效应实验室,陕西 华阴 714200)

**摘 要** 电磁轨道炮是利用洛仑兹力将电枢在极短时间内超高速发射的武器,电磁轨道炮发射过程中,一方面要保证电枢和轨道间良好的电接触,满足发射需求;另一方面要避免多种形式的失效,以保证发射的稳定性和轨道寿命。本文概括了电磁轨道炮3种主要的失效形式、机理,介绍了4种轨道防护方案,讨论了在轨道炮口处制备电阻涂层抑制炮口电弧的可行性,对电磁轨道炮轨道表面功能化和防护进行了展望。

**关键词** 电磁轨道;表面防护;涂层;炮口电弧

**中图分类号** TJ99

**文献标志码** A

**文章编号** 1004-244X(2022)02-0134-07

**DOI:** 10.14024/j.cnki.1004-244x.20220124.011

## Rail surface functionalization and protection of electromagnetic railgun

CHEN Jingyuan<sup>1</sup>, WANG Xiaohe<sup>2</sup>, LIU Bin<sup>1</sup>, JIANG Shichang<sup>1</sup>

(1.School of Material Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China;  
2.Laboratory for Effects of Environments on Materiel, China Huayin Ordnance Test Center, Huayin 714200, China)

**Abstract** The electromagnetic railgun is a weapon that uses the Lorentz force to launch the armature at ultra-high speed in a very short time. During the launch of the electromagnetic railgun, on the one hand, it is necessary to ensure good electrical contact between the armature and the rail to meet the requirements of launch performance. On the other hand, multiple forms of failure should be avoided to ensure the launch stability and the rail life. This essay summarized three main failure modes and mechanism of electromagnetic railgun. Four rail protection schemes were introduced. The feasibility of preparing a resistive coating at the muzzle position of the rail to suppress muzzle arc was discussed. The functionalization and protection of the rail surface of the electromagnetic railgun were prospected.

**Keywords** electromagnetic rail; surface protection; coating; muzzle arc

自古至今动能类武器在战场上极其重要,其发射能源主要有机械能、化学能和电能。冷兵器时代利用机械能弹射石块或火球,其速度至多几十米每秒;火药发明后,炮弹的发射速度不断提升,随火药配方和发射系统的不断改进,炮弹的发射速度和精度等进一步提高。同样,以电为能源的新型武器—电磁炮必将使动能武器产生质的飞跃。电动机发明后,有学者基于电磁作用原理尝试利用洛仑兹力将弹丸直线加速,直到20世纪初才获得突破性进展。1978年,澳大利亚学者将3.3 g的塑料弹丸通过5 m长电磁轨道加速至5.9 km/s,这一试验结果引起各国军方的高度关注<sup>[1]</sup>。

本文作者讨论一种在炮口位置制备电阻涂层抑制炮口电弧的方案,从理论基础、涂层特性等方面分析该方案的可行性。

### 1 电磁轨道炮轨道失效问题

电磁轨道炮由控制开关、脉冲电源、两根平行导轨和导电电枢组成,如图1所示。接通电源后,电流在电枢和轨道组成的闭合回路中流过,电枢在洛仑兹力的作用下沿轨道瞬间加速,在极短时间内到达炮口位置。

不同于传统火炮,电磁轨道炮以电能为发射能量,发射时电枢和导轨需承受高达几兆安的电流,在发射过程中电枢和轨道间产生剧烈的电、力、热、磁等变化,电枢和轨道在复杂苛刻的工作环境下,易出现形式多样的损伤<sup>[2]</sup>。枢/轨材料性能决定电磁轨道发射稳定性、发射效率及使用寿命等。目前,电磁轨道发射过程面临的材料失效问题仍未完全解决。

收稿日期:2021-08-09;修回日期:2021-11-20

基金项目:国家自然科学基金青年基金(51505484)

第一作者:陈景源,男,硕士研究生;研究方向为表面工程及质量检测。E-mail:cjingyuan1997@163.com。

通信作者:汪笑鹤,男,博士,工程师;研究方向为装备环境适应性及表面工程。E-mail:wxiaohe1984@163.com。

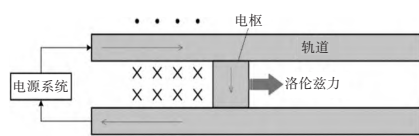


图1 电磁轨道炮原理图

Fig.1 Schematic diagram of electromagnetic railgun

## 1.1 高速刨削损伤

### 1.1.1 刨削损伤概述

为保持发射中枢/轨间良好的滑动电接触,电枢和导轨这对载流摩擦副以过盈配合装配。电磁轨道炮发射过程中,兆安级的脉冲大电流使电枢在极短时间内被加速至几百甚至几千米每秒,在该瞬间加速阶段,枢/轨摩擦副形成相对剪切运动,若轨道材料的力学性能不佳,在电枢高速运动带来的冲击下,导轨表面会产生刨削损伤。大部分刨削坑呈尖部朝炮尾,弧部朝炮口的泪滴状<sup>[3-4]</sup>,典型的刨削损伤形貌如图2所示<sup>[4]</sup>。

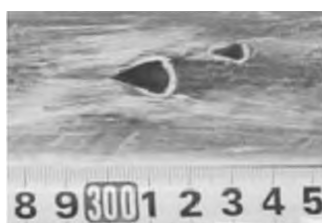


图2 典型的刨削损伤形貌

Fig.2 Typical planing damage morphology

产生刨削的基础条件是电枢和轨道间高速相对滑动,只有当枢/轨间的相对滑动速度到达一定阈值后才发生刨削损伤。研究表明,刨削阈值速度与电枢和轨道材料属性密切相关,电枢和轨道的材料不同时,刨削速度也不同<sup>[5-6]</sup>。其次,电枢、轨道形状和几何参数也对刨削行为产生影响。C型电枢产生的刨削坑较块状电枢的小,且对相对滑动速度不敏感<sup>[7]</sup>;刷状电枢和楔状轨道组成的电磁轨道发射系统具有更高的阈值速度,低速发射时不易产生刨削损伤<sup>[8]</sup>。刘峰等<sup>[3]</sup>通过有限元模拟得出电枢的质心位置后移可使刨削阈值速度增大,此外,轨道表面状态也对阈值速度产生影响,若轨道表面不平整或存在微颗粒时,易发生刨削损伤。

### 1.1.2 高速刨削机理分析

轨道高速刨削的直接原因是大电流加持下电枢在轨道间超高速不稳定滑动冲击。在电磁轨道发射时,随回路中通入大电流,电枢在洛伦兹力作用下瞬间加速,以极快的速度向膛口运动,轨道在电枢的高速冲击下处于高压状态,同时回路中大电流产生的电阻热和高速滑动摩擦产生的摩擦热使电枢和轨道界面温度急剧升高,轨道材料的屈服强度降低,轨道表面更易塑性变形,导致枢/轨界面的接触状态进一步恶化,接触面

不规则加剧,枢/轨间的剪切力直接促进了刨削坑的形成<sup>[3,9]</sup>。

## 1.2 电弧烧蚀损伤

### 1.2.1 转捩现象

在电磁轨道炮高速发射过程中,电枢和轨道需紧密的机械接触,使电接触性能良好,以保证高效率的能量转换。同时在接触界面产生大量的焦耳热,轨道局部被熔化甚至气化,电枢和轨道间产生局部空隙,在强大的电流作用下,枢/轨表面间产生电弧,使枢/轨间的接触形式由原本的固-固滑动电接触变成分离式的固-等离子体-固接触,产生转捩现象<sup>[4,9]</sup>。

电枢和轨道界面因转捩带来的电弧产生剧烈烧蚀,严重破坏电枢和轨道接触界面的完整性,从而影响发射的稳定性和精度<sup>[10]</sup>。

### 1.2.2 电弧烧蚀机理分析

转捩是导致电弧烧蚀的主要因素,由于电流趋肤效应,流经轨道和电枢的电流主要集中在两者的接触表面,使电枢和轨道局部因高温熔化。虽熔化后的熔融层在枢/轨界面间起润滑的积极作用,但枢/轨材料因摩擦磨损和熔化损耗导致滑动接触面分离,为电弧放电提供空间。同时通过接触界面间的大电流为电弧产生提供能量<sup>[11]</sup>。因此流经枢/轨的大电流和枢/轨接触间距是产生转捩和电弧烧蚀的两个因素。其中电枢和轨道间的原始接触状态由预紧力决定,发射前按照“1g/A”的法则在电枢法向施加预紧力,保证发射初始具有良好的电接触特性<sup>[12]</sup>。研究表明,原始施加的预紧力越大,电枢和导轨间的滑动电接触状态越好,产生的焦耳热相应变小,电弧烧蚀对轨道的烧蚀程度变轻<sup>[13]</sup>。在相同预紧力下,电流越大,提供给枢/轨界面间电弧的能量也越大,对轨道的烧蚀程度越严重。

### 1.2.3 炮口电弧烧蚀

电磁轨道炮的大载流作为发射能源通过电枢和轨道的回路产生高强洛伦兹力将电枢瞬间加速,根据理论计算,电磁轨道炮发射效率约为50%<sup>[14-15]</sup>。首先在电枢加速过程中因电枢和轨道特殊的电接触状态消耗一部分能量,通过电阻热和电弧热等形式释放;其次在电枢出膛后轨道内部仍残余一部分电流,最终以炮口电弧的形式释放。当电枢出膛口时,电枢和轨道间的距离急剧增大,原先在电枢和轨道回路间流通的电流保持继续传导,电枢出膛后在炮口形成电弧导通电流,通过电弧的形式持续消耗剩余的发射能量,直到剩余能量释放完毕。产生的电弧不仅对炮口存在电弧烧蚀,还产生声响、闪光及降低初速度精度等负面效应,严重影响轨道炮的发射性能、寿命和作战隐蔽性。因此有效抑制炮口电弧具有重要意义。

### 1.3 槽蚀损伤

#### 1.3.1 槽蚀损伤概述

槽蚀损伤是电磁轨道炮中常见的损伤形式,主要出现在轨道边缘部位,具有积累效应,随发射次数累加对轨道表面造成严重损伤,影响轨道寿命和发射效率<sup>[16-17]</sup>。2001年,Gee等<sup>[18]</sup>首次报道出现在铍铜轨道上的槽蚀损伤现象,经试验发现损伤位置在电枢和轨道接触边缘,形貌为尖锐沟槽状,深度为62.8  $\mu\text{m}$ 。Watt等<sup>[19]</sup>在多次发射试验中发现在轨道的不同位置,槽蚀损伤形貌不同,在轨道10 cm处,槽蚀损伤形貌为尖锐沟槽状,在30 cm处形貌为扩展型凹槽。Cooper等<sup>[20]</sup>通过多次发射试验发现槽蚀损伤的深度随发射次数增加不断加深,呈线性增长,Watt通过试验也得出相同的结果。

#### 1.3.2 槽蚀机理分析

目前关于槽蚀损伤的机理未形成统一意见。Gee等<sup>[18]</sup>认为槽蚀是液态金属膜化学腐蚀和塑性变形引起。Meger等<sup>[21]</sup>认为槽蚀是由于枢/轨接触界面电流速度趋肤效应引起的界面高温导致槽蚀损伤。Watt等<sup>[19]</sup>对试验中10、30 cm两处不同形貌槽蚀进行分析,认为10 cm处的尖锐沟槽状槽蚀是由于轨道材料受热软化及塑性变形导致,30 cm处的扩展型槽蚀是由于高速运动的铝液对已受热软化的轨道侵蚀所致。

## 2 轨道表面防护

为减少上述形式损伤对电磁轨道炮寿命和发射性能的影响,目前主要研究方向:1)开发新轨道材料,如新型铜合金轨道;2)利用涂层优化电弧和轨道表面性能;3)优化电枢形状和几何参数等。本文主要介绍几种涂层技术。Siopis等<sup>[22]</sup>通过Ashby图对枢/轨材料可选方案分析,提出4种可能的结构,如图3所示。

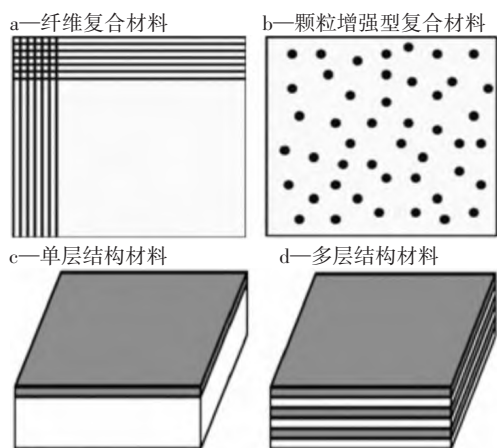


图3 Matthew提出4种可能的轨道材料

Fig.3 Four possible rail materials proposed by Matthew

Siopis等<sup>[22]</sup>指出单层结构材料为最优选择,以导电性能优异的材料为基体,保证良好的电导率和磁场强度,再以钨、铬、镍、钼、钽等材料为表面层,提高可靠性。

#### 2.1 Mo涂层

Mo具有高硬度、高熔点,刘贵明等<sup>[23-25]</sup>利用超音速等离子喷涂技术在45CrNiNoVA钢表面制备Mo涂层,研究Mo涂层对基体材料显微硬度和载流摩擦情况下磨损性能的影响,通过试验期望为电磁轨道材料改性提供参考方案。试验制得与基体结合强度为41.5 MPa的Mo涂层,研究表明,Mo涂层的显微硬度较基体提升了一倍,比基体的摩擦因数小、磨损量小、耐电弧烧蚀能力强。通过系列试验得出,利用Mo涂层优化电磁轨道炮发射性能可行,并对不同喷涂工艺的涂层性能进行研究,得出一组性能优异的工艺参数。

#### 2.2 液态金属涂层

电枢和轨道的接触表面为凹凸不平的离散点,通电后,电流只能通过部分实际接触的离散点流通,导致枢/轨电接触状态较差。同时还产生收缩效应,造成接触部位产生大量的焦耳热,当实际接触点温度过高时,接触点转移,从低电压处转移到高电压处,产生电弧,最终产生烧蚀损伤<sup>[26]</sup>。增大枢/轨界面间实际接触面积可避免这个问题,如让材料表面更光滑,尽可能接近界面光滑的理想接触状态;利用导电液体涂层填充接触界面,增大接触面积。利用液态金属导电性和液体特性,应用于电枢和轨道界面,可增加枢/轨接触面积,从而减小枢/轨界面接触电阻<sup>[27]</sup>。

2016年,Engel等<sup>[28]</sup>将液态镓、铟、锡和水膜用棉签涂抹在铜电枢和铜轨道的表面进行发射试验,发现两组液态涂层都降低了枢/轨界面的摩擦因数,相较于水膜,液态镓铟锡对发射速度的提升效果更好。通过对比试验得到液态金属可达到提高发射性能,但试验中制备涂层的过程繁琐、可重复性差,难以投入实际应用,需开发更加便捷、高效的液态金属涂覆系统,并保证在发射过程中涂层能连续稳定的发挥作用。

#### 2.3 低熔点合金涂层

在电磁轨道炮实际发射过程中,铝电枢随温度升高而熔化,变成熔融态铝后,可起到一定润滑作用。陈建伟等<sup>[27]</sup>提出在电枢和轨道表面制备低熔点合金涂层,在发射中产生的热量可使其在低于电枢和轨道材料熔点以下的温度熔化,增加电枢和轨道的电接触面积,同时电枢和轨道间熔融金属的粘滞力替代静摩擦力,起润滑作用。陈建伟等<sup>[29-31]</sup>在铝电枢表面制备低熔点的锡合金,试验证明锡合金可提高电枢出膛速度。



### 3 炮口消弧

#### 3.1 炮口消弧装置

目前在炮口安装基于分流器形式的炮口消弧器是一种有效的抑制炮口电弧的方式。Parker等<sup>[32-33]</sup>发现在炮口装备分流器能有效减轻炮口烧蚀问题,并设计出一种电感型炮口分流器。Jamison等<sup>[34]</sup>在炮口加装电阻后发现,可以显著降低电枢出膛后轨道内剩余电流。何勇等<sup>[35]</sup>利用导通时阻抗极低的三级开关等组成主动消弧器,试验证明该消弧器有效抑制炮口电弧,但对比试验发现消弧器件的导通存在一定程度延迟,且延迟时长不确定。唐波等<sup>[36]</sup>设计了一种被动式消弧器,能有效抑制炮口电弧,对电枢出膛速度的影响较小,结构如图4所示。杨帆等<sup>[37]</sup>设计出一种基于反向消弧的炮口消弧方案,能有效抑制炮口电弧,提高电枢的初速度精度,消弧装备的电器参数可根据主回路电压等级进行灵活调配。裴朋超等<sup>[38]</sup>、葛霞等<sup>[39]</sup>设计出一种基于分流器形式的消弧器,并对其消弧装置的电气参数进行优化,结构如图5所示。

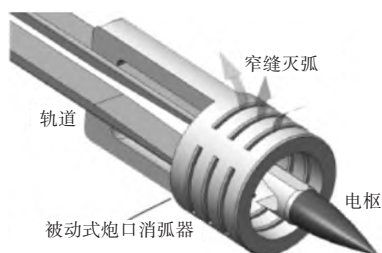


图4 被动式炮口消弧装置

Fig.4 Passive muzzle arc suppression device

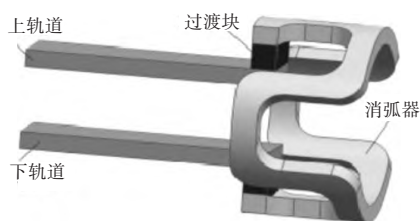


图5 反向消弧炮口消弧装置

Fig.5 Muzzle arc suppression device by reverse arc suppression

##### 3.1.1 主动消弧器

主动消弧器通过装备导通时阻抗极低的外触发开关,在电枢出膛前某个时刻通过外触发信号激活消弧回路,使电流在消弧阻抗极低的消弧回路流过,从而抑制炮口电弧。主动式消弧器虽然对器件的电气参数要求不高,但消弧系统整体体积较大,需准确测定电枢的出膛时间,且由于存在触发延迟现象,可靠性较低。

##### 3.1.2 被动消弧器

相较于主动消弧器,被动消弧器结构较简单,将两个轨道用电感、电阻等连接在一起,形成不需外触发信

号激活的消弧支路。在装备被动消弧器的电磁轨道炮中,发射初期由于消弧旁路阻抗远大于电枢,消弧旁路不产生很大的分流电流,随电枢不断向炮口移动,消弧旁路中的电感迅速下降,其产生的感生电动势增加将增加流过电枢的电流,这些电枢中增加的电流抵消了部分消弧旁路的分流电流,同时电枢前后的磁场都对电枢起加速作用,电枢的加速效果不受太大影响;电枢出膛后,消弧旁路的阻抗小于炮口电弧,基于续流原理,消弧旁路中的电流密度大于电弧中,轨道中的剩余电流经消弧器释放,削减了电弧中的能量,从而有效减轻了炮口电弧造成的负面影响。

被动消弧器虽然结构简单,但需消弧旁路具有合适的电气参数。如果旁路阻抗过小,消弧旁路中产生过大的电流,影响电枢的出膛速度;如果消弧旁路的阻抗过大,消弧器的消弧效果就受影响。而且目前大部分消弧器件的电气参数确定后难以更改,消弧旁路的阻抗无法根据发射条件进行合适匹配。

#### 3.2 炮口电阻涂层

1978年,澳大利亚Marshall博士将3.3 g的塑料弹丸通过5 m长电磁轨道加速至5.9 km/s,该研究说明利用洛伦兹力将弹丸以极高速度发射是可行的,从此电磁轨道发射技术引起各国军方的高度关注,电磁轨道发射技术的研究进入新篇章<sup>[1]</sup>。

##### 3.2.1 理论分析

为提高电磁轨道炮的发射效率,在电枢加速过程中电流基本保持恒定,从而保证电枢的加速效果,在电枢出膛后系统中存在大量的剩余能量,这些能量通过炮口电弧的形式释放。目前抑制炮口电弧的有效手段为装备基于分流器形式的消弧器,但这些消弧设备存在消弧不可靠、需要特定电气参数等。

Shvetsov等<sup>[40]</sup>认为在轨道制备电阻涂层可一定程度减缓因电流趋肤效应引起的电流在接触面集中的现象,进而降低涂层部位的电阻热,避免涂层高温熔化。基于此在炮口位置制备绝缘涂层,抑制炮口电弧具有可行性,其特点:

1)在距炮口某位置制备电阻涂层,朝炮口方向涂层厚度不断增大,炮口厚度最大。这种厚度梯度变化的电阻涂层能减小对电枢出膛速度的影响,还会显著增大炮口处两导轨间的电阻,削弱炮口电弧能量,达到抑制炮口电弧的目的。

2)不需额外加装消弧设备,避免了因器件电气参数不匹配而导致的消弧效果不佳、影响电枢出膛速度等问题。

##### 3.2.2 涂层特性

金属基体具有良好的导电性,陶瓷涂层具有良好

的耐磨、耐高温、高熔点等特点。同时陶瓷材料耐大电流冲击,相较于其它电阻材料,在相同的温升下能吸收更多的电能。将金属基体和陶瓷涂层的优势结合起来,在炮口位置制备梯度陶瓷涂层,既能保证电枢的发射性能,又能一定程度上抑制炮口电弧,延长轨道的使用寿命。

## 4 结束语

目前对电磁轨道炮轨道防护的研究大部分都停留在模拟分析、低能量等级、少量单次发射阶段,缺少大能量密度、连续发射和大样本发射试验。部分防护方法对发射效率存在一定负面影响,对不同形式防护的作用机理还需深入研究。随动能武器的发展,未来可能对电磁轨道炮的发射性能提出更高要求,轨道的工作环境也将更加恶劣。根据目前的研究现状和工程应用背景,轨道防护的发展方向应该包含几个方面:

1) 开展高密度、高强度试验,通过大量试验样本测试防护措施的可可靠性,同时暴露出防护方案缺陷并对缺陷进行针对性改进试验。

2) 轨道寿命由多种形式的损伤耦合作用决定,有必要开展结合多种优化方案的综合性试验,深入研究不同方案的优化机理及不同方案间可能存在的制约关系,最大程度的优化电磁轨道炮的发射性能,延长轨道的使用寿命。

3) 轨道材料的研发应与新型材料接轨,针对电枢和轨道的应用需求开发新型复合材料。

4) 考虑到炮口位置电枢运动速度较快,对涂层产生冲击较强,对涂层与基体结合强度具有较高要求,因此需改善涂层的制备工艺。

## 5 参考文献

- [1] FAIR H D. For love of a gun[J]. IEEE Spectrum, 2007, 44(7):40-46.
- [2] CHEN Lixue, HE Junjia, XIAO Zhen, et al. Experimental study of armature melt wear in solid armature railgun[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(5):1142-1146.
- [3] 刘峰, 赵丽曼, 张晖辉, 等. 电磁轨道炮削蚀的形成机理及仿真分析[J]. 高压物理学报, 2015, 29(3):199-205.  
LIU Feng, ZHAO Liman, ZHANG Huihui, et al. Formation mechanism and simulation analysis of railgun gouging[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2015, 29(3):199-205. (in Chinese)
- [4] 刘贵民, 杨忠须, 闫涛, 等. 电磁轨道炮导轨失效研究现状及展望[J]. 材料导报A, 2015, 29(4):63-70.  
LIU Guimin, YANG Zhongxu, YAN Tao, et al. Current status and prospect on rail failures of electromagnetic railgun[J]. Ma-

- terials Review A, 2015, 29(4):63-70. (in Chinese)
- [5] STEFANI F, PARKER J V. Experiments to measure gouging threshold velocity for various metals against copper[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(1):312-316.
- [6] WATT T J, CLAY C E, BASSETT P M, et al. The effect of surface indentations on gouging in railguns[J]. Wear, 2014, 310(1/2):41-50.
- [7] ZHU Rengui, ZHANG Qian, LI Zhiyuan, et al. Impact physics model and influencing factors of gouging for electromagnetic rail launcher[C]//17th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology (EML). La Jolla: Institute for Strategic and Innovative Technologies, 2014.
- [8] SCHNEIDER M, SCHNEIDER R. Advanced rail-sabot configurations for brush armatures[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1):186-189.
- [9] 闫涛, 刘贵民, 朱硕, 等. 电磁轨道材料表面损伤及强化技术研究现状[J]. 材料导报A, 2018, 32(1):135-140.  
YAN Tao, LIU Guimin, ZHU Shuo, et al. Current research status of electromagnetic rail materials surface failure and strengthen technology[J]. Materials Reports A, 2018, 32(1):135-140. (in Chinese)
- [10] STEFANI F, LEVINSON S, SATAPATHY S, et al. Electrodynamic transition in solid armature railguns[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(1):101-105.
- [11] VANICEK H, SATAPATHY S. Thermal characteristics of a laboratory electromagnetic launcher[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1):251-255.
- [12] MARSHLL R A, WANG Ying. Railguns: Their science and technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2004:33-35.
- [13] 曹海要, 战再吉. 铜/金刚石复合材料电磁轨道烧蚀特性的实验研究[J]. 高压物理学报, 2016, 30(4):317-322.  
CAO Haiyao, ZHAN Zaiji. Experimental study of Cu/diamond composite electromagnetic rail ablation characteristics[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2016, 30(4):317-322. (in Chinese)
- [14] JIN Yi, CAO Ruiwu, ZHANG Yanze, et al. A new double-sided primary wound field flux-switching linear motor[C]//2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Pattaya City: IEEE, 2015:25-28.
- [15] 田慧, 夏言, 栗保明. 13 MJ大功率脉冲电源的诊断系统设计[J]. 高电压技术, 2014, 40(4):1153-1158.  
TIAN Hui, XIA Yan, LI Baoming. Diagnosis system design for a 13 MJ pulsed power supply[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4):1153-1158. (in Chinese)
- [16] 曹荣刚, 苏明, 李士忠, 等. 脉冲大电流高速滑动电接触下轨道槽蚀现象的总结与分析[J]. 高电压技术, 2016, 42(9):2822-2829.  
CAO Ronggang, SU Ming, LI Shizhong, et al. Summarize and analysis of rail-gun's grooving phenomenon with large pulse current and high-velocity sliding electrical contact[J]. High

- Voltage Engineering, 2016, 42(9):2822-2829. (in Chinese)
- [17] STEFANI F, MERRILL R. Experiments to measure melt-wave erosion in railgun armatures[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(1):188-192.
- [18] GEE R M, PERSAD C. The response of different copper alloys as rail contacts at the breech of an electromagnetic launcher[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(1):263-268.
- [19] WATT T, STEFANI F, CRAWFORD M, et al. Investigation of damage to solid-armature railguns at startup[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1):214-218.
- [20] COOPER K P, JONES H N, MEGER R A. Analysis of railgun barrel material[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 43(1):120-125.
- [21] MEGER R A, COOPER K, JONES H, et al. Analysis of rail surfaces from a multishot railgun[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1):211-213.
- [22] SIOPIS M J, NEU R W. Materials selection exercise for electromagnetic launcher rails[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(8):4831-4838.
- [23] 闫涛, 刘贵民, 朱硕, 等. 电磁轨道失效与表面喷涂Mo技术研究[J]. 材料保护, 2018, 51(2):31-35.
- YAN Tao, LIU Guimin, ZHU Shuo, et al. Failure analysis of electromagnetic rail and study of surface spraying Mo coatings[J]. Materials Protection, 2018, 51(2):31-35. (in Chinese)
- [24] 刘贵民, 杨忠须, 张一帆, 等. 基于正交试验法的超音速等离子喷涂钼涂层组织及性能研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(08):1489-1496.
- LIU Guimin, YANG Zhongxu, ZHANG Yifan, et al. Research on microstructure and properties of supersonic plasma sprayed Mo coating based on orthogonal experiment[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(8):1489-1496. (in Chinese)
- [25] 惠阳, 刘贵民, 闫涛, 等. 超音速等离子喷涂Mo涂层的载流摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2019, 32(2):109-119.
- HUI Yang, LIU Guimin, YAN Tao, et al. Current-carrier tribological properties of mo coating deposited by supersonic plasma spraying[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(2):109-119. (in Chinese)
- [26] 杜传通, 雷彬, 张倩, 等. 电磁轨道炮枢轨材料研究进展[J]. 飞航导弹, 2017, 9:88-93.
- DU Chuantong, LEI Bin, ZHANG Qian, et al. Research progress on pivot rail materials of electromagnetic railgun[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2017, 9:88-93. (in Chinese)
- [27] 陈建伟, 吕庆敖, 张倩, 等. 电磁轨道炮滑动电接触导电涂层应用研究[J]. 飞航导弹, 2018, 8:80-85.
- CHEN Jianwei, LÜ Qing'ao, ZHANG Qian, et al. Research on application of conductive coating for sliding electric contact of electromagnetic railgun[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2018, 8:80-85. (in Chinese)
- [28] ENGEL T G, RADA N M. Time and frequency domain characterization of railgun sliding contact noise[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 2017, 45:1-6.
- [29] 陈建伟, 吕庆敖, 邢彦昌, 等. 电磁轨道炮锡合金镀层电枢制备与初步发射试验[J]. 磁性材料及器件, 2019, 50(5):26-30.
- CHEN Jianwei, LÜ Qing'ao, XING Yanchang, et al. Preparation process and launching test of armature coated with Sn alloy for electromagnetic railgun[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2019, 50(5):26-30. (in Chinese)
- [30] 吕庆敖, 陈建伟, 张华翔, 等. 电磁轨道炮锡合金涂层电枢/轨道温度场数值仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(4):10-14.
- LÜ Qingao, CHEN Jianwei, ZHANG Huaxiang, et al. Numerical simulation of armature / rail temperature field of Tin-alloy coating for electromagnetic railgun[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(4):10-14. (in Chinese)
- [31] 陈建伟, 吕庆敖, 邢彦昌, 等. 电磁轨道炮锡合金镀层U形电枢仿真与试验[J]. 火炮发射与控制学报, 2019, 40(3):1-6.
- CHEN Jianwei, LÜ Qing'ao, XING Yanchang, et al. Simulation and experimentation of U-armature for tin alloy coating of electromagnetic railgun[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2019, 40(3):1-6. (in Chinese)
- [32] PARKER J V. Muzzle shunt augmentation of conventional railguns[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(1):80-84.
- [33] PARKER J V, LEVINSON S J. Muzzle arc control using an inductive shunt[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(1):594-598.
- [34] JAMISON K A, LITRELL D M. Performance characteristics of a high velocity, 25 mm railgun[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(1):168-173.
- [35] 何勇, 程诚, 宋盛义, 等. 电磁轨道发射中炮口电弧的抑制[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(2):025003.
- HE Yong, CHENG Cheng, SONG Shengyi, et al. Suppression of muzzle arc in during rail launch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(2):025003. (in Chinese)
- [36] 唐波, 徐英桃, 栗保明. 电磁轨道炮被动式炮口消弧装置的理论分析与优化设计[J]. 弹道学报, 2016, 28(4):62-67.
- TANG Bo, XU Yingtao, LI Baoming. Theoretical analysis and optimization design of passive muzzle arc suppression device in a railgun[J]. Journal of Ballistics, 2016, 28(4):62-67. (in Chinese)
- [37] 杨帆, 陈丽艳, 韩洁. 一种基于反向消弧的电磁发射膛口电弧抑制方案[J]. 科技创新与应用, 2018, 20:9-12.
- YANG Fan, CHEN Liyan, HAN Jie. A scheme of arc suppression in the muzzle of electromagnetic launch based on reverse arc suppression[J]. Technology Innovation and Application, 2018, 20:9-12. (in Chinese)
- [38] 裴朋超, 王剑安, 曹斌, 等. 轨道炮消弧器结构设计及电磁

- 特性分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2020, 41(4): 38-42.
- PEI Pengchao, WANG Jian'an, CAO Bin, et al. Structure design and electromagnetic performance analysis of rail-gun arc suppressor [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2020, 41(4): 38-42. (in Chinese)
- [39] 葛霞, 曹斌, 李明涛, 等. 分流器形式炮口消弧装置的电路模拟优化与试验[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(2): 025002.
- GE Xia, CAO Bin, LI Mingtao, et al. Circuit simulation optimization and test of shunt type muzzle arc suppression device [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(2): 025002. (in Chinese)
- [40] SHVETSOV G A, STANKEVICH S V. Problem of materials for railguns [C]//15th International Conference on Pulsed Power. Monterey: IEEE, 2005.