

电磁发射的出口速度及负载质量变化对导轨热量的影响*

武晓康, 鲁军勇, 李玉, 张永胜, 王刚

(海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北武汉 430033)

摘要:为分析不同发射出口速度、不同发射负载质量对导轨积累热量的影响,建立了导轨温度场模型,计算了导轨各点温度变化过程,并和光纤光栅温度传感器测量结果对比,验证了模型及测量结果的正确性。在此基础上,设计并进行了三种类型实验,分析了在不同发射速度、不同发射负载质量以及相同发射能级不同发射速度下的导轨热量积累差异。该结论为确定连发间隔、导轨冷却设计提供了有效参考。

关键词:电磁发射;导轨;温度场;能级;累积热量

中图分类号:TM835 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)05-116-07

Effect of changing armature's velocity and quality on rail accumulated thermal energy

WU Xiaokang, LU Junyong, LI Yu, ZHANG Yongsheng, WANG Gang

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to analyze the effect of armature's velocity and quality changing on the accumulated thermal energy of rail, the thermal field model of rail was established and the rail temperature variation was calculated. Compared with the experimental results measured by FBG (fiber Bragg grating) temperature sensors, the correctness of the model and the measurement results were verified. On this basis, three types of experiments were designed to analyze the differences accumulated from the thermal energy on rail under different velocity, quality and the same energy level in different velocity. Experimental conclusions can provide valid references for determining the interval between two launches and designing the cooling system.

Key words: electromagnetic launch; rail; thermal field; energy level; accumulated thermal energy

导轨式电磁发射是一种利用电磁力推动负载至超高速的先进发射方式,将在武器、航天等发射领域得到广泛应用^[1-3]。相比于传统化学发射,电磁发射的一个重要优点在于能够通过控制脉冲电源的放电大小和放电时序来发射不同质量和出口速度的负载。但电磁发射以高功率脉冲电流的形式加载到发射装置,伴随高速相对滑动,使得发射装置的导轨在短时间内积累大量的热量^[4]。导轨的热量管理是制约电磁发射技术由实验研究走向工程化、实用化的一项关键技术。

近年来,国内外研究人员对导轨式电磁发射技术的研究不断深入,对发射过程中热量的产生、分布、传导问题进行了广泛研究^[4-12],但对于不同发射速度、不同负载质量发射工况下的导轨积累热量缺乏相应的比较和分析。根据动能公式 $E = 1/2mv^2$,在发射能级相同的状况下,即发射组

件的出口动能一定,发射质量和发射速度有一一对应关系。发射装置的发射距离是固定的,因而发射不同出口速度、不同质量的负载,加载在发射装置的电流的幅值不同,电枢在膛内的运行时间不同,诸多不同因素会影响导轨上积累热量的不同。因此,有必要分析在发射速度变化、负载质量变化,以及相同发射能级不同发射速度下导轨热量积累的差异,为合理选择同能级下的质量/速度关系、提高发射效率提供有效参考。

1 发射装置温度场模型

为简化仿真计算模型,对电磁发射过程中导轨的热量积累及分布做以下简化,简化模型如图1所示。

1) 导轨上的热量只在导轨内部传导,空气和外围封装的绝缘体耗散忽略不计;导轨的热量只考虑

* 收稿日期:2017-05-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51522706,51607187,51407191,51307176);国家部委基金资助项目(613262)

作者简介:武晓康(1990—),男,河北邯郸人,讲师,博士,E-mail:172896292@qq.com;

鲁军勇(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:jylu@xinhuanet.com

横向截面的传导,不考虑沿着导轨纵向的传导。

2) 计算表明电磁发射过程中导轨上的热量大小依次为导轨体电阻产生的焦耳热、枢轨滑动产生的摩擦热、枢轨滑动电阻产生的焦耳热,可忽略枢轨滑动电阻产生的焦耳热及电枢与导轨之间的热量传导过程,并假设枢轨滑动产生的摩擦热量全部传递给导轨。

3) 发射过程中不考虑电枢磨损,将摩擦系数设为恒定值,导轨电阻率的温度系数随温度变化。

设 h 为发射装置导轨的高度为, w 为导轨的宽度, c 为导轨材料的比热容, ρ 为导轨密度, ρ_{rail} 为导轨电阻率。

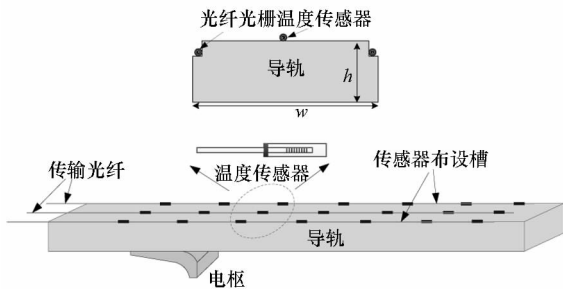


图1 发射装置模型

Fig.1 Model of electromagnetic launcher

1.1 导轨体电阻产生的热量

在趋肤效应下,导轨截面电流是分布不均的,电流集中在导轨内表面薄层中,趋肤深度 δ 可以表示为:

$$\delta(t) = \sqrt{\pi \rho_{\text{rail}} t / \mu_0} \quad (1)$$

式中, μ_0 为真空磁导率, t 从磁场开始扩散计时。设发射时刻为零时刻,电枢在 t_i 时刻运动到导轨 l_i 处,电枢离开发射装置时刻为 t_{out} ,导轨 l_i 处、长度为 Δl 导轨段的通电时间区间为 $[t_i, t_{\text{out}}]$,该段导轨的电阻值 R 可以表示为:

$$R = \frac{\rho_{\text{rail}}}{S} \Delta l = \frac{\rho_{\text{rail}}}{\delta(t)(2h+w)} \Delta l \quad (2)$$

则导轨在该处单位长度导轨上产生的焦耳热量为:

$$Q_{j-R}(l_i) = \frac{\rho_{\text{rail}}}{(2h+w)} \int_{t_i}^{t_{\text{out}}} \frac{I^2(t)}{\delta(t-t_i)} dt \quad (3)$$

式中,电阻率 ρ_{rail} 不但与材料的种类有关,而且与温度有关,导轨电阻率与温度近似有如下关系:

$$\rho_{\text{rail}} = \rho_{\text{rail}_0} (1 + \beta T) \quad (4)$$

式中, ρ_{rail_0} 为导轨 0°C 时的电阻率, ρ_{rail} 为导轨在 $T^\circ\text{C}$ 时的电阻率, β 为电阻温度系数。

1.2 电枢导轨摩擦产生的热量

脉冲电流对电枢的电磁推力为:

$$F(t) = \frac{1}{2} L' I^2(t) \quad (5)$$

C型电枢通过对导轨的电磁挤压力提供接触压力, C型电枢对导轨的电磁挤压力可表示为:

$$F_p(t) = \frac{1}{2} a L' I^2(t) \cos \theta \quad (6)$$

式中: θ 为电枢尾翼与导轨的夹角; a 为电枢臂受到电磁扩张力转化为电磁挤压力的系数,因不考虑电枢磨损,电枢过盈产生的机械预接触力 F_0 为常量。

电枢与导轨的滑动摩擦力与接触压力成正比,设摩擦系数为常量 μ 。摩擦力为:

$$F_{\text{friction}}(t) = \mu [F_p(t) + F_0] \quad (7)$$

在时间段 $[t_i, t_i + \Delta t]$, 电枢在 $[l_i, l_i + \Delta l]$ 的运动区间产生的摩擦热量为:

$$Q_f(l_i) = \frac{\int_{t_i}^{t_i+\Delta t} \mu F_{\text{friction}}(t) v(t) dt}{\int_{l_i}^{l_i+\Delta l} v(t) dt} \quad (8)$$

当 Δt 趋近于零时,得到电枢与导轨在该处单位长度导轨上产生的摩擦热量。

1.3 导轨热量仿真计算方法

采用电磁-温度耦合场计算导轨的瞬态温度特性。该模型采用 ANSYS14.5 软件的 Emag 模块建立发射装置的电磁场分析模型,采用热场模块的 13 号单元建立其温度场模型,然后利用 ANSYS 参数化设计语言完成电磁场和温度场的顺序耦合计算。计算流程如图 2 所示。

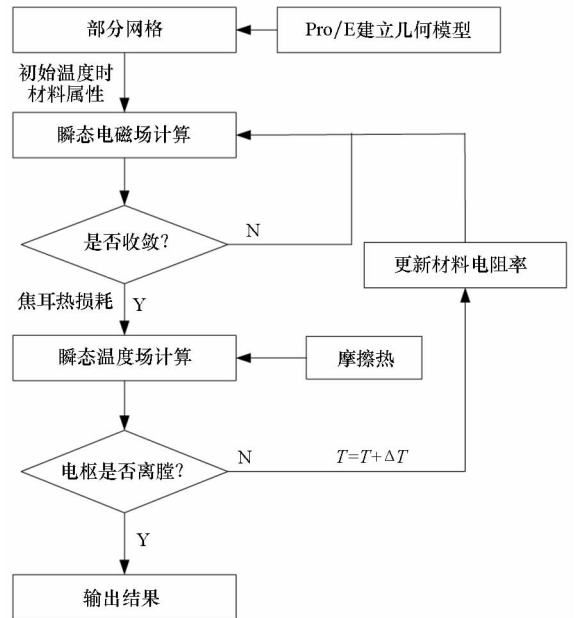


图2 温度场与电磁场双向耦合分析流程

Fig.2 Diagram of coupling field calculation

按照图 2 中计算流程,将表 1 中发射装置相关的各个计算参数代入即可计算获得导轨各处温度变化过程。

表 1 模型相关参数

Tab. 1 Parameters for simulation model

属性	符号	单位	数值
密度	ρ	kg/m^3	8900
比热容	c	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	398
热导系数	κ	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	115
0 °C 时电阻率	$\rho_{\text{rail},0}$	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$	1.6
电阻温度系数	β	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	4.3×10^{-3}
真空磁导率	μ_0	N/A^2	$4\pi \times 10^{-7}$
导轨长度	l	m	3
导轨高度	h	mm	60
导轨宽度	w	mm	20
上下导轨间距	l_h	mm	60
电感梯度	L'	$\mu\text{H}/\text{m}$	0.465
预接触压力	F_0	N	1000
枢轨摩擦系数	u		0.15
转化系数	a		0.5
电枢尾翼角度/rad	θ		0.11π

2 发射实验

2.1 实验条件

脉冲电源为多模块同步放电,通过控制电源的充电电压可以实现电流波形一致而幅值大小有所差别。为了尽可能减少误差,在温度场计算过程中采用 Rogowski 线圈实际测量的加载电流进行温度场仿真计算。

图 3 为电枢及配重示意图,设 C 型电枢的质量为 m_{arm} ,配重的质量为 m_c 。发射实验中不改变电枢尺寸,只在电枢头部增加配重块来改变总质量,从而模拟不同的发射质量。

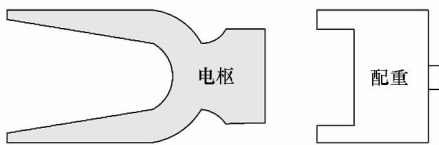


图 3 电枢及配重示意图

Fig. 3 Armature and counter weight

将导轨长度归一化为无量纲的单位长度。图 4 中给出了 0.5 MJ 发射能级下出口速度为 1500 m/s 左右和 2000 m/s 左右边界发射条件下的加载电流、电枢速度随电枢位置的变化曲线。电枢速度是采用 B-dot 磁探针阵列测量电枢通过时刻再经拟合求得^[13-14]。

加载脉冲电流的峰值约为 630 kA,从图 4 中

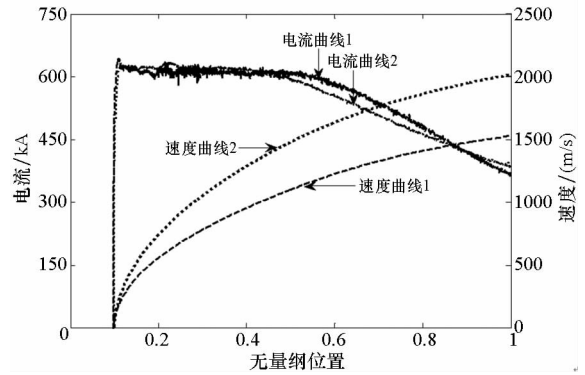


图 4 实验加载电流及发射速度

Fig. 4 Load current and armature velocity

看出电流在导轨同一位置的幅值大致相同,只是速度不同导致作用时间长短不同。图中电流曲线 1 对应着速度曲线 1,测量的出口速度为 1521 m/s,电流曲线 2 对应着速度曲线 2,测量的出口速度为 2015 m/s。

2.2 导轨热量测量方法

光纤光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 是利用光纤材料的光敏特性将使得光纤纤芯的折射率发生轴向周期性调制而形成的衍射光栅^[15-16]。在温度的作用下,光纤光栅的纤芯有效折射率和周期发生变化,从而使中心波长 λ_B 发生移动。以二等标准铂电阻温度计 (计量精度优于 0.05 °C) 作为标准温度参考,在 0 ~ 400 °C 范围内选取不同温度点标定光纤光栅温度传感器,得到温度传感器中心波长 λ_B 与铂电阻温度值的对应关系。通过三次曲线拟合,得到温度传感器输出温度值计算公式如下:

$$T = c_0 + c_1 \lambda_B + c_2 \lambda_B^2 + c_3 \lambda_B^3 \quad (9)$$

参数 c_0, c_1, c_2, c_3 均由曲线拟合得到。利用光纤光栅的中心波长和温度的关系,可以将光纤光栅用于温度的测量。光纤光栅温度传感器的响应时间在 100 ~ 150 ms 之间,灵敏度约 10 pm/°C,稳态测温精度为 ± 0.4 °C。

2.3 温度传感器的布设

导轨热量的时空分布具有自身的特殊性,首先是电流的趋肤效应导致的电流分布不均使得在导轨同一横截面的焦耳热量分布不均;其次,随着电流变化和电枢运动,枢轨的接触时间、接触状态不断变化,导致导轨在纵向的温度分布不均。整个发射过程在 10 ms 内完成,因而导轨内表面是一种“闪温”状态,其热量很快向处于室温的导轨内部传导。虽然枢轨的接触界面间的热环境最恶劣,但导轨在可承受的温度范围内是不会发生烧

蚀现象的。重点在于导轨内表面热量传导到整个导轨,而外围封装的绝缘隔热效果使得整个导轨的热量很难耗散。

远离导轨内表面的背部是热量传导平衡的标志处,该处距离枢轨接触面最远,热量传导到该处用时最长。因此,在导轨背面布设温度传感器。由于在枢轨接触面上安装温度测试仪器难以实施,在不影响导轨结构强度情况下,在导轨外侧边缘加工出能够容纳传感器大小的“L”型测试槽布设温度传感器。导轨截面及导轨上温度传感器的布局如图1所示。

在上下导轨依次对称布置7组温度传感器,表2中给出了7组传感器在导轨上的相对位置。

表2 温度传感器在导轨上的相对位置

Tab.2 Relative position of FBG sensors

编号	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
相对位置	0.08	0.28	0.3	0.45	0.55	0.7	0.9

2.4 实验与仿真综合分析

将采集电流加载到仿真模型计算导轨温度,提取导轨传感器测量位置处的温度,并将其与传感器测量温度进行对比。

在图4电流曲线1的发射实验条件下,仿真计算了导轨P1位置点的侧边和背部的温度变化曲线,并和测量值对比,结果如图5所示。从中可以看出,传感器测量导轨温度变化和仿真结果趋势一致;由于外围封装的隔热,导轨横向的温度梯度远大于导轨纵向的温度梯度,导轨先在横截面到达热量平衡。测量结果也表明了模型假设条件1的合理性。虽然温度传感器没有测量到导轨温升最高值,但传感器测量的热量传导平衡时刻的温度是准确的。

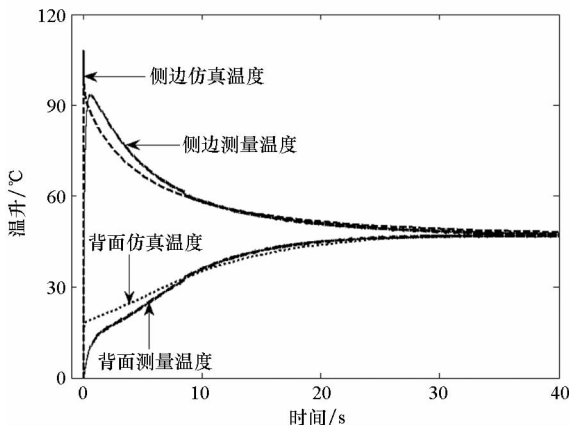


图5 仿真与测量温度曲线对比

Fig.5 Temperature rise of simulation and measurement

3 实验与仿真综合分析

为了更好地分析出口速度、负载质量对导轨热量的影响,有必要进行单因素变量实验,一一确定导轨的热量和能级之间的关系。设计以下三种实验:

- 1) 质量变化下的能级爬坡实验;
- 2) 速度变化下的能级爬坡实验;
- 3) 同能级对比实验。

主要通过以下两个指标来说明导轨热量情况:

1) 测量最大温升。 $Q = cm\Delta T$, 导轨比热容和质量可看作常量,故温升可以作为表示导轨吸收的热量指标。因固定位置处的温度传感器在不同实验下的响应时间一致,故而可选取传感器测量的最大温升作为参考指标。

2) 测量平衡温升。导轨的温度首先在同一截面到达热量平衡,当背部传感器和测量传感器测量的温度达到温度一致时,认为导轨在该截面热量平衡,把此刻温升作为平衡温升。

3.1 质量变化下的能级爬坡实验

质量变化下的能级爬坡实验,主要验证在出口速度一致的情况下,改变电枢的配重,对比导轨温升 ΔT 的变化。表3中给出了4组发射实验的数据。

图6中给出了4组发射实验中,导轨侧边7处传感器测量的最大温升,以及导轨热量平衡时的温升。从图6中可以看出,随着发射质量的增加,温度传感器测量的导轨的最大温升以及同一截面平衡温升随发射能级 E_k 增长而增长。

表3 实验数据
Tab.3 Experimental data

实验编号	1	2	3	4
电枢质量/g	75.2	75.0	74.8	75.0
配重质量/g	150.8	199.8	252.0	302.6
出口速度/(m/s)	1571.5	1594.5	1550.3	1550.1
发射能级/MJ	0.28	0.35	0.39	0.45

设质量变化下的能级爬坡中两个发射能级为 E_{k1} 和 E_{k2} 。根据式(5)中的电磁推力,发射能级之间比值关系为:

$$\frac{E_{k1}}{E_{k2}} = \frac{\int (F_1 - F_{f1}) ds}{\int (F_2 - F_{f2}) ds} \approx \frac{\int \left(\frac{1}{2} L' T_1^2 \right) ds}{\int \left(\frac{1}{2} L' T_2^2 \right) ds} \approx \frac{\int T_1^2 ds}{\int T_2^2 ds} \tag{10}$$

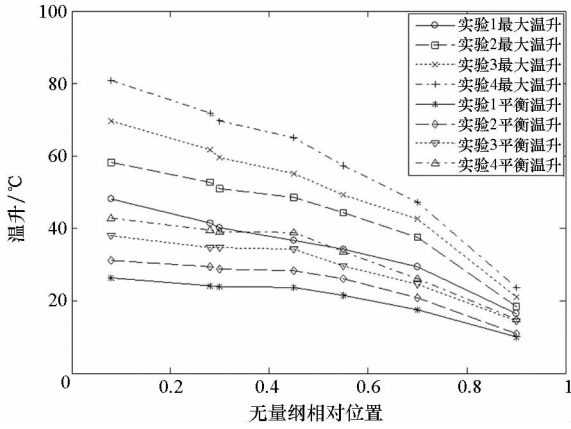


图 6 导轨温升数据

Fig. 6 Rail temperature rise data versus relative location

在导轨位置 l_i 处单位长度上产生的热量 Q 为式(3)与式(8)之和。则两者在导轨 l_i 位置处单位长度上产生的热量 Q_1, Q_2 比值为:

$$\frac{Q_1}{Q_2} \approx \frac{Q_{J,R1} + Q_{f1}}{Q_{J,R2} + Q_{f2}} \quad (11)$$

其中,两者产生的焦耳热量 $Q_{J,R1}, Q_{J,R2}$ 的比值为:

$$\frac{Q_{J,R1}}{Q_{J,R2}} = \frac{\int_{t_i}^{t_{out}} \frac{I_1^2(t)}{\delta(t-t_i)} dt}{\int_{t_i}^{t_{out}} \frac{I_2^2(t)}{\delta(t-t_i)} dt} \quad (12)$$

两者产生的摩擦热量 Q_{f1}, Q_{f2} 的比值为:

$$\frac{Q_{f1}}{Q_{f2}} = \frac{\int_{t_i}^{t_i+\Delta t} \mu \left(\frac{1}{2} aL'I_1^2 \cos\theta + F_0 \right) v_1(t) dt}{\int_{t_i}^{t_i+\Delta t} \mu \left(\frac{1}{2} aL'I_2^2 \cos\theta + F_0 \right) v_2(t) dt} \quad (13)$$

质量变化下的能级爬坡,电枢在导轨同一位置的速度相近,流经导轨该处电流的时长没有明显改变,电枢与导轨同一位置的接触时间变化不大,且电枢和导轨的接触压力也随着电流的增大线性增加。电枢速度低时,产生的摩擦热量少,因而越靠近发射端导轨固定位置处的最大温升、平衡温升与发射能级之间的线性关系越明显,但沿着导轨纵向方向,摩擦热量比重的增加,线性拟合度降低。

假设测量的导轨温升 ΔT_{max} 及平衡温升 ΔT_{sta} 和发射能级为 E_k 之间呈线性关系,则:

$$\begin{cases} E_k = k_\alpha \Delta T_{max} \\ E_k = k_\beta \Delta T_{sta} \end{cases} \quad (14)$$

拟合求解得到温度测量点 7 处温度系数 k_α 依次为 175.41, 155.68, 150.84, 140.46, 126.35, 106.64, 53.52。 k_β 依次为 94.34, 87.12, 86.05, 85.32, 75.25, 60.21, 34.13。但 k_α, k_β 的拟合误差平方值越来越大,两者的线性关系越来越低,这表

明摩擦热量在总热量的比重逐步加大。

3.2 速度变化下的能级爬坡实验

速度变化下的能级爬坡实验,主要验证在相同电枢和配重质量下,随着出口速度的提高,对比导轨的温升 ΔT 变化。表 4 中给出了 4 组发射实验的数据。

表 4 实验数据
Tab. 4 Experimental data

实验编号	1	2	3	4
电枢质量/g	75.1	75.2	74.8	75.1
配重质量/g	175.3	176.7	177.1	174.4
出口速度/(m/s)	1702.2	1791.5	1910.2	2022.5
发射能级/MJ	0.36	0.40	0.46	0.51

图 7 中给出了 4 组发射实验中,导轨侧边 7 处传感器测量的最大温升,以及导轨热量平衡时的温升。从图 7 中可以看出,随着出口速度的增加,温度传感器测量的导轨的最大温升以及同一截面平衡温升随发射能级 E_k 增长而增长。

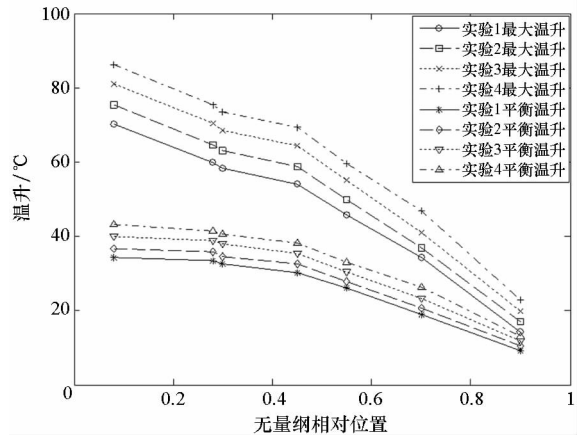


图 7 导轨温升曲线

Fig. 7 Rail temperature rise data versus relative location

设两者在导轨 l_i 位置处单位长度上产生的热量 Q_1, Q_2 。由于改变发射出口速度,电枢与导轨的接触时间与上一次实验工况不同,随着速度的增大,通电时间减少,从式(10)、式(12)可得出在导轨同一位置处的焦耳热量 $Q_{J,R1}, Q_{J,R2}$ 的比值不再和能级比值相同,这表明导轨同一位置处的焦耳热与能级没有线性关系。

将式(13)等效变化,两者产生的摩擦热量 Q_{f1}, Q_{f2} 的比值为:

$$\frac{Q_{f1}}{Q_{f2}} = \frac{\int_{s_i}^{s_i+\Delta s} \mu \left(\frac{1}{2} aL'I_1^2 \cos\theta + F_0 \right) ds}{\int_{s_i}^{s_i+\Delta s} \mu \left(\frac{1}{2} aL'I_2^2 \cos\theta + F_0 \right) ds} \quad (15)$$

可从式(15)中发现摩擦热量 Q_{f1}, Q_{f2} 的比值近似和电流的平方成正比,与速度的大小无关。表明导轨同一位置处的摩擦热与能级仍有线性关系。

将式(12)、式(15)代入式(11)中。可以看出传感器测量的温升和发射能级没有显著的线性关系,但测量的导轨温升 ΔT_{max} 及平衡温升 ΔT_{sta} 和发射能级 E_k 之间成单调递增关系。

3.3 同能级对比实验

发射能级是衡量发射装置性能的一个重要指标。在该型发射装置上进行 0.5 MJ 能级左右的发射实验,下限速度为 1500 m/s 左右,上限速度为 2000 m/s 左右。在保证出口动能 0.5 MJ 不变的情况下,给以电枢不同配重,分析两种临界速度下导轨累积热量的不同。

表5中给出了4组发射实验的数据,实验1、实验2温度数据基本重叠,实验3、实验4温度数据基本重叠。实验1、实验2与实验3、实验4测量结果存在一定差值。

表5 实验数据
Tab.5 Experimental data

实验编号	1	2	3	4
电枢质量/g	75.1	75.0	74.8	75.1
配重质量/g	360.5	360.2	177.1	174.4
出口速度/(m/s)	1516.2	1519.4	2001.1	2003.5
发射能级/MJ	0.501	0.502	0.504	0.501

从图4中看出,在0.5 MJ发射能级下,1500 m/s的发射速度和2000 m/s的发射速度在导轨同一位置点P处加载电流大小接近。选取三处测温升作为对比:发射前段即电枢起始端前部P1处、电流恒流段P4处,电流下降段P7处。图8中给出了实验1、实验3中P1、P4、P7三处的温度变化曲线。从图8中可以发现P1处最大温升差值为8℃、平衡温升差值为7.8℃,P4处最大温升差值为3.9℃、平衡温升差值为3.8℃,P7处最大温升差值为1.4℃、平衡温升差值为0.2℃。

从中可以得出:在0.5 MJ的发射能级下,1500 m/s的发射速度和2000 m/s的发射速度相比,前者导轨产生的总热量大,沿着发射方向导轨同一位置上的热量差值逐步减少。

设相同发射能级 E_k 下的发射速度分别为 v_1, v_2 , 其中 $v_1 < v_2$ 。因能级相同,加载电流的幅值相近,根据式(15)可以得知在同一位置处的摩擦热量接近,但出口速度越快,电流作用在导轨的时间

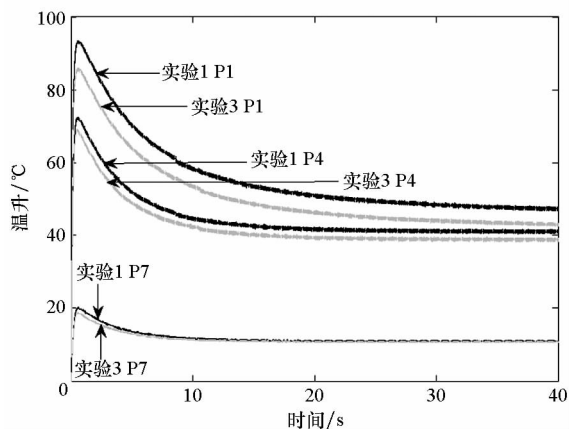


图8 导轨温升曲线

Fig. 8 Rail temperature rise versus time

越短,从而导轨电阻产生的焦耳热量就会减少。从而有:

$$\begin{cases} Q_{f1} \approx Q_{f2} \\ Q_{J,R1} \geq Q_{J,R2} \end{cases} \quad (16)$$

根据式(11)、式(12)、式(16)可以得到,相同发射能级下出口速度越快,导轨上积累的热量越少;沿着发射方向摩擦热量的比重增大而焦耳热量比重减少, Q_1, Q_2 的差值沿着发射方向逐步减少。

4 结论

从仿真分析和实验结果中可以得到如下结论:

1) 无论是质量变化下的能级爬坡实验还是速度变化下的能级爬坡实验,导轨上的热量和发射能级具有单调递增的关系;在0.5 MJ相同发射能级下,以1500 m/s的速度发射要比以2000 m/s的速度发射导轨产生的总热量要多。从中可推测出相同发射能级下,发射速度越快,导轨积累的热量越少。

2) 电磁发射中引起导轨热量积累的主要因素为电流焦耳热,且热量在发射起始端附近积累较多。故而提高电磁发射效率及在发射前段增加冷却装置是改善导轨热量管理的必经之路。

参考文献 (References)

[1] 王莹, 肖峰. 电炮原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 416-419.
WANG Ying, XIAO Feng. The theory of electric gun[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 416-419. (in Chinese)

[2] 马伟明, 鲁军勇. 电磁发射技术[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(6): 1-5.
MA Weiming, LU Junyong. Electromagnetic launch

- technology [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(6): 1-5. (in Chinese)
- [3] 李军, 严萍, 袁伟群, 等. 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 Jun, YAN Ping, YUAN Weiqun, et al. Electromagnetic gun technology and its development [J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(4): 1052-1064. (in Chinese)
- [4] 张永胜, 鲁军勇, 谭赛, 等. 电磁轨道连续快速发射下导轨中热量分布特性[J]. *海军工程大学学报*, 2016, 28(s1): 94-99.
ZHANG Yongsheng, LU Junyong, TAN Sai, et al. Research on distribution characteristics of thermal energy in continuous electromagnetic rail launch [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2016, 28(s1): 94-99. (in Chinese)
- [5] 巩飞, 翁春生. 电磁轨道炮滑动电接触的热效应[J]. *高压物理学报*, 2014, 28(1): 91-96.
GONG Fei, WENG Chunsheng. Thermal effect of sliding electrical contact in electromagnetic railgun [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(1): 91-96. (in Chinese)
- [6] 王志恒, 万敏, 李小将. 电磁轨道炮接触热时空分布特性分析[J]. *高压物理学报*, 2016, 30(6): 511-516.
WANG Zhiheng, WAN Min, LI Xiaojiang. Characteristics of temporal and spatial distribution of railgun contact heat [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2016, 30(6): 511-516. (in Chinese)
- [7] 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 Qinghua, LI Baoming. Numerical simulation of transient temperature field in the electromagnetic railgun [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(1): 149-154. (in Chinese)
- [8] 胡汉平. 热传导理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 15-20.
HU Hanping. Heat conduction theory [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2010: 15-20. (in Chinese)
- [9] Smith A N, Ellis R L, Bernardes J S, et al. Thermal management and resistive rail heating of a large-scale naval electromagnetic launcher [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, 41(1): 235-240.
- [10] Myers S H, Smith A N. Demonstration of combined spray and evaporative cooling of an electromagnetic railgun [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45(1): 396-401.
- [11] Motes D, Keena J, Womack K, et al. Thermal analysis of high-energy railgun tests [J]. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 2012, 40(1): 124-130.
- [12] 林灵淑, 赵莹, 袁伟群, 等. 电磁轨道发射的瞬态温度效应[J]. *高电压技术*, 2016, 42(9): 2864-2869.
LIN Lingshu, ZHAO Ying, YUAN Weiqun, et al. Thermal effect analysis of railgun tests under transient conditions [J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(9): 2864-2869. (in Chinese)
- [13] 武晓康, 鲁军勇, 李玉, 等. 磁探针位置及角度偏移对电磁发射过程测试的影响[J]. *国防科技大学学报*, 2016, 38(6): 37-42.
WU Xiaokang, LU Junyong, LI Yu, et al. Influence of changing magnetic probe's distance and angle in testing electromagnetic launch [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(6): 37-42. (in Chinese)
- [14] 李玉, 李湘平, 武晓康. 基于磁探针阵列的电磁发射内膛速度拟合方法[J]. *海军工程大学学报*, 2016, 28(s1): 31-34.
LI Yu, LI Xiangping, WU Xiaokang. In bore velocity fitting algorithm for electromagnetic launch by magnetic probe array [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2016, 28(s1): 31-34. (in Chinese)
- [15] 王震宇. 高速立铣切削刀具温度场建模与实时在线温度测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
WANG Zhenyu. Study on the temperature field modeling and the real-time online temperature measuring technique for the high speed end mill [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [16] 余桥. 多功能分布式光纤传感技术研究[D]. 上海: 东华大学, 2015.
YU Qiao. Research on the technology of multi-functional distributed optical fiber sensing system [D]. Shanghai: Donghua University, 2015. (in Chinese)