

文章编号:1001-4888(2015)01-0009-08

小型霍普金森杆多级电磁发射系统的优化^{*}

刘战伟¹, 陈喜民¹, 董杰¹, 刘爽¹, 谢惠民²

(1. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081; 2. 清华大学 航空航天学院, 北京 100084)

摘要: 根据小型霍普金森杆(Mini-SHB)对发射效率高、体积小、噪声污染小的要求及动态性能测试对高应变率的要求,本文对磁阻式小型霍普金森杆电磁发射系统进行了优化。利用电磁发射原理、电磁仿真计算和控制变量方法,对影响子弹发射速度的五个因素:电容组电容量、电路初始电压、电磁线圈匝数、线圈用漆包线直径、子弹初始位置分别进行了仿真优化。根据仿真得到的各个最优参数研制的电磁发射系统获得了单级 16.16m/s、二级 21m/s 的最高子弹出口速度,达到了微小型试件动态性能测试对高应变率的要求。

关键词: 电磁发射技术; 小型霍普金森杆; 动态力学性能; 高应变率

中图分类号: O347.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-14-103

0 引言

霍普金森压杆技术(SHPB)源于1914年B. Hopkinson测试压力脉冲的实验工作^[1]。后来R. M. Davies对它进行了改进^[2]。1949年,H. Kolsky在这些基础上建立了进行材料单轴动态压缩性能测试的实验方法,测试了高应变率下金属材料的力学性能^[3]。此后,霍普金森压杆技术广泛应用于材料动态力学性能的测试,同时发展了霍普金森拉杆(SHTB)、霍普金森扭杆(SHTOB)、霍普金森剪切杆(SHSB)、多功能霍普金森杆(Multi-SHB)技术。

霍普金森杆技术发展到现在,多数霍普金森装置仍然使用传统的气动加载方式。气体发射装置体积庞大、噪音污染严重、实验重复性差、不易于操作、加载应变率对气体压力要求较高,限制霍普金森杆装置的小型化。

2008年,北京理工大学王一沛首次开展了磁阻式线圈发射技术在SHTB装置中的应用研究^[4],经过改进,于2010年申请了国家发明专利^[5]。2009年,C. M. A. Silva等将磁阻式线圈发射装置应用到大型SHPB装置中,实现了对金属材料的动态力学性能测试^[6]。2010年,西北工业大学郭伟国等开展了磁阻式线圈发射方式在SHPB中的应用尝试^[7]。此后,北京理工大学刘战伟等开展了多级电磁发射系统在小型霍普金森杆中的应用尝试^[8,9]。磁阻式线圈发射的霍普金森杆技术具有噪音小、能量转化率高、易于实现小型化等诸多优点,但是目前该技术仍处于起步阶段,发射速度很难满足高应变率的要求。

由此可见,电磁发射系统的改进和优化对霍普金森杆的小型化及达到更高应变率要求具有重要意义。本文基于电磁发射原理和电磁仿真方法对影响小型霍普金森杆电磁发射系统发射速度的各个因素进行优化,同时利用仿真计算获得最优参数研制的电磁发射系统,满足了大于 $10^4/s$ 的高应变率的加载要求。

^{*} 收稿日期: 2014-05-26; 修回日期: 2014-08-05

基金项目: 国家自然科学基金资助(NOS. 11072033, 11232008, 11372037)、北京市自然科学基金资助(NO. 3122027)

通讯作者: 刘战伟(1973—),男,教授。主要研究领域:光测实验力学与材料的动态力学性能。Email: liuzw@bit.edu.cn

1 电磁驱动原理

根据电磁发射原理^[10],单级磁阻式线圈发射系统由螺线管驱动线圈与铁磁材料弹丸组成,驱动原理见图 1。由于铁磁弹丸磁导率高于空气,当将其放置于接通的线圈腔内时,线圈周围磁阻减小,产生作用于弹丸方向垂直于线圈截面并指向线圈中心的电磁力。弹丸受到磁力作用沿线圈中心轴线向右运动。当弹丸运动到线圈中心时,磁路磁阻达到最小值,线圈对弹丸作用力达到最小。此时假设弹丸继续向右运动,线圈将产生阻碍弹丸运动的电磁力。因此,设计具有时序导通的线圈回路,使弹丸到达线圈中心时断开连接,可以消除阻力对弹丸加速的影响。

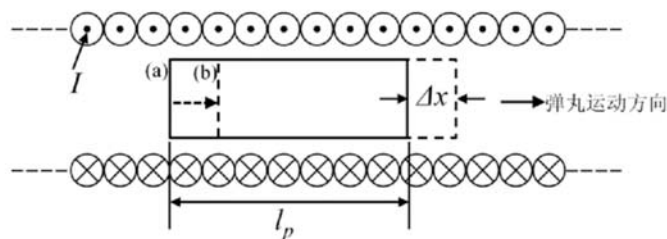


图 1 单级电磁驱动原理

Fig. 1 Single-stage electromagnetic drive principle

多级电磁发射系统相对单级发射系统能满足更高的发射速度要求,其控制模型见图 2。模型由三级加速线圈、光电开关、总开关和测速装置构成。弹丸在一级加速线圈中加速过程与单级线圈加速相同。弹丸中心与一级线圈中心重合时,一级线圈右侧光电开关检测到弹丸,关闭一级线圈回路,同时导通二级线圈回路,以便于弹丸到达二级线圈时二级线圈中电流达到最大值,具体控制原理参考文献^[11]。弹丸在二级线圈中加速过程与一级线圈相仿。弹丸中心与二级线圈中心重合时,二级线圈右侧光电传感器检测到弹丸,关闭二级线圈回路,同时打开三级线圈回路。弹丸在三级线圈中加速,三级线圈出口处设有测速装置。离开三级线圈,弹丸完成整个加速过程。

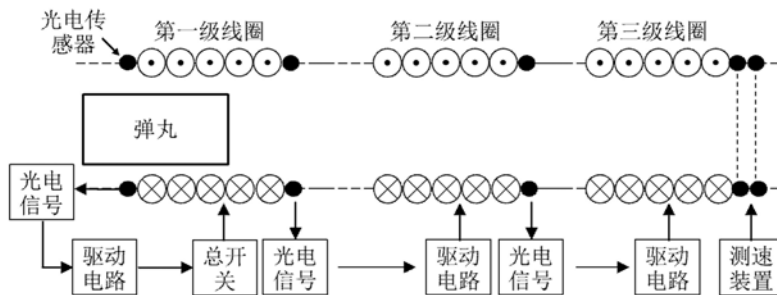


图 2 多级电磁发射系统控制模型

Fig. 2 Control model of multistage electromagnetic launching system

2 影响子弹发射速度参数的优化

电磁发射系统由螺线管线圈和具有磁化效应的金属导体组成,其简化模型见图 3。

金属导体受到来自于螺线管线圈的电磁力可由下式表示^[12]:

$$F = (Ni)^2 \frac{4g}{u_0 \pi d l^2} \quad (1)$$

其中, N 为线圈匝数; i 为线圈电流大小; g 为线圈内径与子弹内径缝隙宽度; u_0 为真空磁导率; d 为线圈内径; l 为螺线管长度。由上式知,提高电磁力最有效的方法是提高线圈匝数与电流大小。然而随着线圈匝数增加,线圈电阻变大,外界条件不变时,电流减小。实际操作中还要考虑所使用电子元器件的额定功率。因此,需对影响子弹最大速度的各种条件进行优化,包括:电容组电容量、初始电压、线圈匝

数、漆包线直径、子弹初始位置等。这些因素通过改变回路中电流大小、线圈匝数以及磁场集中程度、作用时间等来影响子弹最大速度,详细分析见下文。

本文采用 Ansoft Maxwell 电磁仿真软件^[13]对发射系统进行模拟,根据模拟得到的最优参数搭建最合理的发射系统。电磁发射系统仿真模型见图 4。模型基于 Maxwell 3D 的瞬态场模块来对电磁发射系统进行分析。发射线圈三维模型中,弹丸直径 6mm,长度 150mm;线圈内径为 13mm,长 150mm;透明玻璃管内径和外径分别为 10mm 和 13mm。在实际装置中,子弹上装有摩擦系数极低的聚四氟乙烯制成的弹托,这使得子弹与玻璃管之间的摩擦力非常小,故在电磁仿真中忽略了摩擦的影响。线圈外径、匝数根据仿真条件设置。

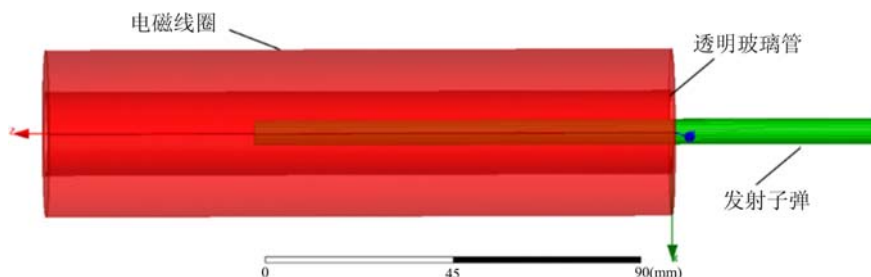


图4 电磁发射系统仿真模型

Fig. 4 Simulation model of electromagnetic launching system

本文主要通过控制变量来研究子弹最大速度随电容组电容量、初始电压、漆包线直径、线圈匝数、子弹初始位置五个因素的变化而变化的情况。在整个模拟过程中,漆包线直径、电容容量等参数信息均是通过合理选择目前市场上能购买到的漆包线的直径和电容容量的具体参数确定的,如漆包线直径只能选择市场上常用的 0.35mm、0.5mm、0.71mm、1.0mm 四种。初始充电电压是根据所选电容的可用电压范围确定的,线圈匝数是在满足能够让整个发射装置正常工作的情况下根据漆包线相关参数、初始充电电压等确定的。

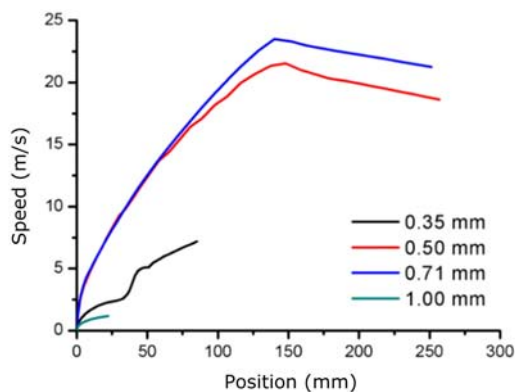


图5 漆包线直径与子弹速度关系

Fig. 5 The relationship between diameter of the enameled wire and velocity of the bullet

线缠绕成的线圈进行电磁仿真,结果见图 5。由图 5 可知,在漆包线直径位于 0.35~0.71mm 范围时,子弹最大速度随漆包线直径增加而增加。但当漆包线直径达到 1mm 时,子弹速度骤减。由表 1 可知,漆包线直径为 1mm 时,漆包线长度达 282.67m,3000 匝线圈尺寸变得很大。分析可总结为:漆包线直径为 1mm 时,由于线圈外径变大,线圈周围很难形成强磁场集中,导致子弹无法获得足够作用力,速度减小。实际实验中,若采用 1mm 漆包线,由于线圈电阻变小,线圈中电流变大,超过常用的场效应管(二



图3 磁阻式电磁发射系统简化模型

Fig. 3 Simplified mode of magnetic resistance type electromagnetic launching system

由于漆包线是制作电磁线圈的关键材料,所以在整个模拟过程中首先从漆包线直径的优化开始。在这个优化过程中,由于其他参数最优值未知,故根据经验初步设定线圈匝数为 3000 匝,电容组初始电压设定为现有状态下能保证装置正常运行的最大电压 450V,子弹初始位置为子弹前端面进入线圈 10mm,电容组容量 4500 μ F,漆包线的直径为市场上能够购买到的 4 种直径。表 1 显示了不同直径漆包线的电阻以及理论上绕制成 3000 匝线圈所需要的漆包线长度和电阻。同时,根据漆包线直径和玻璃管外径以及线圈的长度等参数计算线圈直径。根据表 1 中的数据,计算出线圈直径以及设定的参数,可以对不同直径漆包

级发射所用器件之一)额定电压,使得场效应管经常烧坏。说明漆包线直径不能无限增加,0.71mm 为最优漆包线直径。

表 1 不同直径漆包线缠绕的发射线圈参数

Tab. 1 The parameters of different enameled wire winding coil

直径(mm)	0.35	0.50	0.71	1.00
线电阻率(Ω/m)	0.172101	0.112987	0.076472	0.021014
漆包线长度(m)	117.28	141.37	186.68	282.67
线圈电阻(Ω)	20.18	15.97	14.27	5.94

根据电磁仿真的结果设定漆包线直径为 0.71mm,其他参数设定不变,对在不同电容组电压条件下子弹的发射速度进行电磁仿真,仿真结果如图 6 所示。由图可知,随着初始电压的增加,子弹在各个位置的速度均有所增加。经分析可总结为:随初始电压增加,线圈内电流增加,子弹所受电磁力增加,子弹最大速度增加。但受电容组额定电压约束,考虑安全性及电容组寿命,450V 为本实验最大电压。当然,条件允许情况下,子弹最大速度会随电压增加而继续增加。

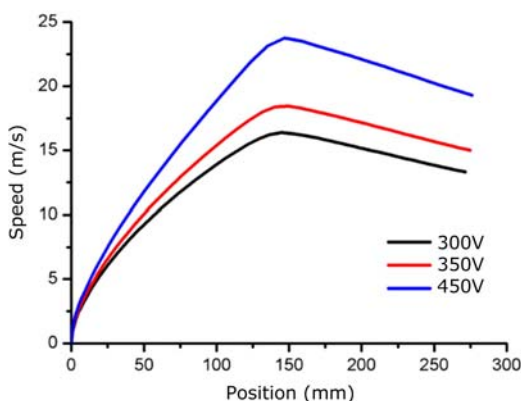


图 6 不同电容组电压条件下子弹发射速度情况

Fig. 6 The speed of bullet under the different voltage of capacitor group

得实际缠绕的 3000 匝线圈所使用的漆包线长度要大于理论计算的长度,实际线圈直径大于计算直径,实际线圈的电阻值也大于计算的电阻值。

在对子弹发射速度与线圈匝数进行模拟时,设定电容组中电容为 4500 μF ,电容组初始电压 450V,绕制漆包线直径为 0.71mm,子弹初始位置为前端面进入线圈 10mm。在这个模拟中,不同匝数线圈的直径和电阻值采用量取实际手工缠绕而成的不同线圈的实验值确定。在量取线圈直径和电阻值过程中,发现实际的线圈直径和电阻值均大于计算的线圈直径和电阻,如用 0.71mm 漆包线缠绕 3000 匝线圈的电阻值为 17.73 Ω ,大于相同情况下计算得到的电阻值 14.27 Ω 。原因在于:在线圈的制作过程中,由于采用手工缠绕的方法,线圈与线圈之间不可能很紧,存在一定的间隙,而且在缠绕过程中为防止散乱需要每隔几匝就需要涂一层胶水固定,这就使

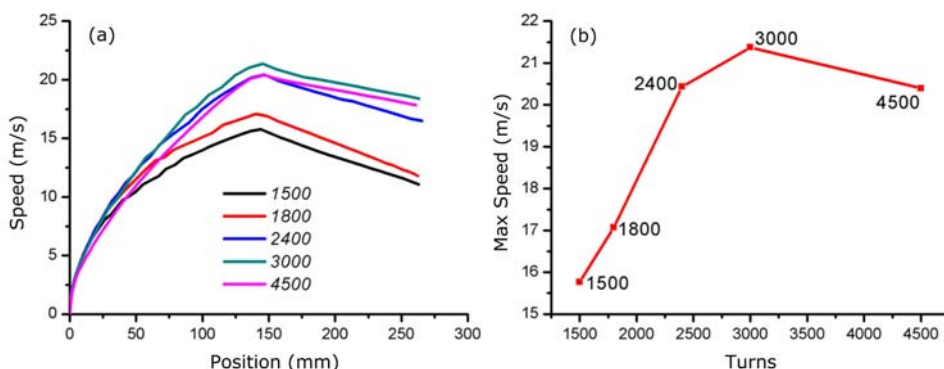


图 7 子弹发射速度与线圈匝数的关系

Fig. 7 The relationship between the bullet velocities and the number of turns

图 7 是利用实际线圈直径和电阻值对不同匝数的线圈进行电磁仿真的结果。由图可知,线圈匝数在 1500~3000 范围内时,子弹速度随匝数增加而增加。由 3000 增加到 4500 时,子弹最大速度减小。

刚开始缠绕线圈时,如从 1000 匝到 3000 匝,随着线圈匝数的增加,电容组放电时线圈中的磁场强度增加,电阻也增加,由于线圈匝数相对较少时,电流的降低并不明显,由公式(1)可知:匝数增加电磁力在增加,因此子弹速度将增加,然而由于线圈匝数的增加和与电阻的增加和电流的降低不是成固定的比例关系,如不是随着线圈匝数的增加,电阻就成比例的增加,电流也成比例的降低。原因在于:线圈匝数相对较少时,电流影响不明显;而当线圈匝数超过一定量时,随着线圈匝数的进一步增加,由于线圈缠绕时每缠几匝就需要涂胶水预先固定等处理,导致线圈的直径(外径)增加得很快,也即当线圈直径大到一定程度时,每增加 1 匝,其所用的导线长度都比上一匝所用的导线长很多,与整体匝数较少时相比也增加了相对较多的电阻,在假定放电电压一定时,将对电流造成不利影响,而这种影响在线圈匝数相对较少时并不明显。因此线圈匝数较少时随匝数增加,速度增加,而当匝数增加到一定程度后,随匝数增加速度将会有降低趋势。除此之外,在整个过程中,线圈两端的电压会逐渐下降,这也会对子弹的发射造成影响。根据仿真结果可以看出,3000 匝为最优的线圈匝数。

已经确定的参数为:电容组初始电压 450V,绕制的漆包线直径 0.71mm,线圈匝数 3000 匝。子弹初始位置设定为子弹前端面进入线圈 10mm,线圈直径和电阻选定为真实测量值,可以通过仿真计算得到子弹速度变化随电容组电容量变化情况如图 8 所示。由图可知,电容量从 1500 μ F 增加到 4500 μ F 过程中,子弹最大速度随电容升高而加快;4500 μ F 到 6000 μ F 上升过程中,子弹最大速度没有明显升高。经分析可以总结为:电容量由 4500 μ F 升高到 6000 μ F 过程中,回路电流的大小变化和持续时间变化对子弹最大速度影响已经很小。4500 μ F 为本实验最优电容组容量。

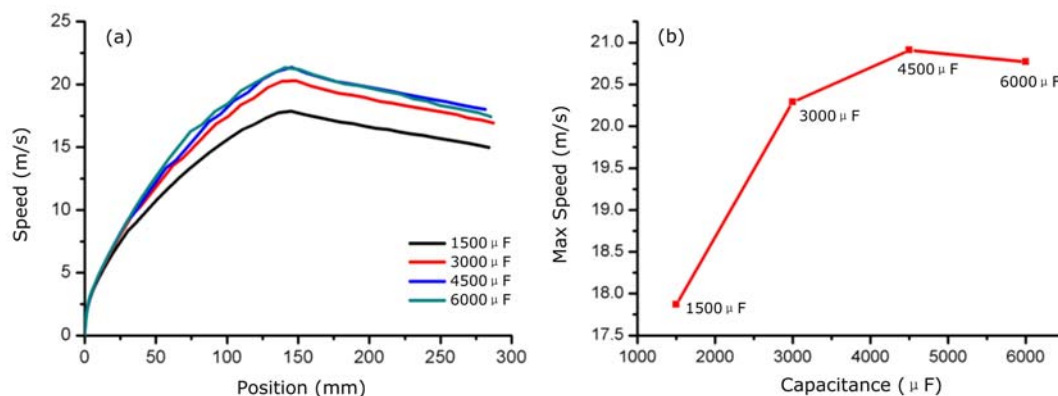


图 8 子弹速度与电容量的关系:(a)不同电容量下子弹各位置的速度变化情况;
(b)子弹出口处的(最大)速度随电容量的变化

Fig. 8 The relationship between the bullet velocity and the capacitance;

(a) the speed of bullets under different capacitance of each position;

(b) the exit speed(maximum) of bullet varing by the change of capacitance

由于在实际电磁发射装置的应用中,常常使用的电容组初始电压为 300V,所以在进行子弹初始位置的相关电磁仿真时,设定初始电压为 300V,其他参数选定最优值仿真。图 9 为子弹在不同初始位置时子弹发射速度的仿真结果。由图可知,子弹最大速度随子弹初始位置由 -5mm 到 20mm 的变化,有一个先升后降的过程,其中初始位置 5~10mm 时,速度达到较大值。分析可知:子弹在 -5mm 到 0mm (线圈外部)时,线圈产生的磁场分散,子弹受到的电磁力相对较小,初期加速不明显;当子弹在 0mm 到 10mm (线圈内部)时,线圈内部相对线圈外部的磁场集中,所以在此初始位置范围内子弹速度增加;但是随着子弹初始位置逐渐靠近线圈中心,子弹受到的电磁力将逐渐减小,这将使得子弹发射速度下降。可见子弹最大速度受限于初始位置,结合子弹速度变化趋势,初始位置 10mm 为最优位置。

综上,影响子弹最大发射速度的各个因素最优值见表 2。

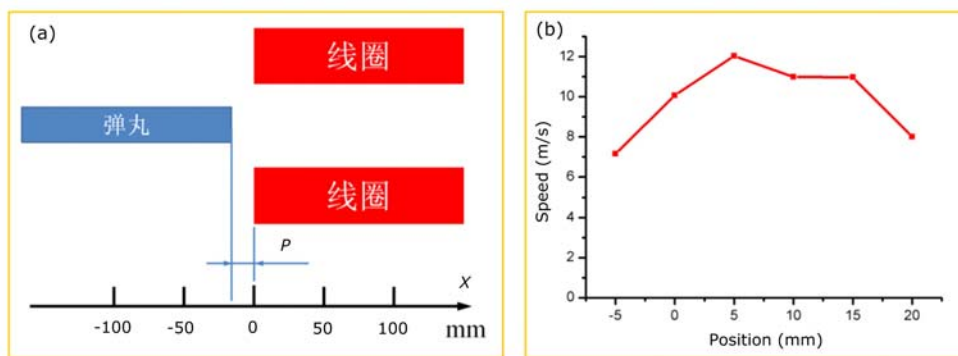


图 9 弹丸速度随初始位置的变化

Fig. 9 The speed of the bullet varing by the change of the initial position

表 2 影响子弹最大速度各因素最优值

Tab. 2 The optimal value of various factor effecting the bullet maximum speed

电容组容量 (μF)	初始电压 (V)	漆包线直径 (mm)	线圈匝数 (匝)	子弹初始位置 (mm)
4500	450	0.71	3000	5~10

3 新研制发射系统发射速度测试

电磁发射系统的电路集成化可以使系统紧凑合理,实验操作安全高效。新研制电磁发射系统电路集成化后实物图见图 10。

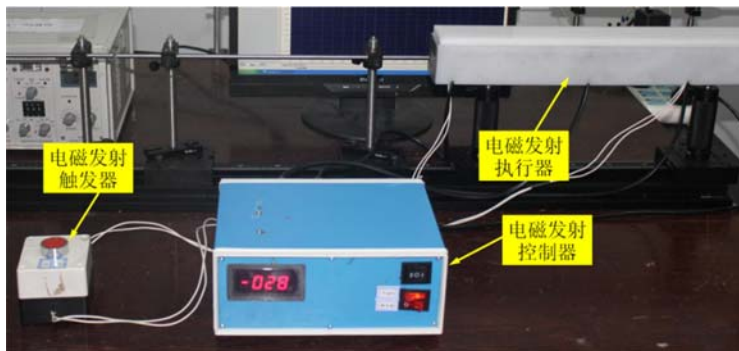


图 10 新研制电磁发射系统实物图

Fig. 10 Physical figure of the new developed electromagnetic launching system

表 3 新研制的单级电磁发射系统速度测试结果

Tab. 3 Speed test results of newly developed single-stage electromagnetic launching system

初始电压(V)	250	300	350	400	450
图片数量(幅)	159	145	126	113	103
时间(s)	0.00127	0.00116	0.00101	0.00091	0.00082
速度(m/s)	9.83	10.78	12.40	13.83	16.16

电磁发射装置的速度测试通过放置在发射系统的出口处的高速相机完成,由子弹上 12.5mm 标记物的成像张数可求得子弹速度。不同初始电容组电压下的单级电磁发射装置的测速结果见表 3。由表 3 可知:在初始电压为 450V 时,单级电磁发射系统的最高子弹出口速度为 16.16m/s;在初始电压为 300V 时,最高子弹速度为 10.78m/s。这些都小于相同状态下仿真得到的结果(20.7m/s 和 11m/s),这

主要是由于:

- (1) 子弹与玻璃管之间的摩擦和实验中不能及时通过光电开关断开电路;
- (2) 实际缠绕的 3000 匝线圈所使用的漆包线长度要大于理论计算的长度,实际线圈直径也大于计算直径,实际线圈的电阻值也大于计算的电阻值。

在使用二级电磁发射,初始电压均为 450V 时,子弹的发射速度可以达到 21m/s。加载应变率粗略计算公式为^[14]:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{l_s} \quad (2)$$

其中, v 为子弹发射速度; l_s 为试件长度; $\dot{\epsilon}$ 为发射应变率。在试件长 2mm,发射速度 21m/s 的情况下,计算可知加载应变率超过 10^4 /s。

4 结论

本文基于电磁发射原理对影响小型霍普金森装置电磁发射系统发射速度的各因素进行了仿真优化,得到了各参数最优值。通过高速相机测速装置,对使用最优参数研制的电磁发射系统进行速度测试,得到单级 16.16m/s、二级 21m/s 电磁发射速度的实验结果,满足了小型霍普金森杆产生超过 10^4 /s 的加载应变率的要求。

参考文献:

- [1] HOPKINSON B. A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 1914, 89(612): 411—413.
- [2] DAVIES R M. A critical study of the Hopkinson pressure bar[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1948:375—457.
- [3] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. Proceedings of the Physical Society, Section B, 1949, 62(11): 676.
- [4] 王一沛. 小型冲击加载装置的设计与应用[D]. 北京理工大学, 2008 (WANG Yipei. Design and application of miniature impact loading device [D]. Beijing institute of technology, 2008 (in Chinese))
- [5] 刘战伟, 王一沛, 吕新涛 等. 微型试件冲击加载与动态力学性能测量系统及方法[P]. 国家发明专利: 201010608781.4 (LIU Zhanwei, WANG Yipei, LV Xintao, et al. The system and method for miniature specimen impact loading and dynamic mechanical performance test[P]. Chinese Patent: CN201010608781.4 (in Chinese))
- [6] SILVA C M A, ROSA P A R, MARTINS P A F. An innovative electromagnetic compressive split Hopkinson bar [J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2009, 5:281—288.
- [7] 郭伟国, 赵融, 魏腾飞 等. 用于 Hopkinson 压杆装置的电磁驱动技术[J]. 实验力学, 2010, 25(6):682—689 (GUO Weiguo, ZHAO Rong, WEI Tengfei, et al. Electromagnetic driving technique applied to split-Hopkinson pressure device [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(6):682—689(in Chinese))
- [8] LIU Zhanwei, CHEN Ximin, LV Xintao, et al. A mini desktop impact test system using multistage electromagnetic launch [J]. Measurement, 2014, 49:68—76.
- [9] 刘战伟, 吕新涛, 陈喜民 等. 基于多级电磁发射的 mini-SHPB 装置[J]. 实验力学, 2013, 28(5):557—562 (LIU Zhanwei, LV Xintao, CHEN Ximin, et al. On the mini-SHPB device based on multi-level electromagnetic emissions[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(5):557—562(in Chinese))
- [10] 刘延贤. 发展中的电磁炮[J]. 大学物理, 1998, 17(4):44—46 (LIU Yanxian. The developing electromagnetic gun [J]. College Physics, 1998, 17(4):44—46 (in Chinese))
- [11] 吕新涛. 微型霍普金森杆装置的研制与应用[D]. 北京理工大学, 2011 (LV Xintao. The design and application of miniature Hopkinson bar device[D]. Beijing Institute of Technology, 2011(in Chinese))
- [12] BRESIE A, ANDREWS J A. Design of a reluctance accelerator[J]. Transactions on Magnetics, 1991, 27:623—627.
- [13] 赵博, 张洪亮. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010 (ZHAO Bo, ZHANG Hongliang. The application of Ansoft 12 in the engineering field[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010(in Chinese))

Chinese))

- [14] 郭伟国. 应力波基础简明教程[M]. 陕西: 西北工业大学出版社, 2007 (GUO Weiguo. Stress wave basic introductory tutorial[M]. Shanxi: Northwestern Polytechnical University Press, 2007(in Chinese))

The Optimization of Multistage Electromagnetic Launching System of Mini-SHB

LIU Zhan-wei¹, CHEN Xi-min¹, DONG Jie¹, LIU Shuang¹, XIE Hui-min²

(1. Dept. of Mechanics, School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. FML, Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: According to the requirements for Mini-split Hopkinson bar (SHB), such as high launching efficiency, small size, low noise pollution and high strain rate in dynamic performance tests, the optimization of electromagnetic launching system of Mini-SHB, is presented in this paper. By using electromagnetic emission principle, electromagnetic simulation and variable control method, the simulation optimization of five factors influencing the bullet launching velocity was carried out respectively, including capacitor bank capacity, circuit initial voltage, electromagnetic coil turns, coil wire diameter, initial position of bullet. The electromagnetic launching system developed based on each simulation optimized parameters enables the highest bullet exit velocity to reach 16.16m/s for single stage and 21m/s for two stages, respectively, which meets the requirements of high strain rate for dynamic performance test of miniature specimens.

Keywords: electromagnetic launching technique; mini-split Hopkinson bar(SHB); dynamic mechanical properties; high strain rate