



·脉冲功率技术·

霍普金森杆电磁加载系统设计与实验*

王禹晨^{1,2}, 刘晓艳¹, 黄懿贇^{1,2}, 管锐^{1,2}, 江加福¹

(1. 中国科学院合肥物质研究院等离子体物理研究所, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘 要: 设计一种电磁加载系统应用于分离式霍普金森杆实验装置, 能够克服传统气压驱动的优点, 达到精确控制入射应力波的目的。通过对电磁加载技术的调研, 了解不同加载方式的电压等级, 确定低压加载方式; 构建系统等效 RLC 回路, 推导回路参数与入射应力波的函数关系。结合理论计算, 利用有限元软件进行耦合场仿真, 仿真发现放电线圈匝数对入射应力波的幅频特性影响较大, 同时为了保证电磁能量的利用效率, 需要保证感应线圈的厚度大于磁渗透深度, 最后根据实验要求确定电磁加载系统各参数。按照加载系统参数搭建实验平台, 进行霍普金森杆冲击实验, 通过对入射应力波的测量, 验证了理论计算及软件仿真的正确性。

关键词: 电磁加载; 霍普金森杆; 入射应力波; 低压加载; 耦合场仿真

中图分类号: TM302

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210486

Design and experiment of Hopkinson bar electromagnetic loading system

Wang Yuchen^{1,2}, Liu Xiaoyan¹, Huang Yiyun^{1,2}, Guan Rui^{1,2}, Jiang Jiafu¹

(1. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract: An electromagnetic loading system is designed to be applied to a separate Hopkinson rod experimental device. It can overcome the shortcomings of traditional pneumatic drive and achieve the purpose of accurately controlling the incident stress. The low-voltage loading method is determined through the investigation of electromagnetic loading technology, then the system equivalent RLC loop is constructed, and the functional relationship between the loop parameters and the incident stress wave is derived. Combining theoretical calculation results, using finite element software for coupling field simulation, the simulation shows that the number of turns of the active coil has a great impact on the pulse width and amplitude of the incident stress. At the same time, to ensure the utilization efficiency of electromagnetic energy, it is necessary to ensure that the thickness of the inductive coil is greater than the depth of magnetic penetration, and determine the parameters of the electromagnetic loading system according to the experimental requirements. An experimental platform was built to carry out the Hopkinson bar impact experiment, and the correctness of the theoretical calculation and software simulation was verified through the measurement of the incident stress.

Key words: electromagnetic loading, Hopkinson bar, incident stress, low voltage loading, coupled field simulation

研究材料在高应变率加载下的力学响应, 对于结构设计和材料研究均具有重要意义。在进行材料高应变率动态本构关系的实验研究时, 一般都需要冲击加载, 加载时必须考虑实验装置和试件中的应力波传播及其相互作用。实验中应设法把应力波效应和应变率效应解耦, 其中最典型并应用最广泛的解耦方法是分离式霍普金森杆 (SHPB) 实验^[1-2]。传统 SHPB 装置利用气压驱动撞杆冲击入射杆产生入射应力波, 这种实验技术的缺陷在于应力波与气压没有较为准确的对应及函数关系, 只能通过反复调节气压试验和依靠经验, 同时也没有办法控制触发时间的精度^[3-4]。

* 收稿日期: 2021-11-12; 修订日期: 2022-02-24

联系方式: 王禹晨, yuchen.wang@ipp.ac.cn。

通信作者: 黄懿贇, yyhuang@ipp.ac.cn。

电磁成形是利用磁场力使金属坯料变形的高速率成型方式,自 1958 年第一台电磁成形设备问世以来,伴随汽车、航空航天等制造业结构轻量化的发展趋势,可以克服这些材料成形困难的电磁成形技术已得到广泛应用。目前在理论研究方面,人们对放电过程、磁场分布等都进行了深入的研究,可以将部分研究方法和经验应用于产品成形、装配以及焊接中。其中通过等效 RLC 回路研究,可以模拟电磁成形过程,精确计算和控制电磁力的脉宽及幅值^[5-8]。本文为霍普金森杆设计的电磁加载系统是建立在电磁成形技术基础之上的一种新型加载方式,这种方法创新性地通过应力波放大器将霍普金森杆和电磁加载系统结合在一起;通过等效 RLC 回路研究以及通用软件耦合场数值模拟,研究应力波与加载系统分布参数之间的函数关系,准确控制应力波的幅值及上升时间。

1 装置结构及原理

图 1 为本文设计的电磁加载分离式霍普金森杆实验装置示意图,装置由两部分组成:(1)电磁加载系统,主要由放电线圈、感应线圈、锥形放大器和电源系统构成;(2)分离式霍普金森杆,主要由入射杆、透射杆、试样构成。

电磁加载系统位于霍普金森杆一端,入射杆与放大器紧密连接。电容充电完成后对放电线圈放电,放电线圈产生瞬时电流,该电流在周围产生脉冲磁场,磁场在感应线圈上产生涡流,瞬时电流和涡流相互作用产生电磁斥力。感应线圈受电磁斥力挤压放大器,放大器在短时间内冲击入射杆产生入射应力波;应力波继续透过试样传播到透射杆中,形成透射应力波,通过对入射波和透射波波形的分析得到试样的力学响应。对于测量不同的材料试样,需要改变应力波的上升时间,本装置主要用于测量金属材料,根据力学性能要求,应力波幅值应能达到 200 MPa,上升时间应控制在 $(150 \pm 20) \mu\text{s}$ 范围内。

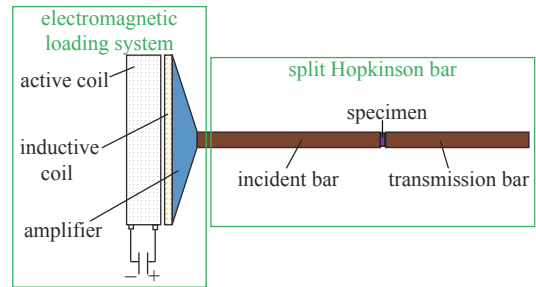


Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

图 1 实验装置示意图

2 电磁加载系统分析

2.1 加载方式确定

在方式上主要分为高压电磁加载和低压电磁加载。高压电磁加载其工作电压为 4000~10000 V,高电压对设备的元器件和操作人员都提出了较高要求,同时设备体积大、成本高;20 世纪 80 年代末 90 年代初,美国开始研究低压电磁加载技术,将原来的加载电压降低到 1000 V 以内。低压电磁加载的出现是电磁技术发展的重要突破,与高压电磁加载相比,低压加载从核心技术到设计均存在很大不同,对其特征的研究和分析十分必要^[5]。低压电磁加载通过电容对线圈放电将电容储能转换为机械能,电容存储能量为^[9]

$$\omega = \frac{1}{2}CU^2 \quad (1)$$

式中: C 为电容器电容量 (F); U 为充电电压 (V)。

在实际应用中,低压电磁加载技术大幅降低充电电压,同时提高电容量弥补电压降低带来的能量损失。因此低压电磁加载带来两个优势:(1)将高压设备变为低压设备,提高安全性能并降低成本;(2)适当减小放电频率,防止加载速度过快导致材料变形。

2.2 等效电路构建

电磁加载系统电路如图 2(a) 所示, L_1 、 R_1 为放电线圈的电感和电阻; L_2 、 R_2 为感应线圈的电感和电阻; C 为充电电容; i_1 、 i_2 分别为放电线圈和感应线圈中的电流。多匝放电线圈电流为^[10]

$$i_1(t) = nI_m e^{-ht} \sin \omega t \quad (2)$$

式中: n 为放电线圈匝数, I_m 为线圈放电电流最大值; h 为放电电流的衰减系数为 $R_1/2L_1$; ω 为衰减振荡圆频率为 $\sqrt{\omega_0^2 - h^2}$, 其中 $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, L 、 C 分别为放电线圈电感和电源电容; 感应线圈中电流 $i_2(t)$ 为

$$i_2(t) = AI_m \sin(\omega t + \psi) \quad (3)$$

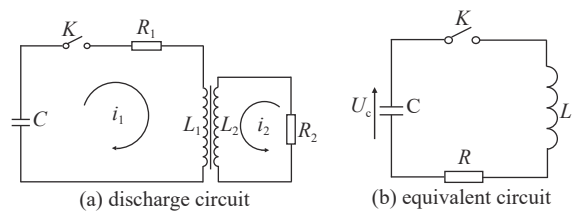


Fig. 2 Circuit diagram of discharge circuit and equivalent circuit

图 2 放电回路电路图以及等效电路图

其中

$$A = \omega M / \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \quad (4)$$

$$\psi = \tan^{-1}(R_2 / \omega L) \quad (5)$$

式中： M 为放电线圈与感应线圈互感；
两共轴线圈的电磁斥力

$$F = \mu_0 i_1 i_2 K \quad (6)$$

式中： μ_0 为真空磁导率； K 为由放电线圈和感应线圈位置和几何尺寸决定的常数，相对固定。由式(6)可以看出，电磁力由放电电流和涡流相互作用产生，但分别计算两回路中的电流并未充分考虑到线圈之间的耦合关系，同时计算过程复杂，为电磁加载系统的设计带来不便和误差。考虑放电线圈和感应线圈的耦合关系后，可将感应线圈参数折算到原边，进一步等效为图2(b)所示的电路，其中： C 为回路电容； L 为放电回路等效电感； R 为放电回路等效电阻； U_c 为放电回路充电电压，电路方程为^[10]

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = U_c \quad (7)$$

放电线圈电阻较小且满足 $R^2 < 4L/C$ ，则有^[6]

$$i(t) = I_m e^{-ht} \sin \omega t \quad (8)$$

通过对式(7)、(8)的简化，将两个电路合并到电源端回路，极大地简化了计算过程。根据等效电路计算电流 $i(t)$ 的幅频响应，便可分析电磁加载力和等效回路分布参数的关系。根据式(2)的分析，冲击电流是一个衰减振荡电流，冲击电流周期为

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} \approx 2\pi \sqrt{LC} \quad (9)$$

冲击电流幅值满足

$$I_m = U_c \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (10)$$

由式(8)~(10)可以看出，电流幅值取决于充电电压、容量以及系统电感，随着电压和电容的增大，电流增大，而电压对电流的改变最为明显；电感增大时，电流幅值减小。冲击电流频率取决于加载系统电感和容量，电感和容量增加时，频率减小。综上可知，冲击电流的幅频特性主要取决于系统电容、电感以及充电电压。

3 实验验证

3.1 实验参数设置

电磁加载系统用于替换本装置中传统气动加载装置，因此需要匹配放大器以将分离式霍普金森杆与电磁加载系统连接。现有霍普金森入射杆直径 14 mm，长 2 m，因此锥形放大器小端直径取 16 mm 略大于入射杆杆径(14 mm) 以便螺纹连接或开口焊接。HONDO 有限元程序是一个 Fortran 程序，用于分析弹性变形和刚性动态响应，适合于二维物体或任意形状的轴对称固体材料。根据有限元程序 HONDO 计算求解，锥形放大器大端外径为 90 mm 时应力波输出比较稳定，为使放大器底端受力均匀，感应线圈和放电线圈直径同样为 90 mm。在建模时应注意应力波方向与入射杆同轴，径向不能产生力的干扰，因此感应线圈、放电线圈上下表面需与放大器大端外径尺寸相同并同轴放置，才能保证应力波的均匀分布。放电线圈需由绝缘材料灌装，感应线圈与放电线圈存在 2 mm 绝缘间隙，利用 ANSYS Maxwell 建模如图 3 所示^[10-12]。

感应线圈外径与放电线圈外径保持相同为 90 mm，内径 14 mm 以配合入射杆穿过。为了保证电磁加载的效率，感应线圈的厚度应大于磁渗透深度。当深度过小时，只在感应线圈表面很浅的深度上产生感应电流，大部分区域不会产生电磁力；而深度过大，又会散失能量，降低电磁利用率。磁渗透深度为^[13]

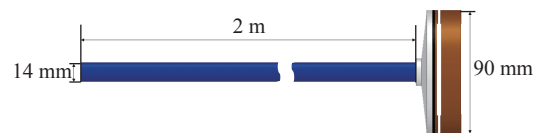


Fig. 3 Loading system model

图 3 加载系统模型

$$H = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0}} \quad (11)$$

式中： ρ 为材料的电阻率($\Omega \cdot m$)，选用电性能较好的铜，电阻率为 $1.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ； f 为放电电流频率(Hz)，由式(9)确定； μ_0 为真空磁导率，等于 $4\pi \times 10^{-7} H/m$ 。

由于系统电感和电容还未确定，无法利用上式确定准确的感应线圈厚度。为了充分验证放电线圈感应涡流的能力，广泛调研各类低压电磁加载设备^[5]，感应线圈厚度在2~8 mm范围内，将感应线圈厚度暂定为8 mm，满足各类线圈的磁渗透深度，代入软件模型。

由前分析可知，冲击电流的幅频特性主要取决于系统电容、电感以及充电电压。其中放电线圈的电感可用下式进行估算^[14]

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} N^2 d \Phi \quad (12)$$

式中： N 为放电线圈匝数； d 为线圈的平均直径； Φ 为由线圈直径和厚度确定的常数，可参考文献[12]。

由于我们初步确定了放电线圈的几何尺寸，因此放电线圈匝数主要决定了系统电感。设置充电电容分别为2 mF、4 mF以及6 mF，由于低压加载电压一般在600 V以下，设置充电电压为600 V，仿真不同电容下线圈匝数所对应的入射应力脉冲大小，匝数分别设置为5、10、15和20匝，仿真结果如图4所示。

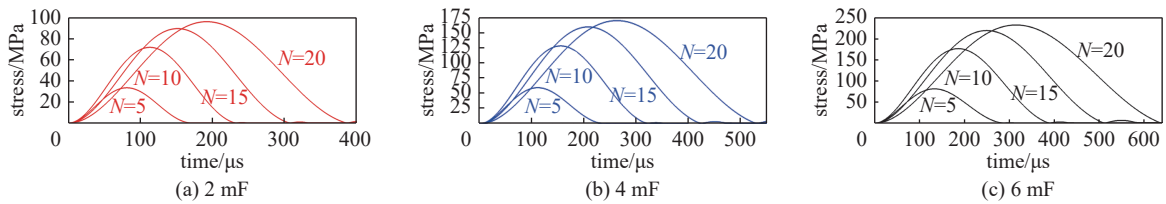


Fig. 4 Influence of coil turns on the incident stress

图4 线圈匝数对入射应力波的影响

由图4仿真结果可知，入射应力波近似为正弦函数，脉宽等于2倍上升时间。满足应力波上升时间($(150 \pm 20) \mu s$)要求的波形有：①充电电容2 mF，放电线圈15匝，应力波上升时间150 μs ；②充电电容4 mF，放电线圈10匝，应力波上升时间160 μs ；③充电电容6 mF，放电线圈5匝，应力波上升时间135 μs ，其中曲线①、曲线②入射应力波峰值较大更易达到实验要求，同时考虑到低压加载通过适当增大电容来降低加载电压的技术特点，选择曲线②仿真条件作为下一步设计参考，即电源电容4 mF，放电线圈匝数为10匝。

3.2 实验参数优化

以上初步分析了感应线圈和放电线圈参数，继续进行优化以更好地满足实验对入射应力波的要求。当电源电容为4 mF，放电线圈匝数为10匝时，应力波上升时间略大，所以我们适当减少线圈电感，将放电线圈匝数设为9匝，分别设置充电电压200 V至1000 V，再次仿真电磁力随充电电压的变化曲线如图5所示。不同电压对应的应力波幅值及上升时间见表1。由表1仿真结果可知，应力波上升时间完全满足实验要求；同时应力波峰值不仅可达到200 MPa，还可通过改变充电电压实现应力波幅值的调节，因此我们将放电线圈匝数确定为9匝。

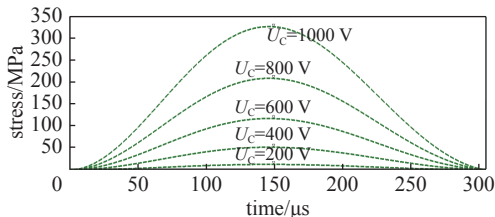


Fig. 5 Simulation results of stress

图5 应力波仿真结果

表1 应力波上升时间及幅值
Table 1 Rise time and amplitude of stress

U_c/V	incident stress amplitude/MPa	rise time/ μs
200	12.89	150
400	51.84	150
600	116.85	150
800	207.92	150
1000	325.04	150

前文中，我们初步设计感应线圈厚度为8 mm，足够满足大范围频率内的磁渗透深度要求，但过大可能降低磁利用效率。电源电容4 mF、放电线圈9匝已经确定时，不同感应线圈厚度对入射应力波的影响。仿真结果如图6所示，由于曲线比较集中，将不同感应线圈厚度对应的入射应力波峰值及上升时间如表2所示。由表2结果可知，当感应线圈从1 mm增加至2 mm时，入射应力波幅值有明显的增加，同时脉宽增大，更加满足了实验要求。主要

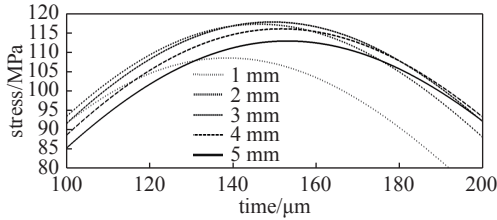


Fig. 6 Influence of induction coil thickness on incident stress

图 6 感应线圈厚度对入射应力波的影响

表 2 仿真结果

Table 2 Results of simulation

thickness/mm	incident stress amplitude/MPa	rise time/μs
1	108.36	139
2	116.91	150
3	117.63	150
4	117.62	150
5	112.73	153

原因是当感应线圈厚度小于磁渗透深度时,随着厚度的增加,集肤效应越明显,涡流增大;涡流增大导致感应线圈与放电线圈的互感略有增大,放电回路时间常数增大,脉宽及上升时间变长。感应线圈厚度由 3 mm 增加至 5 mm 过程中,入射应力波峰值不但没有增大,反而略有下降,说明已超过磁渗透深度,电磁能量发生了损耗。通过以上分析,将感应线圈厚度设计为 3 mm。

3.3 结果及误差分析

根据以上所述电磁加载系统参数及实验室现场条件,搭建电磁加载霍普金森杆实验装置如图 7 所示,利用电缆将电容器柜与放电线圈相连。电缆长度尽可能短,以免电缆的阻抗参数带来误差。在入射杆上粘贴应变片,通过将应变片连接到动态应变仪采集到入射应力波信号。充电电容器 4 mF,电容器充电电压可从 100 V 增至 1000 V。

在脉冲放电实验中,我们使用新的电容器柜,考虑到安全等因素,未将充电电压调至最大值 1000 V。当充电电压达到 800 V 时测试结果波形如图 8 所示,曲线为采集到的应力波应变信号。



Fig. 7 Electromagnetic loading Hopkinson bar experiment

图 7 电磁加载霍普金森杆实验装置

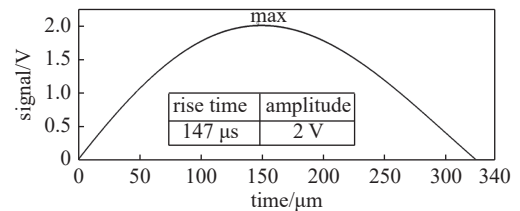


Fig. 8 Experimental test result

图 8 实验测试结果

由实验结果可知,采集到的应变信号幅值达到 2 V,应力应变转换公式为

$$\sigma = E\varepsilon \quad (13)$$

式中: σ 为应力 (MPa); E 为弹性模量,本实验中的钢取 200 GPa; ε 为应变信号,计算公式如下

$$\varepsilon = \frac{1}{B} \frac{1}{4} \frac{1}{k} \frac{1}{100} \frac{1}{U} \Delta U \quad (14)$$

式中: B 为本次实验测量采用 1/2 桥, B 值取 1/2; k 为灵敏度系数,实验动态应变仪灵敏度系数 2 为 2.1; U 为在 1000 倍增益下标定电压为 5 V; ΔU 为测量电压,本文为 2 V。

通过式 (13)、(14) 计算可得: 800 V 电压下应力峰值已达到 190 MPa,在充电电压 1000 V 范围内,完全可实现 200 MPa 的应力幅值要求;应力波上升时间 147 μ s,满足设计要求 (150 \pm 20) μ s 范围内。对比图 5 仿真结果 (应力波幅值 207.9164 MPa,上升时间 150 μ s),存在一定误差;误差原因有以下两点: (1) 在仿真计算中未考虑连接电缆的影响,电缆的阻抗参数使电路时间常数增大,同时电缆电阻会使应力波幅值减小; (2) 软件仿真计算点位于放大器大端即贴近感应线圈一侧,而实验测量点位于入射杆中点位置,入射波在传播过程中会有损耗。实验测量数据与仿真结果有一定偏离,但在误差允许范围内完全满足实验要求。在实验中为了减小误差,可实行如下两种改进措施: (1) 用同轴电缆连接电容器和电磁加载装置,减小线路电感对电路时间常数的影响;同时尽量减小电缆长度,降低电缆电阻对应力波幅值的影响; (2) 软件计算点位于放大器近端,而应力波的传播会有损耗,因此在设计仿真时需考虑一定的裕量。

4 结论

本文为分离式霍普金森杆设计了一套电磁加载系统,研究了加载系统分布参数对入射应力波的影响。结果显

示:(1)可将电磁加载系统进行等效回路构建,将感应线圈直接折算到原边(电源端回路),直接对原边回路进行求解,理论分析了电容、电感及充电电压对入射应力波的影响,方法更易且直观;(2)应力波幅值与放电线圈匝数成正比,但脉宽与匝数成反比;应力波幅值与电容量成正比,脉宽与电容量成反比;充电电压的升高会增大应力波幅值,但不会改变脉宽及上升时间;(3)感应线圈厚度的设计应保证大于系统频率所决定的磁渗透深度,以产生足够大的电磁斥力,但过大会导致电磁能量的损失,使应力波幅值下降。综上所述,本文设计电磁加载系统可以替换霍普金森杆的传统气动加载,并且可以通过等效回路构建、电路参数计算以及软件耦合场仿真精准控制入射应力波的幅频特性。

参考文献:

- [1] 卢芳云,陈荣,林玉亮,等.霍普金森杆实验技术[M].北京:科学出版社,2013.(Lu Fangyun, Chen Rong, Lin Yuliang, et al. Hopkinson bar techniques[M]. Beijing: Science Press, 2013)
- [2] Chen Weinong, Song Bo. Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and applications[M]. New York: Springer, 2011.
- [3] 李玉龙,聂海亮,汤忠斌,等.一种分离式霍普金森压杆实验装置:CN203894129U[P].2014-10-22.(Li Yulong, Nie Hailiang, Tang Zhongbin, et al. Split Hopkinson pressure bar experimental device: CN203894129U[P]. 2014-10-22)
- [4] Nie Hailiang, Suo Tao, Wu Beibei, et al. A versatile split Hopkinson pressure bar using electromagnetic loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 116: 94-104.
- [5] 曹增强,左杨杰.电磁铆接[M].北京:国防工业出版社,2018.(Cao Zengqiang, Zuo Yangjie. Electromagnetic riveting[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018)
- [6] 张俊峰.低压电磁铆接技术研究[D].西安:西北工业大学,2001.(Zhang Junfeng. Research on low voltage electromagnetic riveting technology[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2001)
- [7] 邓将华,李春峰.电磁铆接技术研究概况及发展趋势[J].锻压技术,2006,31(5):10-14.(Deng Jianghua, Li Chunfeng. Current status and trends in researches on electromagnetic riveting[J]. Forging & Stamping Technology, 2006, 31(5): 10-14)
- [8] 邓将华,郑义明,唐超,等.低压电磁铆接放电电流分析[J].塑性工程学报,2013,20(1):108-112.(Deng Jianghua, Zheng Yiming, Tang Chao, et al. Analysis of discharge current in low voltage electromagnetic riveting[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20(1): 108-112)
- [9] 陈永真,李锦.电容器手册[M].北京:科学出版社,2008.(Chen Yongzhen, Li Jin. Capacitor handbook[M]. Beijing: Science Press, 2008)
- [10] Huang Wenkai, Chen Guangxin, Hu Mingbin, et al. A miniature multi-pulse series loading Hopkinson bar experimental device based on an electromagnetic launch[J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90: 025110.
- [11] Xie Beixin, Xu Peidong, Tang Liqun, et al. Dynamic mechanical properties of polyvinyl alcohol hydrogels measured by double-striker electromagnetic driving SHPB system[J]. International Journal of Applied Mechanics, 2019, 11: 1950018.
- [12] Guo Yazhou, Du Bing, Liu Huifang, et al. Electromagnetic Hopkinson bar: a powerful scientific instrument to study mechanical behavior of materials at high strain rates[J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91: 081501.
- [13] 王泽忠,全玉生,卢斌先.工程电磁场[M].北京:清华大学出版社,2004.(Wang Zezhong, Quan Yusheng, Lu Binxian. Engineering electromagnetic field[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004)
- [14] 卡兰塔罗夫,采依特林.电感计算手册[M].陈汤铭,刘保安,罗应立,等译.北京:机械工业出版社,1992.(Калантаров П Л, Цейглин Л А. Inductance calculation manual[M]. Chen Tangming, Liu Baoan, Luo Yingli, et al, trans. Beijing: China Machine Press, 1992)