

文章编号: 1001-4888(2020)01-0018-09

电磁式小型霍普金森杆装置的优化和应用^{*}

张驰涛, 刘战伟, 汪小明, 蔡苏

(北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

摘要: 为了解决电磁式小型霍普金森杆装置加载速度不够高、加载应力波脉宽受限制等问题,对装置的电磁线圈发射系统、供能系统和结构进行改进和优化,提出了多级多绕式串并联线圈阵列发射结构,不但极大提高了子弹发射速度,加载应力波脉宽可方便调节,且简化了多级发射感应元器件结构;采用“锂电池+升压模块”结合电容组的两级储能结构设计,既提高了高电压安全性,又便于重复使用;此外,提出了一种便于杆件调节和对中的新型套管结构。基于上述三大部分的改进和优化,研制了调节范围广、集成度高、结构紧凑、安全便捷的电磁式小型霍普金森杆装置。借助研制的装置,对基于 SLM 金属 3D 工艺制得的 316L 不锈钢材料进行了动态力学性能测试,实验证明了该材料具有应变率敏感特性,应变率在 5800s^{-1} 时,屈服强度比静态提高约 60%,但是加工方向对动态力学性能影响不明显。

关键词: 小型霍普金森杆; 电磁发射技术; 选择性激光熔化技术; 动态力学性能; 高应变率

中图分类号: O347.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-19-033

0 引言

霍普金森杆技术经过 60 多年的发展,已经成为测试材料动态力学性能的重要手段之一。在霍普金森杆技术中较多采用的是压缩气体炮驱动子弹的加载方案,然而为了节约实验成本、减小实验室空间占有率、提高设备的使用效率和控制的稳定性,从 2008 年磁阻式线圈发射技术被首次引入 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar)实验开始^[1],电磁驱动加载方式应用于霍普金森杆的思路得到了初步的发展,并取得了一定的成功。2009 年,采用磁阻式线圈发射技术的大型 SHPB 装置实现了对金属材料的动态力学性能测试^[2],2010 年开始,磁阻式电磁发射技术在小型 SHPB 研制中得到了广泛的应用^[3-15],主要集中在发射系统的优化^[4-9]以及对于一些小型试件动态力学性能的实验研究,和多功能的拉压一体化小型霍普金森杆装置的研制方面^[10-12,15]。

和大型杆装置相比,小型杆装置具有体积小、成本低、得到的应变率高以及横向惯性效应和弥散效应小等优点,尤其是能够对小型试件进行测试得到更加准确的结果,例如在测试单晶材料、金属 3D 打印材料等成本较高的试件时,小型杆装置所需测试样本的尺寸远远小于大型杆装置,能够在得到准确结果的前提下极大降低实验成本。

本文通过对本课题组前期开发的磁阻式小型霍普金森杆装置^[1,4-15]进一步改进与升级,针对普遍存在的子弹长度受限等问题,通过对发射线圈、供能系统和结构等多方面的优化与集成,进一步提高了子弹速度和实验应变率,解除了子弹长度的限制,扩展了该装置的使用范围,并提高了装置的重复使用效率,同时利用优化改进后的电磁式小型霍普金森杆装置对基于 SLM 工艺的 316L 不锈钢材料开展了

^{*} 收稿日期: 2019-03-01; 修回日期: 2019-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(NO. 11372037)、北京市自然科学基金(NO. 1192014)

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动态力学性能研究。Email: liuzw@bit.edu.cn

动态力学性能实验研究, 获得了较好的实验效果。

1 系统优化

由磁阻式电磁发射原理^[12,16]可知, 当子弹中心向靠近驱动线圈中心运动时, 子弹受加速拉力, 而当子弹中心向远离驱动线圈中心运动时, 子弹受减速阻力。所以为了避免驱动线圈的减速作用, 通常使用光电开关来控制场效应管的开闭, 进而控制驱动线圈电路的导通, 从而保证子弹中心在往远离线圈中心运动时不受线圈的减速作用。但是这种控制系统有三个局限性: 一是常用场效应管的额定电流比较低 (40A), 这限制了驱动线圈驱动子弹所能达到的最高速度无法进一步提高; 二是为了保证子弹不受线圈减速作用的影响, 子弹的长度需要保持和线圈长度一致, 这限制了子弹撞击入射杆时产生的应力波宽度为一个定值, 无法根据实际实验需要进行调整; 三是驱动结束后, 电容中依然有剩余电能没有充分释放, 能量转换效率较低, 且残余电量对实验操作者也具有一定的危险性。

1.1 多级多绕式串并联线圈阵列发射结构的优化

由于文献[10]已针对小型霍普金森杆的特点对其几何参数进行了最优化参数设计, 包括子弹长度和直径、发射线圈长度和直径、铜丝直径、匝数等, 同时在此基础上提出了限制子弹速度进一步提高的因素是放电电容最高工作电压值, 在系统总阻值不变的前提下, 最高工作电压值是由整个系统的额定电流值决定的, 也就是保证系统中场效应管正常工作的额定电流值。

晶闸管(可控硅整流器)是常用的控制整流器, 和场效应管相比, 它能够耐受更高的电流(额定 90A, 可耐受毫秒级别的 20 倍浪涌电流)和电压(额定 1600V)。将系统中的场效应管替换为晶闸管能够大幅提高整个系统的额定电流值。但是和场效应管能够同时控制电路的通和断不同, 晶闸管属于半控型器件, 只能控制电路的导通而不能控制其关断。若缩短放电时间, 使电容中的电能在子弹中心到达线圈中心之前充分释放, 则可避免驱动线圈的减速作用。

在对电磁线圈进行缠绕方式优化设计的过程中, 同时使用多股并联的铜线同步缠绕, 即可保证在线圈几何参数最优的情况下, 提高线圈的峰值电流, 同时缩短线圈的放电时间, 设计的线圈示意图如图 1 所示。其中, 在同一个线圈中, 相同编号的铜线为同一股铜线, 不同股铜线之间为并联关系, 在输入和输出时合并为一股线, 并由同一组电容组供电, 对子弹加速时同时放电; 采用多级线圈驱动时, 每级线圈都由单独的电容组进行供电, 串联在同一个子弹发射加速轨道上, 并根据子弹的运动顺序依次进行放电。多级线圈的串联结构和每级线圈的多股铜线并联结构, 共同构成多级多绕式串并联线圈阵列发射结构。

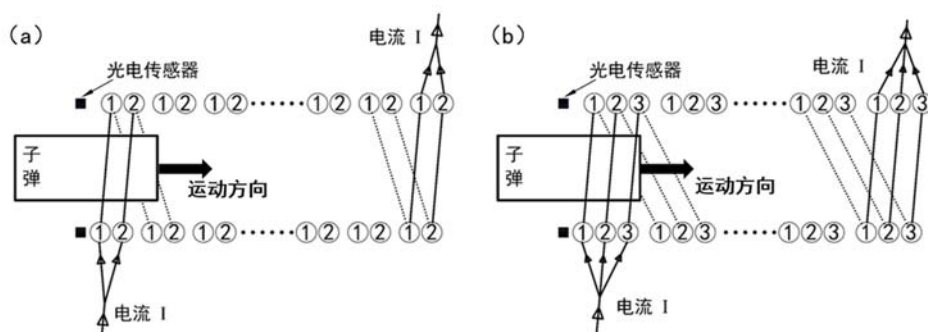


图 1 不同绕数情况下单级并联线圈驱动示意图: (a) 双绕线圈; (b) 三绕线圈

Fig. 1 Schematic diagram of single-stage parallel coil drive under different conditions:

(a) two wires in parallel; (b) three wires in parallel

采用 Ansoft Maxwell 电磁仿真软件^[17]对线圈的放电情况进行仿真, 如图 2 所示。由图可知, 若采用晶闸管控制导通驱动线圈电路, 在电路导通后, 电容中储存的电能将被充分释放至零为止。相比于单绕线圈, 多绕线圈的峰值电流更高, 放电时间更短, 能够在子弹中心运动到线圈中心之前就将电容中的电量充分释放, 从而避免了子弹在线圈中运动时, 线圈带来的减速作用。这样做的另一个好处就是, 由于不再需要控制电路中电流的截止, 故子弹的长度也不再需要保证和线圈长度相等, 可以根据所需应力

波宽度,在一定范围之内随意调节。

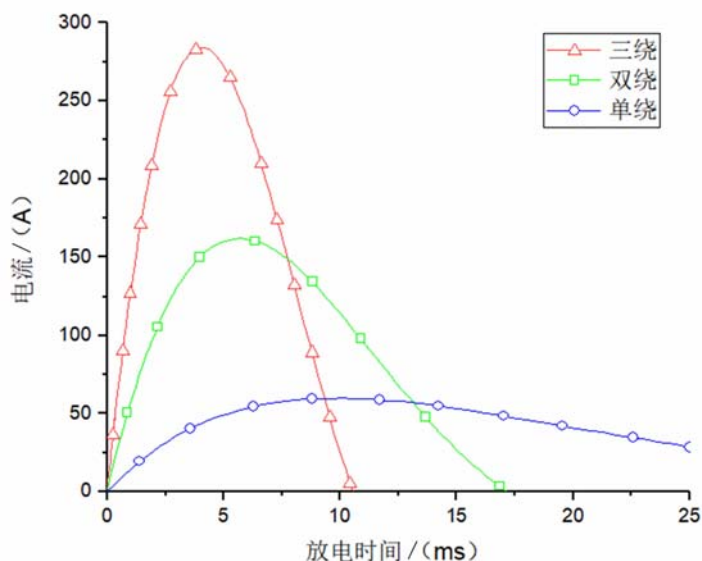


图 2 不同绕数情况下电流放电仿真结果

Fig. 2 Simulation results of current discharge under different conditions

使用晶闸管代替场效应管,并使用多绕线圈代替单绕线圈,能够突破原先最高额定电流的限制,理论上能进一步提高子弹的最高速度,同时可以让电容中的电能快速充分释放,能提高能量转换率,更重要的是解除了子弹长度必须等于线圈长度的限制。

使用多级线圈发射时,除了第一级线圈为子弹加速时子弹无初始速度,后续每级线圈为子弹加速时,子弹都具有初始速度,这使得子弹在后续加速线圈中得到加速的时间越来越短。故每级线圈的缠绕方式由子弹的初始速度和最后的发射速度优化确定。因此,在线圈几何参数不变的情况下,根据仿真结果可以得知,第一级线圈使用双绕线圈缠绕方式,第二级线圈使用三绕线圈缠绕方式,这样的设计可以确保每级电容的电量在子弹穿行时间内释放完毕,既可保证子弹在每级线圈中有充分的加速时间,也能保证子弹不受到线圈的反向减速作用。

1.2 “锂电池+电容组”的两级储能系统设计

改进后的线圈放电电路准许电容组有更高的初始电压值。考虑到实际每次实验时电容消耗的电量很少,而电压更高,若使用市电对电容进行充电,无论是使用交流变压器还是直流电源对电容进行调压,都会有高压隐患的问题。因此,将锂电池作为一级储能结构,将电容组作为二级储能结构,形成一个“锂电池+电容组”的两级储能系统。

实验前先用市电经降压整流对锂电池进行充电,将电能存储在锂电池中,后续实验时,锂电池中的低压电能经升压模块的升压作用后变成高压,由于升压模块有对输出电压进行调节的功能,则可以通过调节升压模块的输出电压对电容组进行可控电压的充电,使电容组中的电压值符合实验要求,完成充电后断开两级储能结构之间的连接,则作为二级储能结构的电容组中储存了高压,最后释放电容组中的电能对线圈放电,从而实现驱动线圈中的子弹进行加速运动。这种“锂电池+电容组”的两级储能系统设计兼具实用性和安全性,既能够实现电容组电压的可控调节,又能够有效降低直接用市电进行高压充电时的风险,并避免可能造成的严重后果。在锂电池和升压模块中都有保险结构,对电容进行充电时能够对电路和电路中的元器件进行保护。由于整个过程是脱离市电进行的,电容中虽然电压高达数百伏,但是实际储存的电能是很少的,所以即使出现漏电的情况,也不会造成严重的后果。

为了使整体结构进一步简化和小型化,同时保证锂电池在一次充电周期中能完成至少 100 次实验,选择体积比交流可调变压器和直流电源更小的“锂电池+升压模块”组合,锂电池实际容量最高可达 16800mAh(12V),一次充满后的可使用次数可由下式进行估算:

$$N_{\max} = \frac{E_B}{n \cdot E_C + E_T + E_R} \quad (1)$$

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

$$E_T = P_T t = UI t \quad (3)$$

$$t = \frac{CU}{I} \quad (4)$$

$$E_R = I^2 R t \quad (5)$$

式中, $N_{\max}$ 为锂电池(一级储能结构)单次充满理论上可对电容组(二级储能结构)充电的最高次数,即单次充电理论最高发射次数; E_B 为满电状态下锂电池所含电能; E_C 为单个电容单次充电完成后所含电能; n 为电容数; C 为单个电容的电容值; U 为单个电容充电完成后的电压值,即预设目标充电电压; E_T 为单个升压调压模块在单次充电过程中消耗的能量; P_T 为单个升压模块的工作功率; t 为使用锂电池对电容组进行单次充电的时长; I 为平均充电电流值; E_R 是充电电路中电阻在单次充电时消耗的电能; R 为充电电路的电阻值。对于本方案,预设目标充电电压为 700V,电容为 4500 μ F,电容数量为 2 个,升压调压模块的工作功率为 200W,电路电阻为 10 Ω 。将上述数值带入式(1)~(5)进行计算可以估算出单次充电理论最高发射次数约为 164 次(700V 电压驱动下),能够满足多次重复实验的需求。

1.3 精确调节杆件对中的新型套管结构设计

小型霍普金森杆采用的是直径较小的细长杆,杆件的对中性会对实验结果产生重要影响。对于小杆系统,使用高直线度(0.1mm/1000mm)的空心铝管作为套管,对入射杆和透射杆进行支撑,能够保证入射杆和透射杆具有良好的对中性,同时还能对杆件起到保护作用,套管内部有对中调节结构,可用于杆件对中的微调,如图 3 所示。

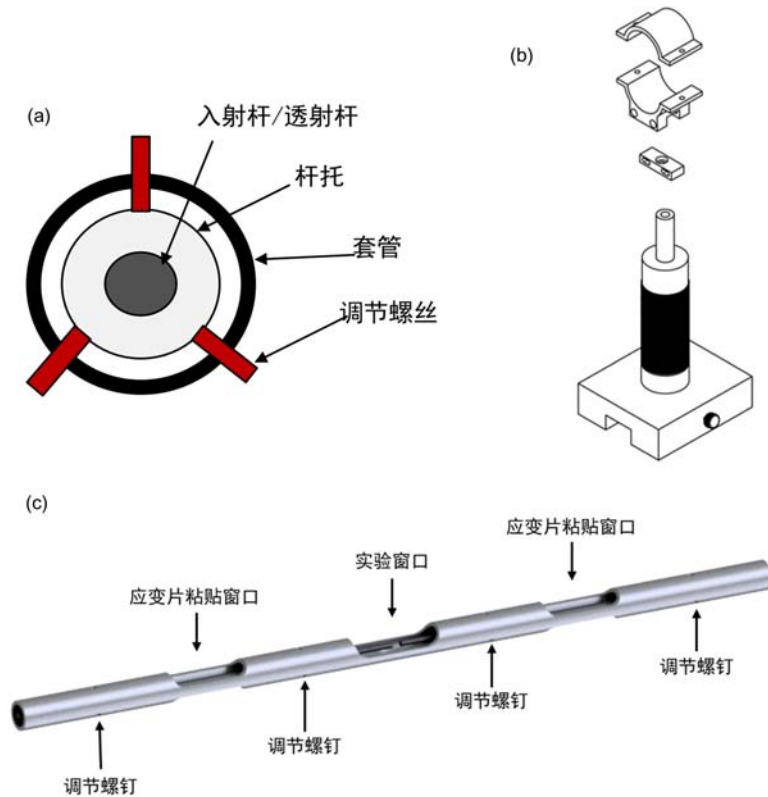


图 3 对中可调套管:(a)内部微调结构;(b)套管调节结构;(c)整体图

Fig. 3 Centering adjustment casing: (a) internal fine-tuning structure; (b) casing adjustment structure; (c) overall structure

1.4 新型电磁式小型霍普金森杆装置的研制

为了得到更高的子弹速度,本文对电磁式小型霍普金森杆实验装置从线圈、供电装置、结构等方面进行了改进。多级多绕式串并联线圈阵列发射结构结合晶闸管的使用能够进一步提高电路的工作电流,使子弹获得更高的速度,并且能够方便调节加载应力波脉宽;“锂电池+升压模块”的组合为更高的子弹速度提供了一种更加安全的供能设计;对中可调套管则是针对小杆的特点提供了一种便于使用的结构。综上,系统优化后的实验装置示意图和实物图见图 4,使用长度为 150mm,直径为 6mm 的 45 号钢子弹进行速度测试,测试结果与优化前的装置对比如表 1 和图 5 所示。

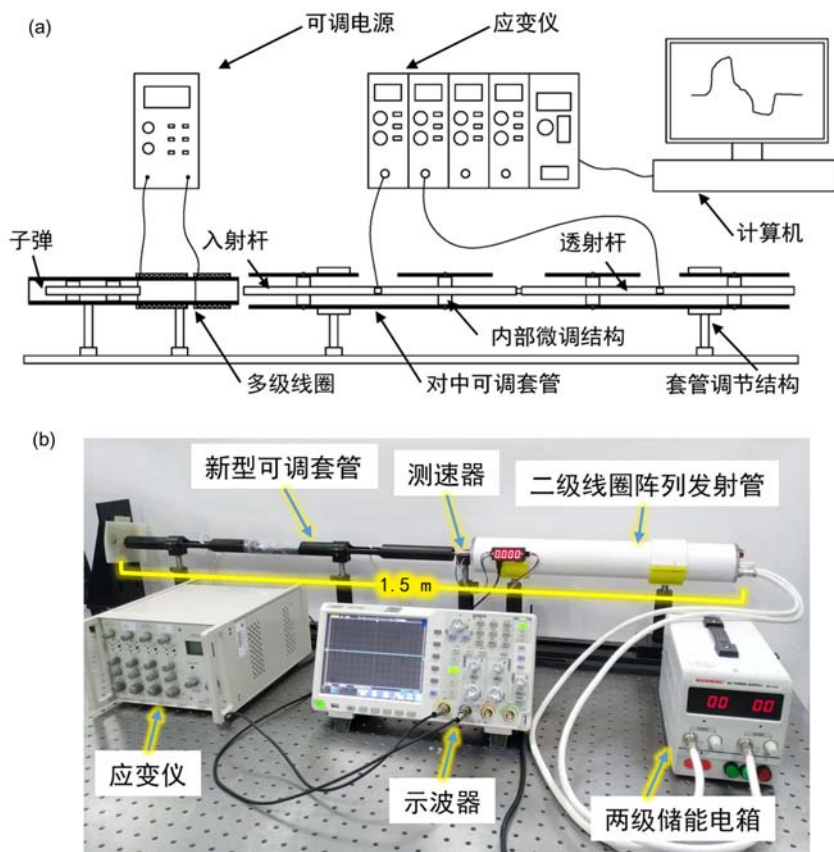


图 4 优化后的小型霍普金森杆实验装置:(a)示意图;(b)实物图

Fig. 4 Optimized mini-SHPB device: (a)schematic diagram; (b)physical figure

表 1 优化前后单级线圈驱动子弹速度对比

Tab. 1 Velocity comparison of single-stage-coil-driven bullets before and after optimization

电压/V	250	300	350	400	450	500	550	600	650
优化前速度 ^[6] /(m/s)	9.83	10.78	12.40	13.83	16.16	—	—	—	—
优化后速度/(m/s)	9.55	11.62	13.47	15.47	16.66	17.89	18.99	20.10	21.18

根据图表所示结果可得,原装置最高电压为 450V,在 300~450V 电压的情况下,两种装置的单级线圈电压相同时,优化后的装置都能比原装置略微提高了子弹速度,在电压较低时加速效果不如原装置,这是因为电压较低时子弹的速度较低,子弹在线圈中运动的时间较长,原装置有更长的加速时间,故原装置的加速效果更好一些,不过对实验并无影响。同时,由于提高了电压上限,最高达到 650V,故优化后的装置能得到更高的极限速度,单级线圈加速时可达 21.18m/s,和原装置相比提高了 31%,两级线圈加速时最高可达 28.03m/s,和原装置最高速度 21m/s 相比提高了 33%。

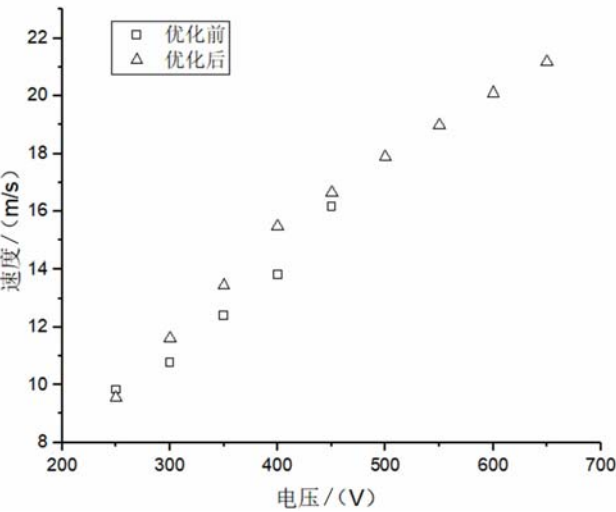


图 5 优化前后子弹“速度—电压”曲线图

Fig. 5 “Velocity-Voltage” curve of bullets before and after optimization

2 基于 SLM 工艺的 316L 不锈钢材料的动态力学性能测试

选择性激光熔化技术(Selective Laser Melting, SLM)是近年来被广泛应用的一种金属增材制造技术。根据三维建模软件的模型,使用 200W 的高能激光逐层扫描熔化金属粉末材料,从而实现零件的直接成型^[18]。本文使用的试件由 EOSM250 金属增材加工设备对 316L-0406 不锈钢粉末进行加工制得,加工参数见表 2,316L-0406 粉末化学成分见表 3。

表 2 EOSM250 设备加工参数

Tab. 2 Parameter of EOSM250

激光功率	光斑直径	扫描速度	层厚	粉末尺寸
200W	100 μ m	Up to 7m/s	0.1mm	45 $\pm$ 10 μ m

表 3 316L-0406 粉末化学成分(%)

Tab. 3 Chemical composition of 316L-0406 powder(%)

C	Ni	Mo	Mn	Si	N	O	P	C	S	Fe
16.00~18.00	10.00~14.00	2.00~3.00	2.00	1.00	0.10	0.10	0.045	0.03	0.03	Others

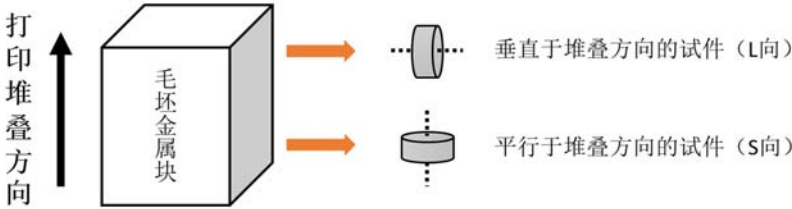


图 6 动态实验试件获取示意图

Fig. 6 Schematic diagram of dynamic experimental specimen acquisition

由于 SLM 工艺为层层堆叠成型,故由此工艺制成的零件有可能存在各向异性。采用 WDW-100D 万能试验机和优化后的小型霍普金森杆装置分别对材料的两个方向进行准静态和动态测试,准静态试件直接按照不同方向打印成毛坯后处理得到,动态试件则由同一块打印成型金属体中截取两个不同方向的小圆柱体得到,如图 6 所示。根据国标(GB/T7314—2017)对准静态压缩试件尺寸的要求(长径比 2.5~3.5)取长径比为 3,根据美国金属学会(American Society of Metals, ASM)推荐的动态试件长径比 0.5~1.0,取长径比为 1,最终试件尺寸如表 4 所示,试件实物图如图 7 所示。

表 4 准静态和动态实验试件尺寸(单位:mm)

Tab. 4 Specimen size of quasi-static and dynamic tests (unit: mm)

	直径	长度
准静态试件	$\phi 5$	15
动态试件	$\phi 2.5$	2.5

相比于传统霍普金森杆装置和早期小型霍普金森杆装置,本文采用优化后的小型霍普金森杆装置能够提供更为宽泛的应变率选择范围,因此选取 1000s^{-1} 和 6000s^{-1} 两种应变率进行动态实验,并与准静态实验(应变率 0.001s^{-1})结果进行对比,实验结果如图 8 所示。

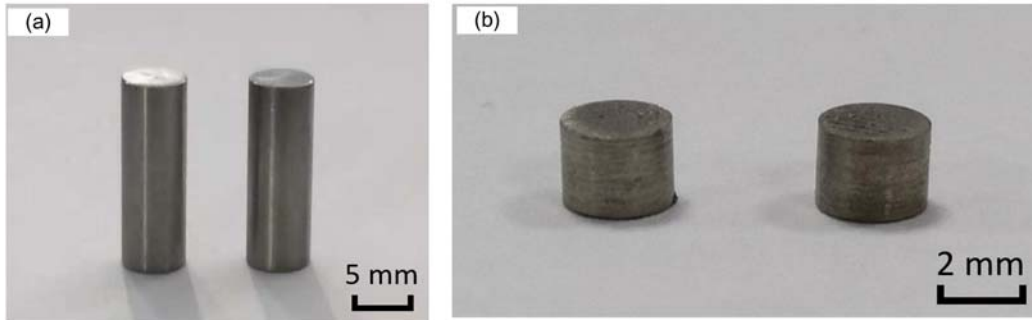


图 7 实验试件实物图:(a)准静态实验试件;(b)动态实验试件

Fig. 7 Experimental specimens: (a) quasi-static test; (b) dynamic test

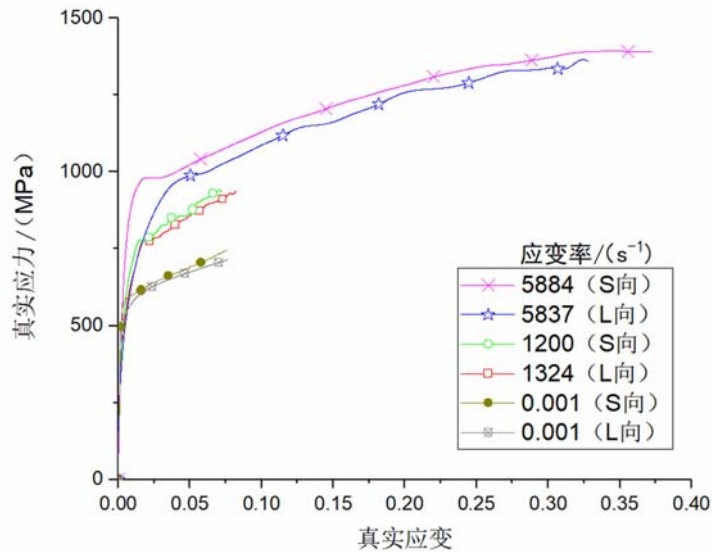


图 8 准静态实验与动态实验的“应力—应变”曲线图

Fig. 8 “Stress-Strain” curve of quasi-static and dynamic tests

由实验结果可见:

- (1) 3D 打印 316L 不锈钢材料的屈服强度随着应变率的提升而升高,是一种应变率敏感材料;
- (2) 同种应变率加载下,316L 不锈钢材料在平行于打印方向上的屈服强度与垂直于打印方向上的屈服强度相比略有提高但并不十分明显。

3 结论

本文对电磁式小型霍普金森杆装置的电磁线圈发射系统、供能系统和结构进行改进和优化,根据改进和优化后的结果研制了调节范围广、集成度高、结构紧凑、安全便捷的新型电磁式小型霍普金森杆装置,并使用该装置对基于 SLM 金属 3D 打印工艺制得的 316L 不锈钢材料进行了动态力学性能测试。

根据优化改进过程和实验应用结果,可得到如下结论:

(1)本文提出的多级多绕式串并联线圈阵列发射结构,不但极大提高了子弹发射速度,同时解除子弹长度的限制,使加载应力波脉宽可方便调节,且简化了多级发射感应元器件结构,从而实现了发射速度的提高,最高可达 28.03m/s,与原装置相比提高了 33%;

(2)采用“锂电池+升压模块”结合电容组的两级储能结构设计,既提高了高电压安全性,又便于电压的精确调节和重复实验使用;

(3)研制的对中可调套管为小杆系统提供了一套更加便捷的对中调节方案,同时起到保护杆件的作用;

(4)经过实验测试得知,基于 SLM 工艺的 316L 不锈钢材料是一种应变率敏感材料,应变率在 5800s^{-1} 时,屈服强度比静态提高约 60%,但是加工方向对动力学性能影响不明显。

参考文献:

- [1] 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))
- [2] 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(3):281-288.
- [3] 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, 26(6):682-689 (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 刘战伟, 陈喜民, 董杰, 等. 小型霍普金森杆多级电磁发射系统的优化[J]. 实验力学, 2015, 30(1):9-16 (LIU Zhanwei, CHEN Ximin, DONG Jie, et al. The optimization of multistage electromagnetic launching system of mini-SHB[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(1):9-16 (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 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. 2011-7-27 (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. 2011-7-27 (in Chinese))
- [8] 刘战伟, 吕新涛, 何光, 等. 小型冲击加载测试系统研制与应用[C]. 哈尔滨:中国力学大会, 2011 (LIU Zhanwei, LV Xintao, HE Guang. Development and application of miniature shock loading test system [C]. Harbin:Mechanical assembly China in 2011, 2011 (in Chinese))
- [9] 刘战伟, 陈喜民, 谢惠民. 桌面用磁阻式 Mini Hopkinson 系统研制与应用[C]. 西安:第二届实验力学青年研讨会, 2012 (LIU Zhanwei, CHEN Ximin, XIE Huimin. Development and application of desktop reluctance Mini Hopkinson system[C]. Xi'an: The 2th Experimental mechanics Youth Seminar, 2012 (in Chinese))
- [10] 陈喜民. 磁阻式拉压一体化小型冲击加载与测试装置的研制[D]. 北京理工大学硕士论文, 2014 (CHEN Ximin. A novel integrated tension-compression design and application for a mini split Hopkinson bar apparatus[D]. Beijing Institute of Technology, 2014 (in Chinese))
- [11] 刘战伟, 陈喜民, 吕新涛, 等. 磁阻式拉压一体化微型霍普金森杆装置[P]. 国家发明专利:201210367229. X. 2013-1-16 (LIU Zhanwei, CHEN Ximin, LV Xintao, et al. A novel integrated tension-compression mini split Hopkinson bar apparatus[P]. Chinese Patent:CN201210367229. X. 2013-1-16 (in Chinese))
- [12] 刘爽, 陈喜民, 刘战伟. 拉压一体化小型霍普金森杆装置的研制与应用[C]. 成都:全国固体力学大会, 2014 (LIU Zhanwei, CHEN Ximin. A tension-compression design and application for a mini split Hopkinson bar apparatus[C]. Chengdu: The National Solid Mechanics, 2014 (in Chinese))
- [13] 刘战伟, 于琦, 陈喜民. 具有预加载的微型动态拉压实验系统[P]. 国家发明专利: 201310128419.0. 2013-7-17

- (LIU Zhanwei, YU Qi, CHEN Ximin. Micro dynamic with pre loaded tension test system[P]. Chinese Patent : CN201310128419.0. 2013-7-17 (in Chinese))
- [14] Liu Z W, Chen X M, Lv X T, et al. A mini desktop impact test system using multistage electromagnetic launch [J]. Measurement, 2014, 49:68—76.
- [15] CHEN X M, LIU Z W, HE G, et al. A novel integrated tension-compression design for a mini Split Hopkinson Bar apparatus[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(3):035114.
- [16] 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))
- [17] 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))
- [18] 张升, 桂睿智, 魏青松, 等. 选择性激光熔化成形 TC4 钛合金开裂行为及其机理研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23):21—27 (ZHANG Sheng, GUI Ruizhi, WEI Qingsong, et al. Cracking behavior and formation mechanism of TC4 alloy formed by selective laser melting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(23):21—27 (in Chinese))

Optimization and application of electromagnetic mini-SHPB device

ZHANG Chi-tao, LIU Zhan-wei, WANG Xiao-ming, CAI Su

(Department of Mechanics, School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To overcome the limitations of insufficient loading speed and restricted stress wave width of the mini-SHPB device, the electromagnetic emission system, energy supply system and structure are improved and optimized. The series-parallel coil array emission structure is proposed, which can not only greatly improve the bullet emission speed, but also facilitate the adjustment of the stress wave width, and simplify the structure of the multi-stage emission sensing component. The two-stage energy storage structure comprised of “lithium battery + boost module” and the capacitor group is beneficial to improving security and reuse. In addition, a new casing structure which facilitates the adjustment and centering is proposed. Based on the above three major improvements and optimizations, the electromagnetic mini-SHPB device is developed with wide adjustment range, high integration, compact structure, safety and convenience. By the developed device, the dynamic mechanical properties of 316L stainless steel based on SLM process are tested. The experimental results show that the material is strain-rate sensitive. When the strain rate is 5800s^{-1} , the yield strength is increased by about 60% than that of static state, but the processing direction has no obvious effect on dynamic mechanical properties.

Keywords: mini-SHPB device; electromagnetic emission technique; selective laser melting (SLM); dynamic mechanical properties; high strain rate