DOI: 10.11883/1001-1455(2016)05-0710-05

强脉冲电磁力驱动的冲击载荷*

赵志衡[1],汝 楠[1],马 涌[1],张 超[1],李春峰[2]
(1.哈尔滨工业大学电气学院,黑龙江 哈尔滨 150001;
2.哈尔滨工业大学材料学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:冲击载荷在材料科学与工程领域具有一定的应用。随着研究的深入,对冲击速度、冲击能量提出了更高的需求,是落锤所无法达到的。强脉冲磁场可由脉冲大电流产生,通过合适的装置可产生强脉冲电磁力,进而可转换为冲击载荷。通过数值模拟,给出了强脉冲磁场、电磁力及冲头运动过程的数值模拟结果。采用高速摄像对该压缩冲击装置的运动过程进行记录,通过对影像数据处理获得了冲击速度及冲击能量,验证了模拟结果。

关键词:爆炸力学;冲击载荷;电磁力;强脉冲磁场;高速摄像
中图分类号:O389;TG391 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

冲击载荷在工业生产及科学研究中具有一定的需求,目前通常采用落锤、压杆或炸药爆炸等产生[1-3],落锤较为常用。近年来的有关研究表明,冲击速度对于材料晶粒细化程度[4]、金属材料的变形性能[5]、粉末压实的致密度[6]等都有很大的影响。受实验条件限制,落锤很难继续提高冲击速度,寻求具有一定冲击速度及冲击能量,而且安全、可靠的冲击载荷,显得尤为必要。国内外已将强脉冲磁场应用于金属成形领域,并已在相关的研究中论及其所具有的冲击效应[7-8],但还没有对其驱动的冲击速度及能量作进一步的探讨。本文中对冲击过程中的放电电流进行测量,以此作为激励条件,对强脉冲电磁力驱动的冲击载荷进行有限元分析。获得冲头的冲击速度及冲击能量,并与高速摄影获得的结果进行对比,结果表明具有较好的一致性。

1 强脉冲磁场及电磁力的有限元分析

强脉冲磁场产生的原理是:通过高压储能电容器组对电感线圈放电,放电回路中获得近百 kA 的冲击电流,使线圈上产生强脉冲磁场,其原理如图 1 所示。

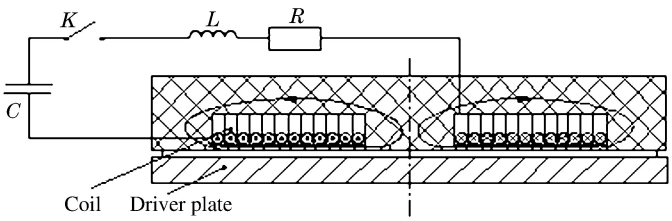

图 1 强脉冲磁场产生示意图

Fig. 1 Generation of high-power pulsed magnetic field

图 1 中,当开关闭合时,充电电压为 U 的电容器组(电容量为 C)对线圈放电,若回路中总电阻为 R(其值较小),回路总电感为 L,则放电电流 i 解析式如下:

* **收稿日期**:2015-01-13;**修回日期**:2016-01-20
基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB0128);
哈尔滨市创新人才专项基金项目(2009RFQXG063)
第一作者:赵志衡(1971—),男,博士,教授,zhzhhe@hit.edu.cn。

$$i=\frac{U}{\omega L}\mathrm{e}^{-\beta t}\sin\omega t \tag{1}$$

式中：$\beta=R/(2L)$，$\omega=\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}$，$\omega_0=1/\sqrt{LC}$。

电容器组电容值为 1 000 μF，充电电压为 10 kV 时（储能为 50 kJ），采用分流器实测[9]，获得的放电电流呈阻尼振荡形式，且衰减很快，第 1 峰值为 57.75 kA，周期约 1.9 ms，波形持续时间约 4 ms。

产生冲击载荷的装置如图 2 所示，图中线圈为圆盘状，外径 176 mm，匝数 20，线圈与驱动片间距 1.5 mm。线圈与电容器组相连接，当线圈中流过冲击电流时，产生强脉冲磁场，在该磁场作用下，驱动片上由于电磁感应产生涡流（感应电流），受冲击电磁力作用，带动与之固定在一起的冲头向下运动，经过一段自由行程的加速，对试件进行高速冲击。

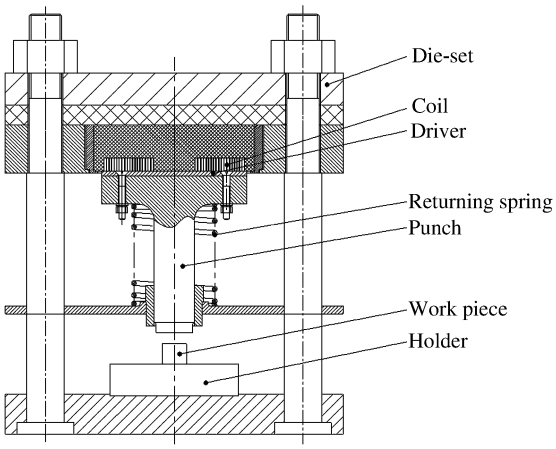

图 2 压缩冲击装置图

Fig. 2 Schematic of impact compression equipment

采用 ANSYS 有限元软件分析电磁力，考虑到对称性，对所求解场域 1/2 建模[10]，以实测的冲击电流作为线圈激励条件[11]，得到数值模拟结果如图 3～6 所示。图 3 为放电瞬间的磁场场景，磁感线为闭合曲线，密度从线圈由内而外迅速衰减。数值模拟结果表明，线圈与驱动片之间的窄缝内实现了磁通压缩，集中了大量磁感线，属于强磁场，且磁感应强度只含有径向分量。

图 4 为线圈及驱动片的电流密度分布，在驱动片上出现数值很大、与线圈电流方向相反的感应电流，且分布不均匀。感应电流的不均匀分布是由其磁场分布决定的。在线圈与驱动片之间，磁场只有径向分量，由于集肤效应[12]，渗入驱动片的磁场呈衰减分布。因而沿驱动片径向，在约 1/2 半径处电流最大；沿轴向，靠近线圈一侧电流明显大于另一侧，由内及外呈衰减分布。

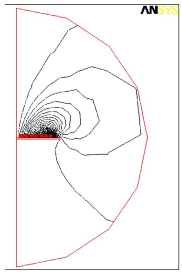

图 3 磁场场景图

Fig. 3 Magnetic flux line

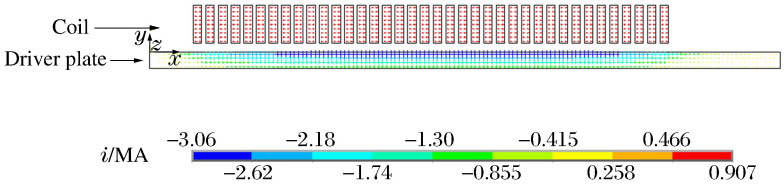

图 4 电流分布

Fig. 4 Distribution of current density

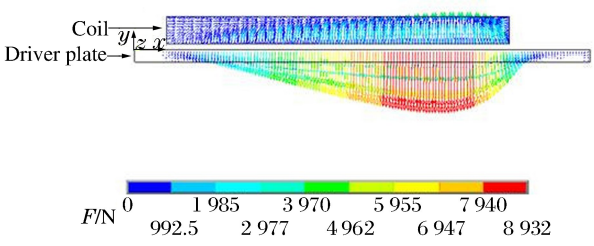

图 5 电磁力分布

Fig. 5 Distribution of electromagnetic force (EMF)

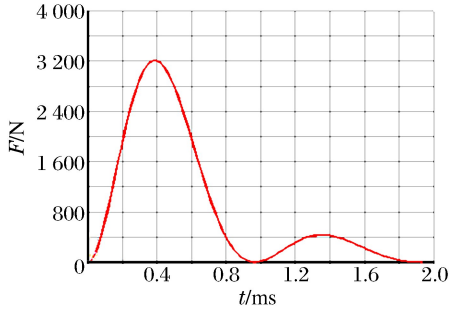

图 6 电磁力-时间曲线

Fig. 6 Curve of electromagnetic force vs. time

图 5 为驱动片所受电磁力的矢量分布,数值模拟结果表明驱动片主要受轴向电磁力的作用,径向分量很小。轴向电磁力沿驱动片半径方向分布不均匀,在距离中心约 3/4 半径处达到最大。

图 6 为驱动片上轴向电磁力随时间变化曲线,0～0.4 ms 内驱动片上受到的电磁力迅速上升达到峰值 3 200 N,0.4～1 ms 内电磁力迅速下降为 0;1～1.4 ms 内电磁力逐渐上升至 400 N,幅值远小于第 1 波峰;而后电磁力逐渐下降为 0。通过分析可知,驱动片受到连续脉冲力作用,但对冲击起主要作用的是第 1 波峰。

2 冲击的运动特性分析

强脉冲电磁力驱动的冲击,是运动和磁场耦合的过程,因此需采用耦合分析冲头的运动特性[13]。在 ANSYS/Multiphysics 中建立冲击模型,通过顺序耦合分析求解,得到设备工作电压 10 kV 时冲头的速度-时间曲线,如图 7 所示,对速度-时间曲线进行积分获得的冲头位移-时间曲线如图 8 所示。

由图 7 可知,0～0.8 ms 内冲头运动速度快速上升到约 37.5 m/s,0.8～1.2 ms 内运动速度基本保持不变;1.2～1.9 ms 内冲头的速度逐渐增大到约 42.5 m/s,增幅远小于 0～0.8 ms 期间。与实测的冲击电流对照可知,冲击速度在冲击电流前 2/5 周期内迅速增大,在之后的 3/5 周期内,速度继续上升,但加速度远小于前 2/5 周期。可见,冲头的加速过程主要集中在电流前 2/5 周期内,冲头速度的变化与数值模拟所获得的电磁力变化相吻合,参见图 6。

由图 8 可知,冲头位移随时间不断增大。通过对比图 7～8,可以确定不同时刻冲头的速度及位移,依此选择冲头的自由行程。

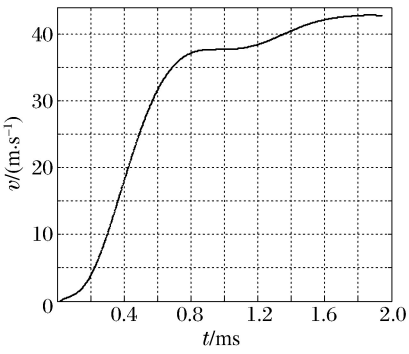

图 7 冲头速度-时间曲线

Fig. 7 Curve of punch velocity vs. time

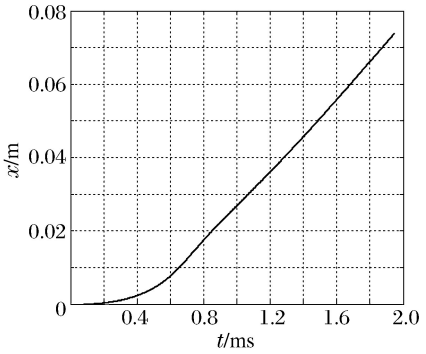

图 8 冲头位移-时间曲线

Fig. 8 Curve of punch location vs. time

数值模拟表明:强脉冲电磁力驱动的冲击装置瞬时输出功率大,适合于短时应用场合。理论分析表明,改变电容器组电容值、电压值,电感线圈的尺寸、匝数等参数可调节冲击电流的峰值及上升时间,进而实现对冲击载荷的控制。

所设计的冲击机构冲头自由行程为 16 mm,由图 8 可知,对应的时间约为 0.763 ms,由图 7 可知此时冲头运动速度 $v\approx36.67$ m/s,经计算冲头的冲击能量 E_k 为:

$$E_k=\frac{1}{2}mv^2=4.38\ \text{kJ} \tag{2}$$

式中:m 为驱动片及冲头质量,为 6.5 kg;v 为冲头速度,m/s。

3 冲击载荷的测试

试验设备的基本参数:电容器组电容值为 1 000 μF,最高工作电压 10 kV,最大储能 50 kJ。

采用 Photron 生产的型号为 FASTCAM SA5 1000K-M2 的高速摄像机测量该冲击载荷的速度[14]。设定 10 000 s^{-1}的拍摄速度。设备电压 10 kV(储能 50 kJ)时进行测试,不同时刻冲头位置图像如图 9 所示。

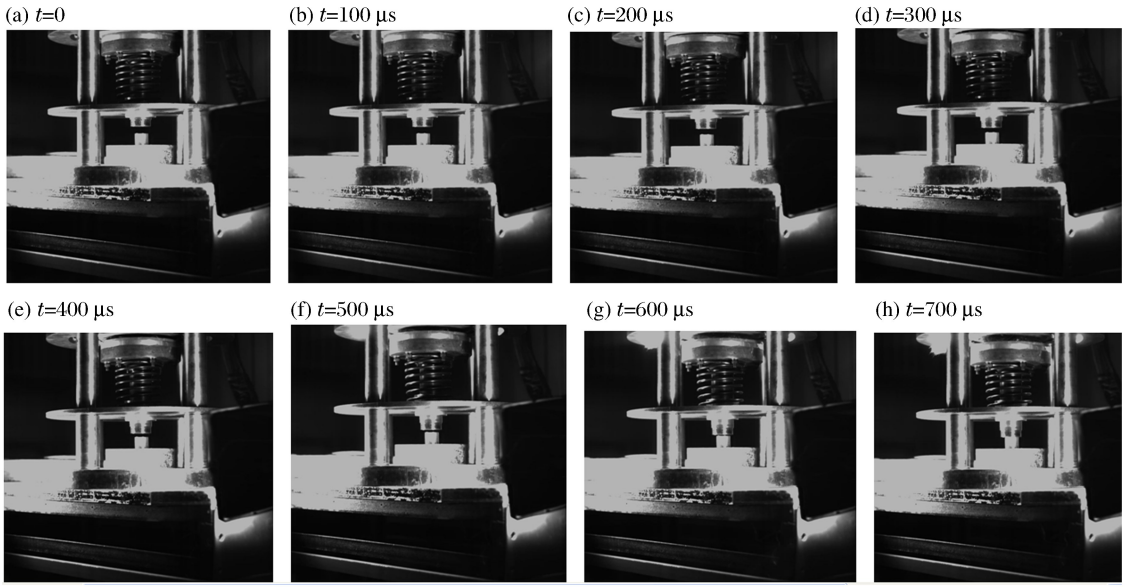

图 9　不同时刻冲头位置图

Fig. 9　Punch location at different time

将图片导入 CAD 软件，对冲头端部与试件间的距离 s 进行测量。再对相邻两幅图片中的距离做差，得到在时间间隔 $\Delta t = 10^{-4}$ s 内冲头所下落的位移 Δs。根据公式 $v = \Delta s / \Delta t$ 计算冲头下落速度，结果如表 1 所示。

由表 1 可知，冲头下落的最高速度 $v \approx 35.81$ m/s。代入驱动片及冲头质量，可得到冲击能量 $E_k = 4.17$ kJ，与有限元分析结果较为接近。

表 1　不同时刻位移速度测量结果

Table 1　Measured results of displacement and velocities at different time

s/mm	Δs/mm	v/m·s^{-1}
15.916		
15.714	0.202	2.02
15.207	0.202	2.02
13.324	1.833	18.33
10.627	2.697	26.97
7.214	3.413	34.13
3.581	3.633	36.33
0	3.581	35.81

4　结　论

(1)本文中所实现的强脉冲电磁力驱动的冲击载荷冲击速度达到 35.81 m/s 以上，冲击能量达到 4.17 kJ，是落锤所无法获得的。该冲击载荷具有冲击速度高、能量重复性好、易于精确调节(控制电容器的储能)、适合产生连续冲击(2～3 次/min)等特点。(2)理论分析表明，线圈中冲击电流所产生的强脉冲磁场，使驱动片受到很大的脉冲电磁力。改变电容器组电容值、电压值，电感线圈的尺寸、匝数等参数可调节冲击电流的峰值及上升时间，进而实现对冲击载荷的控制。(3)高速摄像实现了对冲击速度的测量，同时也展现了高速冲击过程中各元件的运动过程，为机构改进提供了必要的参考。

参考文献：

[1]　Jones N. Dynamic energy absorption and perforation of ductile structures[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2010,87(9):482-492.

[2]　Elmer W, Taciroglu E, McMichael L. Dynamic strength increase of plain concrete from high strain rate plasticity with shear dilation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012,45(7):1-15.

[3]　Lan S, Lok T S, Heng L. Composite structural panels subjected to explosive loading[J]. Construction and Building

Materials, 2005,19(5):387-395.
[4] Balanethiram V S, Daehn G S. Enhanced formability of interstitial free iron at high strain rates[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1992,27(12):1783-1788.
[5] Bach F W, Walden L. Microstructure and mechanical properties of copper sheet after electromagnetic forming[J]. ZWF Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2005,100(7/8):430-434.
[6] Hong S J, Koo J M, Lee J G, et al. Precompaction effects on density and mechanical properties of Al_2O_3 nanopower compacts fabricated by magnetic pulsed compaction[J]. Materials Transactions, 2009,50(12):2885-2890.
[7] Psyka V, Risch D, Kinsey B L, et al. Electromagnetic forming—A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011,211(5):787-829.
[8] Alves Z J R, Bay F. Magnetic pulse forming: Simulation and experiments for high-speed forming processes[J]. Advances in Materials and Processing Technologies, 2015,1(3/4):560-576.
[9] 陈景亮,姚学玲,孙伟.脉冲电流技术[M].西安:西安交通大学出版社,2008.
[10] 雷银照.轴对称线圈磁场计算[M].北京:中国计量出版社,1991.
[11] 周晓,刘军.电磁冲击加载平板线圈的有限元分析[J].机械科学与技术,2013,32(2):209-212.
Zhou Xiao, Liu Jun. Finite element analysis of panel coil loaded with electromagnetic impact[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013,32(2):209-212.
[12] Yu H P, Li C F. Effects of current frequency on electromagnetic tube compression[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009,209(2):1053-1059.
[13] 叶华华,刘正士,陈恩伟,等.基于 Ansys 的磁-结构耦合分析及应用[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2010,33(11):1733-1736.
Ye Huahua, Liu Zhengshi, Chen Enwei, et al. Analysis and application of magnetic-structural coupling based on ansys[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2010,33(11):1733-1736.
[14] 张三喜,姚敏,孙卫平.高速摄像及其应用技术[M].北京:国防工业出版社,2006.

Impact load driven by high-power pulsed electromagnetic force

Zhao Zhiheng[1], Ru Nan[1], Ma Yong[1], Zhang Chao[1], Li Chunfeng[2]
(1. *Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150001, *Heilongjiang, China*;
2. *School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150001, *Heilongjiang, China*)

Abstract: Impact load is applicable to material science and engineering. With the research development, there is a higher requirement for the impacting velocity and energy, which are however beyond what the drop hammer can achieve. High-power pulse current can therefore be utilized to set up an intense pulsed magnetic field, and then high-power pulsed electromagnetic force (EMF) can be generated with proper equipments and converted to the impact load desired. In the present work we simulated the generation of the impact load driven by high-power electromagnetic force. The simulation results of high-power pulsed magnetic field, EMF and the punch movement process were obtained through numerical modeling. The high speed photography was used to record the movement of the compressing impact device. Through the image processing, the value of the impact velocity and impact energy is obtained that verified the simulation results.

Key words: mechanics of explosion; impact load; electromagnetic force(EMF); high-power pulsed magnetic field; high-speed photography

(责任编辑 曾月蓉)