DOI: 10.11883/bzycj-2016-0394 文章编号: 1001-1455(2018)04-0863-06

轴向脉冲磁场增强金属射流侵彻穿深能力的因素*

孟学平,雷 彬,向红军,吕庆敖,黄 旭
(军械工程学院弹药工程系,河北 石家庄 050003)

摘要: 为掌握轴向脉冲磁场对金属射流的作用规律,基于破甲弹金属射流对目标的作用原理及磁场与金属射流之间的相互作用关系,设计了励磁线圈对破甲弹金属射流作用的试验系统,并开展了相关实弹试验,突破了金属射流形成和励磁线圈脉冲电流产生之间时序匹配的关键技术,得出了使金属射流发生有效变形的合理储能电容器组电参数和励磁线圈结构参数。试验结果表明,当电容器电压为 5 kV、电容为 1 200 μF、励磁线圈长度为 50 mm 时,破甲弹金属射流对目标靶板的侵彻穿深增量最大,破甲效果最佳;各因素对破甲弹金属射流侵彻穿深能力影响程度由大到小分别是电容器组充电电压、电容器组电容、线圈长度。研究成果为破甲弹威力电磁增强技术可行性论证、原理试验及励磁线圈结构设计提供了重要的理论和技术支撑。

关键词: 轴向脉冲磁场;破甲弹;金属射流;脉冲电流;励磁线圈
中图分类号: O389;TJ99 **国标学科代码**: 1303599 **文献标志码**: A

破甲弹(high-explosive anti-tank, HEAT)是一种有效的反坦克反装甲弹药,它利用成型装药的聚能效应来完成任务,在军事作战中发挥着重要作用。聚能装药爆炸产生爆轰波,金属药型罩在爆轰波作用下被压垮,导致其微元相继互相碰撞,从而形成细束的高速金属射流,射流尾部速度为 2 km/s,头部速度可达 10 km/s,高速金属射流可以有效摧毁敌方军事目标[1-4]。为了有效完成任务,科研人员通过改变药型罩、聚能装药、弹丸及战斗部的结构等来增强破甲弹的破甲作用[5-6]。然而,随着装甲防护技术的不断提升,需要在原有破甲弹基础上进一步增强其侵彻穿深能力。

磁场与金属射流间有强烈的相互作用,欧洲和美国专家对此进行了探究。Shvetsov 等[7-9]建立了被动电磁装甲对金属射流侵彻效果影响的定性物理模型,并通过数值计算和实验验证了被动电磁装甲对金属射流侵彻效果的减弱作用。2007 年,Fedorov 等[10]通过数值模拟和实验分析了破甲弹药型罩内预置磁场对金属射流的影响,发现金属射流在磁场作用下产生变形,金属射流的侵彻穿深能力降低。2010 年,Fedorov 等[11]研究了金属射流拉伸过程中的磁场稳定性,建立了金属射流在轴向脉冲磁场作用下的拉伸物理模型,分析了线圈脉冲磁场对金属射流变形过程的影响,对金属射流在轴向脉冲磁场作用下的延长进行了预测,最后探讨了金属射流不同部位在轴向脉冲磁场作用下有效长度的增加程度。2013 年,Fedorov 等[12]分析了被动电磁装甲对金属射流侵彻效果的影响,证明了被动电磁装甲可对金属射流进行有效箍缩,加速金属射流断裂,进而减弱破甲弹的破甲作用效果。2014 年,Fred 等[13]采用在药型罩中加载脉冲电流产生脉冲磁场作用于金属射流的方法,研究了电磁能对金属射流的作用效果,验证了当脉冲电流峰值达到兆安级时,可以产生高质量金属射流。

1 试验原理、系统构成及时序匹配设计

1.1 试验原理

图 1 为励磁线圈磁场对破甲弹金属射流的作用原理图。雷管起爆聚能装药,进而压垮药型罩,产生

* 收稿日期: 2016-12-26; 修回日期: 2017-04-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(51307182)
第一作者: 孟学平(1988—),男,博士研究生,mxp19880104@163.com。

长径比很大、沿轴向高速飞行的金属射流，由于存在轴向速度梯度，金属射流在飞行过程中会发生局部变细甚至断裂，一旦发生断裂，其对装甲目标的侵彻穿深能力会大幅下降。在金属射流发生局部变细但尚未断裂的过程中，可以在金属射流外部通过励磁线圈施加轴向脉冲磁场。一方面，脉冲磁场能够产生较大的感应电流，感应电流的欧姆热效应能够引起金属射流温度升高，进而导致金属射流材料软化和等效流动极限降低；另一方面，脉冲磁场可以使得金属射流的凸起部分产生较大的磁压力，该磁压力能够使金属射流凸起部分产生有效箍缩形变，减小金属射流直径差，从而增长金属射流均匀拉伸时间，延缓破甲弹金属射流局部变细至断裂的过程，维持金属射流形成至着靶过程中的整体性和连续性，增强金属射流的穿深破甲能力，最终实现有效增强破甲弹威力的目的。

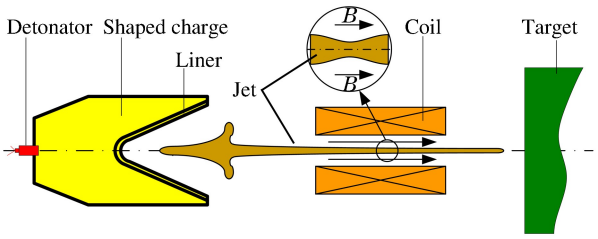


图 1 线圈磁场对破甲弹金属射流的作用原理

Fig. 1 Action principle of magnetic field of coil on shaped charge jet of HEAT

金属射流某处所受磁压力可以表示为：

$$p_{\mathrm{m}}=\frac{B_{\mathrm{e}}^{2}(t)}{2\mu_{0}}-\frac{2}{R^{2}}\int_{0}^{R}\frac{B^{2}(r,t)}{2\mu_{0}}r\,\mathrm{d}r \tag{1}$$

式中：p_{m} 为金属射流表面磁压力，B_{e} 为轴向脉冲磁场，$B(r,t)$ 为感应电流引起的磁场，μ_{0} 为真空磁导率，R 为金属射流某处横截面半径。

当轴向脉冲磁场频率达到一定数值时，受趋肤效应影响，金属射流所受体电磁力主要集中在表层，而内部电磁力很小，故体电磁力可等价于金属射流表面的磁压力。该磁压力可表示为：

$$p_{\mathrm{m}}=\frac{B_{\mathrm{e}}^{2}(t)}{2\mu_{0}}$$

要使金属射流发生变形，其所受磁压力应大于金属射流材料流动极限 σ_{Y}，即满足 $p_{\mathrm{m}}>\sigma_{\mathrm{Y}}$。通过控制轴向脉冲磁场的幅值和脉宽，可实现磁压力调节，使金属射流凸起部分和凹陷部分形成较大的磁压力差，减小金属射流表面扰动，对颈缩发展进行有效延缓，最终增强金属射流的侵彻穿深能力。

1.2 系统构成

励磁线圈对破甲弹金属射流作用的试验系统主要由充放电子系统、破甲弹本体子系统和控制子系统 3 部分组成，如图 2 所示。充放电子系统主要由充电机、储能电容器、三电极开关、励磁线圈及电流测量装置构成，可以产生脉冲电流，并通过励磁线圈产生轴向脉冲磁场；破甲弹本体子系统主要由火雷管、聚能装药金属射流及钢制靶板等部分构成，主要用于产生金属射流；控制子系统主要由控制电容器、总控开关、脉冲变压器、电雷管及导爆索等构成，可以用于控制主放电回路接通和雷管起爆，通过总控开关及延时控制开关（包括电雷管和导爆索）调节三电极开关及火雷管起爆的时序，保证火雷管起爆前励磁线圈内部已经建立足够强的磁场，以满足研究脉冲磁场对破甲弹金属射流的作用规律的需要。

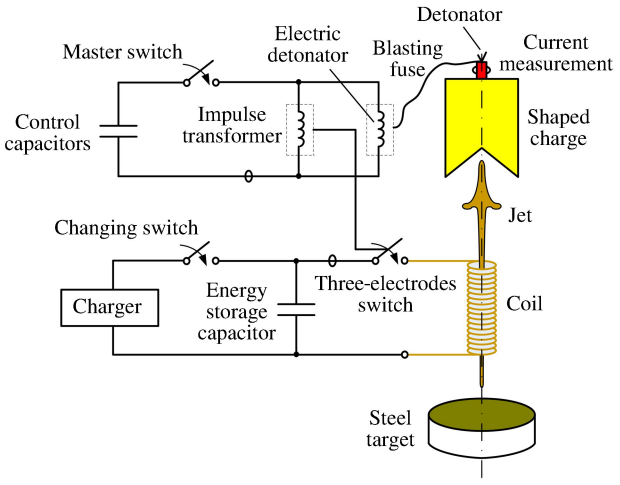


图 2 励磁线圈对破甲弹金属射流作用的试验系统

Fig. 2 Experiment system of effect of pulse current on shaped charge jet

1.3　时序匹配设计及测试试验

在该试验中，如何控制金属射流形成与放电电流产生之间的时序是一项关键技术，通过前期查阅资料和相关实验可知，破甲弹本体从火雷管起爆到金属射流形成的时间为几微秒，而试验用脉冲电容器组放电半周期在百微秒以上，因此，必须合理控制二者的时序。由于金属射流产生变形需要足够的磁压力，而电容器组的放电电流为脉冲电流，故理想情况是电容器放电一段时间后，再起爆破甲弹本体雷管产生金属射流，这里拟采用延时控制装置，延时控制装置需满足精确调配雷管起爆时间，从而使金属射流产生时刻精确可控，便于试验开展。

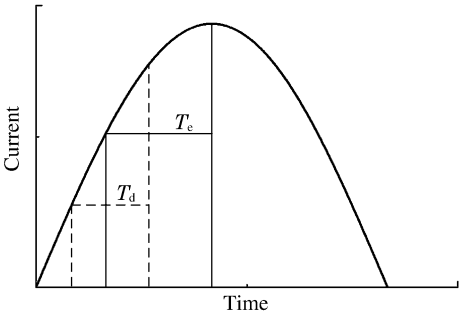


图 3　延时控制时序

Fig. 3　Time sequence of delay control

如图 3 所示，T_d 表示起爆火雷管时刻 t_d 所处的时间范围，T_c 表示励磁线圈磁场可对金属射流产生有效作用的时间范围。在延时控制时序设计时，由于破甲弹金属射流的形成时间较短，故应该首先由电容器组经过励磁线圈放电，形成脉冲磁场，再起爆火雷管形成金属射流，初步设计起爆火雷管时刻位于 T_d 之间，这样即可保证脉冲磁场对金属射流的有效作用时间落在 T_c 内。设电雷管的延时时间为 t_{ed}，根据试验情况，确定电容器组放电和火雷管起爆合理时序应为延时控制器的延时时间 t_c，即

$$t_c = t_{switch} + t_{ed} \tag{3}$$

式中：t_{switch} 为三电极开关的延时时间。通过反复试验得知，主电路的导通时刻与电容器组的充电电压密切相关，充电电压越高，三电极开关两个主电极间电压越高，进而使得三电极开关主电极间发生电场畸变可能性增大，主电路越容易导通，控制电路与主电路之间的时间差越小。为保证金属射流发生可靠变形，对控制电路与主电路的放电时序进行反复测试，进而确定放电时序范围，如表 1 所示。

表 1　不同充电电压下破甲弹起爆的延时时序

Table 1　Delay time sequence of HEAT firing under different charge voltage

充电电压/kV	t_c/μs	充电电压/kV	t_c/μs	充电电压/kV	t_c/μs
3	926～1 041	5	418～533	6	368～483

2　试验结果及分析

为验证励磁线圈脉冲电流对破甲弹金属射流的作用效果，共进行了 10 次试验，如表 2 所示。其中：U 为充电电压，L 为励磁线圈长度，C 为电容器电容，B 为数值模拟得到的磁感应强度，d 为靶板穿深。1～4 号试验主要分析不加电情况下励磁线圈对破甲弹金属射流侵彻穿深能力的影响。从试验结果可以看出，在破甲弹与目标靶板之间放置励磁线圈能够提高金属射流的侵彻能力，但影响较小，随着励磁线圈长度增加，金属射流对目标靶板的穿深减小。

为了更直观地表示励磁线圈脉冲电流对金属射流的作用效果，引入靶板穿深增量 η，其表达式为：

$$\eta = (d - d_0)/d_0 \times 100\% \tag{4}$$

式中：d 为靶板穿深，d_0 参考试验的靶板穿深。

对比 2、6、8 号试验结果，以 2 号试验为参考试验，6 号和 8 号试验的靶板穿深增量分别为 0.2% 和 37.4%；对比 3、5、7 号试验，以 3 号试验为参考试验，5 号和 7 号试验的靶板穿深增量分别为 0.3% 和 44.4%；对比 4、10 号试验，以 4 号试验为参考试验，10 号试验的靶板穿深增量为 12.3%。由以上分析可得：励磁线圈脉冲电流对金属射流起整形作用；随着电容器组电压的增大，金属射流对目标靶板的穿深逐渐提高。当电容器电压为 3 kV 时，对应的励磁线圈脉冲电流为 39.42 kA，此时励磁线圈脉冲电流

对金属射流的靶板穿深的提高作用不明显。当电容器电压升至 5 kV 时，对应的励磁线圈脉冲电流为 68.39 kA，此时靶板穿深提高明显。当电容器电压为 6 kV 时，对应的励磁线圈脉冲电流为 118.67 kA，此时靶板穿深增量介于 3 kV 和 5 kV 对应的增量之间。这是由于虽然电压较高，但是励磁线圈长度较大，引起放电回路电感和电阻增加，使磁感应强度变化率减小，从而减弱了金属射流的侵彻穿深。

表 2 试验原始数据

Table 2 Experiment data

No.	U/kV	L/mm	C/μF	B/T	d/mm	No.	U/kV	L/mm	C/μF	B/T	d/mm
1	0	0	0	0	52.10	6	3	50	1 200	9.74	56.20
2	0	50	0	0	56.08	7	5	100	1 200	14.84	77.90
3	0	100	0	0	53.96	8	5	50	800	14.63	77.04
4	0	150	0	0	52.90	9	5	50	1 200	17.25	97.80
5	3	100	800	9.68	54.10	10	6	150	1 200	10.51	58.94

基于试验设计开展了数值模拟研究，励磁线圈加载脉冲电流峰值为 30～70 kA。图 4 和图 5 分别给出了不同脉冲电流幅值(充电电压)下金属射流磁感应强度和有效应变的变化规律。根据数值模拟和试验结果分析可知，当磁感应强度大于 12 T 时，脉冲电流峰值大于 50 kA 时，金属射流有效应变较明显。当励磁线圈脉冲电流频率足够大时，磁感应强度对金属射流侵彻穿深能力的影响可从两方面进行分析：一方面，磁感应强度幅值主要反映金属射流所受磁压力大小，磁感应强度幅值越大，金属射流所受磁压力越大，金属射流凸起部分所受磁压力总和大于凹陷部分所受磁压力总和，故金属射流材料在该磁压力差作用下由凸起部分流向凹陷部分，减小金属射流直径差，进而延缓其局部变细至断裂的过程；另一方面，当脉冲电流峰值为 70 kA 时，对应的励磁线圈电压大于 5 kV，此时不仅磁感应强度幅值达到最大值，对应的磁感应强度变化率也最大，金属射流中磁感应强度变化率直接反映励磁线圈磁场变化率，金属射流中磁感应强度变化率越大，证明励磁线圈脉冲电流变化率越大，金属射流中产生的感应电流越大，根据 $\mathrm{d}\boldsymbol{F}=\boldsymbol{j}\times\boldsymbol{B}\mathrm{d}V$ 可知，对应的金属射流所受电磁力越大，进而更容易发生变形，最终使得破甲弹金属射流对目标的侵彻穿深增加更大。

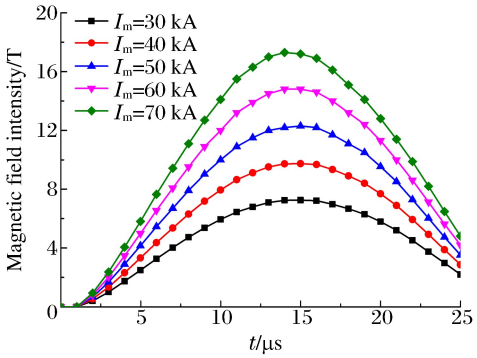


图 4 不同脉冲电流幅值下磁感应强度随时间的变化

Fig. 4 Variation of magnetic flux intensity with time under different amplitudes of pulse current

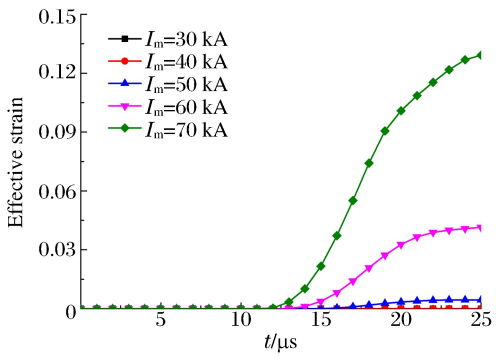


图 5 不同脉冲电流幅值下金属射流应变随时间的变化

Fig. 5 Variation of effective strain of shaped charge jet with time under different amplitudes of pulse current

为了进一步掌握充电电压、线圈长度及电容器组电容 3 个参数对破甲弹金属射流侵彻穿深能力的影响，运用正交试验法设计了 3 因素 2 水平正交试验(见表 3)。按照正交试验的设计规则，共设计了 4 次试验，并记录试验结果，如表 2 中 5～8 号试验所示。

表 3 正交试验因素水平表

Table 3 Orthogonal factor level table

因素水平	U/kV	L/mm	C/μF
1	3	50	800
2	5	100	1 200

正交试验结果可以通过表 4 进行分析。其中 $K_{1,\mathrm{ave}}$ 和 $K_{2,\mathrm{ave}}$ 分别表示第 j 列因素取表 3 中水平 1 和水平 2 时进行试验所得结果(侵彻穿深)的平均值，由此可得第 j 列因素的极差 R 为：

$$R = |K_{1,\mathrm{ave}} - K_{2,\mathrm{ave}}| \tag{5}$$

极差反映了各因素水平对指标的影响程度，极差值越大，表明该因素的水平变化对试验指标的影响越大，该因素越重要。由表 4 可以看出，$R_U > R_C > R_L$。由此可知，对破甲弹金属射流侵彻穿深能力影响程度由大到小是电容器组充电电压、电容器组电容、线圈长度。根据正交试验的结果可以推出，最佳参数组合为 5 kV、50 mm、1 200 μF。因此，需对该组参数组合重新进行一次试验，试验结果如表 2 中第 9 号所示，得到金属射流对目标靶板的穿深为 97.80 mm，以 2 号试验为参考试验，该组参数的靶板穿深增量为 74.4%，验证了正交试验所得结论。

表 4 极差分析

Table 4 Range analysis

分析结果	侵彻深度指标		
	U	L	C
$K_{1,\mathrm{ave}}$	55.15	66.62	66.57
$K_{2,\mathrm{ave}}$	77.74	66.00	67.05
R	22.59	0.62	1.48

3 结　论

(1) 轴向脉冲磁场对破甲弹金属射流作用效果显著，可有效控制破甲弹金属射流变形，增加金属射流对后效靶板目标的侵彻穿深。

(2) 轴向脉冲磁场对破甲弹金属射流侵彻穿深能力影响大小与电容器电压、电容器电容及励磁线圈长度等参数密切相关。根据正交试验结果可得，各因素对破甲弹金属射流侵彻穿深能力影响程度从大到小依次是电容器组充电电压、电容器组电容、线圈长度。

(3) 通过总控制开关同时控制破甲弹火雷管起爆和控制回路三电极开关触发，运用电雷管和导爆索延时控制火雷管起爆，保证金属射流进入励磁线圈之前，线圈内部已建立足够强的轴向脉冲磁场，脉冲磁场产生的欧姆热效应使金属射流材料发生软化，磁压力对金属射流进行有效压缩，以减小金属射流由于速度梯度引起的直径差，延缓金属射流的断裂过程，增强其对装甲等目标的侵彻穿深能力。

参考文献：

[1] 陈少辉，李治源，雷彬，等. 大气/钢靶板交界处对平行入射聚能射流干扰的数值模拟[J]. 爆炸与冲击，2011，31(6)：630-634.
CHEN Shaohui, LI Zhiyuan, LEI Bin, et al. Numerical simulation of air/steel target interface effects on parallel injecting shaped charge jet[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(6): 630-634.

[2] 孙承纬. 爆炸物理学[M]. 北京：科学出版社，2011：1048-1061.

[3] 武双章，顾文彬，李旭锋. 楔形罩线型聚能装药侵彻钢锭[J]. 爆炸与冲击，2016，36(3)：353-358.
WU Shuangzhang, GU Wenbin, LI Xufeng. Penetration of steel ingot by linear shaped charge with cuniform cove [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(3): 353-358.

[4] 祖旭东，黄正祥，贾鑫. 橡胶复合靶板抗射流侵彻的理论和实验研究[J]. 爆炸与冲击，2012，32(4)：376-383.
ZU Xudong, HUANG Zhengxiang, JIA Xin. Theoretical and experimental study on rubber composite armor anti-shaped charge jet penetration[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(4): 376-383.

[5] KARLSSON H. Computer simulation of shaped charge jet fragmentation[C]// The 19th International Symposium on Ballistics. Interlaken, Switzerland, 2001: 819-826.

[6] HORSFALL I, PETROU E, CHAMPION S M. Shaped charge attack of spaced and composite armour[C]// The 23th International Symposium on Ballistics. Tarragona, Spain, 2007: 1281-1288.

[7] SHVETSOV G A, MATROSOV A D, FEDOROV S V, et al. Electromagnetic control of the shaped-charge effect [C]// The 19th International Symposium of Ballistics. Interlaken, Switzerland, 2001:851-857.

[8] SHVETSOV G A, MATROSOV A D. Qualitative physical model for the disruption of shaped-charge jets by a current pulse[C]// The 20th International Symposium on Ballistics. Orlando, Florida, 2002:613-619.

[9] SHVETSOV G A, MATROSOV A D, FEDOROV S V, et al. Effect of external magnetic fields on shaped-charge operation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011:521-526.

[10] FEDOROV S V, BABKIN A V, LADOV S V, et al. Magnetic armor as a method of anti-terror protection of objects against shaped-charge action[C]// The 23th International Symposium on Ballistics. Tarragona, Spain, 2007: 1091-1098.

[11] FEDOROV S V. Magnetic stabilization of elongation of metal shaped charge jets[C]// The 25th International Symposium on Ballistics. Beijing, China, 2010:967-975.

[12] FEDOROV S V, LADOV S V. Powerful electric discharge as method of anti-shaped-charge protection[C]// The 27th International Symposium on Ballistics. Freiburg, Germany, 2013:1723-1734.

[13] FRED G, JAMES D, CHRIS R, et al. Shaped charge jets driven by electromagnetic energy[C]// The 28th International Symposium on Ballistics. Atlanta, Georgia, 2014:15-26.

Effect of axial pulse magnetic field on shaped charge jet action

MENG Xueping, LEI Bin, XIANG Hongjun, LÜ Qing'ao, HUANG Xu

(*Department of Ammunition Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang* 050003, *Hebei*, *China*)

Abstract: In order to understand the effect of axial pulse magnetic field on the shaped charge jet (SCJ), we designed an experiment system and carried out related experiments based on the mechanism of a high-explosive anti-tank (HEAT) penetrating a target and the interaction between the magnetic field and SCJ, and came up with the key technology to match the time sequence between the formation of SCJ and the pulsed current generation of the coils, which was a major breakthrough. The experiment results show that the increment of the penetration depth for SCJ penetrating the target is largest when the voltage is 5 kV, the capacitor is 1 200 μF and the length of coil is 50 mm. The influence factors of the penetration depth are respectively the charging voltage of the capacitor, the capacitance and the coil length, each in a descending order. These results provide an important theoretical foundation and technical support for the feasibility demonstration, principle test and related physical design of the coil of the enhanced HEAT by the electromagnetic method.

Keywords: axial pulse magnetic field; high-explosive anti-tank (HEAT); shaped charge jet; pulse current; coil

(责任编辑 王玉锋)