复合纤维材料在预制破片弹上的应用

赵丽俊[1],毛 亮[2]

1. 北方华安工业集团有限公司国营第 123 厂技术部,黑龙江齐齐哈尔 161046
2. 北京航空航天大学宇航学院,北京 100083

摘要 为提高预制破片弹丸携带的有效载荷量,增强其综合毁伤威力,采用理论与试验相结合的方法对复合纤维材料代替金属材料作为预制破片包覆层的发射强度进行了计算分析。结果表明,在高过载条件下,碳纤维 T700S 和钢材料作为包覆层材料均能满足强度要求,而 E 玻璃纤维作为包覆层材料则不能满足。此外,使用复合纤维材料的成本也比钢材料要低。研究结果对复合纤维材料在相关弹药上的应用前景具有重要的参考意义。

关键词 预制破片弹;发射强度;复合纤维材料;有效载荷

中图分类号 TJ412.+3 **文献标志码** A **doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.22.003

Fiber Composite Material Application on Prefabricated Fragment Projectile

ZHAO Lijun[1], MAO Liang[2]

1. North Hua´an Industrial Group Co., Ltd., Heilongjiang Qiqihar 161046
2. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100083

Abstract In order to increase the effective payload of the prefabricated fragment projectile and enhance the comprehensive damage power, this paper studies the launching strength of the prefabricated fragment covering layer using fiber composite materials instead of metal materials both theoretically and experimentally. The results show that the covering layer using the carbon fiber T700S and the steel can satisfy the strength requirements, but not by using the E glass fiber under the high overload. By the way, the cost of fiber composite materials is lower than that of the steel. The research result can be used to evaluate the application prospect of the correlation ammunition using the fiber composite materials.

Keywords prefabricated fragment projectile; launching strength; fiber composite material; effective payload

0 引言

随着材料科学技术日新月异的进步,各种复合纤维材料得到了迅速的发展,由于其具有高比强度、高比模量、耐高温、耐腐蚀、耐疲劳、膨胀系数小、密度小等优异性能,成为当今世界首选的高性能材料[1,2]。目前,复合纤维材料已经广泛用于航天、军工、体育、医疗等领域,在国内武器装备中也得到了广泛应用,如先进的运载火箭、导弹战斗部、发动机壳体、发射筒等均已采用了复合纤维材料,并获得了良好的使用和实战效果。表 1 中列出了几种常见复合纤维材料的性能参数。

当前,中国现役的预制破片弹通常是采用钢质套筒来固定预制破片环(图 1),钢质套筒的存在会使弹丸携带的有效载荷降低,且不利于弹丸的结构强度和威力设计。若复合纤维材料能够代替钢质套筒,则为提高弹丸结构强度和增大预制破片尺寸优化设计空间提供了条件,有利于提高弹丸的综合杀伤威力。因此,本文从理论和试验两方面对 E 玻璃纤维和碳纤维 T700S 在预制破片弹上的应用进行了研究。

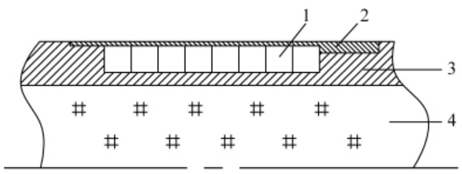
收稿日期:2012-12-07;修回日期:2013-05-28

作者简介:赵丽俊,工程师,研究方向为弹药工程,电子信箱:zhaolijun7827@126.com;毛亮(通信作者),博士后,研究方向为弹药总体技术及毁伤效能评估,电子信箱:maoliang6419@163.com

表 1 常见的复合纤维材料的性能参数

Table 1 Parameters of some fiber composite materials performance

纤维名称	密度/($g\cdot cm^{-3}$)	拉伸强度/MPa	拉伸模量/GPa	延伸率/%
E 玻璃纤维	2.54	1000~3000	70	2.5~4
2# 玻璃纤维	2.54	3000~3400	83~85	—
S 玻璃纤维	2.49	4600	88	—
硼玻璃纤维	3.90	3500	330~400	0.5~0.8
芳纶 I	1.44	2600~3300	90~120	2~3.2
芳纶 II	1.465	2800~3400	150~160	1.8~2.2
凯夫拉	1.43~1.44	3200	61.8	1.43~1.44
碳纤维 T500	1.74	3200	250	1.3
碳纤维 T600	1.79	4150	250	2.0
碳纤维 T700S	1.8	4900	230	2.1



1—预制破片,2—薄壁套筒,3—弹体,4—装药

图 1 预制破片弹结构示意

Fig. 1 Sketch map of configuration of prefabricated fragment projectile

1 发射强度理论分析

对于采用线膛火炮发射的预制破片弹丸,弹丸出炮口时将会获得一定的初速和转速,在出炮口后,由于离心力的作用,可能将包覆套筒及预制破片环从弹体上腾开[3~5]。这就会影响弹丸在空中飞行时的外弹道性能,造成毁伤威力的降低。下面将从理论上对包覆层的受力进行分析,建立包覆层承受径向拉应力的计算方法,并以某预制破片弹为例,选取包覆层材料为 35CrMnSiA、E 玻璃纤维及碳纤维 T700S 进行了详细计算。

1.1 包覆层的受力分析

弹丸在出炮口时,由离心力在包覆层以及预制破片断面上都将产生撕破力。以包覆层产生的撕破力计算为例,在环形的包覆层上,坐标位置为 dφ 角处,取质量为 dm 的扇形微元体,如图 2 所示。

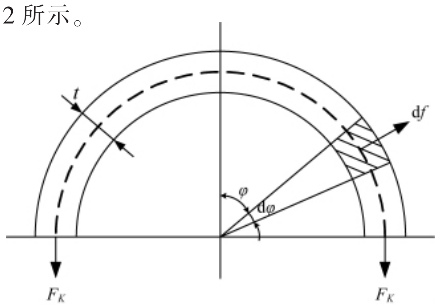


图 2 环形包覆层

Fig. 2 Annular covering layer

则此微元体在出炮口瞬间的离心力 df 为

$$\mathrm{d}f=\mathrm{d}mr\omega_0^2 \tag{1}$$

式中,r 为包覆层微元体平均半径,m;ω_0 为出炮口时弹丸的角速度,rad/s。

由于 $\omega_0=\frac{\pi}{\eta r}v_0$ 和 $\mathrm{d}m=B_K t_K r\rho_K \mathrm{d}\varphi$,得

$$\mathrm{d}f=B_K t_K\rho_K\left(\frac{\pi v_0}{\eta}\right)^2\mathrm{d}\varphi \tag{2}$$

式中,B_K 为包覆层总宽度,m;t_K 为包覆层厚度,m;ρ_K 为包覆层材料密度,$kg\cdot m^{-3}$;v_0 为出炮口时弹丸速度,m/s;η 为火炮缠度。

则离心力在包覆层断面上产生的撕破力为

$$F_K=\int_0^{\frac{\pi}{2}}\cos\varphi\,\mathrm{d}f=B_K t_K\rho_K\left(\frac{\pi v_0}{\eta}\right)^2 \tag{3}$$

同理可知,预制破片环上产生的撕破力为

$$F_W=B_W t_W\rho_W\left(\frac{\pi v_0}{\eta}\right)^2 \tag{4}$$

式中,B_W 为预制破片环总宽度,m;t_W 为预制破片环厚度,m;ρ_W 为预制破片密度,$kg\cdot m^{-3}$。

由此可知,包覆层所受径向拉应力 σ_p 为

$$\sigma_p=\frac{F_W+F_K}{S_K} \tag{5}$$

式中,S_K 为包覆层的纵向横断面积,$S_K=B_K t_K$,m^2。

预制破片包覆层采用复合纤维材料制造时,一般采用单股或多股复合纤维材料进行缠绕多层,然后经保温固化后机加车制而成,有一定的含胶量。本文采用 E 玻璃纤维缠绕时,用 2 股缠绕 22 层;采用碳纤维 T700S 时,用 3 股缠绕了 24 层。

考虑到复合纤维缠绕的包覆层含胶量 β 对极限抗拉强度的损失,则复合纤维包覆层的极限抗拉强度 σ_{pb} 为

$$\sigma_{pb}=\sigma_b(1-\beta) \tag{6}$$

式中,σ_b 为单股复合纤维的拉伸断裂强度,$\sigma_b=\frac{F_b}{S}$,Pa;F_b 为单股纤维的拉伸断裂强力,N;S 为单股纤维的横截面积,$S=\frac{\pi}{4}d^2$,m^2;d 为单股纤维的直径,$d=\sqrt{\frac{4m}{\pi\rho_l\rho_v}}$,m;$m$ 为单位长度复合纤维的质量,kg;ρ_l 为复合纤维的线密度,kg/m;ρ_v 为复合纤维的体积密度,$kg\cdot m^{-3}$。

1.2 包覆层径向拉应力计算

由 1.1 节分析可知,将包覆层所用材料的各项性能参数及发射时火炮环境参数代入以上各式,便可计算得到发射时包覆层所受的径向拉应力。表 2 给出了 3 种材料的各项性能参数,表 3 为包覆层径向拉应力计算所得的结果。

从表 3 得知,E 玻璃纤维缠绕套筒所受到的径向拉应力近似等于 E 玻璃纤维缠绕套筒极限抗拉强度,因此在正常射击时会导致发射强度欲度不足的现象。而碳纤维 T700S 缠绕套筒所受到的径向拉应力远小于自身的极限抗拉强度,在强

表 2　包覆层材料的各项性能参数

Table 2　Parameters of covering layer material performance

材料属性	E 玻璃纤维	碳纤维 T700S	35CrMnSiA
$\rho_l/(\mathrm{g\cdot m^{-1}})$	1.2	0.776~0.824	—
$\rho_v/(\mathrm{kg\cdot m^{-3}})$	2540	1760~1840	7810
B_K/m	0.084	0.084	0.084
t_K/m	0.0025	0.0025	0.0025
B_W/m	0.0735	0.0735	0.0735
t_W/m	0.0075	0.0075	0.0075
F_b/(N·股$^{-1}$)	540	2400	—

表 3　包覆层径向拉应力计算结果

Table 3　Calculation result of tensile stress of covering layer

计算参数	E 玻璃纤维	碳纤维碳 T700S	35CrMnSiA
d/mm	0.776	0.752	—
S/mm^2	0.473	0.4439	—
σ_b/MPa	1141.65	5406.62	—
F_W/kN	159.37	221.96	221.96
F_K/kN	8.52	8.596	36.485
S_K/mm^2	210.0	210.0	210.0
σ_p/MPa	799.5	1097.88	1230.69
σ_{pb}/MPa	799.2	4325.3	—

装药条件下射击,弹丸结构强度满足使用要求,且有较大的安全欲度。由于钢材料的屈服极限试验值[6]为 $\sigma_s\approx1260$MPa,因此,在强装药条件下,其发射强度基本满足使用要求,但安全欲度较小。

综上分析,35CrMnSiA、E 玻璃纤维及碳纤维 T700S 3 种材料作为预制破片的包覆层,其承受过载能力最大的是碳纤维包覆层,其次是钢质套筒,最后是 E 玻璃纤维。因此,碳纤维是用在高初速、高膛压身管弹药上的最优材料之一。

2　试验验证

试验是对理论分析进行验证的最好方法,通过试验可以验证设计的合理性和可行性。在某型预制破片榴弹上,采用了以上 3 种典型材料作为预制破片的包覆层,并分别进行了弹丸结构的强度试验。

2.1　试验方案及条件

试验正式射击共 4 发,其中,E 玻璃纤维缠绕结构射击 1 发、碳纤维 T700S 缠绕结构射击 2 发、钢质套筒结构射击 1 发。试验过程中,通过固定的仪器设备测量膛压、初速和射程。

2.2　试验结果与分析

弹丸发射以后,在弹道终点处回收到弹体,并检测了预制破片的包覆层是否破损以及预制破片是否脱落。回收的弹体形状如图 3~图 5 所示。

图 3　E 玻璃纤维缠绕弹体

Fig. 3　E glass fiber layer

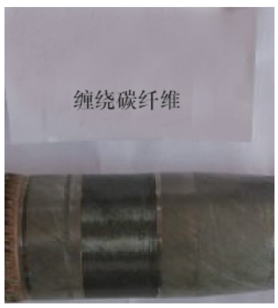


图 4　碳纤维 T700S 缠绕弹体

Fig. 4　Carbon fiber T700S layer

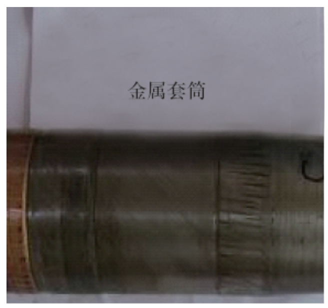


图 5　钢质套筒包覆弹体

Fig. 5　Steel layer

检测后的结果统计如表 4 所示。从表 4 可知,E 玻璃纤维包覆结构的弹丸在 1 号装药条件下射击,缠绕筒和预制破片环均脱落,发射强度不满足要求;而碳纤维 T700S 和钢质套筒包覆结构的弹丸在 0 号强装药条件下射击,缠绕筒完好且预制破片环未脱落,发射强度满足要求。

表 4　强度试验结果统计

Table 4　Statistical table of strength experiment result

射序	包覆层材料	装药号	初速度/(m·s^{-1})	落点距离/m	膛压/MPa	试验结果
1	E 玻璃纤维	1	804.9	5500	379	E 玻璃纤维撕裂,预制破片环脱落,强度不满足要求
2	碳纤维 T700S	0	950.1	6500	380	碳纤维 T700S 未撕裂,预制破片环未脱落,强度满足要求
3	碳纤维 T700S	0	949.3	6500	381	碳纤维 T700S 未撕裂,预制破片环未脱落,强度满足要求
4	35CrMnSiA	0	948.7	6000	382	钢质套筒未撕裂,变形量满足要求;预制破片环未脱落,强度满足要求

3 讨论与结论

通过对几种复合纤维材料作为某型预制破片弹的破片包覆层的理论分析与试验研究,得到以下结论。

(1)在高膛压、高初速身管火炮弹药上,钢质套筒和碳纤维包覆层均能满足发射强度的要求,E 玻璃纤维不能满足发射强度要求;而在发射过载较小的弹药上,如导弹战斗部、火箭战斗部及低初速身管火炮弹药上,可以考虑应用 E 玻璃纤维。

(2)从成本上分析,钢质套筒材料的价格大约为 40 元/kg,单发试验弹约需要 8kg 材料;碳纤维 T700S 的价格大约为 300 元/kg,单发试验弹约需要 0.3kg 材料;玻璃纤维的价格大约为 70 元/kg,单发试验弹约需要 0.3kg 材料,结合加工工艺等因素综合考虑可知,应用复合纤维材料的生产成本较低。

(3)弹药的长储性是弹药重要的战技指标,而发生在长储过程中的老化现象会使力学性能降低。根据相关文献报道[7],某纤维制造的工作艇下海超过 15a,拉伸强度仍保留 80%以上,弯曲强度保留 50%以上,而且冲击强度的变化也不是很大。因此,在结构设计时取较大的安全欲度,是可以弥补长储过程中因强度不足而导致性能的下降。

(4)复合纤维材料在弹药上的应用,应加强相容性问题研究,据相关文献报道[8],经过长期试验,在技术上已经取得进步,如涂漆、表面处理或嵌入防护膜等措施,但有待于更进一步的分析和试验研究。

参考文献(References)

[1] 李根臣, 张海燕, 刘晓飞等. 碳纤维复合材料在中空异型弹翼上的应用[J]. 工程塑料应用, 2010, 38(11): 53–55.
Li Genchen, Zhang Haiyan, Liu Xiaofei, et al. Engineering Plastic Application, 2010, 38(11): 53–55.

[2] 陈平, 韩冰, 程子霞. 玻璃纤维增强耐高温改性环氧基拉挤电绝缘芯棒的研究[J]. 复合材料学报, 2000, 17(2): 12–15.
Chen Ping, Han Bing, Chen Zixia. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(2): 12–15.

[3] 魏惠之, 朱鹤松, 汪东晖, 等. 弹丸设计理论 [M]. 国防工业出版社, 1985: 84–193.
Wei Huizhi, Zhu Hesong, Wang Donghui, et al. Theory of ammunition design [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1985: 84–193.

[4] 华恭, 欧林尔. 弹丸作用和设计理论(榴弹和迫击炮弹)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1975: 156–212.
Hua Gong, Ou Liner. Projectile effect and design theory (shrapnel and mortar shell)[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1975: 156–212.

[5] 钱林方. 火炮弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 145–162.
Qian Linfang. Ballistics of artillery [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009: 145–162.

[6] 刘鸿文. 材料力学 I[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 241–251.
Liu Hongwen. Material mechanics I [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2004: 241–251.

[7] 梁益群, 林廷旭, 张建设. 纤维增强复合材料在反水雷艇中的应用[J]. 造船技术, 1998, 11: 8–11.
Liang Yiqun, Lin Tingxu, Zhang Jianshe. Marine Technology, 1998, 11: 8–11.

[8] 李强, 穆柏春, 于景媛, 等. 表面改性碳纤维增强羟基磷灰石复合材料抗弯性能的研究[J]. 功能材料, 2013, 44(7): 609–612.
Li Qiang, Mu Baichun, Yu Jingyuan, et al. Journal of Functional Materials, 2013, 44(7): 609–612.

(责任编辑　吴晓丽)

·学术动态·

中国科学技术协会

中国科协启动甘肃定西地震应急科普响应

2013 年 7 月 22 日上午 7 时 45 分,甘肃省定西市岷县、漳县交界发生里氏 6.6 级地震,目前地震已造成 95 人死亡,逾千人受伤。地震发生后,中国科协党组书记处主要领导迅速作出指示,要求中国科协有关职能部门认真了解地震灾区情况,积极关注抗震救灾工作进展,抓紧对接甘肃省科协系统开展抗震救灾工作的相关需求,为地震灾区提供力所能及的支持和帮助。

根据党组书记处领导的指示,中国科协办公厅及时与甘肃省科协取得联系,转达中国科协党组书记处领导对甘肃定西地震的关心和对甘肃广大科技工作者的慰问,详细了解灾情和科协系统受灾情况;中国科协科普部迅速启动应急科普预案,会同有关直属单位开展科普宣传,中国数字科技馆于 7 月 22 日晚 22 点上线了"甘肃定西地震专题",为灾区提供科普资源下载服务,科普出版社紧急向灾区发放地震科普宣传挂图 2 种各 500 套,应急科普系列丛书(11 本/套)1000 套。

详情见中国科协网 http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/14893366.html。