

高速粒子斜撞击下 LF6 合金薄靶的损伤行为

周劲松 甄良 杨德庄

(哈尔滨工业大学 哈尔滨 150001)

文 摘 研究了 LF6 合金薄靶在 GCr15 高速粒子斜撞击下的损伤行为。研究表明,薄靶的损伤行为随粒子速度和入射角度的不同而不同。当粒子入射角 θ 小于某一临界入射角 θ_c 时,粒子在靶材的表面会发生跳弹现象,如果粒子在碰撞时粉碎,一部分粒子碎片可能击穿薄靶,一部分粒子碎片可能在靶材表面发生弹跳现象。发生跳弹现象的临界入射角度 θ_c 随粒子速度 v_0 的增大而减少。当 $\theta > \theta_c$ 时,高速粒子在 LF6 合金靶表面不会发生跳弹现象,粒子或击穿薄靶或嵌入到靶材中。发生跳弹现象时,LF6 薄靶表现出不击穿、极限不击穿和被击穿三种损伤形式。

关键词 高速粒子,斜撞击,跳弹,损伤

Damage Behavior of LF6 Alloy Thin Targets Slantly Impacted by Hypervelocity Projectiles

Zhou Jinsong Zhen Liang Yang Dezhuang

(Harbin Institute of Technology Harbin 150001)

Abstract Damage behavior of LF6 thin targets under the condition of inclined hypervelocity impact of GCr15 projectiles has been studied. Test results show that the damage behavior of thin targets is dependent on the projectile velocity and incident angle. when the incident angle θ is less than the critical θ_c , projectiles may leap away from the target surface. If the projectile is smashed by the impact, some parts of the smashed projectile can penetrate through the target, while other parts may leap away from the target surface. The critical angle θ_c decreases with the increase of projectile velocity v_0 . If $\theta > \theta_c$, hypervelocity projectiles cannot leap over the LF6 thin target surface, and the projectile either penetrates through or embeds in the target. There are three kinds of damage behavior of non-penetration, critical non-penetration and penetration, when a leap happens.

Key words Hypervelocity projectile, Slantly impact, Ricochet, Damage behavior

在研究高速粒子碰撞下靶材的损伤行为时,应该把高速粒子同薄靶的斜撞击作为一个普遍存在的现象来加以研究。国内外已有学者在这方面做了一些工作^[1~5],但大多是关于高速粒子击穿薄靶的情况。对于一定碰撞角度下,高速粒子在薄靶表面发生跳弹现象,而非击穿薄靶时薄靶的损伤行为研究较少。本文利用火药加速器将直径为 4.75 mm 的球

形钢粒子加速到 2 km/s,撞击 LF6 合金薄靶,研究了在一定碰撞角度下,高速粒子在薄靶表面发生跳弹现象时靶材的损伤行为。

1 实验装置和方法

粒子同薄靶斜撞击实验装置示意图如图 1 所示。实验进行过程如下:粒子和弹座同时从加速装置的杆中射出,经过隔弹片时弹座被隔弹片隔住,停

收稿日期:1998-09-08;修回日期:1998-12-28

周劲松,1969 年出生,博士研究生,主要从事复合材料、电工触头及材料在空间环境因素作用下行为的研究工作

宇航材料工艺 2000 年 第 2 期

— 55 —

止前进,而粒子继续前进。碰撞前粒子的速度由测量装置9(由传感器和频率计组成)测量,即可由粒子穿过第一组传感器的时间和第一组传感器的距离得出。粒子同靶碰撞后,如果发生碰撞现象,粒子就穿过第二个传感器组并同“观察试样”7碰撞。根据“观察试样”4和7的损坏程度来确定跳弹是否发生。根据相互作用点在“观察试样”上的坐标 a 和 b ,跳弹角度根据下式可得出:

$$\text{tg} \theta = \frac{a}{b}$$

式中, a 为在试样3上跳弹粒子痕迹坐标, b 为在倾斜放置的“观察试样”7上的损伤坐标。如果不发生跳弹,粒子击穿薄靶试样3,在位于试样3后的另一“观察试样”4上留下相撞的痕迹。

加速粒子选用 GCr15 弹丸,粒子直径 $d = 4.75$ mm,质量为4g。选用 LF6 作为靶材,撞击速度在 $0.5 \text{ km/s} \sim 2 \text{ km/s}$ 范围内变化。斜撞击角度由小逐渐增大,直到不发生跳弹现象而是击穿试样为止。

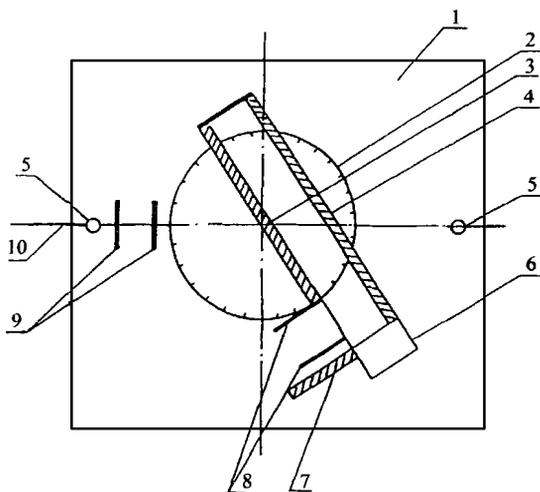


图1 粒子同薄靶试样斜碰撞装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the inclined impact device for thin target

- 1—平台;2—带有刻度的转盘;3—试样;
- 4—用于确定跳弹现象是否发生的“观察试样”;
- 5—基准销;6—固定试样的夹具;
- 7—用于确定跳弹角度的“观察试样”;
- 8—测定跳弹粒子速度的传感器;
- 9—测粒子速度的传感器;10—加速器。

2 实验结果和讨论

2.1 靶材的损伤类型

粒子同靶材的碰撞角度定义为粒子飞行方向和薄靶试样表面的夹角,发生跳弹现象的临界入射角度 θ_c 是指高速粒子斜撞击靶材时发生跳弹现象的最大角度。当粒子入射角度 $\theta < \theta_c$ 时,高速粒子会发生跳弹现象;当 $\theta > \theta_c$ 时,不会发生跳弹现象。当不发生跳弹现象时,LF6 合金靶材的损伤情况比较简单,高速粒子要么不击穿薄靶,要么击穿薄靶。这取决于薄靶的厚度是否大于该碰撞条件下的极限不击穿厚度 δ_c 。在 $\theta < \theta_c$ 时,高速粒子发生跳弹现象,材料的损伤情况十分复杂。表1列出了发生跳弹现象角度范围内 LF6 合金靶材损伤的几种类型。

表中的 P 值综合体现了高速粒子斜击下靶材的损伤程度和粒子发生跳弹部分体积的大小。随着 P 值的增大,靶材损伤程度增大,粒子发生跳弹部分体积一般减少。

图2是高速粒子斜撞击下 LF6 合金损伤状态示意图。

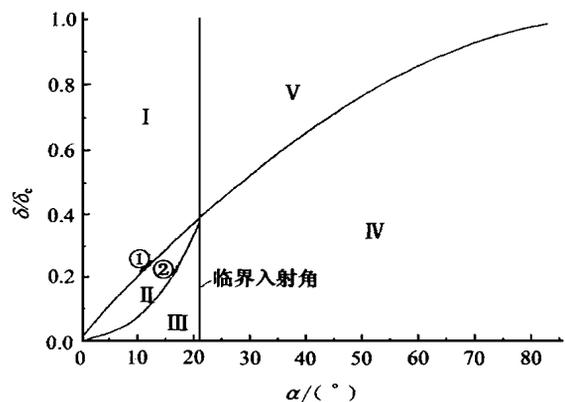


图2 高速粒子斜撞击下 LF6 合金损伤状态示意图

Fig.2 Schematic diagram showing the damage condition of the LF6 alloy slantly impacted by hypervelocity projectiles

由图2可以看出,发生跳弹现象的有三个区域:
区域 I:高速粒子同薄靶相互作用 $P = 0$ 和 $P = 0.2$ 的区域;

区域 II:高速粒子同薄靶相互作用 $P = 0.6$ 的区域;

区域 :高速粒子同薄靶相互作用 $P=0.81$ 和 $P=0.83$ 的区域;

不发生跳弹现象的有两个区域:

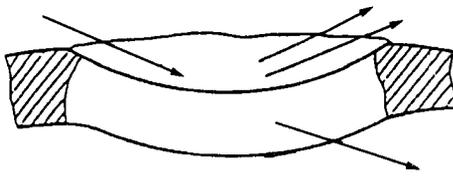
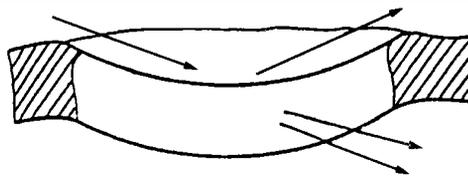
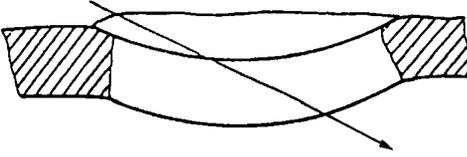
区域 —薄靶未被击穿;

区域 —薄靶被击穿。

曲线 表示薄靶被击穿与未被击穿领域的分界线,曲线 是 $P=0.6$ 和 $P=0.81$ 的分界线。当薄靶相对厚度落在曲线 和曲线 之间的区域(区域)时,薄靶完全被击穿,但高速粒子发生完全跳弹现象,不会穿过薄靶。

表 1 发生跳弹现象时靶材典型损伤类型

Tab.1 Typical damage modes of target materials by projectile ricocheting

损伤类型	发生跳弹部分/% (体积分数)	P 值	特点
	100	0	在薄靶上形成一个拉长的弹坑,薄靶背面不产生崩落现象
	100	0.2	在薄靶上形成一个拉长的弹坑,薄靶背面形成没有裂纹的突起
	100	0.4	只是薄靶背面形成带裂纹的突起,但裂纹没有贯穿整个靶材
	100	0.6	薄靶被击穿
	> 50	0.81	薄靶被击穿,高速粒子同薄靶碰撞后被破坏,粒子破碎后形成的碎片大部分跳弹,小部分粒子击穿薄靶
	< 50	0.83	薄靶被击穿,高速粒子同薄靶碰撞后破坏。大部分粒子碎片穿过薄靶。
	0	1.0	薄靶被完全击穿。高速粒子(或已击穿,或未被粉碎)100%穿过薄靶

2.2 粒子速度对临界入射角度 α_c 的影响

图3是发生跳弹现象时临界入射角度 α_c 随粒子速度 v_0 的变化规律。可见,随着粒子速度的增加,发生跳弹现象的临界角度 α_c 减小。这是因为高速粒子正碰撞薄靶时,薄靶极限击穿厚度 d_0 与 v_0 成正比。在高速粒子斜撞击薄靶时,薄靶法向方向的速度分量为 $v_0 \cdot \sin \alpha$ 。显然,在薄靶厚度一定时,随着 v_0 增大,只有碰撞角度减小才能保证 $v_0 \cdot \sin \alpha$ 保持在不击穿薄靶的速度范围内,同时切线速度 $v_0 \cos \alpha$ 保持在能发生跳弹而不嵌入靶材中的速度范围内。

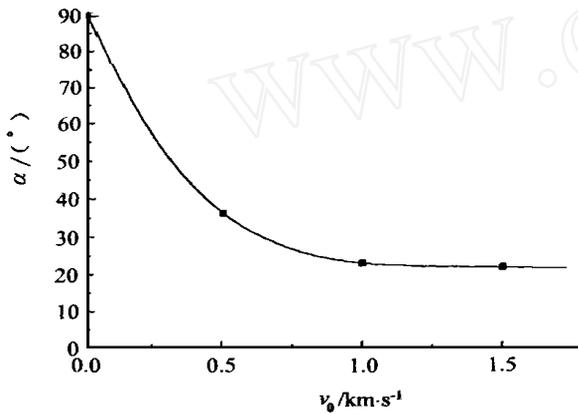


图3 发生跳弹现象的临界入射角度 α_c 与粒子速度 v_0 的关系曲线

Fig.3 Critical incident angle α_c of projectile ricocheting vs projectile velocities v_0

2.3 高速粒子斜撞击下薄靶极限不击穿厚度

在粒子速度小于 5 km/s 时,半无限体靶上形成的弹坑深度 P_c 可以由下式计算^[6]:

$$\frac{P_c}{d} = 0.6 \left(\frac{p}{t} \right)^{0.62} \left(\frac{HB_p}{HB_t} \right)^{0.15} \left(\frac{v_0^2}{HB_t} \right)^{0.24} \quad (1)$$

式中, P_c 是半无限体靶上的弹坑深度, d 是粒子直径, v_0 是粒子速度, ρ 是密度, HB 是材料的布氏硬度,下标 p 和 t 分别表示粒子和靶材。

文献[6,7]的研究表明,在正向碰撞条件下,弹丸不能击穿的铝合金薄靶的厚度 d_0 约为同样碰撞条件下半无限体靶上弹坑深度的 1.5 倍。因此在正

向碰撞下薄靶不被击穿的极限厚度 d_0 可以由下式计算:

$$\frac{d_0}{d} = 0.9 \left(\frac{p}{t} \right)^{0.62} \left(\frac{HB_p}{HB_t} \right)^{0.15} \left(\frac{v_0^2}{HB_t} \right)^{0.24} \quad (2)$$

由表1可见,高速粒子同薄靶斜碰撞 $P = 0.4$ 时,粒子正好不击穿薄靶,此时薄靶的厚度相当于斜碰撞时极限不击穿厚度 d_0 。图4是斜撞击时靶的无量纲极限不击穿厚度 (d_0/d) 随碰撞角度 α 变化的关系曲线。通过数值回归分析发现,斜撞击时薄靶的无量纲极限不击穿厚度 (d_0/d) 与高速粒子入射角度 α 的正弦值成正比,即

$$\frac{d_0}{d} = \sin \alpha \quad (3)$$

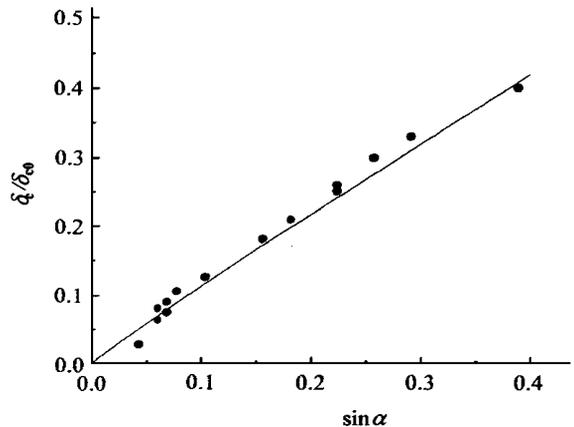


图4 斜撞击时薄靶的无量纲极限不击穿厚度 (d_0/d) 与碰撞角度 α 的关系曲线

Fig.4 Normalized critical non-punctured thickness (d_0/d) of the target material slantly impacted vs the incident angle

如果将式(2)代入式(3),则可得到计算斜撞击条件下薄靶极限不击穿厚度 d_0 的表达式,即

$$\frac{d_0}{d} = 0.9 \left(\frac{p}{t} \right)^{0.62} \left(\frac{HB_p}{HB_t} \right)^{0.15} \left(\frac{v_0^2}{HB_t} \right)^{0.24} (\sin \alpha) \quad (4)$$

这个结果与文献[5]的结果有所不同。文献[5]宇航材料工艺 2000年 第2期

的研究结果表明,薄靶的极限不击穿厚度 c_c 与粒子入射角度正弦值的 $2/3$ 次幂成正比。

3 结论

(1)在高速粒子斜撞击薄靶时,存在一个临界入射角度 c_c ,当粒子入射角度 $\alpha < c_c$ 时,粒子在靶材表面发生完全或部分跳弹现象。发生跳弹现象的临界入射角度随粒子速度的增大而减小。

(2)在发生跳弹现象时,LF6合金薄靶的损伤随粒子入射角度的不同而不同,主要可分为不击穿、极限不击穿、被击穿三种形式。

(3)在高速粒子斜撞击时,薄靶的极限不击穿厚度 c_c 可由下列公式计算:

$$\frac{c_c}{d} = 0.9 \left(\frac{p}{t} \right)^{0.62} \left(\frac{HB_p}{HB_t} \right)^{0.15} \left(\frac{v_0^2}{HB_t} \right)^{0.24} (\sin \alpha)$$

参考文献

- 1 贾光辉,张国伟,裴思行.钨球侵彻薄靶的实验研究.兵工学报,1998;19(2):185~188
- 2 黄长强等.球形破片对薄靶极限穿透速度公式的建立.弹箭与制导学报,1993;2:58~62
- 3 吕德业.射流着角对其侵彻能力的影响.兵器材料科学与工程,1996;19(3):50~55
- 4 Backman M E, Finnegan S A. Technical Report, TP 5844 U. S. Naval Weapons Center, China Lake, California, 1976
- 5 Merzieskii L A, Titov V M. Hypervelocity impact. Contribution and Explosion Physics (in Russian), 1987; 5: 92
- 6 周劲松.在高速粒子撞击作用下几种金属的宏观和微观损伤行为.哈尔滨工业大学工学博士学位论文,1997:42
- 7 Arenz R J. Influence of hypervelocity projectile size and density on the ballistic of dual-sheet structures. J. Spacecraft and Rockets, 1969; 6(11): 1 319

高频溅射制膜技术

高频溅射技术原理是在真空中充以惰性气体氩,在高压电场的作用下,氩气电离使阴极与阳极间产生辉光放电,经磁场作用增强等离子体并被电场加速成高能离子流,撞击到阴极靶材上,使靶材逐渐地、缓慢地“溃散”,以原子或原子团甚至以剩余气体分子、化学结合物形成脱离靶材,淀积到衬底上,形成薄膜,这个过程称为“溅射”。又因使用射频电源,故称“高频溅射”。

利用高频溅射技术能制取多种金属薄膜、半导体薄膜、化合物薄膜和合金薄膜等。

本成果研制的高频溅射仪器具有以下特点:(1)溅射室中有三个水冷阴极靶,可在一次真空条件下,制成不同要求的薄膜;(2)高频输出端与靶电极之间加有匹配、调谐网络,可有效地提高溅射速率和效率;(3)具有溅射刻蚀特性(也称反溅射),由于它边界陡直,图形清晰,故在刻蚀细线条薄膜图形和清洁基片表面等方面获得应用;(4)采用衬底加偏压的溅射方式,能改善薄膜的性能,减少薄膜针孔。应用衬底加热的溅射技术,能满足各类压电、陶瓷、合金等薄膜晶格趋向的要求。

本项技术成果在微电子工业和半导体工业的各个领域获得极为广泛的应用。在金属表面硬化处理等技术领域也有巨大的潜在市场。经在科研、生产部门推广应用,取得了良好的经济效益。应用该技术制作 SiO_2 - Ta_2O_5 双层薄膜电容和氧化钽铝薄膜电阻器均获得成功。制成的彩色电视机氧化锌中频表面波滤波器,已经推广应用。该技术应用前景广阔。

·李连清·