

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0071

# 球形弹丸高速冲击 IN718 合金板的变形与破坏模式\*

陈艳丹<sup>1,2</sup>, 陈兴<sup>1</sup>, 卢永刚<sup>1</sup>, 刘彤<sup>3</sup>

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 顶峰多尺度科学研究所, 四川 成都 610031;

3. 中国工程物理研究院成都科学技术发展中心, 四川 成都 610299)

**摘要:** 为研究 IN718 镍基高温合金在高速冲击作用下的抗侵彻能力, 采用直径为 5 mm 的 304 不锈钢球形弹丸, 利用二级轻气炮试验装置对 IN718 靶板进行了一系列弹道冲击试验。通过高速摄像机进行拍摄, 弹丸的入射速度范围为 548.2~1 067.0 m/s。对弹丸的剩余速度进行了测量和分析, 并对弹道极限速度进行了验证, 观察了靶板的变形和破坏模式以及弹孔直径。结果表明: 在试验冲击范围之内, 随着冲击速度的升高, 靶板的变形模式由撕裂破坏到剪切破坏转变, 靶板的穿甲破坏模式与冲击速度密切相关; 靶板能量吸收效率随弹丸初始动能的增加而降低, 且趋于常值 0.7; 靶板变形挠度随着冲击速度的升高呈减小趋势, 且最大变形挠度出现在弹道极限附近; 靶板正面和背面所形成的弹孔直径均随着冲击速度的升高而增大, 且背面所形成的弹孔直径大于前面所形成的弹孔直径。

**关键词:** IN718 镍基高温合金; 弹道冲击; 弹道极限速度; 变形与破坏模式; 侵彻

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

## Deformation and failure modes of IN718 alloy plate impacted by spherical projectile at high velocity

CHEN Yandan<sup>1,2</sup>, CHEN Xing<sup>1</sup>, LU Yonggang<sup>1</sup>, LIU Tong<sup>3</sup>

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;

2. The Peak Institute of Multiscale Sciences, Chengdu 610031, Sichuan, China;

3. Chengdu Development Center of Science and Technology, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610299, Sichuan, China)

**Abstract:** A series of high-speed ballistic impact tests were conducted on a two-stage light gas gun to investigate the perforation behaviors of Inconel 718 (IN718) superalloy plates. The IN718 targets were prepared with 2 mm thickness, and the 5 mm diameter SS304 spheres were used as projectiles. The impact velocity ranged from 548.2 m/s to 1 067.0 m/s. The shadow graphs of the impact process were captured by using a high-speed camera at a frame rate of 160 000 frames per second. The projectile residual velocities after perforation were then obtained from snapshots and analyzed. The Rechi-Ipson model was employed for the investigated projectile-target combination by fitting the projectile initial velocity-residual velocity relationship, and the ballistic limit velocity 561.0 m/s was then verified. The maximum deformation deflection of the ballistic impact-recovered plates was measured using a height gauge. The optical morphology of the postmortem target was captured, the deformation and failure modes of the target material were observed, while the bullet hole diameters were measured. The experimental results reveal that within the investigated impact velocity range, as the impact velocity increases, the failure mode

\* 收稿日期: 2023-03-01; 修回日期: 2023-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(11672278)

第一作者: 陈艳丹(1992—), 女, 博士研究生, chenyardan21@gascaep.ac.cn

通信作者: 刘彤(1964—), 男, 博士, 研究员, liut@yinhe596.cn

of the target material changes from tension-dominated failure to tension/shear-dominated failure. The perforation failure mode of the plates is closely associated with the impact velocity. The energy absorption efficiency of the target plates decreases with the increase of projectile's initial kinetic energy, and it approaches a constant of 0.7. The deformation of the plates decreases with the increase of impact velocity, with the maximum deformation deflection occurring near the ballistic limit. The bullet hole diameters on the front and rear side both increase with the increase of impact velocity, and the bullet hole diameter on the rear side is greater than that on the front side. It is evident that investigating the deformation, failure modes, and ballistic properties of IN718 superalloy under high-speed ballistic impact is essential for its industrial applications.

**Keywords:** IN718 nickel-base superalloy; ballistic impact; ballistic limit velocity; deformation and failure modes; perforation

作为一种典型的镍基高温合金, Inconel 718(IN718)镍基高温合金在高温下表现出高强度、高耐磨以及耐腐蚀等优点,被广泛应用于制造燃气轮机、火箭发动机和涡轮叶片等结构部件<sup>[1-3]</sup>。在发动机运行期间,由于螺栓脱落、外物飞入、鸟击等因素<sup>[4]</sup>,可能会导致 IN718 合金结构部件受到严重的高速冲击损伤或破坏,进而危及飞机飞行安全。因此,研究 IN718 合金在高速冲击下的变形与破坏模式,确定其弹道性能,对其在工业方面的应用具有重要意义<sup>[5-8]</sup>。

目前,学者们致力于 IN718 合金在不同类型载荷下的变形损伤研究,如准静态试验<sup>[9-11]</sup>、循环载荷<sup>[12-13]</sup>以及分离式霍普金森杆载荷<sup>[14-16]</sup>等。然而,目前针对 IN718 合金弹道性能的研究较少,例如: Pereira 等<sup>[17]</sup>采用圆柱形 Ti-6Al-4V 弹丸,以 150~300 m/s 的速度对分别考虑退火和老化条件的平板材料进行冲击试验,在退火材料中发现了最佳的撞击行为,研究了热处理 Inconel 718 对弹道冲击响应和失效机制的影响。Erice 等<sup>[18]</sup>通过改变温度参量,对 Inconel 718 合金板进行了弹道冲击试验和数值模拟,提出了与 Lode 角相关失效准则的耦合弹塑性损伤本构模型。Liu 等<sup>[19]</sup>和刘焦等<sup>[20]</sup>在 25~600 °C 的温度范围内,对 GH4169 合金薄板开展了初始速度在 110~187 m/s 的弹道冲击试验和数值模拟,研究了温度和初始速度对靶板的变形、破坏模式和能量吸收的影响。Rodríguez-Millán 等<sup>[21]</sup>从弹道冲击试验和数值模拟两方面分析了弹丸几何形状对 Inconel 718 钢板弹道性能的影响,确定了不同弹丸几何形状在高达 200 m/s 速度下的弹道极限、失效机制和板吸收的能量。吴轲<sup>[22]</sup>在 70~200 m/s 的入射速度范围内,采用弹片对 GH4169 高温合金靶板进行了一系列的弹靶试验,通过高速摄影观察了靶板在不同加筋结构和不同冲击速度下的冲击过程,进而分析了靶板的宏观破坏形式和损伤机理。谭学明等<sup>[23]</sup>采用 GCr15 弹丸对不同厚度的 GH4169 靶板进行了一系列弹道冲击试验,入射速度范围为 96.7~314.2 m/s,分析了冲击载荷作用下靶板的变形、破坏模式和失效机理等。综上可知,目前对 IN718 合金靶板已经进行了一些弹道冲击试验和数值模拟方面的研究,但研究成果主要集中于对高温或低速冲击作用下的研究,对高速冲击方面的研究报道较少。然而,航空发动机在工作过程中,涡轮发动机转子(叶片等)处于高速运转状态<sup>[23]</sup>,因此,有必要研究 IN718 合金在高速冲击荷载作用下的变形、破坏模式和失效机理,进而开展相应的弹道冲击试验研究。

为获得 IN718 合金靶板在球形弹丸高速冲击下的变形、破坏模式和失效机理,本文中,拟采用二级轻气炮和 2 mm 厚的 IN718 合金靶板进行一系列弹道冲击试验,研究 304 不锈钢球形弹丸对 IN718 合金的弹道侵彻,入射速度范围为 548.2~1 067.0 m/s,获得其随冲击速度变化的动态响应特性,以期为航空航天领域中发动机关键部件的理论设计提供支撑。

## 1 弹道冲击试验

### 1.1 试件设计

金属靶板和球形弹丸的主要几何尺寸如图 1 所示。弹体选用球形弹丸,材料为 304 不锈钢,直径  $D=5$  mm,弹丸质量为 0.51 g,几何参数如图 1(a) 所示。靶体为 IN718 镍基高温合金薄板,试验中设计为正方形,尺寸为 50 mm×50 mm,厚度为 2 mm,几何参数如图 1(b) 所示。

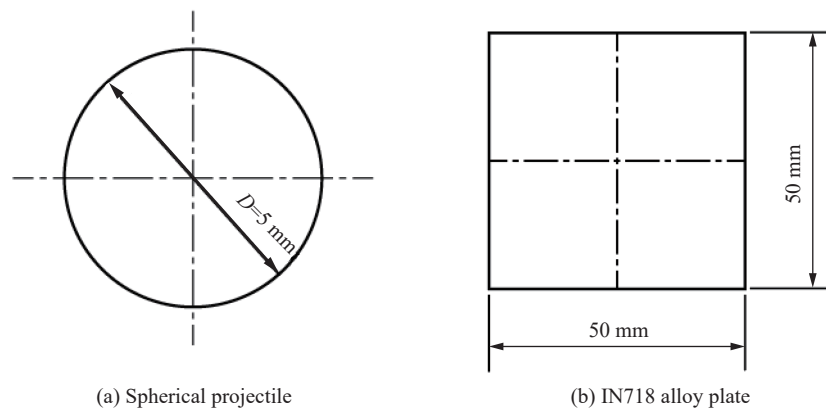
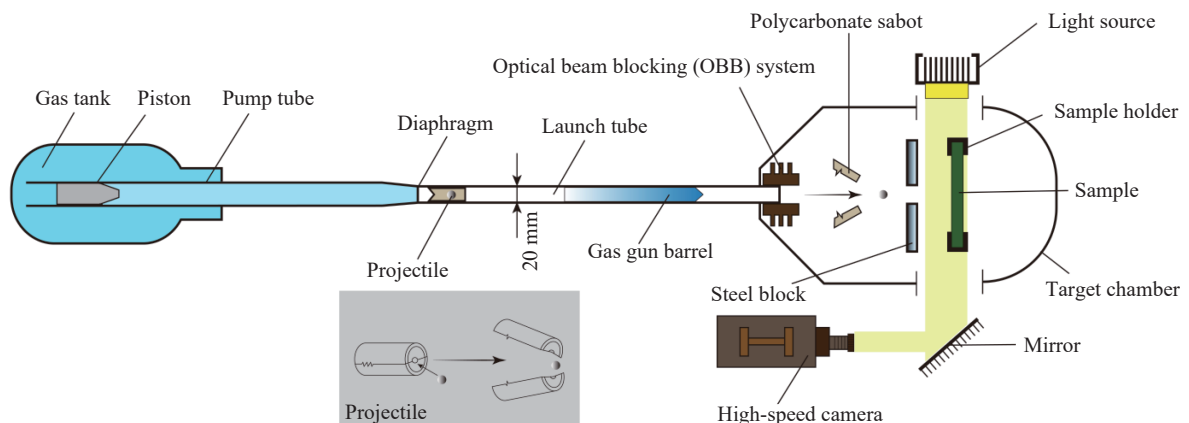


图 1 球形弹丸和 IN718 合金靶板

Fig. 1 Spherical projectile and IN718 alloy plate

## 1.2 试验装置

在膛径为 20 mm 的二级轻气炮上进行了一系列弹道冲击试验, 试验装置如图 2 所示。本试验采用脱壳弹分离方法, 发射直径为 5 mm 的 304 不锈钢球形弹丸<sup>[24]</sup>, 聚碳酸酯弹托由 2 个带齿的半片组成, 为球形弹丸提供支撑。当向电磁阀发送点火信号时, 第 1 级中的活塞在高压气体(He 或 N<sub>2</sub>)作用下进行加速, 当第 1 级和第 2 级之间的隔膜破裂时, 聚碳酸酯弹托和弹丸组件在第 2 级气枪枪管中继续加速。射出枪口时, 用光束阻挡系统测量弹丸速度, 该系统还向光源和高速摄像机发送触发信号。离开枪管后, 由于空气动力学原因, 弹托和弹丸在随后的飞行过程中自动分离<sup>[25]</sup>(图 2 插图)。弹托被钢块阻挡, 球形弹丸撞击 IN718 合金样本。撞击过程中的阴影由转向镜传递到以 160 000 s<sup>-1</sup> 帧率运行的高速摄像机中。通过高速摄像机拍摄的弹丸快照计算得出弹丸的初始速度  $v_i$  在 548.2~1 067.0 m/s 范围内。



Inset: separation of polycarbonate sabot and projectile via sabot splitting

图 2 二级轻气炮试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram setup for perforation experiment with two-stage light gas gun

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 侵彻过程

采用 304 不锈钢球形弹丸对 IN718 合金靶板进行了 7 发弹道冲击试验, 依据高速摄像机获取的侵彻过程的图像资料, 计算出弹体的初始速度和弹体穿透靶板后的剩余速度  $v_r$ 、弹体穿透靶板前后的速度差  $v_d$  等, 计算结果如表 1 所示。表中:  $E_i$  为弹体初始撞击动能,  $E_r$  为弹体穿透靶板后的剩余动能,  $E_d$  为弹体穿透靶板前后的动能改变量。

304 不锈钢球形弹丸分别以 3 种代表性初始速度(548.2、748.0 和 1 067.0 m/s)撞击 IN718 合金靶板, 侵彻过程如图 3(伪彩色)所示。本文中将球形弹丸首次接触目标表面的瞬间定义为时间零点( $t=0 \mu\text{s}$ )。在低速(548.2 m/s)状态下, 弹丸撞击目标靶板后, 靶板首先产生局部变形, 然后形成凸起, 弹丸深入靶板, 并被困在弹坑内, 冲塞脱落, 没有观察到碎片, 如图 3(a) 所示。在高速(748.0 和 1 067.0 m/s)状态下, 一旦弹丸到达目标, 弹丸侵彻靶板, 伴随大量闪光, 可以在撞击表面观察到碎片。随着弹丸初始速度  $v_i$  的升高, 可以观察到伴随的闪光增大, 射流携带的碎片颗粒的数量随着初始速度的升高而显著增加, 碎片尺寸随着初始速度的升高而不断减小。如图 3(b)~(c) 所示。

表 1 IN718 合金靶板的弹道冲击试验结果  
Table 1 Test results of the IN718 alloy plates impacted by spherical projectiles

试验	$v_i/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_r/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_d/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$E_i/\text{J}$	$E_r/\text{J}$	$E_d/\text{J}$
1	548.2	0	548.2	76.63	0	76.63
2	573.8	185.0	388.8	83.96	8.73	75.23
3	620.9	251.0	369.9	98.31	16.07	82.24
4	748.0	347.0	401.0	142.67	30.70	111.97
5	787.0	396.0	391.0	157.94	39.99	117.95
6	935.0	513.5	421.5	222.93	67.24	155.69
7	1 067.0	589.0	477.9	290.26	88.46	201.80

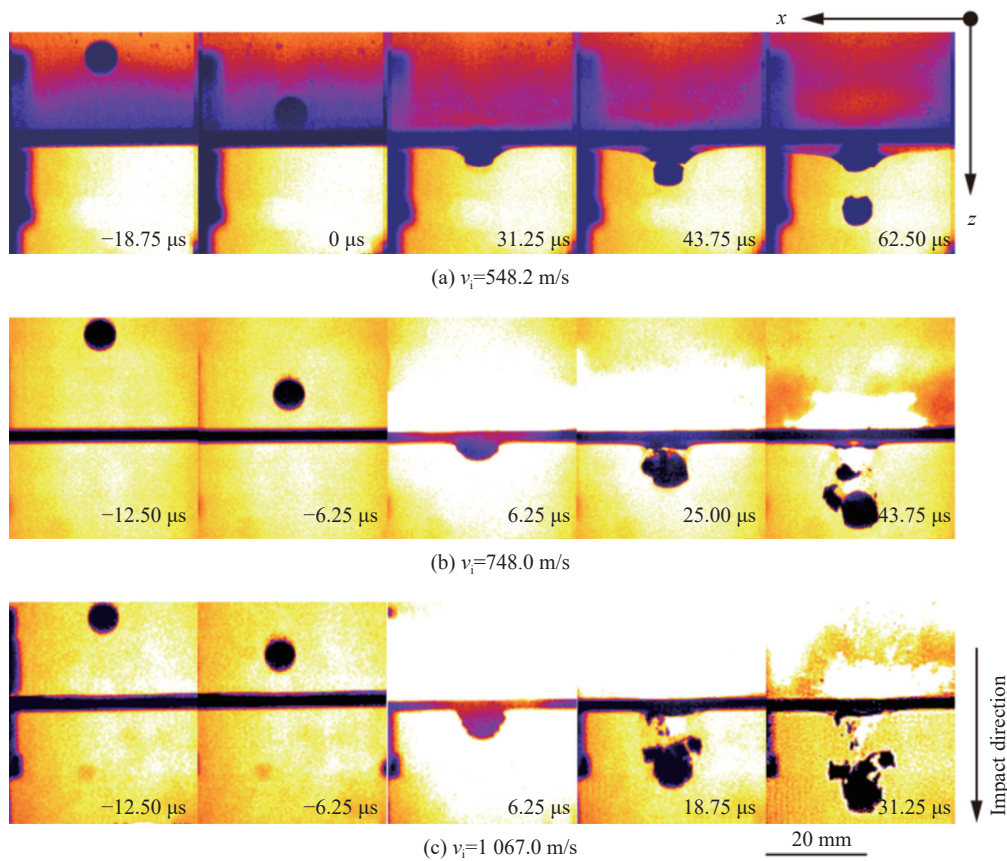


图 3 不同冲击速度下球形弹丸对 IN718 合金的弹道冲击快照(伪彩色)  
Fig. 3 Snapshots (in pseudo color) of ballistic impact by a spherical projectile on an IN718 nickel-base superalloy target at different impact velocities

## 2.2 弹道极限速度

使用改进的 Recht-Ipson(R-I)模型<sup>[26]</sup>来预测刚性球形弹丸的剩余速度。基于能量和动量守恒, 并结合试验修正得到 R-I 模型的表达式:

$$v_r = a(v_i^p - v_{bi}^p)^{1/p} \quad (1)$$

式中:  $v_{bl}$  为弹道极限速度, 为试验中最大未穿透速度与最小穿透速度的平均值<sup>[27]</sup>;  $a$ 、 $p$  为拟合参数。利用最小二乘法得到  $a$  和  $p$ , 拟合结果如图 4 中红色实线所示, 拟合参数如表 2 所示。

为了更好地研究球形弹丸的弹道极限, 将弹丸的残余动能与初始动能之比定义为能量吸收效率( $E_a$ ), 靶板的能量吸收效率为:

$$E_a = \frac{0.5m_p(v_i^2 - v_r^2)}{0.5m_p v_i^2} = 1 - \frac{v_r^2}{v_i^2} \quad (2)$$

式中:  $m_p$  为弹丸的质量。

图 5 给出了靶板的能量吸收效率与不同冲击速度下弹丸初始动能之间的关系。从图 5 可以看出, 靶板的能量吸收效率随着弹丸初始动能的增加而降低, 且降低速率逐渐减小, 并趋于平缓。当冲击速度在 548.2~574.0 m/s 范围内时, 能量吸收效率下降最快; 当冲击速度升高至 574.0~935.0 m/s 时, 靶板的能量吸收效率逐渐降低; 当冲击速度继续升高至 1 067.0 m/s 时, 靶板的能量吸收效率下降不明显。因此, 在一定的冲击速度范围内, 靶板的能量吸收效率变化明显, 靶板能量吸收效率的最大值出现在弹道极限速度附近。随着冲击速度继续升高, 靶板能量吸收效率趋于常值 0.7。能量吸收效率的变化情况与文献 [28] 中球形弹丸冲击 6061-T651 铝合金试验中靶板能量吸收效率与初始动能的变化规律相似。

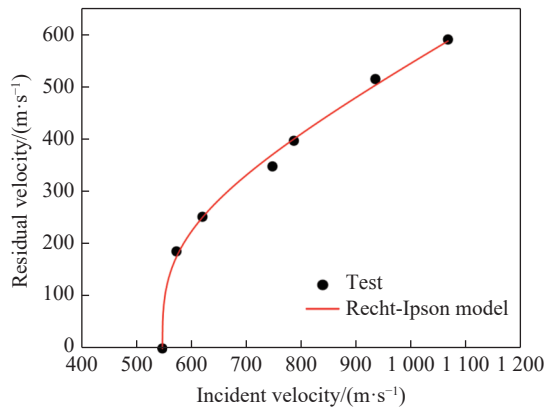


图 4 弹体贯穿靶体的初始-剩余速度

Fig. 4 Initial versus residual velocities for the targets impacted by spherical projectiles

表 2 弹道极限速度及 R-I 模型参数

Table 2 Ballistic limit velocity and the R-I model parameters

弹体材料	$v_{bl}/(m \cdot s^{-1})$	$a$	$p$
304 不锈钢	561.0	0.63	2.58

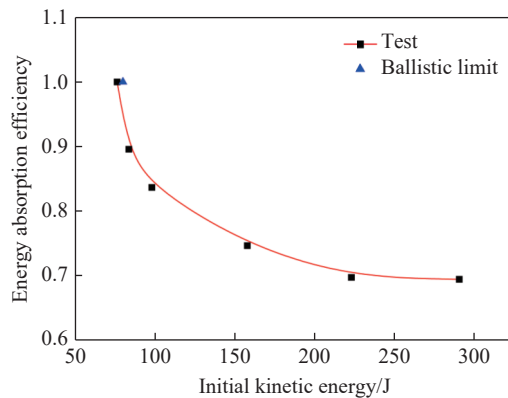


图 5 靶板能量吸收效率与弹丸初始动能的关系

Fig. 5 Relationship between the energy absorption efficiency of the plate and the initial kinetic energy of the projectile

### 2.3 靶板变形挠度分析

图 6 给出了 IN718 合金靶板在不同冲击速度下的最大变形挠度, 最大变形挠度使用高度尺测量冲击后的靶板获得。由图 6 可知, 靶板所产生的最大变形挠度为 5.26 mm, 此时冲击速度为 548.2 m/s, IN718 合金靶板变形挠度的最大值出现在弹道极限速度附近, 与文献 [29-30] 中的结论相同。弹丸击穿靶板, 且弹丸冲击速度低于 787.0 m/s 时, 靶板的最大变形挠度随冲击速度的升高近似呈线性下降趋势, 与文献 [22] 中曲线的走势大致相同。当冲击速度高于 935.0 m/s 时, 靶板最大变形挠度随着冲击速度的升高反而出现了上升现象, 分析可能是由于高速冲击作用下弹丸发生了旋转和变形。

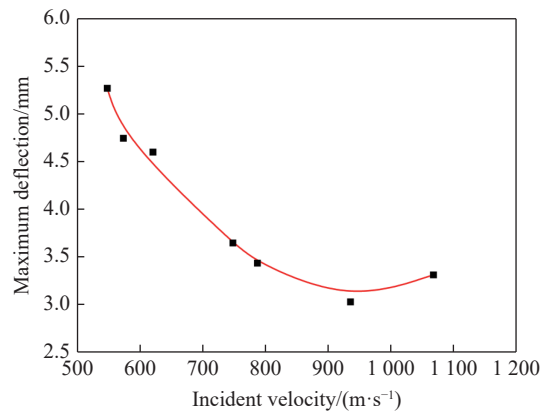


图 6 试验中靶板最大变形挠度随冲击速度的变化曲线

Fig. 6 The maximum deflection of the targets impacted at different impact velocities in the test

### 2.4 靶板破坏模式分析

试验工况 1、2 和 7 的冲击速度分别为低于、略高于和远高于弹道极限, 靶板变形如图 7 所示。从图 7 可以看出, 当初始速度  $v_i=548.2$  m/s, 即低于弹道极限 ( $v_i < v_{bl}$ ) 时, 弹丸未能击穿靶板, 靶板经历弯曲和背

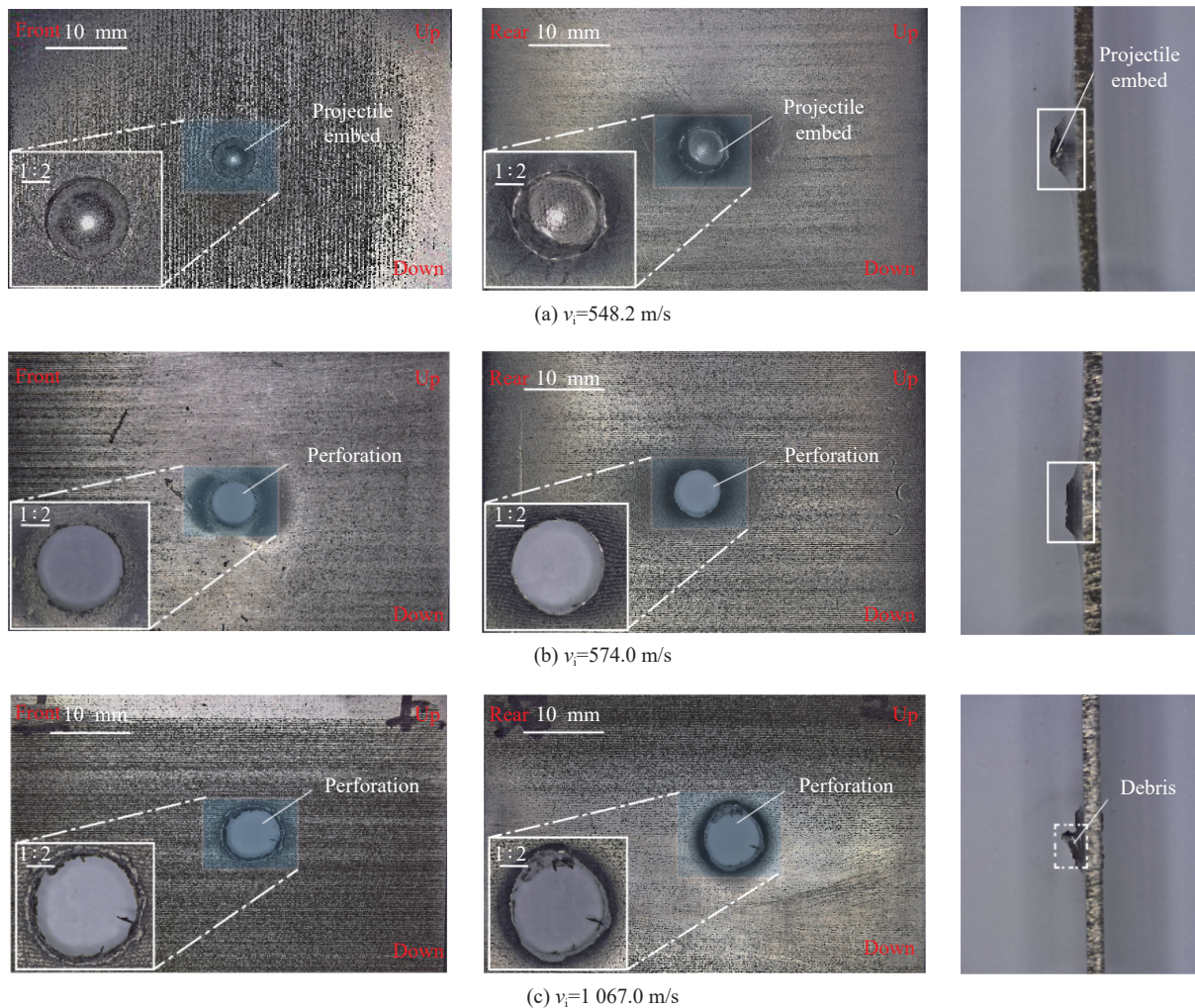


图 7 不同冲击速度下靶板的变形与破坏模式

Fig. 7 Deformation and failure modes of the targets impacted at different impact velocities

部隆起, 球形弹丸嵌入靶板之中, 靶板背面冲塞脱落。靶板的主要失效模式为局部盘隆起, 弹丸撞击产生的应力超过了材料的抗剪强度, 从而形成挤凿破坏的脆性失效(见图 7(a))。当初始速度  $v_i=574.0$  m/s, 即略高于弹道极限 ( $v_i > v_{bl}$ ) 时, 弹丸击穿靶板, 弹靶作用时间缩短, 靶板在经历背部隆起和碟形变形后, 在弹孔周围可以观察到花瓣状的孔缘, 靶板的整体弯曲变形程度和范围逐渐减小, 弹体从靶板上剪下的失效块成块状。靶板失效模式为局部盘隆起, 产生碟形变形, 最后发生脆性靶板的背面花瓣形破坏(见图 7(b))。当冲击速度继续升高, 初始速度  $v_i=1\ 067.0$  m/s, 即远高于弹道极限 ( $v_i \gg v_{bl}$ ) 时, 弹丸击穿靶板, 弹靶作用时间进一步缩短, 靶板变形扩展速度高于塑性波速, 靶板不会出现典型的碟形变形, 局部出现一定的弯曲变形, 但变形并不明显, 弹体从靶板上剪下的失效块成粉末状。靶板的失效模式为局部盘轻微隆起, 弹体穿透后发生韧性靶板的孔口扩展型破坏(见图 7(c))。因此, 靶板的变形和破坏模式与其初始冲击速度密切相关。靶板在高速冲击过程下的主要破坏模式发生了由脆性靶板破坏到韧性靶板破坏的转变, 且随着冲击速度的升高, 弹靶作用时间缩短(见图 3), 背部隆起时间也随之缩短, 靶板的整体弯曲变形程度和范围逐渐减小, 失效块尺寸也随之不断减小。由于球形弹丸初始冲击速度的不同, 弹丸与靶板之间形成的作用力大小和作用时间也存在一定的差异, 因而产生了不同的穿甲破坏模式。

图 8 给出了弹孔直径  $D_h$  与弹体初始冲击速度的关系。为了更好地描述靶板在球形弹丸高速冲击后变形区域的破坏情况, 定量分析了靶板弹孔直径  $D_h$  与冲击速度之间的关系。通过测量弹孔正面和背面各个方向过圆心的距离, 取其平均值作为正面和背面弹孔直径。由图 8 可知, 在冲击速度范围内, 靶板正面弹孔直径随着冲击速度的升高近似呈线性增长, 且均大于弹丸直径 (5 mm)。靶板背面弹孔直径随着冲击速度的升高而增大, 但增大速率在不断减小, 与文献 [22] 中 2 mm 靶板的发展趋势一致。在穿孔情况下 ( $v_i \geq v_{bl}$ ), 由于弹丸变形, 靶板正面和背面所形成的弹孔直径均随初始速度的升高而增大, 且背面形成的弹孔直径大于正面的弹孔直径, 分析是由于拉伸失效主要发生在靶板背面所致。

### 3 结 论

在二级轻气炮上开展了直径为 5 mm 的 304 不锈钢球形弹丸冲击 IN718 合金靶板的弹道试验, 冲击速度在 548.2~1 067.0 m/s 之间, 得到以下主要结论。

(1) 靶板在高速冲击过程下的主要破坏模式由脆性破坏转变到韧性破坏, 耗能机制随之改变。随着冲击速度的升高, 弹靶作用时间随之缩短, 背部隆起和弯曲变形逐渐减小, 其变形更加局部化, 虽然局部出现一定的弯曲变形, 但变形并不明显, 且失效块尺寸随之不断减小。因此, 靶板的变形和破坏模式与弹丸的初始冲击速度密切相关。

(2) 靶板的能量吸收效率随着弹丸初始动能的增加而降低, 且降低速率逐渐减小, 靶板能量吸收效率的最大值出现在弹道极限速度附近, 靶板能量吸收效率趋于常值 0.7。

(3) 在冲击速度范围内, 弹丸击穿靶板后, 靶板的最大变形挠度随冲击速度的升高整体呈下降趋势。靶板正面和背面形成的弹孔直径均随着初始速度的升高而增大, 且背面形成的弹孔直径大于正面的弹孔直径。

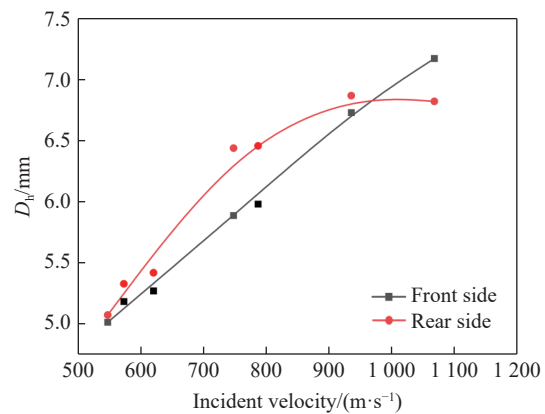


图 8 靶板弹孔直径随初始速度的变化曲线

Fig. 8 Bullet hole diameter in the targets impacted at different impact velocities

## 参考文献:

- [1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册 2: 变形高温合金、铸造高温合金 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [2] CHEN Y D, HUA J Y, FAN D, et al. High-speed projectile perforation of nickel-based Inconel 718 superalloy plates: experiments and modeling [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 192: 111181. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111181.
- [3] 庄景云, 杜金辉, 邓群. 变形高温合金 GH4169 组织与性能 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 1–3.
- [4] HE Q, XUAN H J, LIU L L, et al. Perforation of aero-engine fan casing by a single rotating blade [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2013, 25(1): 234–241. DOI: 10.1016/j.ast.2012.01.010.
- [5] BIAN Y L, LIU Q, FENG Z D, et al. High-speed penetration dynamics of polycarbonate [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 223: 107250. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107250.
- [6] HUA J Y, LIU Q, YANG H, et al. High-speed penetration of cast Mg-6Gd-3Y-0.5Zr alloy: experiments and modeling [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 241: 107942. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107942.
- [7] LIU Q, HUA J Y, XU Y F, et al. Ballistic penetration of high-entropy CrMnFeCoNi alloy: experiments and modelling [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 249: 108252. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2023.108252.
- [8] SCIUVA M D, FROLA C, SALVANO S. Low and high velocity impact on Inconel 718 casting plates: ballistic limit and numerical correlation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(8): 849–876. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00156-2.
- [9] SANG L J, LU J X, WANG J, et al. In-situ SEM study of temperature-dependent tensile behavior of Inconel 718 superalloy [J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56(28): 16097–16112. DOI: 10.1007/s10853-021-06256-8.
- [10] ZHANG D Y, FENG Z, WANG C J, et al. Comparison of microstructures and mechanical properties of Inconel 718 alloy processed by selective laser melting and casting [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 724: 357–367. DOI: 10.1016/j.msea.2018.03.073.
- [11] 邹品. GH4169 高温动态本构模型与高速冲击性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.  
ZOU P. Research on dynamic constitutive model at high temperatures and high speed impact performance of GH4169 [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [12] 宋宗贤. 基于 SLM 成形的 Inconel718 镍基高温合金超高周疲劳断裂机理研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2021. DOI: 10.27721/d.cnki.gyzjc.2021.000100.  
SONG Z X. Study on ultrahigh cycle fatigue fracture mechanism of Inconel718 nickel-based superalloy formed by SLM [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2021. DOI: 10.27721/d.cnki.gyzjc.2021.000100.
- [13] 王建国, 王红纓, 王连庆, 等. GH4169 合金高温多轴低周疲劳寿命预测 [J]. *机械强度*, 2008(2): 324–328. DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2008.02.005.  
WANG J G, WANG H Y, WANG L Q, et al. Fatigue life prediction for GH4169 superalloy under multi-axial cyclic loading at 650 °C [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2008(2): 324–328. DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2008.02.005.
- [14] LEE W S, LIN C F, CHEN T H, et al. Dynamic impact response of Inconel 718 alloy under low and high temperatures [J]. *Materials Transactions*, 2011, 52(9): 1734–1740. DOI: 10.2320/matertrans.M2011130.
- [15] SHOCKEY D A, SIMONS J W, BROWN C S, et al. Shear failure of Inconel 718 under dynamic loads [J]. *Experimental Mechanics*, 2007, 47(6): 723–732. DOI: 10.1007/s11340-007-9068-2.
- [16] KOBAYASHI T, SIMONS J W, BROWN C S, et al. Plastic flow behavior of Inconel 718 under dynamic shear loads [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(5): 389–396. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.03.005.
- [17] PEREIRA J M, LERCH B A. Effects of heat treatment on the ballistic impact properties of Inconel 718 for jet engine fan containment applications [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25(8): 715–733. DOI: 10.1016/S0734-743X(01)00018-5.
- [18] ERICE B, PÉREZ-MARTÍN M J, GÁLVEZ F. An experimental and numerical study of ductile failure under quasi-static and impact loadings of Inconel 718 nickel-base superalloy [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 69: 11–24. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.02.007.
- [19] LIU J, ZHENG B L, ZHANG K, et al. Ballistic performance and energy absorption characteristics of thin nickel-based alloy plates at elevated temperatures [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 126: 160–171. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.12.012.



- [20] 刘焦, 郑百林, 杨彪, 等. 镍基合金薄板不同温度下的弹道冲击行为 [J]. *航空材料学报*, 2019, 39(1): 79–88. DOI: 10.11868/j.issn.1005-5053.2018.000045.  
LIU J, ZHENG B L, YANG B, et al. Ballistic impact behavior of thin nickel-base alloy plates at different temperatures [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2019, 39(1): 79–88. DOI: 10.11868/j.issn.1005-5053.2018.000045.
- [21] RODRÍGUEZ-MILLÁN M, DÍAZ-ÁLVAREZ A, BERNIER R, et al. Experimental and numerical analysis of conical projectile impact on Inconel 718 plates [J]. *Metals*, 2019, 9(6): 638. DOI: 10.3390/met9060638.
- [22] 吴轲. GH4169 高温合金加筋结构机匣抗冲击能力研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019. DOI: 10.27239/d.cnki.gnhhu.2019.000311.  
WU K. Research on impact resistance of GH4169 casing in the form of stiffened structure [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. DOI: 10.27239/d.cnki.gnhhu.2019.000311.
- [23] 谭学明, 郭伟国, 林栋, 等. GCr15 弹丸冲击不同厚度 GH4169 板的变形与破坏模式试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2022, 41(7): 199–206.  
TAN X M, GUO W G, LIN D, et al. Tests for deformation and failure modes of GH4169 plates with different thickness under GCr15 projectile impact [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(7): 199–206.
- [24] KAWAI N, TSURUI K, HASEGAWA S, et al. Single microparticle launching method using two-stage light-gas gun for simulating hypervelocity impacts of micrometeoroids and space debris [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(11): 115105. DOI: 10.1063/1.3498896.
- [25] SHARMA P, CHANDEL P, BHARDWAJ V, et al. Ballistic impact response of high strength aluminium alloy 2014-T652 subjected to rigid and deformable projectiles [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 126: 205–219. DOI: 10.1016/j.tws.2017.05.014.
- [26] RECHT R F, IPSON T W. Ballistic perforation dynamics [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1963, 30(3): 384–390. DOI: 10.1115/1.3636566.
- [27] 邓云飞, 张伟, 曹宗胜, 等. 叠层顺序对双层 A3 钢薄板抗侵入性能的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(3): 263–268. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)03-0263-06.  
DENG Y F, ZHANG W, CAO Z S, et al. Influences of layer order on ballistic resistance of double-layered thin A3 steel plates [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(3): 263–268. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)03-0263-06.
- [28] DENG Y F, WU H P, ZHANG Y, et al. Experimental and numerical study on the ballistic resistance of 6061-T651 aluminum alloy thin plates struck by different nose shapes of projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 160: 104083. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.104083.
- [29] RODRÍGUEZ-MILLÁN M, VAZ-ROMERO A, RUSINEK A, et al. Experimental study on the perforation process of 5754-H111 and 6082-T6 aluminium plates subjected to normal impact by conical, hemispherical and blunt projectiles [J]. *Experimental Mechanics*, 2014, 54(5): 729–742. DOI: 10.1007/s11340-013-9829-z.
- [30] RODRIGUEZ-MILLÁN M, GARCIA-GONZALEZ D, RUSINEK A, et al. Perforation mechanics of 2024 aluminium protective plates subjected to impact by different nose shapes of projectiles [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 123: 1–10. DOI: 10.1016/j.tws.2017.11.004.

(责任编辑 蔡国艳)