

材料在脉冲加热下的动响应实验

李清源 蒋垣昆 杜世刚

宋林西 薛克珍 马维仪

(1983年11月21日收到)

本文描述铝合金、铜合金、不锈钢和多孔不锈钢等材料在脉冲电子束加热下的动响应试验。试验结果表明：无孔材料呈现层裂破坏，编织型多孔材料呈现“十字形”裂纹破坏，而毡型多孔材料呈现“凸起变形”；层裂破坏属于动态韧性断裂；多孔材料凸起变形的能量阈值有高于无孔材料层裂能量阈值的趋势

一、引言

随着科学技术的发展和工程设计的需要，材料在脉冲加热条件下的动响应问题愈来愈受到人们的关注。国外已有不少研究机构和产业部门用各种方法研究材料在脉冲加热条件下的动态破坏问题。文献[1]用强脉冲激光辐照铝合金材料，在材料背面获得了层裂破坏，文献[2]用脉冲电子束对铝合金等材料进行辐照试验，得到了层裂破坏的能量阈值。

本文叙述了用强流脉冲电子束对密实铝合金材料、密实铜合金材料、密实不锈钢材料以及由不锈钢丝制成的多孔材料进行的辐照试验，对它们的破坏断口做了宏观分析和扫描电子显微分析。分析结果表明，材料的破坏基本上属于动态韧性断裂。试验还证明，毡型多孔材料的“凸起”变形阈值能量高于密实（即无孔）材料的层裂阈值能量。在相同的电子束辐照下，在抵抗应力波引起的动态断裂能力方面，多孔材料显出相当的优越性。

二、试件制备及其有关数据

1. 试件制备

(1) 编织型多孔试件制备

编织型多孔试件有两种。一种是编织型多孔GH30试件。它系用直径0.3毫米（经向）和0.2毫米（纬向）的GH30纤维编织成“布”，将布按经纬方向重叠起来，轧制烧结成板，再机械加工成直径约70毫米的园平板。根据不同的多孔度要求，可制成不同厚度但重量相等的多

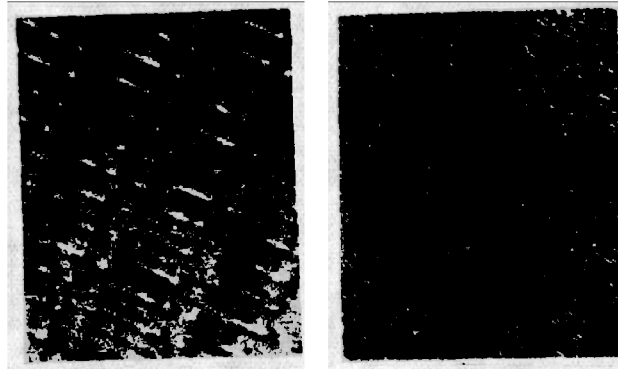
孔试件。当孔隙度为零时,试件就变成无孔材料,本文称之为“密实材料”,以便与有孔(或多孔)材料相区别。图1a为编织型多孔试件的放大照片。另一种是毡型多孔1Cr18Ni9Ti试件。其制造工艺类同。

(2) 毡型多孔试件制备

将直径约40微米,长约5~10毫米的1Cr18Ni9Ti短纤维沉降于模具中压制所需毛坯,经真空烧结成型,再机械加工成直径约70毫米园板。图1b为其放大照片。

(3) 密实型试件制备

密实型试件系指初始多孔度为零的试件。其材料分别为铝合金板材、铜合金板材和1Cr18Ni9Ti钢板。试件机加工成厚3.0毫米,直径约70毫米的园板。



a. 编织型试件 b. 毡型试件

图1 多孔试件放大照片

2. 试件的有关数据

为了对多孔材料和密实材料进行比较,如前所述,使试件的总重量保持相等而变更其厚度。为此,多孔试件的厚度在3.3~3.5毫米间变化。试件的有关数据列入表1。

表1 材料的有关数据

材 料 名 称	制造 类型	孔隙度 (%)	σ_b^* (kg/mm ²)		a_k^* (kg-m/cm ²)	平均孔径 (μ m)
			纵向	横向		
编 织 型	0	0	~ 50	~ 35	2.2~3	0
		0.94	~ 35	~ 27	~ 3.0	~ 10.6
	11.8	11.8	33~36	23~28	2.6~3.6	~ 13.7
		11.8	33~36	23~28	2.6~3.6	~ 13.7
	13.0	13.0	~ 30	~ 25	~ 3.0	12~15
		13.8	~ 28	~ 9	3~4	12~15
毡 型	16.0	~ 27	~ 8	~ 2.5	~ 10	
	15.3	26~30	~ 10	3~4	12~13.5	
	28.0	~ 26	~ 8	~ 2.5	~ 7.7	
	31.0	~ 25	~ 7	~ 2.0	~ 6.0	
不锈钢	密实	0	~ 50			0
铜合金	密实	0	~ 18		2~3	0
铝合金	密实	0	~ 12		~ 1	0

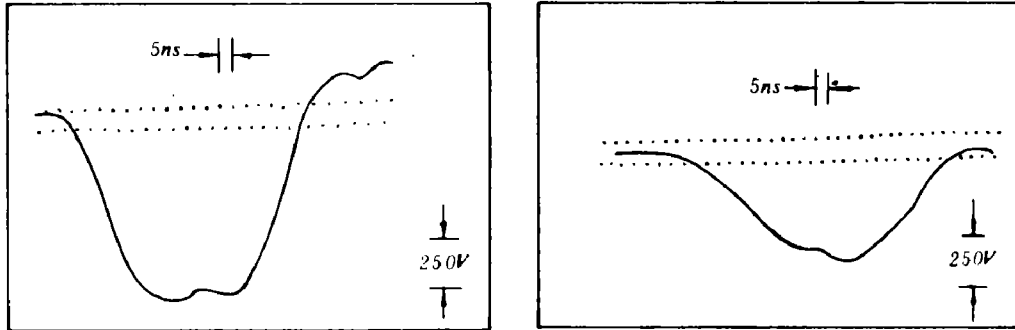
* σ_b —材料静态拉伸强度; ** a_k —材料的冲击强度; ·—因机械加工有超差,故分别列出。

三、试验方法与结果描述

1. 试验方法简介

本试验采用相对论电子束对试件进行脉冲加热。所用最大电压约为0.75~1.0兆伏,最大

束流约为96~130千安，阴极采用平头型和中空5度锥两种形式，电子束斑（在靶材上）的最大表观半径约8毫米。图2为电子束的典型电压时间曲线和电流时间曲线。



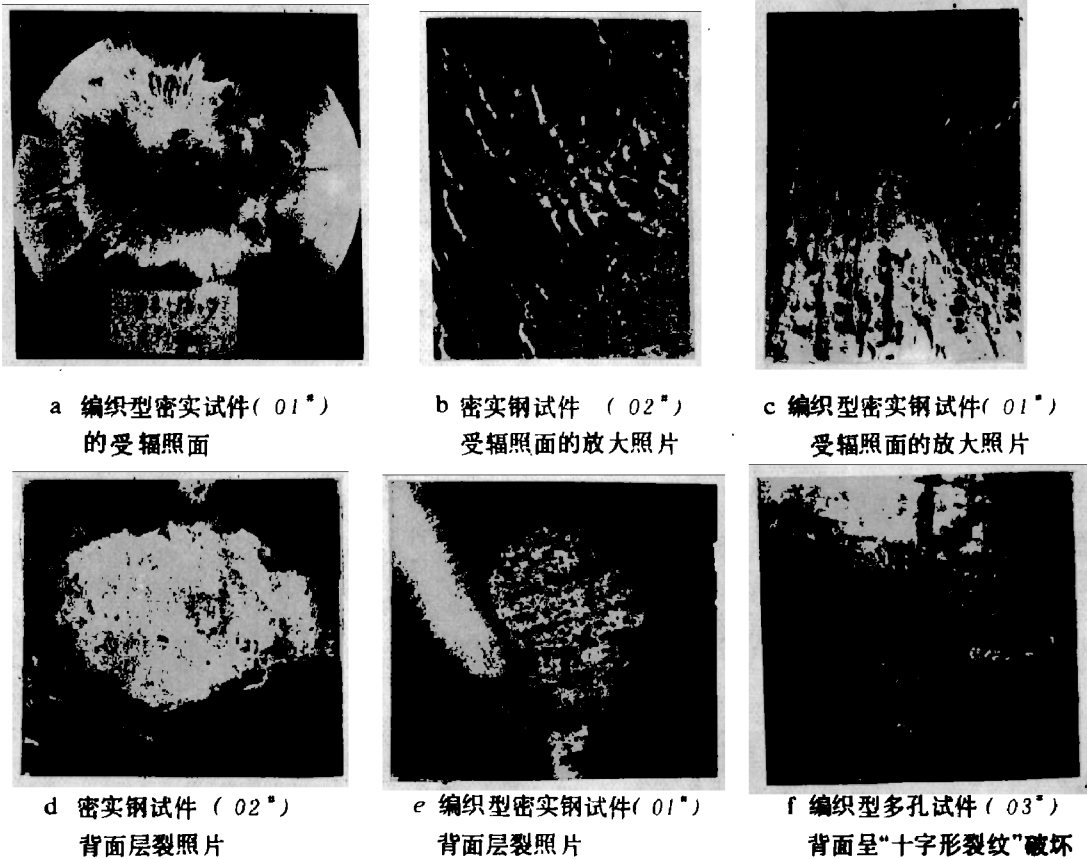
a. 典型电压—时间曲线

b. 典型电流—时间曲线

图2 典型电子束曲线

2. 试验结果描述

图3a为编织型钢试件受电子束辐照面的照片，中心黑色园斑为电子束辐照在试件上的园斑，园斑周围的“放射状花朵”为试件的熔化液体在试件表面上沿径向快速流动或飞溅的痕



a 编织型密实试件(01°)的受辐照面

b 密实钢试件(02°)受辐照面的放大照片

c 编织型密实钢试件(01°)受辐照面的放大照片

d 密实钢试件(02°)背面层裂照片

e 编织型密实钢试件(01°)背面层裂照片

f 编织型多孔试件(03°)背面呈“十字形裂纹”破坏

图3 编织型试件与密实钢试件受辐照破坏情况

迹。图3b为密实钢试件受辐照面熔化液体快速流动的放大图片，图3c为图3a的放大照片。比较图3b和图3c可以看出，图3c上有许多微小颗粒和条痕，乃系编织型试件未完全熔断的纤维

残骸所致。

图3d和图3e分别为密实钢试件(02[#])和编织型密实钢试件(01[#])背面产生层裂破坏照片。由图3d、e和后面的图8可以看出,层裂片极薄,层裂只是发生在背表面附近,层裂区边缘极不规则。图3d和图3e的区别在于:密实试件的层裂面比较光滑平坦,而编织型密实材料的层裂面凹凸不平,呈现出编织纤维的方向。

随着电子束面能量密度增加,编织型多孔试件会产生“十字形裂纹”破坏。图3f就是03[#]试件遭受较高的面能量密度电子束辐照后产生的十字形裂纹破坏照片。可以看出,破坏裂纹沿着编织纤维的经向和纬向产生。出现十字形裂纹破坏的原因,除面能量密度较高以外,显然也与此类试件的编织工艺有关。

但是,对毡型多孔试件而言,在本文试验条件下,既未出现层裂破坏,也未呈现十字形裂纹破坏,而是呈现“凸起变形”,如图4a的照片所示,它表示毡型多孔试件(09[#])受电子束辐照后背面凸起的照片。



图4 毡型多孔试件(09[#])背面
“凸起变形”照片

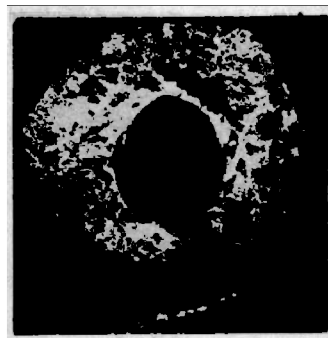


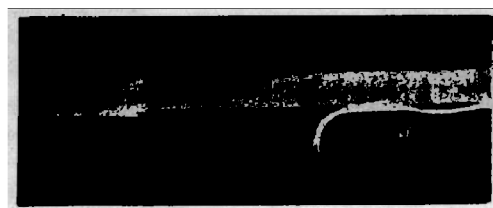
图5 密实铜合金试件(14[#])
的孔洞和层裂破坏

此外,我们还对密实铜合金、密实铝合金制成的试件进行了电子束辐照试验,试验后的铜合金试件见图5中的照片。由于铜合金和铝合金的熔化能和汽化能远比钢小,所以在相同的面能量密度下,铜合金和铝合金试件不仅产生“孔洞”(由烧蚀引起)破坏,而且在孔洞周围还出现了层裂破坏(由应力波引起)。

为了观察试件在电子束辐照后沿厚度方向的破坏情况,本文用“线切割法”将辐照后的试件沿厚度方向剖开,以便不损坏材料的金相组织。图6给出了几种典型情况。图6a表示密



a 密实铜合金试件(04[#])



b 密实钢试件(02[#])

图6 电子束辐照试件的横剖面

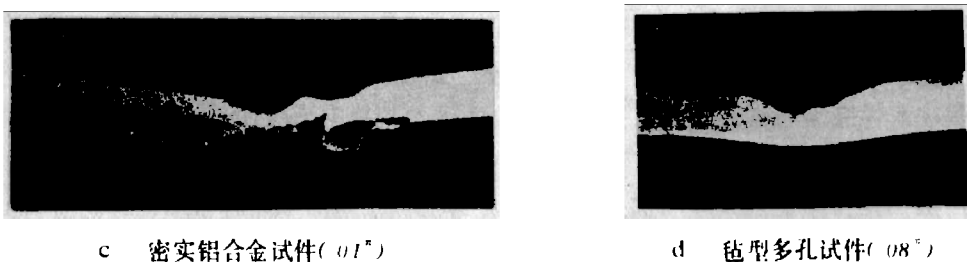
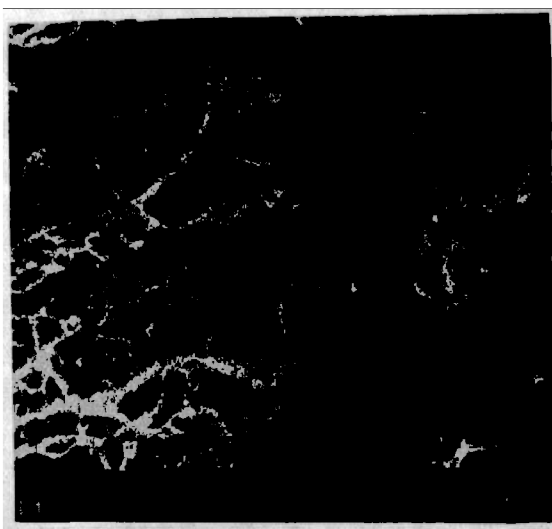
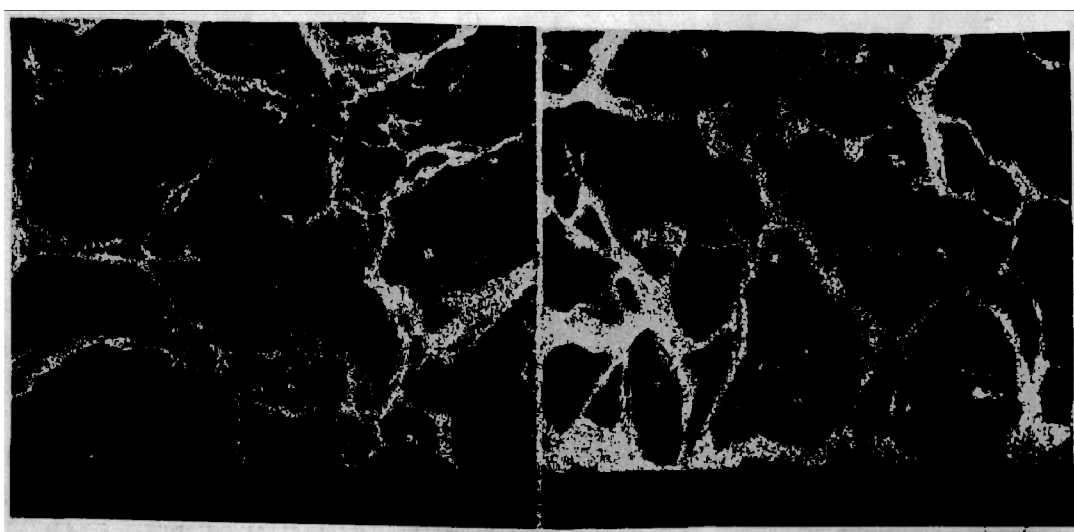


图6 电子束辐照试件的横剖面

实铜合金试件(04°)的横剖面图片,试件产生层裂破坏,但未与试件完全分离;图6b表示密实钢试片(02°)产生层裂破坏的情况,层裂片从试件上飞离,但还有一部分与试件相连,同时,试件正面有质量损失凹陷,试件产生微弯曲塑性变形;图6c为密实铝合金试件(01°)与图6b类似,但塑性弯曲变形较大;图6d为毡型多孔试件(08°)的横剖面照片,由于该试件为多孔材料,所以试件正面有较深的质量损失凹陷,背面有明显的凸起变形,但没有层裂破坏。图6b、图6c和图6d的照片清楚地表明,当我们把试件看作一个园形平板结构时,园板的正面束斑处由于熔化和汽化的材料喷溅而产生一个反冲载荷,从而使园板产生塑性弯曲变形,宛如周边支持的园板中心某个小面积上施加一集中载荷,园板会产生塑性弯曲变形一样。



a 密实铜合金试件(14°)(×920)



b 密实钢试件(02°)(×1130)

c 密实铝合金试件(02°)(×927)

图7 密实金属试件层裂面显微照片

用肉眼观察层裂断口,发现它与脆性材料在静拉伸载荷下的断口极为相象,即呈现脆性断裂。也就是说,象铝合金、铜合金和不锈钢这类韧性材料在极短脉冲(亚微秒)拉伸载荷下是否会呈现脆性断裂特性呢?为此,我们对层裂面进行扫描电子照相,图7a、图7b和图7c分别表示铜合金(14*)、不锈钢(02*)和铝合金(02*)层裂面的典型扫描电子照片。由这些照片看出:层裂面呈现出非常明显的韧窝结构,绝大多数韧窝不但浅而且也小(与静态拉伸引起的韧性断裂相比),极少出现脆性断裂条纹,同时,韧窝无方向性。由这些典型照片可以得出结论:铝合金、铜合金和不锈钢这类材料在亚微秒拉伸载荷作用下的断裂仍呈现韧性断裂,动态韧性断裂与静态韧性断裂的区别是韧窝较小较浅,因为在短周期载荷作用下,断裂面来不及形成深而大的韧窝结构。

此外,由图7a还可以看到一个“二次裂缝”,这是肉眼观察不到的。

四、结果分析与讨论

根据电子束的电压时间曲线(做了电感修正)和电流时间曲线,可以得到电子束的总能量,再根据“小孔成像”测得的束斑面积,就得到电子束的平均面能量密度。如果以密实钢材料产生层裂破坏的平均面能量密度的平均值为基准,则可以得到多孔钢试件的十字形裂纹和凸起变形所需要的平均面能量密度比。如果以钢试件的孔隙度 ρ/ρ_0 (ρ 为多孔钢材料的初始密度, ρ_0 为密实钢材料的初始密度)作为横坐标,以平均面能量密度比(以密实钢试件层裂破坏的平均面能量密度的平均值为1)为纵坐标,则得图8表示的平均面能量密度比与孔隙度的函数关系。图中给出了密实钢材料层裂破坏阈值的上下限,但对多孔钢材料,由于试件数据不足,只能用虚线给出凸起变形阈值能量的上下限。从图8可以看出,毡型多孔材料的凸起变形阈值能量要比密实材料的层裂破坏阈值高,其破坏阈值能量显然比密实材料层裂破坏阈值还要高。

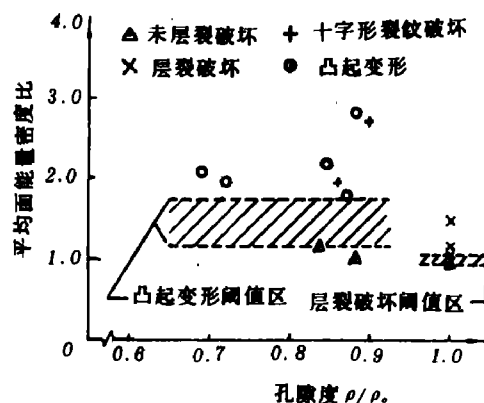


图8 平均面能量密度比与多孔度的函数关系

图9示意地表示脉冲电子束在多孔金属材料 and 密实材料中的能耗曲线和瞬态应力分布。由于电子束对材料的加热时间极短(80~100毫微秒),材料正面的薄层区域几乎是在恒容下被加热的,该薄层区的最外层呈汽相,内层呈液相,再往里面是高温固相材料。对于多孔材

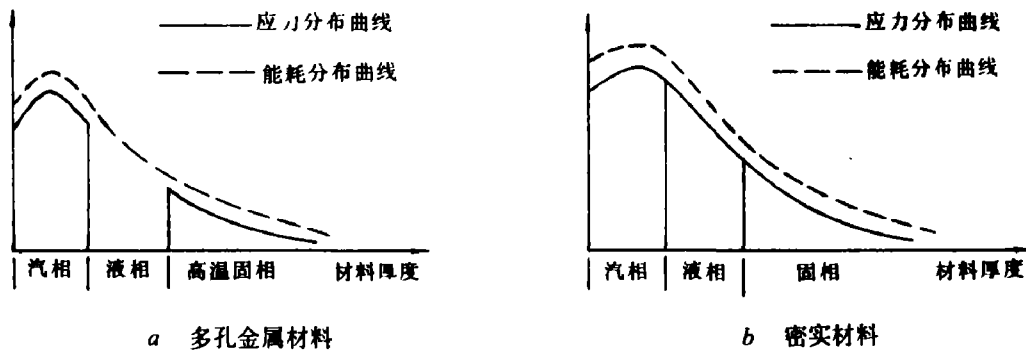


图9 能耗与应力分布曲线。——应力曲线，- - - - 能耗曲线

料来说, 该液相为“多孔液体”或“雾珠”。在脉冲加热后的极短时间内, 汽相开始迅速膨胀并填充了原来的孔隙, 但多孔液体中的孔却未能立即消失, 这就形成图9a实线所示的应力分布, 即液相区的应力为零(对于密实材料, 液相区无孔存在, 应力不为零)。只有当汽相材料的膨胀将多孔液体“压实”后(液体中不再有孔存在), 汽相材料的高压状态才能通过孔的液相区向高温固体材料内部传递, 形成应力波。正是由于多孔液体零应力状态的存在才使得传向高温固体的应力波峰值及波所携带的动量减少。这就是毡型多孔材料比其密实材料具有较高破坏阈值能量的物理解释。此外, 与密实材料相比, 多孔材料(指高温固体材料对应力波具有更好的衰减能力。从而可以说, 在相同的脉冲电子束辐照下, 重量相等的多孔金属材料 and 密实材料中形成的应力波及其动量是不相等的, 前者要小很多。

凸起变形阈值能量的下限是多少, 孔隙度取什么值较为适宜, 什么样的孔尺寸和孔分(即变孔隙度)为好, 有待进一步研究。

平均面能量密度的测量误差小于百分之二十。平均面能量密度比的误差还会小些。

五、初步结论

由前面的分析与讨论, 在本试验条件下可得出几点结论:

1. 铝合金、铜合金和不锈钢(包括编织型密实材料)的层裂均呈动态韧性断裂。动韧性断裂的特征是断裂面呈现小而无方向性的浅韧窝结构。

2. 编织型多孔材料的破坏呈现十字形裂纹。

3. 对于密实材料, 在一定条件下, 可以同时出现孔洞和层裂破坏。

4. 毡型多孔材料仅发生凸起变形。

5. 毡型多孔材料的凸起变形阈值能量比同种密实材料的层裂破坏阈值能量高, 其破能量阈值还要高。这证明了“多孔液体零应力效应”是存在的, 它使脉冲能量沉积在材料形成的应力波及其动量减小。

6. 在结构设计时, 必须考虑熔化和汽化材料飞溅产生的反冲载荷以及其引起的结构态塑性大变形。

7. 脉冲能量沉积引起的材料破坏形式大致有: 质量损失和表面凹陷、孔洞(和层裂)层裂和塑性大变形等。

本工作得到王乃彦、姜东华和张俊华同志的大力支持, 在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1) Fox, J. A., Barr, D. N., *Appl. phys. Lett.*, **22** (1) (1973), 591.
- 2) Stefansky, T., Shea, J. H., *Dynamic Fracture Experiments Using High Energy pulsed Electron Beams*, *DASA - 2698* (1971).

EXPERIMENTS ON DYNAMIC RESPONSE OF MATERIALS UNDER PULSED HEATING

Li Qingyuan Jiang Yuankun Du Shigang

Shong Linxi Xue Kezheng Ma Weiyi

Abstract

This paper describes the experiments on the dynamic response of materials such as aluminum alloy, copper, stainless steel and porous stainless steel under pulsed electron beams heating. The experimental results show that nonporous material exhibits spallation fracture and woven-type porous material exhibits "cross-crack" damage; but the felt-type porous material exhibits "convex deformation"; the spallation damage belongs to the dynamic ductile fracture; and there is a tendency that the threshold energy of convex deformation of porous material is higher than that of nonporous.