

# 在分离式 Hopkinson 拉杆实验中确定临界实验条件的经验方法\*

曹 雷, 文学军, 卢芳云, 覃金贵, 陈 荣  
(国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:**在分离式 Hopkinson 拉杆实验中,常常需要获得试样在经历一个拉力脉冲拉断情况下的最低应变率,而在分离式 Hopkinson 拉杆装置中确定对应最低应变率的发射压力需要进行多次尝试性实验。为了更好地解决这一问题,提出一种简单的经验方法,可以通过一次拉断的实验结果计算出一个拉力脉冲拉断试样需要的最小发射压力及相应的应变率,进一步可以预测不同发射压力下的应变率。对4种铝合金试样进行拉伸实验,结果表明,利用提出的经验方法得到的应变率结果与实验结果吻合较好,可以有效地对发射压力和实验应变率进行预估。

**关键词:**分离式 Hopkinson 拉杆;拉断位移;发射压力;动态加载

**中图分类号:** O347 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2015)01-107-05

## An empirical method for the determination of critical condition in split Hopkinson tensile bar test

CAO Lei, WEN Xuejun, LU Fangyun, QIN Jingui, CHEN Rong

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In split Hopkinson tensile bar test, it is necessary to obtain the smallest strain rate of the specimen which was fractured by a tensile stress impulse, while determining the corresponding launch pressure of the smallest strain rate needs to conduct many tentative tests. In order to solve this problem well, an empirical method which needs to carry out tensile fracture test only once was proposed to calculate the smallest launch pressure and strain rate to fracture the specimen. The method can further predict the strain rate in different launch pressure. The tensile fracture tests of four kinds of aluminum alloy testify that the proposed method is coincident with the experimental results and it is efficient to evaluate the launch pressure and strain rate.

**Key words:** split Hopkinson tensile bar; displacement of tensile fracture; launch pressure; dynamic loading

材料在不同的加载速率下表现出不同的响应特点,在动态加载作用下的响应涉及应变率效应和波传播效应,往往与静态加载条件下的响应大不相同。落锤、分离式 Hopkinson 杆、轻气炮以及化爆加载是目前使用广泛的动载实验技术,其中,分离式 Hopkinson 杆被认为是获得材料在  $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$  应变率范围内应力-应变关系最基本的加载方式,以分离式 Hopkinson 杆技术为基础的高应变实验是目前研究的热点<sup>[1-3]</sup>。

分离式 Hopkinson 杆实现动态拉伸的技术可以分为两类,一类是直接对试样进行拉伸加载,另一类是改变试样构形,将施加在试样上的压缩加载转换为试样中某一部位的拉伸加载。在直接拉伸实验中,多采用将试样的两端加工成楔型、带螺纹、套环、销钉夹头等方式进行夹持<sup>[4]</sup>,其中螺纹

连接使用得最为广泛。然而采用螺纹式连接方式时,由于螺纹形位公差和间隙的存在,形成连接段的高次超静定约束,从而可能引起应变值偏大,还可能引起应力时间曲线和应力-应变曲线的非本构抖动<sup>[5]</sup>。胶粘连接方式可以克服这种问题,得到的应变信号质量明显提高, Qin 等<sup>[6]</sup>采用胶粘连接,通过分离式 Hopkinson 拉杆 (Split Hopkinson Tensile Bar, SHTB) 实验系统对3种高强钢拉伸断裂行为中的应变率进行了研究,获得的应力平衡比用螺纹连接得到的应力平衡更好,且应力-应变曲线重复性很好。然而采用胶粘连接方式需要一定固化时间,且进行多次尝试性实验既耗时又费力。因此,人们试图进行尽量少的尝试性实验,获得感兴趣的加载应力。

在 SHTB 实验系统中,对于固定的发射装置,

\* 收稿日期:2014-06-12

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(11132012);国家自然科学基金面上资助项目(11172328)

作者简介:曹雷(1985—),男,吉林长春人,博士研究生,E-mail:cl\_caolei@163.com;

卢芳云(通信作者),女,教授,博士,博士生导师,E-mail:Fylu@nudt.edu.cn

由于子弹长度有限,其可以提供的应力加载时间具有最大值。因此,在保证拉断的前提下,试样的加载应变率具有最小值。利用 SHTB 开展材料的拉伸实验时,研究者往往希望获得材料在较低应变率被一个应力脉冲拉断情况下的应力-应变曲线。然而对于一种未知特性的材料而言,需要多次调节发射压力进行尝试性实验才能获得理想的加载应力。尽管许多研究者对自己使用的 SHTB 发射装置的发射压力与子弹速度有许多经验数据,但是多次进行尝试性实验仍然是不经济的。

基于 SHTB 实验系统,提出了一种简单的方法——只需进行一次在一个脉冲内将试样拉断的尝试性实验,便可以从实验结果中分析出试样在一个应力脉冲内被拉断所需的最小发射压力及相应的应变率,可以大大缩短尝试性实验的次数和实验时间。对 4 种未知特性的铝合金材料进行了实验验证,利用该方法得到的发射压力和拉伸应变率与实验结果吻合较好,表明该方法有效可靠,可以用于 SHTB 系统的实验中。

### 1 理论基础

SHTB 实验系统依靠压缩空气作为动力能源,推动子弹运动撞击入射杆进而对试样进行动态加载。发射压力与子弹发射速度的关系可以通过图 1 所示的两种状态来分析。假设子弹质量为  $M$ ,加速段长度为  $L$ ,横截面积为  $S$ ,气室容积为  $V_0$ ,初始压力为  $p_0$ ,子弹在发射管的出口速度为  $v_0$ ,如果不考虑子弹与发射管内壁的摩擦以及热传导的影响,在  $t$  时刻,按照牛顿第二定律,对子弹有

$$p(x)S = M \frac{dv(x)}{dt} = Mv(x) \frac{dv(x)}{dx} \quad (1)$$

对式(1)进行整理并积分得

$$\int_0^L p(x)S dx = \int_0^{v_0} Mv dv \quad (2)$$

式(2)可写为

$$M \frac{v_0^2}{2} = S \int_0^L p(x) dx \quad (3)$$

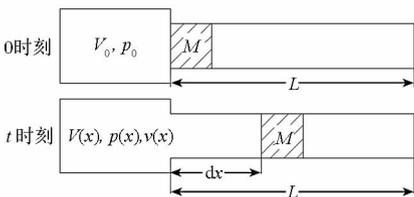


图 1 发射装置不同时刻的状态

Fig. 1 Launching states in different time

假设气体膨胀推动子弹运动可视为理想气体绝热膨胀过程,满足绝热方程

$$p_0 V_0^\gamma = p(x) (V_0 + Sx)^\gamma \quad (4)$$

由式(4)得到  $p(x)$  的表达式,将其代入式(3),得到气室初始压力  $p_0$  与子弹发射速度  $v_0$  之间的关系为

$$\frac{p_0}{v_0^2} = \frac{M}{2V_0^\gamma} (1 - \gamma) [(V_0 + SL)^{1-\gamma} - V_0^{1-\gamma}]^{-1} = a_1 \quad (5)$$

其中,  $\gamma$  为气体绝热指数,为常数,对于空气常取 1.4;  $a_1$  为比例常数。

对于相同材料、相同直径的入射杆和透射杆,按 Hopkinson 杆实验技术的两个基本假定<sup>[7]</sup>: 1) 杆中一维应力波假定; 2) 试样应力、应变沿其长度均匀分布假设,有

$$\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t \quad (6)$$

其中,下标  $i, r, t$  分别表示入射波、反射波和透射波信号。

试样应变率的计算公式为

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{2c_0}{l_0} \varepsilon_r = \frac{2c_0}{l_0} (\varepsilon_i - \varepsilon_t) \quad (7)$$

其中,  $l_0$  为试样的原始长度,  $c_0$  为入射杆中声速。

实验中试样采用片状试样,其拉伸段横截面积与杆横截面积之比仅为 2.2% (试样及杆的具体尺寸见第 2 节),透射应变与入射应变相比可以忽略,因此式(7)中应变率可以近似写为

$$\dot{\varepsilon}_i = -\frac{2c_0}{l_0} \varepsilon_i \quad (8)$$

子弹以速度  $v_0$  撞击入射杆,在杆中产生入射脉冲  $\sigma_i$ ,对称碰撞下其幅值为  $\rho c_0 v_0 / 2$ ,因为在杆中还满足  $\sigma_i = E \varepsilon_i$ ,所以有

$$E \varepsilon_i = \frac{\rho c_0 v_0}{2} \quad (9)$$

其中,  $\rho, E, c_0$  分别为入射杆的密度、弹性模量和杆中声速。

由式(8)和式(9)得

$$\frac{\dot{\varepsilon}_i}{v_0} = \frac{\rho c_0^2}{El_0} = a_2 \quad (10)$$

其中,  $a_2$  为比例常数。

由式(5)和式(10),消去  $v_0$ ,得

$$\frac{p_0}{\varepsilon_i^2} = \frac{a_1}{a_2^2} = a \quad (11)$$

其中,  $a$  是比例常数。

下面定义一个与材料特性和试样构型相关的物理量,称之为拉断位移

$$S = v \cdot t \quad (12)$$

其中,  $v$  是子弹发射速度,  $t$  是应力加载时间。理论上,在一次拉伸实验中试样的拉断位移  $S$  达到

临界值  $S_c$  时,试样即发生断裂。

对于一种未知特性的材料,采用 SHTB 进行拉伸实验,从尝试性实验中获得最小发射压力及相应的应变率的思路是:

1) 进行一次发射压力尽可能高的尝试性实验,务必保证该次实验可以使试样在一个应力脉冲内被拉断,通过压力计记录发射压力  $p_0$ ,根据式(5)计算得到子弹的发射速度  $v_0$ ,通过透射信号得到应力加载时间  $t$ ,根据式(12)计算得到试样的临界拉断位移  $S_c$ ;

2) 通过子弹长度确定理论应力脉宽,通过空杆实验确定单次应力脉冲最大加载时间  $t_{max}$ ;

3) 将临界拉断位移  $S_c$  和单次应力脉冲最大加载时间  $t_{max}$  代入式(12),反求得到子弹的最小发射速度  $v_{min}$ ,进而求得最小发射压力  $p_{min} = (t/t_{max})^2 p_0$ ;

4) 将尝试性实验数据计算得到的应变率  $\dot{\epsilon}$  和发射压力  $p_0$  代入式(11)中,通过比例恒等关系,即可得到最小发射压力  $p_{min}$  下的材料应变率  $\dot{\epsilon}_{min} = (t/t_{max}) \dot{\epsilon}$ 。

## 2 实验及验证

实验在国防科技大学理学院轻气炮实验室的分离式 Hopkinson 压拉通用实验装置上进行,图 2 为实验装置示意图,其中气室容积  $V = 10L$ ,发射管内径  $38mm$ ,长  $1220mm$ ;入射杆、透射杆和子弹的材料均为 LY12,密度为  $2.7g/cm^3$ ,弹性模量为  $71GPa$ ,杆径  $20mm$ ,杆中声速  $c_0 = 5053m/s$ ;套筒式子弹长  $1040mm$ ,理论上不加整形器可以获得的脉宽为  $412\mu s$ ,在发射管中的加速段长度  $L = 230mm$ 。套筒式子弹与入射杆之间无缝接触装配,套筒式子弹与发射管之间通过固定在套筒式子弹上的聚乙烯塑料环支撑装配,子弹与入射杆、塑料环与发射管之间涂抹润滑油以减小摩擦,套筒式子弹和聚乙烯支撑环的质量和为  $1000g$ 。透射杆后端安装控制单脉冲的法兰盘。

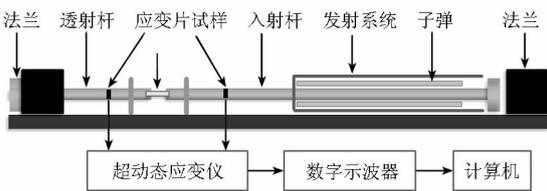


图 2 SHTB 实验装置示意图

Fig.2 Schematics of SHTB installations

实验采用片状试样,其尺寸如图 3 所示。图中所示的试样中心的  $w \times l_0 \times e$  区域为试验段,试样两端的  $b \times d \times e$  区域与入射杆和透射杆通过胶

粘方式连接起来。

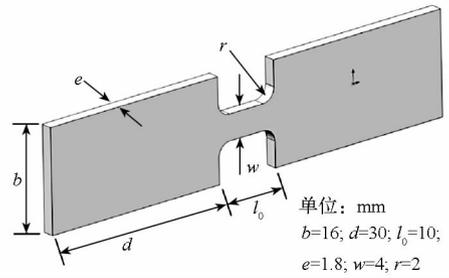


图 3 试样的尺寸示意图

Fig.3 Size schematic of the specimen

根据以上实验装置及试样初始参数,可以按式(5)、式(10)及式(11)得到 3 个比例常数的值:  $a_1 = 2686.2$ ,量纲为  $ML^{-1}$ ;  $a_2 = 97.1$ ,量纲为  $L^{-1}$ ;  $a = 0.285$ ,量纲为  $ML$ 。

### 2.1 空杆实验

不安装试样和透射杆,可以通过入射杆上的应变片得到一个应力脉冲的加载时间。在法兰上安装波形整形器,以提高应力加载时间,示波器得到的信号如图 4 所示。可以看出,第一个应力脉冲大约持续  $600\mu s$ ,但是  $500\mu s$  之后信号开始进入下降沿。如果试样在  $500\mu s$  的稳定应力脉冲时间内不能被拉断,则保守地认为在一个应力脉冲时间内试样不能被拉断,便确定单次应力脉冲最大加载时间  $t_{max} = 500\mu s$ ,发生在  $500\mu s$  内的拉伸断裂为有效的实验结果。

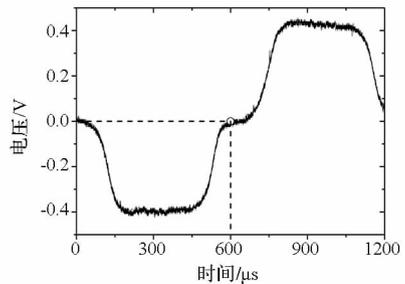


图 4 空杆实验示波器记录的信号

Fig.4 Signal recorded by oscillograph without specimen

### 2.2 验证实验

在 SHTB 实验平台上针对某未知特性的 A, B, C, D 四种铝合金材料进行拉伸实验。对铝合金 A 试样,初始发射压力为  $0.53MPa$ ,作为尝试性实验。从图 5 给出的透射应变 - 时间曲线中可以看出,试样在  $410\mu s$  时被拉断,即试样在有效最大加载时间  $500\mu s$  内被拉断。计算得到本次实验的子弹速度为  $14m/s$ ,该试样的临界拉断位移  $S_c = 5.76mm$ ,最小发射压力  $p_{min} = 0.35MPa$ ,相应的应变率  $\dot{\epsilon}_{min} = 1066s^{-1}$ 。

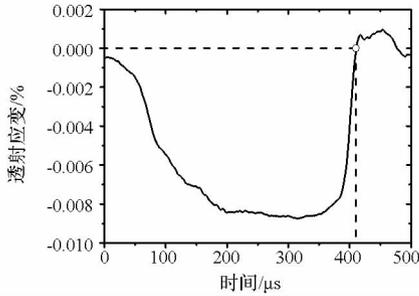


图 5 铝合金 A 的透射应变 - 时间曲线

Fig. 5 Transmitted strain history of aluminium-alloy A

由于材料的动态性能具有分散性,在实验中,试样达到临界拉断位移后,可能不会断裂。因此,实验时为保证拉伸断裂可靠发生,适当提高最小发射压力,在发射压力为 0.45MPa 和 0.38MPa 的条件下进行实验,将得到的数据进行处理可得到实验应变率  $\dot{\epsilon}_e$ 。按照求解思路得到计算应变率和拉断位移等结果。对铝合金 A 试样,发射压力分别为 0.53MPa、0.45MPa、0.38MPa 的实验和计算结果如表 1 所示。其中,发射压力为压力计记录的结果,应力加载时间为判读透射信号得到的结果,实验应变率为实验数据按照式(7)处理得到的结果,计算应变率为根据尝试性实验数据按照式(11)计算得到的结果。

表 1 铝合金 A 的实验和计算结果

Tab. 1 Experimental and computational results of aluminium-alloy A

编号	发射压力 (MPa)	应力加载时间 ( $\mu\text{s}$ )	实验应变率 ( $\text{s}^{-1}$ )	计算应变率 ( $\text{s}^{-1}$ )	拉断位移 (mm)
1#	0.53	410	1300	—	5.76
2#	0.45	448	1210	1198	5.86
3#	0.38	491	1100	1101	5.84
4#	0.38	454	1190	—	5.84

从表 1 可以看出,依据发射压力 0.53MPa 的实验结果计算得到的试样在发射压力分别为 0.45MPa 和 0.38MPa 时的应变率与实验应变率吻合较好;随着发射压力降低,应力加载时间变长,逼近单个应力脉冲最大加载时间 500 $\mu\text{s}$ 。需要说明的是,对于 2#、3#和 4#实验,拉断位移是采用实验数据的结果得到的,其中子弹速度是采用式(10)按照不同实验的恒等关系计算得到的,计算得到的拉断位移与作为预估常数的 1#实验拉断位移结果非常接近。

用同样的方法对铝合金 B 进行拉伸实验。以子弹发射压力为 0.3MPa 作为尝试性实验。从图 6 给出的透射应变 - 时间曲线中可以看出,试样在 384 $\mu\text{s}$  时被拉断,计算得到本次实验的子弹速度为 10.6m/s,该试样的临界拉断位移  $S_c = 4.06\text{mm}$ ,最小发射压力  $p_{\min} = 0.18\text{MPa}$ ,相应的应变率  $\dot{\epsilon}_{\min} = 695\text{s}^{-1}$ 。

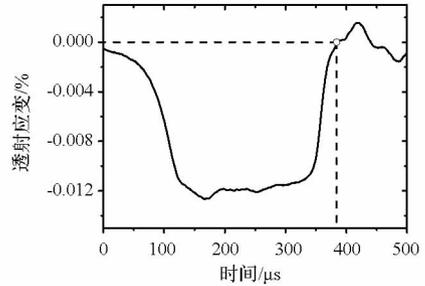


图 6 铝合金 B 的透射应变 - 时间曲线

Fig. 6 Transmitted strain history of aluminium-alloy B

为保证拉伸断裂可靠发生,在发射压力为 0.21MPa 下进行实验,重复 3 次。两种发射压力下的 4 次实验结果列于表 2。表 2 中数据的计算方法与表 1 相同。从表 2 可以看出,依据发射压力为 0.3MPa 的实验结果计算得到的发射压力为 0.21MPa 时的试样应变率与实验应变率吻合较好,计算得到的拉断位移与作为预估常数的 1#实验拉断位移也非常接近。

表 2 铝合金 B 的实验和计算结果

Tab. 2 Experimental and computational results of aluminium-alloy B

编号	发射压力 (MPa)	应力加载时间 ( $\mu\text{s}$ )	实验应变率 ( $\text{s}^{-1}$ )	计算应变率 ( $\text{s}^{-1}$ )	拉断位移 (mm)
1#	0.3	384	905	—	4.06
2#	0.3	490	716	—	4.00
3#	0.21	699	480	757	4.06
4#	0.21	486	720	—	4.04

此外,对 C 和 D 两种铝合金材料在 SHTB 平台上开展拉伸实验,利用提出的方法确定最低发射压力,并在最低发射压力之上进行实验。表 3 给出了 C 和 D 四种铝合金试样在不同发射压力下进行实验的实验和计算结果,其中,每个试样的 1#实验均为尝试性实验。从表中可以看出,计算应变率与实验结果非常接近,但随着发射压力降低,差距有逐渐增大的趋势;拉断位移结果一致性较好,反映了材料在特定实验条件下的属性。

表3 铝合金 C 和 D 的实验和计算结果

Tab.3 Experimental and computational results of aluminium-alloy C and aluminium-alloy D

试样	编号	发射压力 (MPa)	应力加载时间 ( $\mu\text{s}$ )	实验应变率 ( $\text{s}^{-1}$ )	计算应变率 ( $\text{s}^{-1}$ )	拉断位移 (mm)
C	1#	0.39	317	1050	—	3.82
	2#	0.28	368	873	890	3.69
	3#		398	833		3.80
	4#	0.21	536	612	770	3.76
	5#		456	729		3.81
	6#		542	629		3.91
D	1#	0.35	221	1090	—	2.52
	2#	0.13	446	557	664	2.60
	3#		411	599		2.58
	4#		425	586		2.61

### 3 结论

在 SHTB 实验中,获得试样在一个拉力脉冲加载下被拉断情况时的最低应变率,需要进行多次尝试性实验确定发射压力。本文提出了“拉断位移”的概念,建立了一套经验方法,应用该方法,通过一次拉断试样的实验结果,便可以估算出试样在单次拉力脉冲加载下被拉断需要的最小发射压力以及该加载条件下的应变率。

“拉断位移”这一概念是与试样构形相关的,在不变的实验装置和试样构形条件下为常数,其物理本质是材料的断裂应变,是与断裂应变正相关的,但较断裂应变更容易获得。应用这一概念可以充分利用应力脉冲宽度,获取试样在较低加

载应变率下的实验结果。

对 4 种未知特性的铝合金试样进行了拉伸实验,结果表明,利用该方法得到的计算结果与实验结果吻合较好,可以有效对发射压力进行预估,大大缩短尝试性实验次数及实验时间。

### 参考文献 (References)

- [1] Song B, Chen W, Lu W Y. Compressive mechanical response of a low-density epoxy foam at various strain rates[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(17): 7502–7507.
- [2] 陈荣, 郭弦, 卢芳云, 等. Stanstead 花岗岩动态断裂性能[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 375–380. CHEN Rong, GUO Xian, LU Fangyun, et al. Research on dynamic fracture behaviors of Stanstead granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 375–380. (in Chinese)
- [3] Wang Q Z, Li W, Xie H P. Dynamic split tensile test of flattened Brazilian disc of rock with SHPB setup [J]. Mechanics of Materials, 2009, 41(3): 252–260.
- [4] GB/T 228.1–2010. 金属材料拉伸试验—第 1 部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2010. GB/T 228.1–2010. Metallic materials-tensile testing—Part 1: method of test at room temperature[S]. Beijing: Standardization Administration of China, 2010. (in Chinese)
- [5] 王从约, 夏源明. 带有哑铃状扁平形试件的杆杆型冲击拉伸试验系统的三维弹塑性有限元分析[J]. 应用力学学报, 2000, 17(1): 121–127. WANG Congyue, XIA Yuanming. Three-dimensional analysis of bar-bar tensile impact testing apparatus with a flat specimen by elastoplastic FEM[J]. Chinese Journal Applied Mechanics, 2000, 17(1): 121–127. (in Chinese)
- [6] Qin J G, Chen R, Wen X J, et al. Mechanical behaviour of dual-phase high-strength steel under high strain rate tensile loading[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 586: 62–70.
- [7] 卢芳云, 陈荣. 霍普金森杆实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013. LU Fangyun, CHEN Rong. Hopkinson bar techniques[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)