

# SHPB 实验及其在合金材料中的应用研究

李定远, 朱志武

(西南交通大学力学与工程学院, 成都 610031)

**摘要:**钛、铝合金材料在航空航天等工程领域中得到了广泛应用,对其动态冲击力学性能的研究需借助分离式 Hopkinson 压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)实验完成。比较并分析了 SHPB 实验装置及其在该两种合金材料研究上的应用,研究了影响 SHPB 实验结果的因素,如弥散效应、均匀性问题、惯性效应及端面摩擦效应等。通过对钛合金、铝合金材料冲击动态力学性能及其本构模型进行研究发现:钛合金和铝合金材料的流动应力和屈服强度往往会随着应变率的升高而升高,随温度的升高而降低。对钛合金和铝合金材料的冲击动态力学性能进行了比较,Johnson - Cook 本构模型可以合理描述两种材料的冲击动态力学行为。

**关键词:**SHPB;动态力学性能;本构模型;钛合金;铝合金

**中图分类号:**O347.1

**文献标志码:**A

## 引言

分离式 Hopkinson 压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)装置是研究材料在  $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$  应变率范围内力学特性的主要实验手段<sup>[1]</sup>。通过测试两个杆中的应力脉冲信号,可以得到杆件与试件端面的应力、位移和时间关系,进而求解试样的应力-应变关系。Hopkinson<sup>[2]</sup>利用长弹性杆中应力波的传播来测量动态过程的压力脉冲,研究了应力波在长杆中的传播特征,建立了 Hopkinson 杆的雏形。Davies<sup>[3]</sup>对该技术做了总结,研究了压缩波在杆中的传播规律,提出细长杆条件下可忽略波传播的弥散效应,最早提出一种采用电学方法测试杆中质点位移的方法。Kolsky<sup>[4]</sup>将试样置于两根杆中间并测量试样的应力-应变曲线,提出了完整实验理论以及数据处理方法,并将 Kolsky 改进的 Hopkinson 杆称为分离式 Hopkinson 杆(SHPB)。

钛、铝合金材料因密度低、强度高和抗腐蚀性等优

点,在航空、航天、汽车、船舶及化学工业中被广泛应用。由于实际工作环境的复杂性,钛、铝合金必然会承受动态冲击载荷,动态冲击载荷所引起的高应变率和高升温等因素使得材料的力学性能较准静态载荷时有显著的不同,因此对钛、铝合金材料的动态力学性能的研究受到越来越多的关注。国内外大量学者通过对 Johnson - Cook 模型进行修改,从而得到合理描述钛、铝合金材料动态力学性能的模式。

本文通过对 SHPB 实验装置及其原理的研究,分析影响 SHPB 实验结果的因素,并在该实验系统上对钛合金和铝合金等合金材料动态力学性能研究中的应用进行研究,以便为进一步提升 SHPB 实验装置的测试精度和工程应用提供重要参考。

## 1 SHPB 实验装置组成及其影响实验结果因素分析

### 1.1 SHPB 实验装置组成及原理

SHPB 实验装置是基于两个基本假设(一维假定和

收稿日期:2016-12-23

基金项目:国家自然科学基金项目(11172251);四川省青年科技创新团队(2013TD0004)

作者简介:李定远(1993-),男,四川广元人,硕士生,主要从事合金材料动态本构方面的研究,(E-mail)scldy105@163.com;

朱志武(1974-),男,四川成都人,副教授,博士,主要从事材料动态本构方面的研究,(E-mail)zzw4455@163.com

应力均匀假定)而成立的:(1)在导杆的横向尺寸与应力波的波长相比很小时,应力波在细长杆中传播,弹性杆的每个截面始终保持为平面状态,任意一个应力波在杆中的传播速度为定值,仅与材料有关;(2)应力波在试件中反复2~3个来回,试件中的应力处处相等。

典型的 SHPB 实验装置如图 1 所示,装置主要由撞击杆(子弹)、入射杆、透射杆和吸收杆(缓冲装置)等组成<sup>[5]</sup>。装置各部分尺寸的确定和材料的选择需要在应力波传播理论上综合考虑多方面因素。

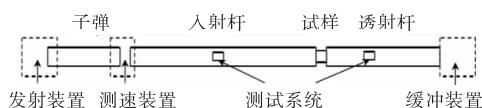


图1 SHPB系统

实验时,高压气体驱动子弹对入射杆撞击,在入射杆中产生入射应力波,入射应力波作用试件后,一部分反射回入射杆中形成反射应力波,另一部分透射到透射杆中形成透射应力波,通过对采集到的反射应力波和透射应力波进行处理可得到试件的应力应变响应。

## 1.2 影响 SHPB 实验结果因素分析

在 SHPB 实验中存在着多种影响实验结果的因素,如弥散效应、均匀性问题、惯性效应及端面摩擦效应等,为了减小这些因素对实验结果的影响,国内外学者进行了大量研究。

胡时胜<sup>[6]</sup>在不考虑材料粘性的条件下,给出了波在弹性杆中传播的近似解:

$$C_p \approx C_0 \left[ 1 - \pi^2 v^2 \left( \frac{r}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中,  $v$  和  $\lambda$  分别为弹性杆的泊松比和半径;  $\lambda$  为组成应力脉冲某个谐波的波长;  $C_p$  为该谐波的传播速度;  $C_0$  为不考虑泊松效应时的一维应力波速。

由式(1)可知,弥散效应与子弹、导杆的尺寸以及泊松比和入射波的特征等有关。为减小弥散效应,常列珍<sup>[7]</sup>提出减小压杆的直径及在打击端加一层软介质两种优化方法。陶俊林等<sup>[8]</sup>介绍了增加子弹的长度、选用低泊松比的材料作为波导杆可降低弥散效应对实验结果的影响。

在满足试件几何特性要求及加载条件下,均匀假定是可以成立的,实际中尤其在金属材料的动态测试上效果比较好,但在脆性材料和软材料的测试上效果不够理想。为减小应力不均对实验结果的影响,冯明德等<sup>[9]</sup>提出了两种消除实验中的应力不均匀性和早期破坏行为

的方法。胡时胜<sup>[10]</sup>提出采用万向头技术以消除接触不平而造成的误差。宋力等<sup>[11]</sup>对通过控制应变率以改善应力不均匀做了研究,发现实现恒应变率加载、选择合适的试件尺寸及采用三波法公式处理数据都可以减小横向惯性效应引起的误差,并给出了理想塑性材料横向惯性效应产生的测试误差公式。

SHPB 实验是在冲击载荷作用下进行的,试件的变形速率很高,作用在试件上的外力做功,除转化为试件的应变能外,尚有部分转化为试件的横向动能和纵向动能,从而破坏了一维假定,这就是惯性效应产生的影响。理想塑性材料径向惯性效应产生的测试误差表示为

$$\Delta\sigma = \frac{\rho a^2}{8} \left[ \frac{3}{2} \dot{\epsilon}^2 + \ddot{\epsilon} \right] \quad (2)$$

式中,  $a$  为试件半径;  $\rho$  为试件密度;  $\epsilon$  为应变。

通过理论分析得到试件两端压力、平均压力与试件标称应力的关系,可以发现实现恒应变率加载、选择合适的试件尺寸及采用三波法公式处理数据都可以减小横向惯性效应引起的误差。

在应力脉冲作用下,压杆和试件端面处的横向运动不同,由此而产生的端面摩擦力破坏了试件的一维状态。为减小端面摩擦效应对实验结果的影响,Kelczko 等<sup>[12]</sup>在他人工作的基础上提出了简便的修正公式

$$\sigma = \sigma_0 \left( 1 - \frac{2\mu}{3l} \right) \quad (3)$$

式中,  $\sigma$  为试件应力;  $\sigma_0$  为实测的试件应力;  $\mu$  为端面摩擦系数;  $l$  为试件长度。

在试件的长径比  $l/r \approx 1$ , 界面处给予充分润滑 ( $\mu = 0.02 \sim 0.06$ ) 的条件下,摩擦效应通常不予考虑。胡时胜<sup>[10]</sup>通过对试件受力和运动情况的分析比较,发现采用三波法处理数据可减少摩擦效应对实验结果的影响。

## 2 合金材料冲击动态力学性能研究

### 2.1 钛合金冲击动态力学性能研究

钛合金因具有强度高、耐腐蚀性好、耐热性高等特点而被用于各个领域,其应用在航空航天领域中的飞机发动机压气机部件、火箭、导弹和高速飞机的结构件制造方面尤其广泛,而这些结构部件的一个共同特点就是工作状态中需要承受动态载荷,因此国内外学者对钛合金的动态力学性能进行了大量的研究。

Seo Songwon<sup>[13]</sup>进行了从室温到 1000 °C 温度范围,加载应变率 1400 s<sup>-1</sup> 下的 Ti-6Al-4V 钛合金 SHPB 实验,得到如图 2 的实验曲线。

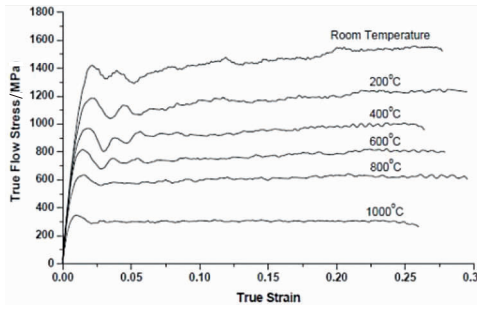


图 2 Ti-6Al-4V 钛合金在不同温度下的应力-应变曲线

研究发现 Ti-6Al-4V 钛合金的屈服强度和流动应力随温度的升高而明显下降,并提出修正后的 Johnson - Cook 模型:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) (1 - T^{*m}) H(T) \quad (4)$$

$$T = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (5)$$

$$H(T) = \frac{1}{1 - \left[1 - \frac{(\sigma_f)_{rec}}{(\sigma_f)_{def}}\right] u(T)} \quad (6)$$

式中,  $\sigma$  为流动应力;  $\varepsilon$  为等效应变;  $\dot{\varepsilon}$  为应变率;  $\dot{\varepsilon}_0$  为参考应变率;  $T$ 、 $T_m$  分别为环境温度、材料熔化温度;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $m$  和  $n$  为材料应变硬化参数,可由实验确定;  $(\sigma_f)_{def}$  和  $(\sigma_f)_{rec}$  分别为动态再结晶前后的流动应力,  $u(T)$  为温度阶梯函数。

为研究 TC4 钛合金动态本构关系,刘旭阳<sup>[14]</sup> 通过对其进行动态拉伸实验及准静态拉伸实验,得图 3 结果。王晓峰<sup>[15]</sup> 采用 SHPB 实验装置研究了 TC4 钛合金在应变率 1500 ~ 5000 s<sup>-1</sup> 范围内动态压缩曲线,如图 4 所示。

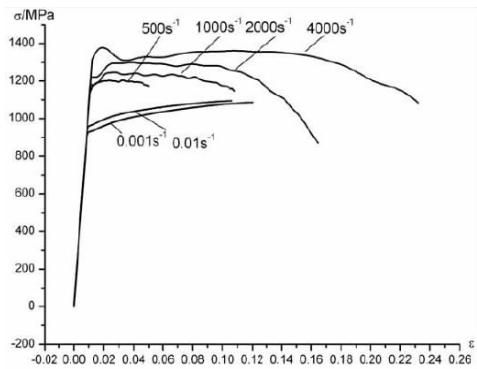


图 3 TC4 钛合金各应变率应力应变拉伸曲线

研究表明,TC4 钛合金在实验应变率范围内都表现出明显的应变率效应,材料屈服强度和流动应力都随应变率升高而升高,且塑性拉伸硬化效应不明显,接近理想弹塑性材料,通过比较随动塑性动态本构关系式

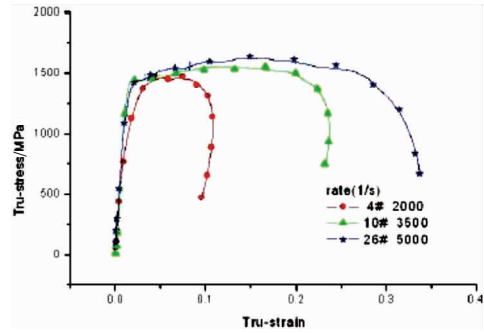


图 4 TC4 钛合金各应变率应力应变压缩曲线

(7) 和 Johnson - Cook 动态本构关系对实验数据的拟合结果后,发现随动塑性模型更能够较好描述 TC4 钛合金的动态拉伸行为。

$$\sigma_Y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^P\right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon^{eff}) \quad (7)$$

其中:  $\sigma_0$  为初始屈服应力,  $\dot{\varepsilon}$  为应变率,  $C$ 、 $P$  为 Cowper - Symonds 应变率参数,  $\varepsilon^{eff}$  为有效塑性应变,  $\beta$  是硬化参数,  $E_p$  为塑性硬化模量。

此外, Fan<sup>[16]</sup>, 陈刚<sup>[17]</sup>, Gambirasio 等<sup>[18]</sup> 学者均利用 SHPB 实验装置对钛合金进行冲击动态实验,并将 Johnson - Cook 模型应用于不同实验条件下钛合金动态本构关系研究。

从国内外大量的研究成果中,可以发现到钛合金普遍存在应变率敏感效应和温度软化效应,即流动应力及屈服强度都随着应变率的升高而升高,随温度的升高而降低。

## 2.2 铝合金冲击动态力学性能研究

铝合金因其密度低、强度高、塑性好及抗腐蚀性等优点被大量应用于航空、航天、汽车、机械制造、船舶及化学工业中。在应用过程中,铝合金材料不仅会受到静态载荷,而且经常承受动态载荷加载。相对于静态加载而言,铝合金在动态加载条件下的力学性能有显著不同。因此,铝合金动态力学性能研究引起了研究者的关注。

王雷等<sup>[19]</sup> 利用 SHPB 装置对五种航空常用铝合金 2Al2 - CZ, 2Al2 - M, 2024 - T351, 7050 - T74, 7050 - T7451 进行了室温下动态力学性能探究,得到了五种铝合金在不同应变率下的拉伸真实应力应变曲线(图 5),五种铝合金都表现出一定程度应变率正相关性。

张正礼<sup>[20]</sup>、Lee O S<sup>[21]</sup> 对飞机结构常用铝合金材料(包括 2024、7050 和 6061)动态力学性能进行了研究,利用电子万能试验机和 SHPB 实验装置进行实验,得到了试件的应力应变曲线(图 6)。

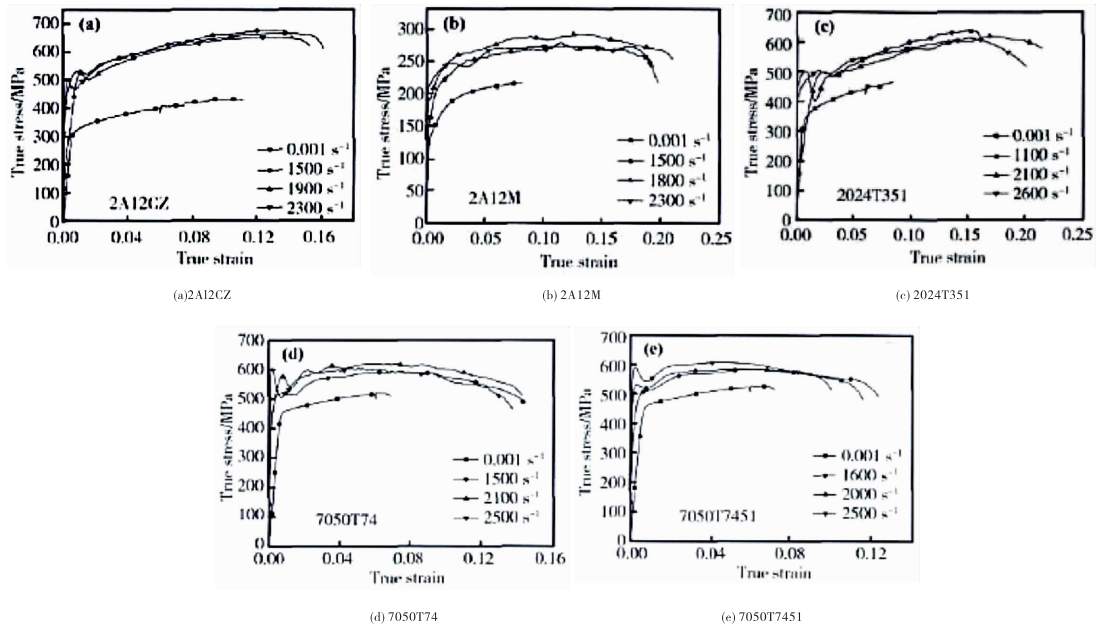


图5 五种航空铝合金拉伸真实应力应变曲线

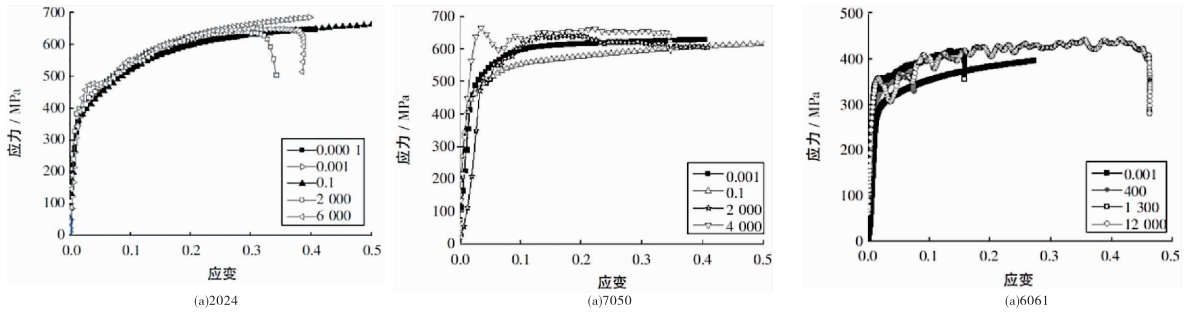


图6 2024、7050和6061三种铝合金动静态压缩应力-应变曲线

从应力应变曲线发现2024铝合金和7050铝合金基本不存在应变率敏感性,而6061铝合金具有应变率敏感性,失效力随应变率升高明显升高,在高应变率下表现出硬化效应。覃金贵<sup>[22]</sup>在对常温、5种不同应变率条件下LC9铝合金进行了SHPB实验之后得到了其常温下不同应变率应力应变曲线(图7)。

通过对应力应变曲线的观察,得到LC9铝合金应变率效应不明显的结论。林木森等<sup>[23]</sup>运用材料试验机和SHPB实验装置对3种不同加工及热处理状态的5A06铝合金在常温至500℃、应变率为 $10^{-3} \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 条件下的力学特性进行了研究时,考虑绝热温升对Johnson-Cook模型参数拟合的影响,即温升为

$$\Delta T = \frac{\eta}{\rho C_p} \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (8)$$

式中, $\eta$ 为塑性功转化成热得因子; $\rho$ 为材料密度; $C_p$ 为材料比定热容。

将Johnson-Cook模型中应变率敏感系数修正为

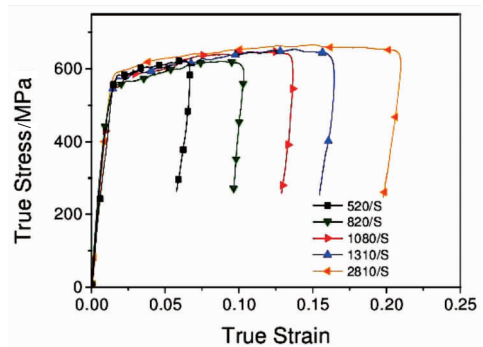


图7 LC9铝合金常温下不同应变率应力应变曲线

$C = f(\dot{\epsilon})$ , 得到修正过得Johnson-Cook模型为

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) (1 + f(\dot{\epsilon}) \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (9)$$

式中参数同(2)式。

从而确立了3种状态5A06铝合金的动态本构关系。朱耀<sup>[24]</sup>对AA7055铝合金在不同温度和不同应变率条件下力学性能进行了研究,得到其在这些条件下的

应力应变关系,提出修正的 Johnson - Cook 模型,用来描述 AA7055 铝合金在实验条件下的应力应变关系,即如下包含临界转变温度、最大有效应变以及耦合温度的应变率效应函数的修正 Johnson - Cook 模型:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left( 1 + C \left( \frac{T}{T_m} \right)^k \ln \dot{\varepsilon}^* \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^{m_1} \right) \left[ \frac{1}{1 + (T/T_c)^{m_2}} \right]^{m_3} \quad (10)$$

式中,  $\sigma$  为流动应力;  $\varepsilon$  为有效应变;  $\dot{\varepsilon}^*$  为相对应变率;  $T$ 、 $T_m$  分别为环境温度、材料熔化温度;  $A$ 、 $B$ 、 $n$  为材料应变硬化参数,可由实验确定;  $C$ 、 $k$  为应变率效应参数及温度耦合因子,可由实验确定;  $m_1$ 、 $m_3$  为温度效应参数,可由实验确定;  $T_c$ 、 $m_2$  为临界转变温度及温度软化参数,可由实验确定。

通过以上的研究可以看出,多数钛合金和铝合金材料的流动应力和屈服强度都随应变率的升高而升高,随温度的升高而降低。但值得注意的是有部分铝合金(如 2024、7050 以及 7A04)表现出对应变率不敏感的特性,这在常见的金属材料中比较少见。国内外很多学者在钛合金和铝合金动态本构的研究中,均利用了 Johnson - Cook 模型或对其进行修改后的模型对实验数据进行拟合和模拟,最后都得到了比较好的结果,说明 Johnson - Cook 模型在钛合金和铝合金材料动态本构的研究中很有实用意义。

### 3 结 论

(1) 对 SHPB 实验装置及其原理进行了研究并分析了影响 SHPB 实验结果的弥散效应、均匀性问题、惯性效应及端面摩擦效应等因素,并得到了相应改进手段。

(2) 对 SHPB 实验装置在钛合金和铝合金材料动态力学性能研究中的应用进行研究。从结果发现,大多数钛合金和铝合金在动态加载时,有明显的应变率敏感效应和温度效应,即屈服强度和流动应力随应变率升高而升高,随温度升高而降低,但部分铝合金却表现出对应变率不敏感。

(3) 对于不同合金材料动态本构模型进行了研究。鉴于合金材料在实验中表现出的应变率效应和温度效应,通常对 Johnson - Cook 模型的应变率敏感系数和温度项进行合理修改后,可以对实验结果进行合理的解释。

### 参 考 文 献:

[1] [1] 陈荣,卢芳云,林玉亮,等.分离式 Hopkinson 压杆

实验技术研究进展[J].力学进展,2009,39(5):576-587.

[2] HOPKINSON B.A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets[J].Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1914, 213: 437-456.

[3] DAVIES R M.A critical study of the Hopkinson pressure bar[J].Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1948, 240: 375-457.

[4] KOLSKY H.An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J].Proceedings of the Physical Society, Section B, 1949, 62(11): 676-700.

[5] 孙宝玉,庄惠平.SHPB 试验技术需要注意的几个问题[J].高校实验室工作研究,2009(2):39-42.

[6] 胡时胜.霍普金森压杆技术[J].兵器材料科学与工程,1991(11):40-47.

[7] 常列珍,潘玉田,张治民,等.一种调质 50SiMnVB 钢 Johnson-Cook 本构模型的建立[J].兵器材料科学与工程,2010(4):68-72.

[8] 陶俊林,田常津,陈裕泽,等.SHPB 系统试件恒应变率加载实验方法研究[J].爆炸与冲击,2004,24(5):413-418.

[9] 冯明德,彭艳菊,刘永强,等.SHPB 实验技术研究[J].地球物理学进展,2006,21(1):273-278.

[10] 胡时胜.Hopkinson 压杆实验技术的应用进展[J].实验力学,2005,20(4):589-594.

[11] 宋力,胡时胜.SHPB 测试中的均匀性问题及恒应变率[J].爆炸与冲击,2005,25(3):207-216.

[12] KLEPACZKO J, MALINOWSKI Z, KAWATA K, et al. High velocity deform action of solids[M]. Berlin: Springer, 1978.

[13] SEO S, MIN O, YANG H. Constitutive equation for Ti-6Al-4V at high temperatures measured using the SHPB technique[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(6): 735-754.

[14] 刘旭阳.TC4 钛合金动态本构关系研究[D].南京:南京航空航天大学,2010.

[15] 王晓峰,卢芳云,林玉亮.TC4 钛合金的动态力学性

- 能研究[C]//第五届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集,西安:西北工业大学出版社,2008:230-236.
- [16] FAN Y F, ZHAO B R. Experimental studies on dynamic mechanical behaviors and anti-projectile capabilities of extruded magnesium alloy[J]. International Journal of Modern Physics B, 2010, 24(15-16):2633-2638.
- [17] 陈刚,陈忠富,陶俊林,等.TC4 动态力学性能研究[J].实验力学,2005,20(4):605-609.
- [18] GAMBIRASIO L, RIZZI E. An enhanced Johnson-Cook strength model for splitting strain rate and temperature effects on lower yield stress and plastic flow[J]. Computational Materials Science, 2016, 113: 231-265.
- [19] 王雷,李玉龙,索涛,等.航空常用铝合金动态拉伸力学性能探究[J].航空材料学报,2013, 33(4):71-77.
- [20] 张正礼.几种铝合金材料动态力学性能测试[J].中国民航大学学报,2014,31(1):41-45.
- [21] LEE O S, KIM M S. Dynamic material property characterization by using split Hopkinson pressure bar (SHPB) technique[J]. Nuclear Engineering and Design, 2003, 226(2):119-125.
- [22] 覃金贵.LC9 铝合金在高温和不同动载条件下力学性能研究[D].长沙:国防科学技术大学,2009.
- [23] 林木森,庞宝君,张伟,等.5A06 铝合金的动态本构关系实验[J].爆炸与冲击,2009,29(3):306-311.
- [24] 朱耀.AA7055 铝合金在不同温度及应变率下力学性能的实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

## The Research of SHPB Experiment and Its Application in Alloy Materials

LI Dingyuan, ZHU Zhiwu

(School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Titanium alloy and aluminum alloy are widely applied in aerospace and other fields of engineering. The research of the dynamic mechanical properties of alloy materials is often accomplished by SHPB experiment. The SHPB experiment device and its application in the two kinds of alloys have been carried on comparison and analysis, and the effect factors of SHPB experimental results are studied, such as dispersion effect, uniformity problem, inertia effect and friction effect and so on. The flow stress and the yield strength of titanium alloy and aluminum alloy tends to rise with the increase of strain rate and the reduce of temperature by means of researching dynamic mechanical properties of titanium alloy, aluminum alloy and its constitutive model. Johnson-Cook constitutive model can reasonably describe the dynamic mechanical behavior of the two materials.

**Key words:** SHPB; dynamic mechanical properties; constitutive model; titanium alloy; aluminum alloy