高压物理学报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

第 32 卷 第 1 期
2018 年 2 月

高 压 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 32, No. 1
Feb., 2018

DOI: 10.11858/gywlxb.20170522

# 一种超高温动态力学行为测试及原位图像获取方法*

张 超[1],索 涛[1,2],谭伟力[1],张欣玥[1],汪存显[1],李玉龙[1,2]

(1. 西北工业大学航空学院,陕西 西安 710072;
2. 西北工业大学飞行器结构力学与强度技术国防重点学科实验室,陕西 西安 710072)

**摘要**:提出了一种新的超高温(1 600 ℃)动态力学性能测试及原位图像获取方法:在原有分离式 Hopkinson 压杆的基础上,利用加热源为 $MoSi_2$ 的超高温炉实现超高温环境,采用两个活塞组成双同步系统,利用高速摄像机记录动态变形过程。为了验证所提方法的可行性,以 TC4 钛合金和 SiC 陶瓷为研究对象,进行超高温动态力学性能测试,其中:在 TC4 钛合金实验中,应变率为 2 000 $s^{-1}$,温度范围为 20~1 400 ℃,测得其流动应力从 1.6 GPa 降到 150 MPa;在 SiC 实验中,应变率为 250 $s^{-1}$,温度范围为 20~1 200 ℃,测得其压缩强度从 250 MPa 降到 220 MPa。根据高速摄像机记录的试样动态变形过程,分析试样的破坏模式,结果表明:在高温空气环境下,TC4 钛合金试样表面有氧化层裂开现象,而在氩气环境下则没有;室温下,SiC 试样初始裂纹产生时的应力为压缩强度的 80%,而在 1 200 ℃下为压缩强度的 99%。

**关键词**:超高温;Hopkinson 杆;双同步组装;高速摄像机

**中图分类号**: O347;O521.3 **文献标识码**:A

随着科学技术的发展,人们越来越关注材料在高温、高应变率等极端环境下的动态力学行为[1-3]。分离式 Hopkinson 压杆(Split Hopkinson Pressure Bar,SHPB)作为一种高应变率($10^2$~$10^4$ $s^{-1}$)加载装置[4-5],广泛应用于材料的动态力学行为研究。20 世纪 60 年代,有学者尝试利用 SHPB 技术研究高温下材料的动态力学性能[6-7]。到目前为止,一般采取两种实验方案。一种是对试样与一部分压杆同时加热,然而由于入射杆和透射杆均为热的良导体,在入射杆和透射杆上将不可避免地形成温度梯度。例如:Latella 等[8]基于 SHPB 装置,采用同时加热方式测量了 2.25Gr-1Mo 高强钢的杨氏模量,发现它由室温时的 212.4 GPa 降为 600 ℃时的 169.0 GPa;Lankford[9]在 SHPB 装置中引入快速加温技术,以减少温度在杆中的变化梯度;Gilat 等[10]采用对热不敏感的铝材料制作波导杆,利用局部快速升温设备测试材料的动态高温扭转性能,试样的温度范围为 650~1 060 ℃。另一种方案是将试样与入射杆及透射杆分离,将试样单独加热到预定温度,实验杆与试样接触后立即进行高应变率加载。20 世纪 90 年代,Nemat-Nasser 等[11-13]在 SHPB 上引入一种实现高温的方法,其特点是无需特殊的高温材料压杆,通过建立一个与撞击杆同步启动的连杆机构,实现对试样的高温-高应变率耦合作用。他们首先将试样与弹性杆分离,然后加热试样,达到预定温度后,开启空气炮,在应力波到达试样与入射杆界面时,由驱动系统推动试样与入射杆及透射杆紧密接触,并由此进行了 Ta 和 Ta-W 合金材料在 1 000 ℃下的高应变率实验。Apostol 等[14]提出了冷接触时间(Cold Contact Time,即从杆与试样接触到入射波到达试样端面

* **收稿日期**: 2017-04-11; **修回日期**: 2017-05-28
**基金项目**: 国家自然科学基金(11522220,11272267,11527803)
**作者简介**: 张 超(1991—),男,博士研究生,主要从事高温动态测量研究. E-mail:zhcdao@outlook.com
**通信作者**: 索 涛(1979—),男,博士,教授,主要从事材料及结构的动态力学行为研究.
E-mail:suotao@nwpu.edu.cn



© 2018 Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics 

的时间)的概念,并认为冷接触时间应控制在 50～100 ms。李玉龙等[15-16]通过实验测量了不同冷接触时间下材料的动态力学性能,结果表明,冷接触时间大于 50 ms 时,其对实验结果有较大的影响,实验数据不能真实地反映材料在高温下的动态力学性能。最近,Kajberg 等[17]利用电磁推进方式推动入射杆和透射杆同步组装,测得不锈钢和含碳钢在 700～4 400 $s^{-1}$的高应变率下、温度在 900～1 200 ℃之间的应力-应变曲线。

本研究设计了一种更便捷的双同步实验装置,重新设计高温炉,从而获得更高的工作温度。考虑到某些材料在高温下极易与空气中的某些气体(如氧气)发生反应,所设计的超高温加热炉可通入保护气体,在炉内形成惰性气体环境,并且配有观察窗口,可利用高速摄像机记录实验过程。采用此实验装置,测量 TC4 钛合金和 SiC 陶瓷的超高温动态力学性能,并对 TC4 钛合金在无氧环境下进行高温动态测试,验证实验装置在材料超高温动态力学性能测试方面的可行性。

## 1　实验装置设计

在 SHPB 的基础上重新设计了实验装置,如图 1 所示。利用两个活塞组成双同步系统;利用超高温炉对试样加热;加热炉设有观察窗口和保护气通气孔,可通过通气孔将保护气通入高温炉中形成惰性气体环境,可通过观察窗口记录试样的超高温动态测试过程;发射阀同时控制气室和同步气室,用于进行同步组装和发射撞击杆。

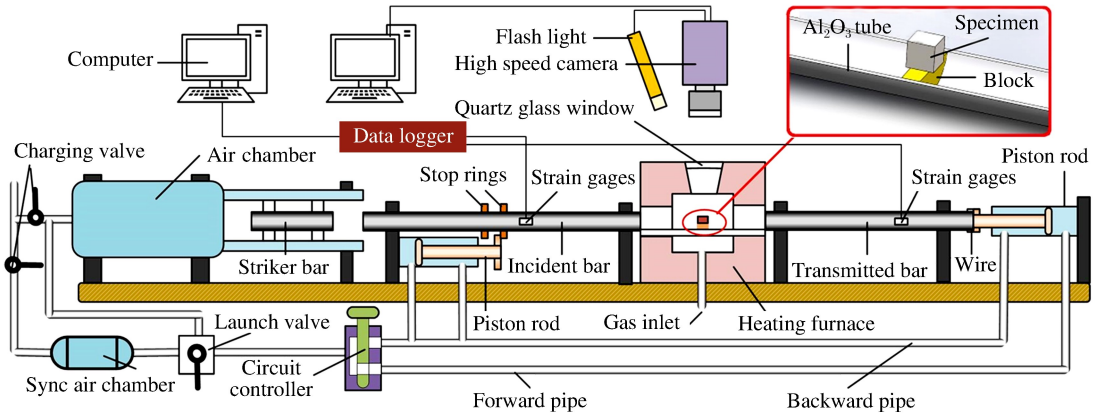


图 1　带有超高速摄像机的超高温双同步 SHPB 装置示意图

Fig. 1　Schematic illustration of the ultra-high temperature SHPB with a double-synchronically assembled heating system and high speed camera

### 1.1　加热炉及试样固定

为实现超高温加热环境,使用加热源为 $MoSi_2$、带智能控制装置的超高温加热炉加热试样,利用位于试样上方的热电偶测量炉内温度,超高温加热系统的工作温度最高达 1 650 ℃。在加热炉前方设有观察窗,在观察口前安装石英玻璃。石英玻璃的软化温度在 1 600 ℃左右,当加热温度超过石英玻璃的稳定工作温度(1 400 ℃)时,利用隔热材料将观察口堵住以保护石英玻璃。在加热炉下方及上方各设置一个通气孔,用于将保护气通入加热炉内,形成惰性气体氛围,使材料不与加热炉中的气体发生反应。试样的固定方式如图 1 中插图所示,利用半圆形氧化铝陶瓷管和高温莫来石纤维泡沫块对试样进行固定,其工作温度均超过高温炉的加热温度。高温泡沫的厚度小于试样厚度,高温泡沫的强度很低,对试样的加载方向没有影响,高温泡沫使试样的其他 3 个面也没有约束,从而将试样的轴向约束降到最低。为了更好地固定试样,将高温胶涂于高温石棉与陶瓷管及试样的接触面上。

### 1.2　双同步组装系统

原有的单同步系统只有透射杆处一个活塞,活塞推动透射杆与试样一起朝入射杆运动,使入射杆及

透射杆与试样紧密接触,同时发射子弹撞击入射杆。在实验过程中,由于试样由透射杆推动并与入射杆接触,因此试样与透射杆的冷接触时间长于试样与入射杆的冷接触时间,造成试样温度分布不均匀。尤其当使用较大的加热炉时,入射杆与透射杆之间的距离较远,如果透射杆的运动速度过低,则会使透射杆与试样间的冷接触时间过长;如果透射杆的运动速度过高,则会对试样产生较大的预冲击,影响实验结果。因此单同步组装系统难以应对较大体积的加热炉,从而限制了实验环境。

针对单同步系统的不足,重新设计了双同步系统(如图 1 所示),即在入射杆和透射杆处各设置一个同步装置。实验前,利用控制器将推进气管与同步气室连接,通过发射阀同时发射撞击杆和双同步组装系统,入射杆和透射杆同步朝试样运动,撞击杆同时朝入射杆运动。在入射波到达试样端面前,通过双同步系统使入射杆和透射杆夹紧试样。实验后,由控制器将回拉气管与同步气室连接,通过活塞带动实验杆离开加热炉,避免实验杆长时间处于加热炉内而影响性能,特别是当加热炉温度达到 1 600 ℃时。同时也可以看到,此系统避免了加热炉体积较大时透射杆与试样间冷接触时间过长的问题,因此可应用不同的加热炉。采用此方法,在标定同步气压并调整活塞的条件下,冷接触时间可控制在 10 ms 以内,实现了入射杆和透射杆同时与试样接触。利用 Abaqus 有限元软件建立热分析模型,发现当冷接触时间保持在 10 ms 以下时,双同步组装对实验中试样温度的影响不大[18]。

### 1.3　高温图像的获取

为观察试样在实验中的变化情况,利用高速摄像机通过高温加热炉的光学观察口拍摄实验过程,如图 2 所示。可见,在实验过程中高温炉辐射出很高的热量。

图 3 给出了根据普朗克公式计算得到的在 400～1 200 ℃温度范围内热辐射能量与辐射波长之间的关系曲线。从图 3 中可以看出:随着温度的升高,各波段的热辐射能量均大幅增加,热辐射总能量迅速增大;并且波长越长,辐射热量越多。为了减少辐射对设备及成像的影响,采用带滤红外波段的石英玻璃将波长较长的红外辐射光滤掉,既控制了热辐射,又保证了可见光通过观察口以满足高速摄像机的拍摄需求。

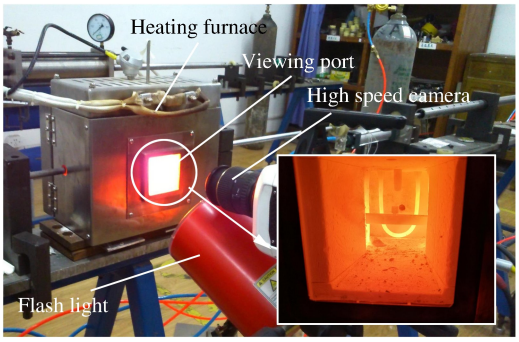


图 2　高速摄像机布局(插图为高温炉内部图像)

Fig. 2　High speed camera (The inset shows the internal of the furnace.)

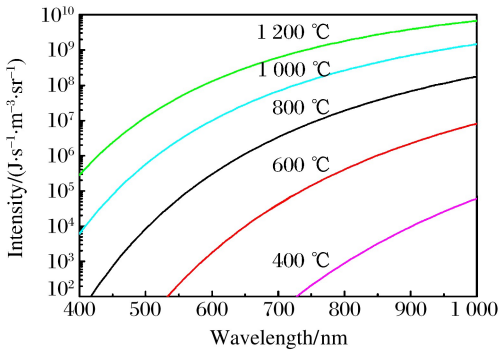


图 3　不同温度下波长与热辐射能量的关系曲线

Fig. 3　Wavelength vs. thermal radiation energy at different temperatures

由于拍摄动态变形所需的相机工作帧频较高,曝光时间很短,为了获得清晰的图像,使用高强度闪光灯。考虑到一般闪光灯的照明时间非常短,且亮度随时间变化,在触发一段时间后才能达到最大亮度并稳定保持一段时间,为此闪光灯的触发时间须与相机的拍照时间配合,使动态加载过程中闪光灯的亮度保持较高水平。本研究将数据采集器的信号输出端分别与闪光灯触发器及高速相机触发端相连,数据采集器通过入射波信号触发,触发同时给闪光灯触发器和高速摄像机输出触发信号。

## 2　超高温动态力学实验结果

以 TC4 钛合金和 SiC 陶瓷作为研究对象,进行超高温动态力学性能测试。在 TC4 钛合金实验中,

应变率 $\dot{\varepsilon}$ 为 2 000 $s^{-1}$，温度范围为 20～1 400 ℃；在 SiC 实验中，应变率为 250 $s^{-1}$，温度范围为 20～1 200 ℃。此外，将氩气通入高温炉中，测量 TC4 钛合金试样在无氧化情况下的动态力学性能，并利用高速摄像机观察试样的变形过程。

## 2.1　TC4 钛合金的超高温动态力学性能

图 4 为 TC4 钛合金在应变率为 2 000 $s^{-1}$、温度为 20～1 400 ℃时的应力-应变曲线。从图 4 中可以看出：温度软化现象非常明显；20 ℃时试样的峰值应力达到 1.6 GPa，当温度达到 1 400 ℃时，流动应力降为 150 MPa。此外从图 4 中还可以看出，在不同温度下 TC4 钛合金基本没有出现塑性强化现象。需要注意的是，在最初应变很小的阶段，应力测量不够准确，这归因于在开始阶段试样两端的应力状态未达到平衡，试样两端受力不均匀。

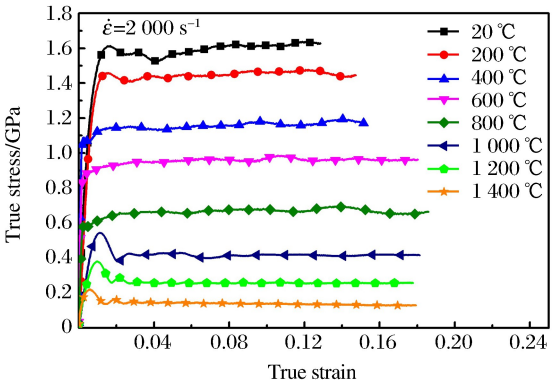


图 4　TC4 在应变率为 2 000 $s^{-1}$、温度范围为 20～1 400 ℃条件下的应力-应变曲线

Fig. 4　Stress-strain curves of TC4 at strain rate of 2 000 $s^{-1}$ and temperature range of 20 ℃ to 1 400 ℃

## 2.2　惰性气体环境下 TC4 钛合金的高温动态力学性能测试

考虑到某些材料在高温下易与空气中的氧气等气体发生反应，对实验装置进行了改进，以实现惰性气体环境下的高温动态力学实验。实验时，先加热超高温炉，同时以较小流量通入氩气，达到排尽炉内氧气的目的。达到预定温度后，加大氩气流量并放入试样，保温一段时间后，进行动态压缩实验。在 1 100 ℃下测得 TC4 钛合金在氩气环境下的动态压缩实验结果，如图 5 所示，其中高速摄像机的采样速率为 0.1 MHz。

从图 5 中可以看到：在空气环境中，40 μs 时 TC4 钛合金试样表面有氧化层裂开现象，100 μs 时部分氧化层与试样表面分离；而在氩气环境下，试样表面未发生氧化层裂开或分离现象，说明氩气的通入防止了 TC4 钛合金试样的氧化。实验表明，本实验装置能进行保护气环境下的超高温动态力学性能测试，并能同步采集实验过程图像。

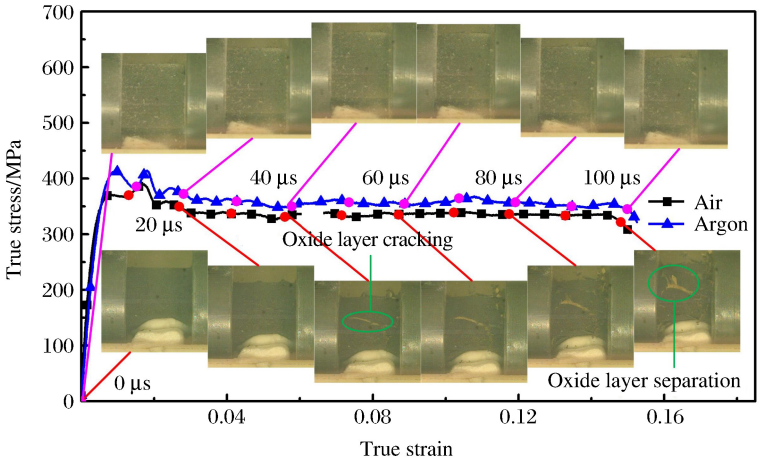


图 5　TC4 在应变率为 2 000 $s^{-1}$、温度为 1 100 ℃、不同气体环境下的应力-应变曲线及形貌

Fig. 5　Stress-strain curves and morphologies of TC4 at 2 000 $s^{-1}$ and 1 100 ℃ in different gas environments

从图 5 还可以看出，在空气环境下 TC4 钛合金的流动应力为 332 MPa，而在氩气环境下则上升至 361 MPa，增幅约 8.5%，说明 TC4 钛合金氧化后其动态压缩强度明显降低。图 5 中的高速摄影图像显示，TC4 钛合金氧化后其表面会形成一层氧化层。氧化层的形成一方面使材料的力学性能下降，另一

方面使动态压缩实验中的真实试样变为被氧化层包裹的试样，其截面积等几何形态发生变化，从而对测量结果产生影响。反映在实验结果上则是氩气环境中的流动应力明显高于空气环境中的流动应力，因此研究惰性气体环境下材料的高温动态力学性能具有实际意义。

## 2.3　SiC 在超高温下的动态力学性能测试

对 SiC 进行超高温动态压缩实验，其中 SiC 材料是由 SiC 粉末烧结而成的微孔陶瓷材料，其密度较小，孔隙率较大。SiC 试样尺寸为 8 mm×8 mm×10 mm，高速摄像机的采样速率为 1 MHz。由于 SiC 为脆性材料，因此需对入射波进行整形以达到应力平衡状态[19-20]。在本实验中，采用圆形树脂整形片进行整形，试样的应变率为 250 $s^{-1}$。为了观察试样表面的变形情况，常用喷漆制作散斑。然而，喷漆只能耐 200 ℃以下的温度，随着温度的增加会出现以下 3 类问题：(1) 脱色——在冲击载荷下脱色；(2) 脱层——喷漆与试样表面的黏结变松，散斑变形与试样表面变形不一致；(3) 脱落——随着温度的继续升高，喷漆从试样表面剥落，所采集的图像完全失真。为此，本研究利用高温无机胶和氧化铝粉末在试样表面制作随机分布的高温散斑，以增强图像的对比度。其制作方式如图 6 所示，将高温无机胶和氧化铝粉末一起放入喷枪中，利用高压在试样表面形成随机分布的散斑。在高温下散斑依然清晰可见，并紧密地附着在试样表面。

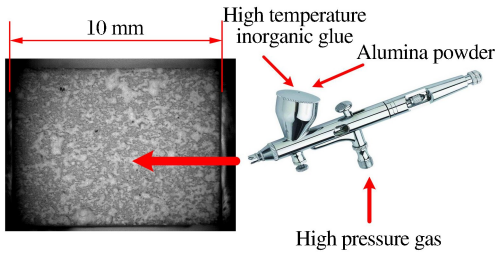


图 6　高温散斑

Fig. 6　High temperature speckle

从图 7 中可以看到：SiC 的强度随温度的升高而降低；但压缩强度下降得较少，从室温时的 250 MPa 下降到 1 200 ℃时的 220 MPa，说明压缩强度对温度不敏感。图 7 中红色圆点代表裂纹产生后采集的图像所对应的应力值，由此可以看出：在室温下，当 SiC 试样应力为 199 MPa 时，有肉眼可见的初始裂纹产生，随着应变的增大，真实应力持续增加，达到 250 MPa 时试样完全失去承载能力，裂纹产生时的应力为压缩强度的 80%(199 MPa/250 MPa)；在高温下，随着温度的升高，出现初始裂纹时的应力随之增加，在 800 ℃时，初始裂纹产生时的应力为 208 MPa，是压缩强度的 90%(208 MPa/231 MPa)，而在 1 200 ℃时，初始裂纹产生时的应力为 218 MPa，是压缩强度的 99%(218 MPa/220 MPa)。高温下初始裂纹的出现时刻随着温度的升高而推迟，在本实验中表现为初始裂纹产生时的应力越来越接近压缩强度。对图像进行数字图像相关(DIC)计算，可以看到试样表面的应力状态基本均匀。实验结果显

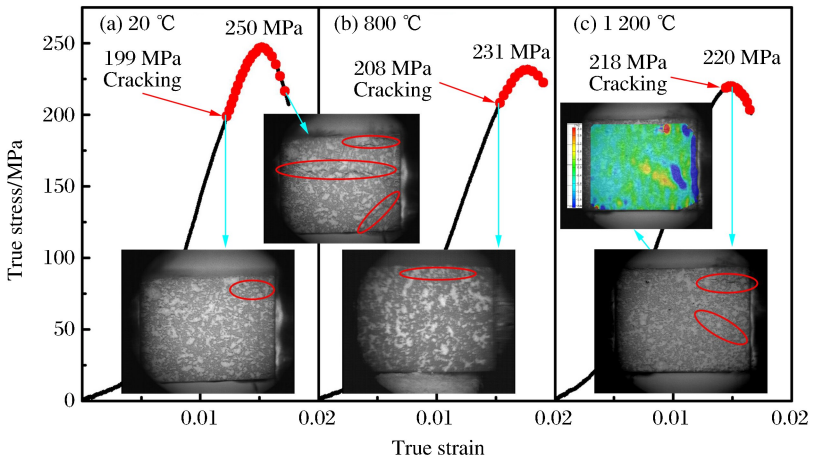


图 7　SiC 在应变率为 250 $s^{-1}$，温度为 20、800 和 1 200 ℃时的应力-应变曲线及形貌

Fig. 7　Stress-strain curves and morphologies of SiC at strain rate of 250 $s^{-1}$ and temperature of 20, 800 and 1 100 ℃

示，所制作的高温散斑能很好地反映高温下试样的变形情况。本研究的高温高速原位图像采集方法可以用来获取高温动态实验中试样的变形信息，为材料高温动态性能研究提供很大的帮助。

## 3 结　论

在现有 SHPB 的基础上，设计了一种能用于超高温（1 600 ℃）环境的动态力学性能测试装置。该装置采用两个活塞组成双同步系统，选用加热源为 $MoSi_2$ 的超高温加热炉，由半圆形陶瓷管和高温泡沫固定试样，通过高速摄像机结合滤光片实时记录高温试样的变形过程。

采用该装置，测量了 TC4 钛合金在应变率为 2 000 $s^{-1}$、温度为 20～1 400 ℃时的应力-应变曲线，以及 SiC 在应变率为 250 $s^{-1}$、温度为 20～1 200 ℃时的压缩强度，获得了 TC4 钛合金和 SiC 的高温动态变形图像，得到以下结论：

（1）在空气环境下，当温度达到 1 400 ℃时，TC4 钛合金的流动应力从 20 ℃时的 1.6 GPa 降为 150 MPa；而在 1 100 ℃的氩气环境下，相比于空气环境，TC4 钛合金的流动应力增幅约 8.5%；

（2）在空气环境下，TC4 钛合金试样表面有氧化层裂开现象，部分氧化层与试样表面分离，而在氩气环境下，试样表面没有氧化层裂开或分离情况；

（3）SiC 的压缩强度从室温时的 250 MPa 降到 1 200 ℃时的 220 MPa，初始裂纹出现时刻随着温度的升高而推迟，并且初始裂纹出现时的应力由常温下压缩强度的 80%增加到 1 200 ℃时的 99%。

实验结果表明，所设计的实验装置能够进行保护气环境下的超高温动态力学性能测试，所使用的图像采集方法能在高温高速加载下进行原位图像采集，从而获取试样在高温下的动态变形信息。所提出的实验方法为研究材料的高温动态性能及破坏形式提供很大的帮助。

## 参考文献：


[1] 魏延鹏，虞钢，段祝平. 高温高应变率下异种不锈钢激光焊接件的力学性能 [J]. 爆炸与冲击，2011，31(5)：504-509.
WEI Y P，YU G，DUAN Z P. Mechanical properties of laser-welded dissimilar stainless steels structure at elevated temperature and high strain rates [J]. Explosion and Shock Waves，2011，31(5)：504-509.

[2] 宫旭辉，王宇，夏源明，等. TC21 钛合金的高温动态拉伸力学行为 [J]. 中国有色金属学报，2010，20(4)：647-654.
GONG X H，WANG Y，XIA Y M，et al. Dynamic tensile behavior of TC21 titanium alloys at elevated temperatures [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2010，20(4)：647-654.

[3] 李玉龙，郭伟国，徐绯，等. Hopkinson 压杆技术的推广应用 [J]. 爆炸与冲击，2006，26(5)：385-394.
LI Y L，GUO W G，XU F，et al. The extended application of Hopkinson bar technique [J]. Explosion and Shock Waves，2006，26(5)：385-394.

[4] CHEN W N，SONG B. Split Hopkinson (Kolsky) bar：design，testing and applications [M]. New York：Springer，2011.

[5] 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.
CHEN R，LU F Y，LIN Y L，et al. A critical review of split Hopkinson pressure bar technique [J]. Advances in Mechanics，2009，39(5)：576-587.

[6] CHIDDISTER J L，MALVERN L E. Compression-impact testing of aluminum at elevated temperatures [J]. Experimental Mechanics，1963，3(4)：81-90.

[7] LINDHOLM U S，YEAKLEY L M. High strain-rate testing：tension and compression [J]. Experimental Mechanics，1968，8(1)：1-9.

[8] LATELLA B A，HUMPHRIES S R. Young's modulus of a 2.25Cr-1Mo steel at elevated temperature [J]. Scripta Materialia，2004，51(7)：635-639.

[9] LANKFORD J. Temperature-strain rate dependance of compressive strength and damage mechanisms in aluminium oxide [J]. Journal of Materials Science，1981，16(6)：1567-1578.

[10] GILAT A，WU X. Elevated temperature testing with the torsional split Hopkinson bar [J]. Journal of Materials Science，1994，34(2)：166-170.

[11] NEMAT-NASSER S，ISAACS J B，STARRETT J E. Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments

[J]. Proceedings of the Royal Society A,1991,435(1894):371-391.

[12] NEMAT-NASSER S,ISAACS J B. Direct measurement of isothermal flow stress of metals at elevated temperatures and high strain rates with application to Ta and TaW alloys [J]. Acta Materialia,1997,45(3):907-919.

[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] APOSTOL M,VUORISTO T,KUOKKALA V T. High temperature high strain rate testing with a compressive SHPB [J]. Journal de Physique IV (Proceedings),2003,110:459-464.

[15] LI Y,GUO Y,HU H,et al. A critical assessment of high-temperature dynamic mechanical testing of metals [J]. International Journal of Impact Engineering,2009,36(2):177-184.

[16] 李玉龙,索涛,郭伟国,等. 确定材料在高温高应变率下动态性能的 Hopkinson 杆系统 [J]. 爆炸与冲击,2005,25(6):487-492.
LI Y L,SUO T,GUO W G,et al. Determination of dynamic behavior of materials at elevated temperatures and high strain rates using Hopkinson bar [J]. Explosion and Shock Waves,2005,25(6):487-492.

[17] KAJBERG J,SUNDIN K G. Material characterisation using high-temperature split Hopkinson pressure bar [J]. Journal of Materials Processing Technology,2013,213(4):522-531.

[18] ZHANG C,SUO T,TAN W,et al. An experimental method for determination of dynamic mechanical behavior of materials at high temperatures [J]. International Journal of Impact Engineering,2017,102:27-35.

[19] SONG B,ANTOUN B R,NIE X,et al. High-rate characterization of 304L stainless steel at elevated temperatures for recrystallization investigation [J]. Experimental Mechanics,2009,50(4):553-560.

[20] MATES S P,RHORER R,WHITENTON E,et al. A pulse-heated Kolsky bar technique for measuring the flow stress of metals at high loading and heating rates [J]. Experimental Mechanics,2008,48(6):799-807.

# A Method for Testing Dynamic Mechanical Behavior of Materials at Ultra-High Temperature and *in-Situ* Observation

ZHANG Chao[1],SUO Tao[1,2],TAN Weili[1],ZHANG Xinyue[1],
WANG Cunxian[1],LI Yulong[1,2]

(1. *School of Aeronautics*,*Northwestern Polytechnical University*,*Xi'an* 710072,*China*;
2. *Fundamental Science on Aircraft Structural Mechanics and Strength Laboratory*,
*Northwestern Polytechnical University*,*Xi'an* 710072,*China*)

**Abstract**:In this work,we propose a novel method for testing the dynamic mechanical properties of materials and for *in-situ* observation at ultra-high temperature (up to 1 600 ℃). The experimental devices used include a classical split Hopkinson pressure bar,a $MoSi_2$ heating source for obtaining ultra-high temperature,two piston rods added to complement the double synchronically assembled system and a high speed camera employed to observe the deformation. To verify the ability of the proposed method for operating at ultra-high temperature, we conducted our experiments on TC4 alloy at temperatures ranging from 20 to 1 400 ℃ and the strain rate of 2 000 $s^{-1}$,and SiC at temperatures ranging from 20 to 1 200 ℃ and the strain-rate of 250 $s^{-1}$. The results showed that the peak flow stress of the TC4 alloy specimen drops from 1. 6 GPa at room temperature to 150 MPa at 1 400 ℃,and the compressive strength of the SiC specimen drops from 250 MPa at room temperature to 220 MPa at 1 200 ℃. Furthermore,the high speed images revealed that the oxide layer of the TC4 alloy specimen cracked in air but not in argon,and the initial cracks of the SiC specimen occurred at 80% of the compressive strength at room temperature and at 99% of the compressive strength at 1 200 ℃.

**Keywords**:ultra-high temperature;Hopkinson bar;double-synchronically assembled system;high speed camera