

文章编号: 1001-1455(2005)06-0487-06

确定材料在高温高应变率下动态性能的 Hopkinson 杆系统*

李玉龙¹, 索 涛¹, 郭伟国¹, 胡 锐², 李金山², 傅恒志²

(1. 西北工业大学航空学院, 陕西 西安 710072

2. 西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 描述了一种利用 Hopkinson 杆装置确定在高温(温度可高达 1 173 K)、高应变率下材料动态性能的试验方法。在试样加温过程中, 试样不与入射杆及透射杆接触。当试样加热到预定温度时, 气压驱动同步组装系统, 推动透射杆及试样, 使得应力波到达入射杆与试样接触面时, 入射杆、试样及透射杆紧密接触。利用以上系统, 完成了连铸单晶铜及上引法连铸多晶铜从室温到 1 085 K 范围内的应力应变曲线。测试结果表明, 不论是上引法连铸多晶铜还是连铸单晶铜, 流动应力随温度的升高而下降, 在温度低于 585 K 时, 材料的应变硬化率明显大于在温度高于 585 K 时的应变硬化率。

关键词: 固体力学; 流动应力; Hopkinson 杆; 高温; 高应变率; 应变硬化

中图分类号: O344

国标学科代码: 130 · 1515

文献标志码: A

1 引 言

通常, 材料在高变形速率下的力学性能不同于准静态载荷作用下的行为, 大部分金属材料的流动应力随着应变率的增加而增加, 表现出应变率硬化效应。同时, 材料特性与应变率的依赖关系受材料使用环境温度的影响。因此确定材料在高温、高应变率和大应变等极端条件下的力学行为, 对于这些材料在如此环境下的应用及其本构方程的建立均有重要的意义。

Hopkinson 杆自 1949 年被 Kolsky 用于测试材料在单轴动态压缩下的动态力学行为以来, 由于其使用简单, 被广泛地应用于确定材料在高应变率下的力学行为。多年来, 很多学者对 Hopkinson 杆试验技术进行了广泛的研究, 例如, J. Harding 等^[1]提出了 Hopkinson 拉杆试验方法, W. E. Backer 等^[2]、J. D. Campbell 等^[3]和 J. Duffy 等^[4]提出了 Hopkinson 扭杆技术。还有很多学者在应力波的弥散效应^[5~6]、三维效应^[7~8]、应力波的离散与重构^[9~12]等方面进行了深入的研究。

自 60 年代起, 就有学者试图利用 Hopkinson 杆技术确定在高温环境下材料的动态力学性能, A. Gilat 等^[13]对利用 Hopkinson 杆技术确定高温环境下材料动态力学性能的试验方法进行了综述。与准静态试验类似, 要进行高温试验, 一种方法是将整个试验系统置于高温环境, 另一种方法就是局部加热。在 Hopkinson 杆试验中, 要对整个试验系统进行加热不仅非常困难, 而且也是不合适的, 所以必须对试样进行局部加热。而在试验过程中, 试样必须与两弹性杆接触。一般有两种手段加热试样, 一种是试样与输入杆及输出杆分离, 将试样加热到预定温度, 使加载杆与试样接触后立即加载。C. E. Frantz 等^[14]就使用这种方法进行了温度达 1 273 K 的试验, 但他们未能确定试样与加载杆接触瞬时到应力波到达试样与入射杆界面之间的时间(接触时间)。如果接触时间非常短, 试样内的温度来不及下降, 加载杆上的温度也来不及上升。作者曾进行过有限元模拟, 接触时间不超过 1 ms, 试样长度方向上超过

* 收稿日期: 2004-11-23; 修回日期: 2005-03-14

基金项目: 国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合资助基金项目(10276033); 西北工业大学博士论文创新基金项目(cx200401)

作者简介: 李玉龙(1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

80% 的距离以内区域的温度降低程度小于 10% (如图 1 所示)。A. M. Lennon 等^[15]用有限元方法模拟的结果也证明了如果接触时间非常短,试样中温度变化不大,在数据处理中是可以忽略试样的温度变化。另一种手段是在试样加热过程中试样与两弹性杆并不分离,这样在入射杆及透射杆上要形成温度梯度。众所周知,在 Hopkinson 杆试验中,假设应力波的波阻抗沿杆的长度方向不变,试样中的变形、应力是通过贴在输入、输出杆上的应变片,再使用一维应力波理论确定。入射杆及透射杆中的温度变化将引起波阻抗的变化,在试验数据处理过程中必须进行修正,这给试验数据的处理带来极大的困难。此外,也可在与试样接触的入射杆和透射杆杆端进行冷却或隔热。J. Lankford^[16]采用快速加热技术,减少温度在杆中的变化梯度。尽管如此,一般弹性杆的温度不能超过其淬火温度,以免降低弹性杆屈服极限。因此,这两种方法的使用均有很多缺点。最近,S. Namet-Nassor 等^[17]使用一种方法,首先将试样与弹性杆分离,加热试样,当达到预期的温度时,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、透射杆紧密接触。这种方法可以克服弹性杆过热的问题,是一种较为理想的方法,但缺点是驱动系统比较复杂。

在本文中,将介绍一种 Hopkinson 杆系统的高温试验方法,该方法采用一种同步组装系统,使得在应力波到达试样与入射杆界面时,被单独加热的试样与入射杆和透射杆紧密接触并进行加载。与 Namet-Nassor 等的方法相比,该系统结构更加简单。利用该系统,可测定单晶连铸铜、多晶连铸铜在室温约 1 085 K 时的动态力学性能。

2 试验技术

2.1 传统的 Hopkinson 杆技术

传统 Hopkinson 杆由空气炮、子弹、入射杆、透射杆、测试系统、支持系统组成。基本工作原理如图 2,试样夹持在入射杆和透射杆之间,由空气炮驱动一柱状子弹撞击入射杆,在入射杆中产生应力波。当应力波传到试样与入射杆界面时,一部分返回入射杆,另一部分传给试样,在试样中来回反射 3~5 次后达到平衡,再通过试样与透射杆的界面传给透射杆。贴在入射杆及透射杆上的应变片可以记录入射波、反射波及透射波。通过一维应力波理论,可以给出试样上的应变率、应变、应力随时间的变化规律。

式(1)~(3)给出了 Hopkinson 实验中常用的计算试样应变率、应变和应力的公式

$$\dot{\epsilon} = 2c_0 \epsilon_r / l \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{2c_0}{l} \int \epsilon_r dt \quad (2)$$

$$\sigma = (EA_b / A_s) \epsilon_t \quad (3)$$

式中: l 、 A_s 为试样的长度及横截面积; E 、 c_0 、 A_b 为弹性杆中的弹性模量、应力波速及横截面积。在公式(2)及(3)中如果消去时间,就可以确定材料的应力-应变曲线。值得指出的是,在试样加载过程中,入射杆、试样、透射杆紧密接触。试样中的温度可以传导给入射杆、透射杆。由于试样被加载的时间约在 200 μ s 以内,在试样加载过程中热传导可以忽略不计。但在试样加载前,如果试样与入射杆接触,杆端的温度不可避免的升高。如果其温度在弹性杆材料的回火温度以下,试验结果可通过考虑波阻抗随温度的变化进行修正,如果在回火温度以上,杆材料的屈服极限将明显降低,波阻抗也明显变化,应力波将会发生畸变,给试验带来较大困难。

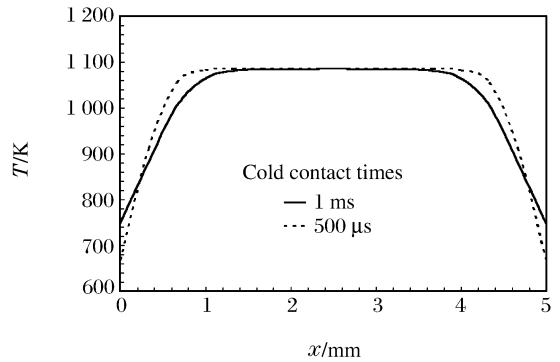
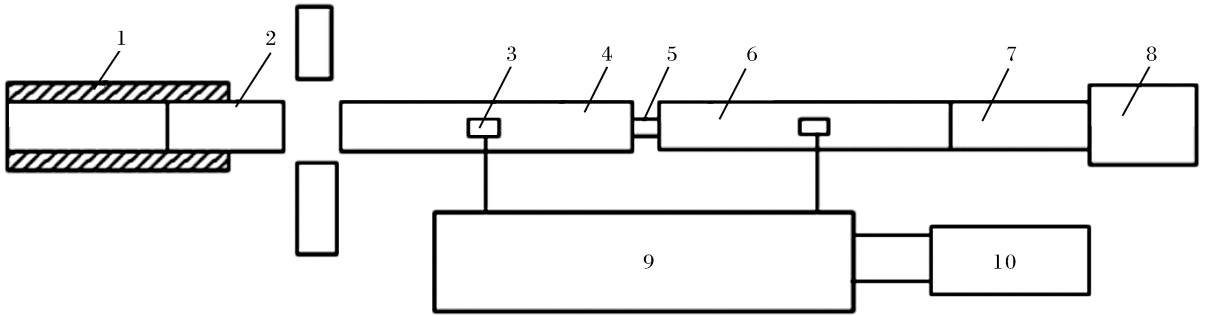


图 1 初始温度为 1 085 K 的铜试样与杆接触后温度传导的有限元模拟结果

Fig. 1 Finite element calculation of temperature profile after bar closure for a copper specimen initially at 1 085 K



1. Gas gun; 2. Strike bar; 3. Strain gage; 4. Incident bar; 5. Sample; 6. Transmitted bar;
7. Momentum trap bar; 8. Buffer; 9. Amplifier; 10. Computer

图 2 Hopkinson 压杆装置示意图

Fig. 2 Schematic illustration of Hopkinson pressure bar system

2.2 高温 Hopkinson 杆系统

2.2.1 基本原理

高温 Hopkinson 杆的基本原理是利用热电偶丝将试样固定于套管上,套管可在入射杆上任意滑动。首先将试样置入环形电炉内对试样进行局部加热,试样达到预定温度时,加热控制系统可使炉温保持在设定温度;开启气炮,气室压力一方面推动子弹运动去撞击入射杆,另一方面通过同步组装系统推动透射杆向试样方向运动。通过调整驱动同步组装系统的气压,可使加载应力波到达试样的同时,透射杆、入射杆和试样刚好紧密接触。试验中,试样上的温度变化通过接在试样的热电偶丝测定。

2.2.2 试样及套管

套管主要用来固定试样,有两个带孔的耳片。利用热电偶丝一方面将试样固定于两个耳片之间,另一方面测定试样的温度。套管的内径与入射杆的外径相同,并可在入射杆上自由滑动。当同步组装系统工作以后,透射杆运动,首先接触试样,再带动套管,使试样的另一端与入射杆相接触。其工作原理如图 3 所示。

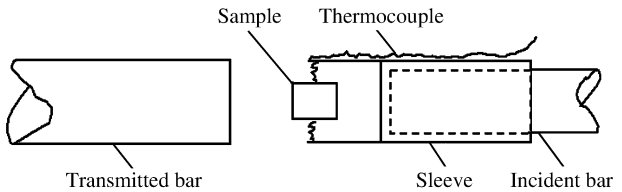
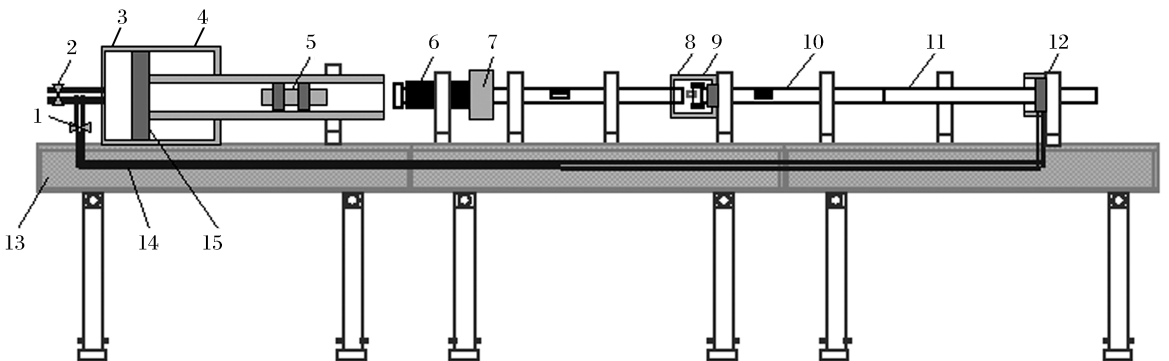


图 3 高温试验试样夹持示意图

Fig. 3 Schematic illustration of sample fixed in high temperature experiment

2.2.3 同步组装系统



1. Outlet valve; 2. Inlet valve; 3. Back air chamber; 4. Front air chamber; 5. Strike bar; 6. Incident bar;
7. Reaction mass; 8. Heating furnace; 9. Sample; 10. Transmitted bar;
11. Driver; 12. Driver; 13. Support; 14. Air pipe; 15. Plunger

图 4 带有同步组装系统的高温 Hopkinson 杆系统

Fig. 4 High temperature Hopkinson bar with synchro assembly system

同步组装系统的工作原理参见图 4。气室分前气室、活塞和后气室,后气室通过气动开关与气源和

同步组装系统气路相连。充气时,进气开关 2 打开,但气动开关 1 关闭。同步组装系统通过气动开关 1 与驱动器 12 相连,在驱动器中,驱动器使活塞的运动与透射杆的运动相连。当达到预期的气室压力后,关闭开关 2,开启开关 1,气室 3 卸压,活塞向后运动,使得气室 4 的压力进入炮管驱动子弹,另外,在开关 1 打开后,气室 3 的高压气体通过管道 14 驱动驱动器活塞 12,带动透射杆向入射杆方向运动。从而使透射杆首先接触试样,带动连接试样的套筒,使试样与入射杆、透射杆在加载应力波到达试样同时紧密接触。在这套系统中,虽然有驱动器回路结构存在,实验时,驱动器利用气压推动透射杆与试样接触,透射波仍可在吸收杆中自由传播,并通过其将全部能量传给置于吸收杆末端的缓冲器上。

2.2.4 加热炉

采用环状可控直流电源加热炉。其厚度约为 30 mm,内通孔直径为 35 mm,电热丝分布于内孔壁,并用定制的隔热瓦片及石棉与外炉壳隔离。电热炉固定于 Hopkinson 杆平台的立柱上。炉壁内的温度由一闭环控制器控制,与设定温度的误差为 ± 3 K,最高温度可达 1 473 K。

2.3 材料与试样

试验用的材料有两种,一种为上引法连铸多晶铜,另一种为连铸单晶铜,材料纯度为 99.999%。试验中使用的试样是直接 8 mm 的连铸多晶铜及单晶铜棒材上截取,并在金相试样抛光机上将试样两端面打磨平滑。最后用于试验的试样直径为 8 mm,长度也是 8 mm。

3 试验结果

所有的试验是在西北工业大学冲击动力学试验室的分离式 Hopkinson 压杆系统上进行。此系统不仅具有进行在高温环境下材料动态性能试验的能力,其接触时间可控制在 $500 \mu\text{s} \sim 1 \text{ ms}$ 之间。此外,该系统还具有单次脉冲加载的能力,能避免由于反射波在入射杆中来回反射引起的试样被反复加载,这样可以将所测的应力-应变曲线与试样的变形相关联,其工作原理可参阅文献[18]。在此系统中,入射杆与透射杆的直径为 12.7 mm。图 5 是一组典型试验中从应变片上输出的入射波、反射波及透射波。

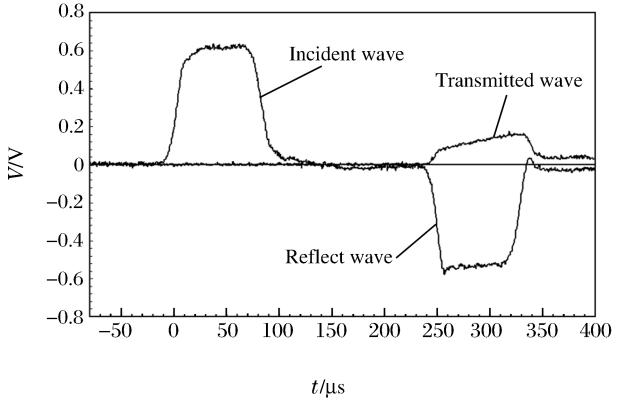


图 5 入射波、反射波和透射波

Fig. 5 Incident, reflect and transmitted wave

从以上信号中,利用公式(1)~(3)就可以确定试样的应力-应变曲线。由于系统的接触时间控制在 $500 \mu\text{s} \sim 1 \text{ ms}$ 之间,因此根据有限元计算结果,对高温实验来说,试样的温度损失不大,因此在数据处理是可以忽略温度损失的影响。

在试验中,不论是上引法连铸多晶铜,还是连铸单晶铜,试验的应变率平均控制在 $2\,000 \text{ s}^{-1}$ 。在室温约 1 085 K 对多晶铜每隔 100 K,对单晶铜则每隔 200 K 进行试验。试验结果如图 6 所示。

从图 6 中我们可以看到,这两种材料的动态力学性能均表现出明显的温度相关性。随着温度的升高,材料的流动应力呈下降趋势。当实验温度在 585 K 以下时,多晶铜材料屈服之后应力应变曲线基本上平行,这说明在这个温度范围内材料的应变硬化率的变化不大,温度的变化主要是影响其屈服应力。而实验温度高于 585 K 时,材料屈服以后的应力应变曲线发生了明显的变化,其应变硬化率明显降低,但是仍基本上保持平行。观察单晶铜的真实应力-应变曲线,可以看到与多晶铜相类似的情况,材料的应变硬化率在实验温度为 685 K 前后有一个明显的变化,而在变化前后各个实验温度下的应变硬化率又基本上相同。

从这两种材料实验结果来看,存在着一个温度门限值 T ,应变硬化率在这个温度前后会发生变化,从实验中来看多晶铜材料是在 585 K 左右,而单晶铜材料也应该在 585 K 左右。如果考虑高应变率实验过程中绝热效应导致温度上升的影响,实际的温度门限值 T 应该大于实验时的环境温度,这是可以通过实验及理论分析得出的,这部分工作我们将在以后的工作中完成。

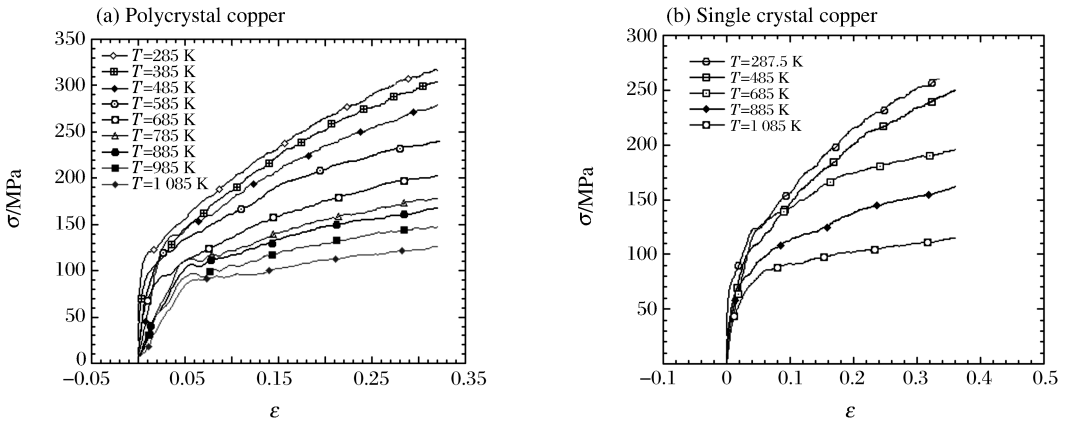


图 6 连铸多晶铜和单晶铜试验曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of polycrystal copper and single crystal copper

4 结 论

- (1) 增加了同步组装系统的分离式 Hopkinson 杆系统能够进行温度材料在 773 K 以上的高应变率实验；
- (2) 对连铸单晶铜及多晶铜成功地进行了温度高达 1085 K 的实验,结果显示材料的流动应力及应变硬化率均受温度的影响。

参考文献：

[1] Harding J, Wood E O, Campbell J D. Tensile testing of materials at impact rates of strain[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1960, 2(1): 88—96.

[2] Backer W E, Yew C H. Strain-rate effects in the propagation of torsional plastic wave[J]. Journal of Applied Mechanics, 1966, 33(6): 917—923.

[3] Campbell J D, Dowling A R. The behavior of materials subjected to dynamic incremental shear loading[J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1970, 18(1): 43—63.

[4] Duffy J, Campbell J D, Hawley R H. On the use of a tensional split hopkinson bar to study rate effects in 1100-0 aluminum[J]. Journal of Applied Mechanics, 1971, 38(1): 83—91.

[5] 刘孝敏,胡时胜,陈智.粘弹性 Hopkinson 压杆中波的衰减和弥散[J].固体力学学报,2002,23(1):81—86.
LIU Xiao-min, HU Shi-sheng, CHEN Zhi. The wave propagation attenuation and disperion in a viscoelastic Hopkinson pressure bar[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2002, 23(1): 81—86.

[6] Bacon C. An experimental method for considering dispersion and attenuation in a viscoelastic Hopkinson bar[J]. Experimental Mechanics, 1998, 38(4): 242—249.

[7] ZHAO Han, Gary G. A three dimensional analytical solution of the longitudinal wave propagation in an infinite linear viscoelastic cylindrical bar[J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1995, 43(8): 1 335—1 348.

[8] Follansbee P S, Franz C. Wave propagation in the split Hopkinson pressure bar[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1983, 105(1): 61—66.

[9] Lee C K B, Crawford R C, Mann K A, et al. Evidence of higher Pochhammer-Chree modes in an unsplit Hopkinson bar[J]. Measurement Science & Technology, 1995, 6(7): 853—859.

[10] Lee C K B, Crawford R C. A method for analyzing dispersed bar gauge data[J]. Measurement Science & Technology, 1993, 4(9): 931—937.

[11] Gorham D A. A numerical method for the correction of dispersion in pressure bar signals[J]. Journal of Physics E, 1983, 16(6): 477—479.

[12] Gorham D A, Wu X J. An empirical method for correction dispersion in pressure bar measurements of impact stress[J]. Measurement Science & Technology, 1996, 7(98): 1 227—1 232.

- [13] Gilat A, Wu X. Elevated temperature testing with the torsional split Hopkinson bar[J]. *Experimental Mechanics*, 1994, 34(2): 166—170.
- [14] Frantz C E, Follansbee P S, Hawley R H. New experimental techniques with the split Hopkinson pressure bar [A]. Berman I, Schroeder J W. *High Energy Rate Forming*[C]. New York: ASME, 1984: 229—236.
- [15] Lennon A M, Ramesh K T. A technique measuring the dynamic behavior of materials at high temperatures[J]. *International Journal of Plasticity*, 1998, 14(12): 1 279—1 292.
- [16] Lankford J. Temperature-strain rate dependence of compressive strength and damage mechanisms in aluminum oxide[J]. *Journal of Materials Science*, 1981, 16(6): 1 567—1 578.
- [17] 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 Ta-W alloys[J]. *Acta Materialia*, 1997, 45(3): 907—919.
- [18] Nemat-Nasser S, Isaacs J B, Starrett J E. Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 1991, 435(8): 371—391.

Determination of dynamic behavior of materials at elevated temperatures and high strain rates using Hopkinson bar

LI Yu-long^{1*}, SUO Tao¹, GUO Wei-guo¹, HU Rui², LI Jin-shan², FU Heng-zhi²

(1. *School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University,*

Xi'an 710072, Shaanxi, China;

2. *School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University,*

Xi'an 710072, Shaanxi, China)

Abstract: The Hopkinson bar technique with a furnace and a driving mechanism is utilized to determine the dynamic property of materials at elevated temperature and high strain rates. The specimen is heated by a furnace independently. While the temperature in specimen reaches the desired temperature, a driving mechanism shifts the transmission bar and the specimen to contact the incident bar, so that the transmission bar, the specimen and incident bar fully contact each other just before the stress wave reaches the interface between incident bar and specimen. The dynamic properties of single crystal copper and polycrystal copper at the temperature range from room temperature to 1 085 K are tested. The results show that the flow stress of both materials decreases with increase of temperature, and strain hardening rates at a temperature below 585 K are greater than that at the temperature above 585 K.

Key words: solid mechanics; flow stress; Hopkinson bar; high temperature; high strain rate; strain hardening

* Corresponding author: LI Yu-long

E-mail address: liyulong@nwpu.edu.cn

Telephone: 029-88494859