

文章编号:1001-4888(2016)05-0715-08

高速切削实验平台在力学实验教学中的应用*

叶贵根¹, 薛世峰¹, 戴兰宏²

(1. 中国石油大学(华东) 工程力学系, 青岛 266580; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 传统的力学实验已无法满足研究生创新性实验教学的需要。为了使研究生在科学研究中掌握实验分析的基本方法和技能, 本文基于 Hopkinson 压杆加载技术建立了一套高速切削实验系统。该实验系统作为一个科研平台, 能够实现切削过程的瞬态冻结并完成变形场和切削力的实时测量, 可为高速切削机理研究提供基础实验数据。同时, 该实验系统也是一个综合性的实验平台。基于该平台, 可以完成金相分析、光栅光纤测力、变形场测量以及塑性本构分析等力学实验教学。高速切削实验平台将力学实验与科学研究相结合, 有利于培养研究生独立分析与研究的能力, 为研究生未来的科研工作打下基础。

关键词: 高速切削; 力学实验; 切削机理

中图分类号: TG501 文献标识码: A DOI: 10.7520/1001-4888-16-084

0 引言

工程力学研究生的培养, 在关注基础理论教学的同时, 也应注重对其实践能力的培养, 力学实验是最重要的培养方式之一^[1]。随着科学技术的发展, 力学实验研究的方法和技术日新月异, 本科阶段的实验力学教学内容已无法满足研究生创新性研究的需要。加强研究生力学实验研究能力的培养已成为高校教学改革的重要课题^[2]。为了培养研究生独立实验与研究的能力, 应转变传统验证性实验教学模式, 积极开展研究性教学实验, 将实验教学与科学研究相结合, 让学生在科学研究中掌握实验分析的基本方法和技能。

高速切削是最近几十年来迅速崛起的一种先进制造技术, 它代表了现代化加工技术的主流方向^[3]。然而, 高速切削中的很多现象我们却知其然而不知其所以然, 高速切削机理仍不清楚, 严重制约了这项先进技术的发展和应用。为了促进高速切削机理的研究, 急需发展有效的实验平台来研究高速切削中的切屑变形行为和相关规律。高速切削是一个复杂的力学过程, 它涉及弹塑性力学、热力学、断裂力学和摩擦学等诸多力学问题。切削机理的研究起源于力学研究^[4], 而金属切削又为力学研究提供了一种特殊的实验方法。在金属切削过程中, 工件材料经历大变形、高应变率、高温耦合加载, 这是常规力学实验无法实现的加载方式^[5,6]。高速切削实验是一个综合性的力学实验, 高速切削实验平台为力学研究生提供了一个研究性的实验教学平台。在高速切削实验平台建设方面, 国外已经开始采用气动加载方式来实现高速加载, 并且将红外测温、高速摄影等现代化测量技术应用于高速切削机理研究^[7,8]。而国内目前的切削实验主要仍在数控车床上进行, 很难实现高速切削。同时, 在主轴转速大幅度改变的情况下, 车床加工往往会出现共振, 难以获得稳态的切削过程。

本文基于分离式 Hopkinson 压杆加载原理, 建立了一套切削速度涵盖 5~35m/s 的高速切削实验

* 收稿日期: 2016-05-04; 修回日期: 2016-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(11402278, 11132011), 中央高校基本科研业务费专项(15CX02110A)资助

通讯作者: 叶贵根(1983-), 男, 博士, 讲师。主要从事高速切削机理及相关力学理论研究。Email: yegg@upc.edu.cn

平台,能完成切削过程的瞬态冻结,可实现变形场非接触式测量和切削力实时测量。该实验平台既可以作为高速切削机理研究的科研平台,也可以作为一个综合性的力学实验教学平台。

1 高速切削瞬态冻结原理

切屑根部图像分析可以为切削机理和切屑塑性变形的研究提供重要信息。目前,最主要的切屑根部图像研究方法包括中断切削法、高速摄影法和有限元分析。其中,中断切削法是目前切削机理研究运用最多的一种实验方法。

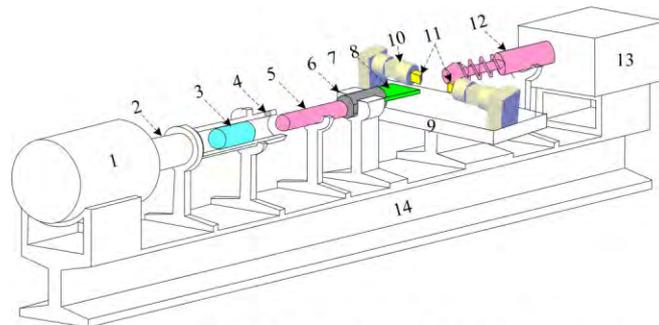
中断切削法的主要原理是使刀具和工件在切削进行过程中突然分离或静止。这样一来切削过程及相应的切屑变形状态可以被快速“冻结”,而被瞬态“冻结”的切屑根部标本可以方便地用于金相制备及进一步的显微观测。中断切削是一种使刀具与工具相对运动突然停止的方法,实质上是切削速度在短时间内降低为零的一个过程。所以中断切削所获得的切屑根部图像其实并不是正常稳态切削过程的冻结图像,而是减速过程中的某一个非稳定状态的“冻结”图像。然而,中断切削的减速过程一般极其短暂,可近似忽略其间的减速过程。因此中断切削法仍被人们所广泛接受,已成为切削机理分析最为重要的一种研究手段。

2 实验系统

实验系统基于分离式 Hopkinson 压杆加载技术搭建,可实现切削速度 $5\sim 35\text{m/s}$ 的高速切削实验研究。该实验平台主要由三部分组成:高速加载模块、切削模块和数字图像采集处理模块。

2.1 加载模块

加载模块用于实现对工件的高速加载和回收,包括:高压气室、加速身管、弹丸、撞击杆、工件、切削台、回收杆和激光测速器,如图 1 所示。弹丸由高压气室发射并经加速身管加速后冲击撞击杆,使撞击杆携带工件沿导向槽快速滑行,滑行速度由激光测速器测量。切削速度通过调节高压气室的气压来控制,速度范围为 $5\sim 35\text{m/s}$ 。



1—高压气室; 2—加速身管; 3—子弹; 4—激光测速器; 5—入射杆;
6—导向槽; 7—工件夹持装置; 8—工件; 9—切削台; 10—梁式刀架;
11—刀具; 12—回收杆; 13—缓冲器; 14—支座

图 1 高速切削实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the high speed cutting experimental equipment

2.2 切削模块

切削模块用于对高速滑行的工件实施正交切削,并对切削力进行高频测量,包括:刀架、刀具、光栅、光纤、动态解调仪和计算机,各部件连接方式如图 2 所示。其中光栅、光纤、动态解调仪和计算机可购置,而刀架和刀具需根据实验要求定制。光栅光纤动态解调仪型号为美国 MOI 公司生产的 sm130,整个系统应变测量精度为 $10^{-3}\mu\epsilon$ 。

两个刀架固定在切削台上,对称分布于撞击杆运行路线的正前方。刀架前端安装刀具,刀具可沿刀架轴线伸缩,以此来调节切削厚度。刀架伸出端为梁式结构,两端为圆形截面梁,中间为方形截面梁。

方形截面梁为测试段,在测试段的上下和左右表面粘贴光栅 a、b、c、d(见图 2),光栅通过光纤与动态解调仪相连。光栅测得的应变数据经动态解调仪解调后由计算机记录并处理,得到水平切削力和横向推挤力。

切削过程中刀具受到工件施加的作用力,作用力可分解为沿 ox 方向的轴向切削力和沿 oy 方向的横向推挤力,分别使梁式刀架发生 oy 方向的压缩变形和绕 oz 轴的弯曲变形;由于光栅 a、b 位于截面中心,所以光栅 a、b 由弯曲引起的应变为零。公式(1)给出了轴向切削力和横向推挤力关于四个光栅应变的关系:

$$\begin{cases} F_x = EW_z \frac{(\epsilon_3 - \epsilon_4)}{2L} \\ F_y = EA \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中, F_x 为轴向切削力; F_y 为横向推挤力; E 为梁式刀架的弹性模量; A 为梁式刀架方形截面梁的截面面积; W_z 为梁式刀架方形截面梁关于 oz 轴的抗弯截面系数; $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$ 分别为光栅 a、b、c、d 的应变,应变压为正、拉为负。将测得的光栅应变带入公式(1),即可获得高速切削过程中的轴向切削力和横向推挤力。切削力测量精度约 0.1N。

切削完成后撞击杆通过撞击回收杆实现高速切削过程的瞬态冻结。

2.3 数字图像采集处理模块

数字图像采集处理模块用于连续捕捉切屑根部瞬态显微图像,并通过数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术计算得到变形场,主要包括:三维矢量平台、高速特种相机、显微镜头、照明装置和计算机,如图 3 所示。其中高速特种相机、显微镜头、照明装置和计算机可购置,而三维矢量平台则需根据平台大小、高速特种相机尺寸以及显微镜头聚焦距离来定制。高速特种相机为美国 Photron 公司生产的 Photron Fastcam SAX Mono 32GB Memory,最高拍摄速度每秒 32 万帧。

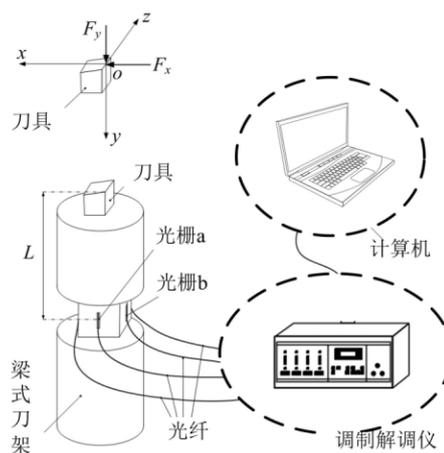


图 2 切削模块示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the cutting module

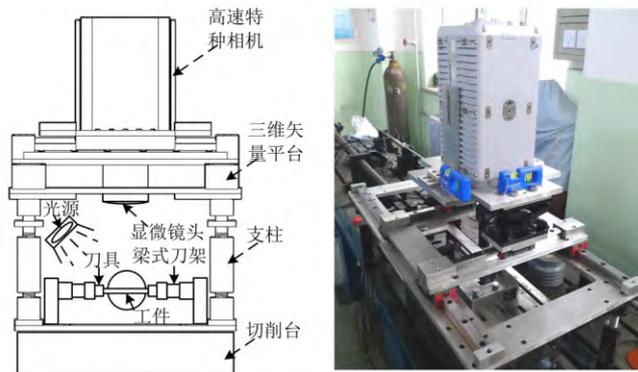


图 3 图像采集模块示意图及实物图

Fig. 3 Schematic diagram of digital image acquisition module and the actual experimental set-up

三维矢量平台通过安装槽固定在切削台上。高速特种相机安装在三维矢量平台上,经显微镜头垂直向下拍摄切屑根部微观图像。高速特种相机的水平位置和上下高度可通过三维矢量平台来调节。高速特种相机由激光测速器激发,可实现高速切削与高速摄影的同步。激光测速器位于加速身管出口处,当弹丸飞出加速身管时激光测速器被激发。而高速特种相机通过数据线与激光测速器相连,测速器被激发的同时,高速特种相机被激活,而这个时候弹丸刚好冲击撞击杆从而开始切削,这就实现了高速加载和高速图像采集的同步。

拍摄得到的系列图片经由 DIC 技术处理后得到切屑区二维变形场,全局应变精度 0.005%,应变范围从 0.01%到 2000%。

为了减少离面位移对拍摄精度的影响,实验过程中在工件上部覆盖一层透明有机玻璃,用于限制工件的离面位移,同时可以防止切屑飞溅。

3 实验平台在力学实验教学中的应用

基于以上实验平台,可进行高速切削定性和定量的实验研究,包括切屑根部微结构观测、变形场测量和切削力测量,以便为高速切削机理研究提供基础实验数据。

本文所建立的高速切削实验平台是一个综合性的力学实验平台,可培养研究生金相分析的能力,使其掌握光栅光纤测力技术和利用数字化图像相关技术研究大变形的的基本方法。通过该研究性实验平台可以让学生对切削力学有更直观的认识,同时也能使学生在研究过程中掌握固体力学实验测量手段和相关设备的使用方法,为后续研究工作打下基础。整个实验教学需 3~4 节课,共 6~8 学时。实验教学过程中鼓励学生自主设计,提高研究生的创新能力。

3.1 切屑根部微结构观测实验

切屑根部的微结构分析为切屑形成机理等研究提供重要信息,也为分析变形区的热力学状态创造条件。该平台的首要目的就是实现高速切削过程的瞬态冻结,获得切屑根部样品,通过观察不同材料在不同切削条件下的晶粒变形情况来分析切削物理过程。

实验过程中,要求学生对切削后的工件进行取样、镶嵌、打磨、抛光、腐蚀,最后进行金相分析和扫描电镜观察,研究切屑的晶粒变化规律。该实验主要为培养学生金相制备和分析的基本能力,并为材料相关的力学研究打下基础。另外,通过实验观察与切削力学理论相印证的方式,可以让学生认识到切削力学中一些基本假设的由来,加深对理论知识的理解。

45 钢具有良好的可加工性,是最为常用的切削加工材料之一。而钛合金 Ti-6Al-4V 是航天航空领域中运用最为广泛的一种典型的难加工材料。本文选用 45 钢和 Ti-6Al-4V 作为对象,对比研究易加工和难加工材料的切屑变形行为。

图 4 为 45 钢在切削速度为 10m/s 情况下的切屑根部微观图像,切屑为连续状切屑。通过观察,可以发现连续状切屑的晶粒变形相对均匀,具有一致的延伸方向。这可以让学生体会到经典切削模型中均匀剪切这一假设的由来。另外,在连续切屑的形成过程中,剪切变形集中发生于狭窄的主剪切区内,如图中 AB 所示。由于剪切变形区很狭小,将其近似成一平面,便有了经典的简单剪切模型^[9,10]。

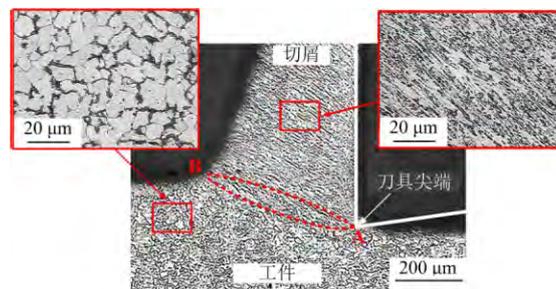


图 4 45 钢切屑根部瞬态图像

Fig. 4 Instantaneous image of the chip root for 45 steel

45 钢的切屑自由面观测结果显示,连续切屑的自由面呈现出规则的“片层”结构,如图 5(a)所示。在连续切屑形成过程中,多数材料发生均剪切,并在自由面形成整齐的“片层”组织结构。部分材料却会因为结构缺陷和刀具颤振等原因发生较大变形,从而在自由面上形成不规则的滑移面(见图 5(a)中的“S”标记)。虽然存在一些不规则分布的滑移面,但切屑的“片层”结构还是较为整齐的,如图 5(b)所示。薄片层的平均厚度 d_L 为 5 ~ 10 μm ,这与 45 钢的晶粒尺寸相当,说明连续切屑中的薄片层厚度与工件的微结构缺陷相关。Piispanen 提出的“卡片模型”把连续切屑的形成描述为一系列“卡片”连续滑动的

过程^[10]，根据这一描述，Shaw 认为只有那些存在结构缺陷的原子平面，如晶粒边界等，才能成为潜在的滑移面^[6]。如此一来，这些“卡片”应当具有某一特征厚度，而这个厚度由工件材料的微结构（如晶粒尺寸）决定。由此可以看出，切屑自由表面上的“片层”组织结构是对 Shaw 观点的一个有力支撑。

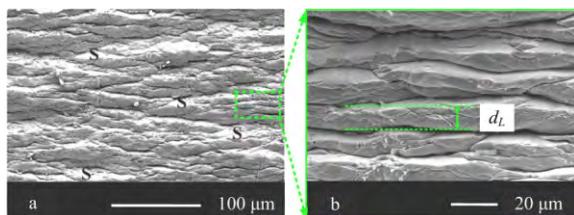


图 5 45 钢切屑自由面微结构形貌

Fig. 5 Microstructures of the chip free surface for 45 steel

图 6(a)为钛合金 Ti-6Al-4V 在切削速度为 10m/s 情况下的切屑形貌，切屑为锯齿状，锯齿之间存在明显的绝热剪切带。Ti-6Al-4V 由于其热扩散系数极低，热量容易在剪切区内聚集，进而发生周期性的绝热剪切，致使稳定的切屑流被周期性的局部化剪切所打破，形成类似于湍流的锯齿流动。在锯齿状切屑形成过程中，切屑材料的变形绝大多数发生在剪切带内，带内的晶粒沿着剪切方向发生严重的拖拽变形，而带外部的晶粒基本保持未变形状态，如图 6(a)中的局部放大图所示。

对 Ti-6Al-4V 的切屑自由面形貌进行扫描电镜观测，如图 6(b)所示。Ti-6Al-4V 的切削自由面也呈“片层”结构，只不过比 45 钢更为整齐，也更加明显。这种“片层”结构是剪切带演化到一定程度，使得剪切前缘面极度凸显的结果。尤为重要的是，在锯齿状切屑的剪切滑移面上存在明显的沿着剪切方向延伸的韧窝结构，如图 6(b)中的局部放大图所示。这种沿着剪切方向延伸的韧窝结构是绝热剪切断裂最典型的标志，是剪切带演化的痕迹^[11]。这表明绝热剪切失稳是锯齿状切屑流形成的原因。

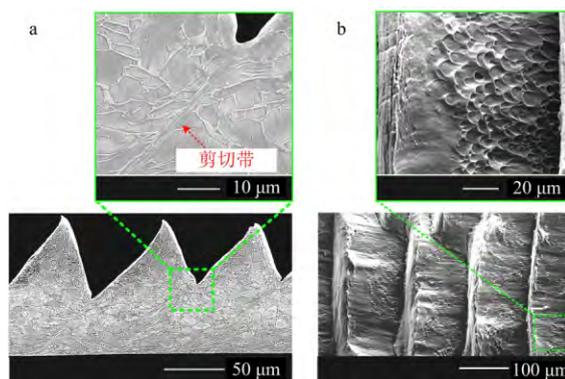


图 6 (a) Ti-6Al-4V 的切屑微结构形貌和(b)自由面形貌

Fig. 6 Microstructures of (a) the chip for Ti-6Al-4V and (b) the corresponding free surface

钛合金的高速切削瞬态冻结实验可以捕捉到锯齿状切屑的剪切带演化图像，如图 7 所示。图 7(a)捕捉到了一条初步演化的剪切带，它从刀尖向自由表面扩展，在扩展一定距离后由于切削过程的冻结而停止了进一步的扩展。图 7(b)则捕捉到了完整的剪切带，它从刀具尖端一直延伸到工件表面。这表明锯齿状切屑的形成是由刀尖向工件自由面扩展的周期性绝热剪切所导致的^[12]，而不是周期性断裂^[13]。这可能是由于高速切削过程中高温、高应变率的相互耦合作用使得 Ti-6Al-4V 的断裂韧性得到加强^[14,15]，从而抑制了裂纹的形核和扩展，使得工件的局部化剪切得到充分发展。通过锯齿状切屑的实验研究，可以让学生了解到绝热剪切带在材料塑性破坏中的作用。

3.2 基于 DIC 技术的切削区变形场测量实验

变形场测量实验利用高速特种相机捕捉切削过程中切削区的时序图像，然后基于 DIC 技术得到切削区的变形场以及应变和应变率随时间的演化规律，可为切削机理的深入研究提供定量数据。图 8 给

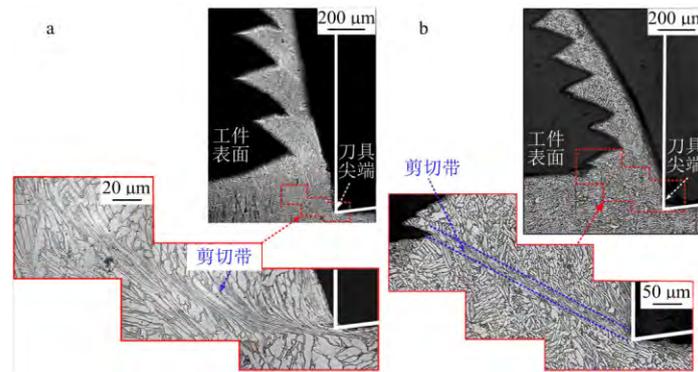


图7 Ti-6Al-4V切屑根部图像

Fig. 7 Instantaneous images of the chip root for Ti-6Al-4V

出了连续状切屑根部的应变场和靠近刀尖处的应变演化曲线。与瞬态冻结实验观察到的变形情况一样,变形场测试结果显示在靠近刀具尖端的主剪切区塑性变形最大。而应变演化曲线则表明工件在进入主剪切区前近似刚体,直到进入主剪切区后才开始沿着剪切方向发生剪切塑性流动,而当其流出主剪切区后又恢复成类似刚体的形态沿着刀具表面向上流动。

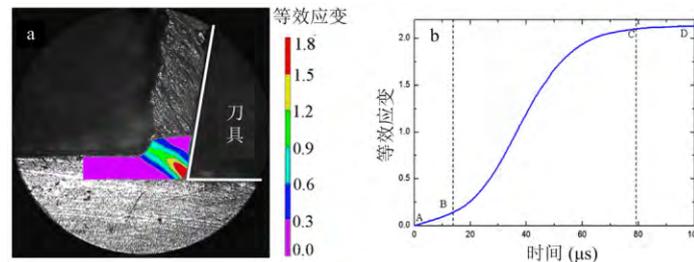


图8 (a) 连续状切屑根部应变场;(b) 靠近刀尖处材料应变演化曲线

Fig. 8 (a) Strain field of continuous chip; (b) Strain evolving with time for the material near tool tip

DIC 是一种先进的非接触式变形场测量技术,适用于大变形条件下的变形场测量,是固体力学研究生开展创新性研究的一个重要工具。切削过程中,工件材料在主剪切区内的塑性剪切变形达到 1~10,这为大变形应变测量提供了一个非常好的实验教学案例。切削区变形场的测量可以使学生对切屑的变形流动有更直观的认识,同时通过对比理论结果,可以加深学生对传统切削模型局限性的认知。更为重要的是,学生在研究过程中可以熟悉高速特种相机等 DIC 测试设备,掌握 DIC 测量原理,学会相关计算软件的使用,为后续的自主创新研究创造条件。

3.3 基于光栅光纤的切削力测量实验

基于光栅光纤测量技术可以实现切削力的实时测量,可为切削机理研究提供基础实验数据。作为教学实验,该实验可培养学生运用光栅光纤这种具有抗电磁干扰、准分布式传感、尺寸小、灵敏度高、精度高等优点的新型传感器来测量应力的技术,同时还可以帮助培养研究生分析塑性流动应力的能力。

塑性流动应力的研究是固体力学研究的一个重要内容,掌握塑性流动本构方程的研究和分析方法是固体力学研究生培养的一个重要环节。切削是一个大变形、高温、高应变率耦合加载的过程,塑性流动行为异常复杂。通过研究主剪切区流动应力,可以培养研究生分析塑性本构的能力。塑性本构分析的实验教学流程如下:(1)通过设计切削参数改变主剪切区的应变、应变率和温度;(2)利用光栅光纤测量得到切削力;(3)基于切削力学理论建立主剪切区流动应力与应变、应变率和温度的关系;(4)通过非线性逆向求解,建立工件材料的本构方程。研究流程如图 9 所示。实验教学过程中可以采取小组协作的方式开展,培养学生相互协作的能力,同时实现数据共享,建立更完备的数据库。

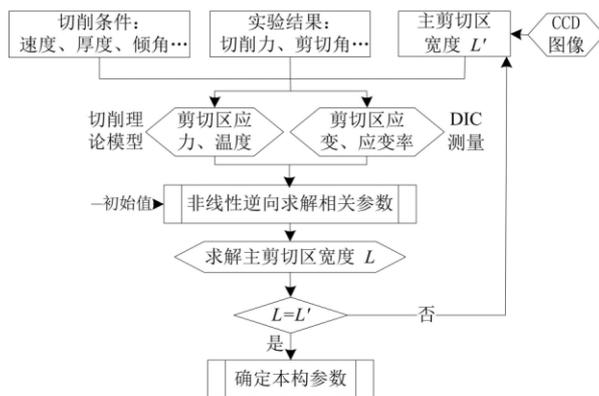


图 9 塑性本构研究流程

Fig. 9 Study process for the plastic constitutive relation

4 结论

本文介绍了应用 Hopkinson 压杆加载技术来研究高速切削机理的实验平台及其在力学实验教学中的应用。

基于实验平台可进行高速切削定性和定量的实验研究,包括切屑根部微结构瞬态冻结观测、变形场测量和切削力测量,为高速切削机理研究提供基础实验数据。

本文建立的高速切削实验平台是一个科研平台,同时也是一个综合性的力学实验平台。该平台将教学、实践与科学研究相结合,将高速特种相机等现代化科研仪器应用于实验教学,可以使学生在科学研究中掌握基本的力学实践能力、熟悉 DIC 及光栅光纤等现代化测试技术。

该实验平台还有进一步的发展空间。受时间和空间分辨率的制约,目前该平台还没有配备温度测试装置。相关的温度测试装置还在研发中,有待发展成集测温、测力、测变形于一体的完善的实验测量系统。另外,基于该实验平台还可以发展更多的研究性力学实验内容,比如通过研究切削力随切削厚度的变化规律可以达到测量工件断裂表面能的目的。

参考文献:

[1] 王廷栋. 固体力学实验课各教学环节的理论与实践[J]. 实验力学, 1988, 3(4):440—442 (WANG Tingdong. Practices and recognitions on the teaching procedures of experimental lesson of solid mechanics[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1988, 3(4):440—442 (in Chinese))

[2] 邱翔, 黄永祥, 周全 等. 分层湍流实验平台及在创新教学实践中的应用[J]. 力学与实践, 2015, 37(1):133—138 (QIU Xiang, HUANG Yongxiang, ZHOU Quan, et al. Stratified turbulence experimental platform and its application in innovative teaching practice[J]. Mechanics in Engineering, 2015, 37(1):133—138 (in Chinese))

[3] 艾兴. 高速切削加工技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2003:1—21 (AI Xing. High speed machining technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003:1—21 (in Chinese))

[4] 刘亚俊, 夏伟. 金属切削理论发展的历史回顾[J]. 力学与实践, 2001, 23(4):72—74 (LIU Yajun, XIA Wei. Historical review on the development of metal cutting theories[J]. Mechanics in Engineering, 2001, 23(4):72—74 (in Chinese))

[5] Komanduri R. Machining and grinding: A historical review of the classical papers[J]. Applied Mechanics Reviews, 1993, 46(3):80—132.

[6] Shaw M C. Metal cutting principles (2nd ed.)[M]. New York: Oxford University Press, 2005.

[7] Kazban R V, Vernaza Pena K M, Mason J J. Measurements of forces and temperature fields in high-speed machining of 6061-T6 aluminum alloy[J]. Experimental Mechanics, 2007, 48(3):307—317.

[8] Sutter G, Molinari A. Analysis of the cutting force components and friction in high speed machining[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005, 127(2):245—250.

[9] Merchant M E. Mechanics of the metal cutting process I: orthogonal cutting and a type 2 chip[J]. Journal of

- Applied Mechanics, 1945, 16(5):267—275.
- [10] Piispanen V. Theory of formation of metal chips[J]. Journal of Applied Physics, 1948, 19:318—324.
- [11] Cho K M, Chi Y C, Duffy J. Microscopic observations of adiabatic shear bands in three different steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1990, 21:1161—1175.
- [12] Barry J, Byrne G. The mechanisms of chip formation in machining hardened steels[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2002, 124(3):528—535.
- [13] Shaw M C, Vyas A. Chip formation in the machining of hardened steel[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 1993, 42:29—33.
- [14] Autenrieth H, Schulze V, Herzig N, et al. Ductile failure model for the description of AISI 1045 behavior under different loading conditions[J]. Mechanics of Time Dependent Materials, 2009, 13:215—231.
- [15] Vaziri M R, Salimi M, Mashayekhi M. A new calibration method for ductile fracture models as chip separation criteria in machining[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2010, 18:1286—1296.

On the Application of High Speed Cutting Experimental Platform in Mechanics Experiment Teaching

YE Gui-gen¹, XUE Shi-feng², DAI Lan-hong²

(1. Department of Engineering Mechanics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Conventional mechanics experiment has been unable to meet the needs of innovative experiment teaching for postgraduate students. In order to make postgraduate students grasp essential method and skill of experimental analysis in scientific research, a high speed cutting experimental system was developed based on split Hopkinson pressure bar loading technology. As a platform of scientific research, the cutting process can be instantaneously frozen by using this experimental system, and the strain field and cutting force can be real-time measured, which provides basic experimental data for study of high speed cutting mechanism. Meanwhile, this experimental system is also a comprehensive experimental platform. Based on this platform, mechanics experiment teaching, such as metallographic analysis, force measurement by grating optical fiber, deformation field measurement and plastic constitutive analysis etc., can be achieved. The high speed cutting platform combines mechanics experiment with scientific research, which is helpful for cultivating ability of independent analysis and research for postgraduate students. This may lay down a solid foundation of future research work for postgraduate students.

Keywords: high speed cutting; mechanics experiment; cutting mechanics