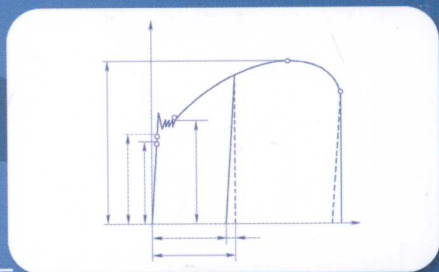
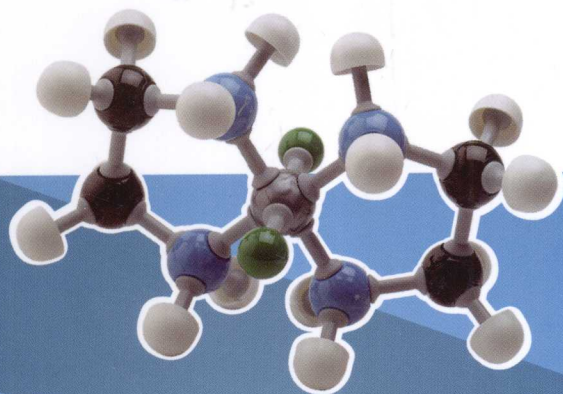


材料科学与工程实验系列教材

总主编 崔占全 潘清林 赵长生 谢峻林
总主审 王明智 翟玉春 肖纪美



金属材料塑性成形实验教程

主 编 李慧中
副主编 刘楚明 陈健美 郑晓华 李海玲
主 审 潘清林

金属材料实验之经典 拓学生创新之潜力

数十所高校参与、多家出版社联合打造
材料科学与工程实验教学研究会倾力推荐

材料科学与工程实验系列教材

总主编 崔占全 潘清林 赵长生 谢峻林

总主审 王明智 翟玉春 肖纪美

金属材料塑性成形实验教程

主 编	中南大学	李慧中
副主编	中南大学	刘楚明
	湖南涉外经济学院	陈健美
	太原科技大学	郑晓华
	北方民族大学	李海玲
主 审	中南大学	潘清林

北 京

冶金工业出版社

北京大学出版社

国防工业出版社

哈尔滨工业大学出版社

2011

内 容 提 要

本书是根据材料加工工程、材料成形及控制工程专业和机械工程专业等系列课程实验教学的要求编写的,内容包括金属材料塑性加工原理、金属材料塑性成形技术、金属材料塑性成形设备及模具、金属材料塑性成形过程参数测试技术等课程的常规实验。涉及专业基础课、专业课及专业选修课等不同类别的课程。根据专业的发展需要,本实验教材特别安排了以培养学生实验研究能力、创新能力为目的的具有综合性、设计性和创新性的大型综合技术实验。每个实验既介绍了实验的专业知识、实验目的、原理、实验内容与步骤,又说明了实验设备及材料,同时提出了对实验报告的要求,旨在为相关专业课程的实验教学提供指导。

本书可作为金属材料科学与工程、材料成形及控制工程、机械工程等专业系列课程的专科、本科、研究生实验教材,也可供相关专业的老师和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料塑性成形实验教程/李慧中主编. —北京:冶金工业出版社, 2011. 8

材料科学与工程实验系列教材

ISBN 978-7-5024-5706-8

I. ①金… II. ①李… III. ①金属压力加工—塑性变形—实验—高等学校—教材 IV. ①TG3-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 177861 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 杨盈园 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5706-8

北京鑫正大印刷有限公司印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2011 年 8 月第 1 版, 2011 年 8 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 9.75 印张; 225 千字; 142 页

20.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

《材料科学与工程实验系列教材》

总 编 委 会

总主编 崔占全 潘清林 赵长生 谢峻林

总主审 王明智 翟玉春 肖纪美

《材料科学与工程实验系列教材》

编写委员会成员单位

(按汉语拼音排序)

北方民族大学、北华航天工业大学、北京科技大学、成都理工大学、大连交通大学、大连理工大学、东北大学、东北大学秦皇岛分校、哈尔滨工业大学、河南工业大学、河南科技大学、河南理工大学、佳木斯大学、江苏科技大学、九江学院、兰州理工大学、南昌大学、南昌航空大学、清华大学、山东大学、陕西理工大学、沈阳工业大学、沈阳化工大学、沈阳理工大学、四川大学、太原科技大学、太原理工大学、天津大学、武汉理工大学、西南石油大学、燕山大学、郑州大学、中国石油大学(华东)、中南大学

《材料科学与工程实验系列教材》

出版委员会

(除出版本书出版社外, 其他出版社按汉语拼音排序)

冶金工业出版社 曹胜利 张 卫 刘小峰

北京大学出版社 杨立范 林章波 童君鑫

国防工业出版社 邢海鹰 辛俊颖

哈尔滨工业大学出版社 黄菊英 杨 桦 许雅莹

序 言

近年来,我国高等教育取得了历史性突破,实现了跨越式的发展,高等教育由精英教育变为大众化教育。以国家需求与社会发展为导向,走多样化人才培养之路是今后高等教育教学改革的一项重要内容。

作为高等教育教学内容之一的实验教学,是培养学生动手能力、分析问题、解决问题能力的基础,是学生理论联系实际的纽带和桥梁,是高等院校培养创新开拓型和实践应用型人才的重要课堂。因此,实验教学及国家级实验示范中心建设在高等学校建设上至关重要,在高等院校人才培养计划中亦占有极其重要的地位。但长期以来,实验教学存在以下弊病:

1. 在高等学校的教学中,存在重理论轻实践的现象,实验教学长期处于从属理论教学的地位,大多没有单独设课,忽视对学生能力的培养;

2. 实验教师队伍建设落后,师资力量匮乏,部分实验教师由于种种原因进入实验室,且实验教师知识更新不够;

3. 实验教学学时有限,且在教学计划中实验教学缺乏系统性,为了理论教学任务往往挤压实验教学课时,实验教学没有被置于适当的位置;

4. 实验内容单调,局限在验证理论;实验方法呆板、落后,学生按照详细的实验指导书机械地模仿和操作,缺乏思考、分析和设计过程,被动地重复几年不变的书本上的内容,整个实验过程是教师抱着学生走;设备缺乏且陈旧,组数少,大大降低了实验效果;

5. 整个高等学校存在实验室开放程度不够,实验室的高精尖设备学生根本没有机会操作,更谈不上学生亲自动手及培养其分析问题与解决问题的能力。

这样,怎么能培养出适应国家“十二五”发展规划以及建设“创新型

国家”需求的合格毕业生?

“百年大计,教育为本;教学大计,教师为本;教师大计,教学为本;教学大计,教材为本。”有了好的教材,就有章可循,有规可依,有鉴可借,有路可走。师资、设备、资料(首先是教材)是高等院校的三大教学基本建设。

为了落实教育部“质量工程”及“卓越工程师”计划,建设好材料类特色专业与国家级实验示范中心,实现培养面向21世纪高等院校材料类创新型综合性应用人才的目的,国内涉及材料科学与工程专业实验教学的40余所高校及国内四家出版社100多名专家、学者,于2011年1月成立了“材料科学与工程实验教学研究会”。“研究会”针对目前国内材料类实验教学现状,以提升材料实验教学能力和传输新鲜理念为宗旨,团结全国高校从事材料科学与工程类实验教学的教师,共同研究提高我国材料科学与工程类实验教学的思路、方法,总结教学经验;目标是,精心打造出一批形式新颖、内容权威、适合时代发展的材料科学与工程系列实验教材,并经过几年的努力,成为优秀的精品课程教材。为此,成立“实验系列教材编审委员会”,并组成以国内有关专家、院士为首的高水平“实验系列教材总编审指导委员会”,其任务是策划教材选题,审查把关教材总体编写质量等;还组成了以教学第一线骨干教师为首的“实验教材编写委员会”,其任务是,提出、审查编写大纲,编写、修改、初审教材等。此外,冶金工业出版社、国防工业出版社、北京大学出版社、哈尔滨工业大学出版社等组成了本系列实验教材的“出版委员会”,协调、承担本实验教材的出版与发行事宜等。

为确保教材品位、体现材料科学与工程实验教材的国家级水平,“编委会”特意对培养目标、编写大纲、书目名称、主干内容等进行了研讨。本系列实验教材的编写,注意突出以下特色:

1. 实验教材的编写与教育部专业设置、专业定位、培养模式、培养计划、各学校实际情况联系在一起;坚持加强基础、拓宽专业面、更新实验教材内容的基本原则。

2. 实验教材编写紧跟世界各高校教材编写的改革思路。注重突出人才素质、创新意识、创造能力、工程意识的培养,注重动手能力,分析问题及解决问题能力的培养。

3. 实验教材的编写与专业人才的社会需求实际情况联系在一起,做到宽窄并举;教材编写应听取用人单位专业人士的意见。

4. 实验教材编写突出专业特色、深浅度适中,以编写质量为实验教材的生命线。

5. 实验教材的编写,处理好该实验课与基础课之间的关系,处理好该实验课与其他专业课之间的关系。

6. 实验教材编写注意教材体系的科学性、理论性、系统性、实用性,不但要编写基本的、成熟的、有用的基础内容,同时也要将相关的未知问题在教材中体现,只有这样才能真正培养学生的创新意识。

7. 实验教材编写要体现教学规律及教学法,真正编写出一本教师及学生都感觉到得心应手的教材。

8. 实验教材的编写要注意与专业教材、学习指导、课堂讨论及习题集等配套教材的编写成龙配套,力争打造立体化教材。

本材料科学与工程实验系列教材,从教学类型上可分为:基础入门型实验,设计研究型实验,综合型实践实验,软件模拟型实验,创新开拓型实验。从教材题目上,包括材料科学基础实验教程(金属材料工程专业);机械工程材料实验教程(机械类、近机类专业);材料科学与工程实验教程(金属材料工程);高分子材料实验教程(高分子材料专业);无机非金属材料实验教程(无机专业);材料成型与控制实验教程(压力加工分册);材料成型与控制实验教程(铸造分册);材料成型与控制实验教程(焊接分册);材料物理实验教程(材料物理专业);超硬材料实验教程(超硬材料专业);表面工程实验教程(材料的腐蚀与防护专业)等一系列与材料有关的实验教材。从内容上,每个实验包含实验目的、实验原理、实验设备与材料、实验内容与步骤、实验注意事项、实验报告要求、思考题等内容。

本实验系列教材由崔占全（燕山大学）、潘清林（中南大学）、赵长生（四川大学）、谢峻林（武汉理工大学）任总主编；王明智（燕山大学）、翟玉春（东北大学）、肖纪美（北京科技大学、院士）任总主审。

经全体编审教师的共同努力，本系列教材的第一批教材即将出版发行，我们殷切期望此系列教材的出版能够满足国内高等院校材料科学与工程类各个专业教育改革发展的需要，并在教学实践中得以不断充实、完善、提高和发展。

本材料科学与工程实验系列教材涉及的专业及内容极其广泛。随着专业设置与教学的变化和发展，本实验系列教材的题目还会不断补充，同时也欢迎国内从事材料科学与工程专业的教师加入我们的队伍，通过实验教材这个平台，将本专业有特色的实验教学经验、方法等与全国材料实验工作者同仁共享，为国家复兴尽力。

由于编者水平及时间所限，书中不足之处，敬请读者批评指正。

材料科学与工程实验教学研究会
材料科学与工程实验系列教材编写委员会

2011年7月

前言

实践教学应以“理论教学与实验教学有机融合、专业知识与应用技能有机融合”为理念,以创新素质培养为目标,建立包括基础实验、综合实践、创新活动、专业实践、社会实践五方面内容的立体式、多形式综合实践教学体系。对于工科教学更应注重实践教学的作用,勤于动手,善于思考,从理论到实践,从了解到掌握,从基础到前沿,这样才能提高工科学生的综合能力,才能培养出真正的国家栋梁。金属材料塑性成形是材料科学与工程、材料成形及控制和机械工程等专业的基础课,主要研究的是金属材料塑性成形原理、技术、设备、模具以及塑性成形过程中参数的测试,本课程教学不仅仅是培养学生具有扎实的专业理论知识,更重要的是培养学生的创新能力。金属材料塑性成形实验教程内容丰富,覆盖面广,主要包括金属材料塑性成形原理、金属材料塑性成形技术、金属材料塑性成形设备及模具、金属材料塑性成形过程参数测试技术等课程等实验内容。每个实验均由专业知识、实验目的、实验原理、实验设备及材料、实验内容及步骤和实验报告要求等六部分组成。在第四章安排了四个“三性”实验以培养学生的创新能力。

全书分为五章,总共37个实验,实验教学可根据本学校专业特点进行适当的选择。

本书由中南大学李慧中任主编并对全书进行统稿,由中南大学潘清林教授主审。具体参加编写的有李慧中(第一章,实验一、三、四、五、八、九、十;第二章,实验一、二、三、四、五、六、七、八、九、十一、十二、十三),郑晓华(第一章,实验六;第二章,实验十;第三章,实验三、四、五),李海玲(第一章,实验二、七、十一;第三章,实验一、二),陈健美(第四章),刘楚明(第五章),研究生王海军、刘洪挺、曾敏、宋阳、李立对本书的文字、图和表进行了校对。

VI 前 言

本书在编写过程中，参考了许多兄弟院校的实验教材、实验指导书、有关著作和论文，中南大学李周、陈明安、徐国富、黄继武四位教授对本书的初稿提出了宝贵的修改意见，本书的出版得到了中南大学、湖南涉外经济学院、太原科技大学及北方民族大学的大力支持，谨此一并深表谢意。由于条件有限，本书未能列出所有参考文献，在此对未列出参考文献的作者表示万分歉意，并对所有参考文献的作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编 者
2011年5月

目 录

第一章 金属材料塑性加工原理实验	1
实验一 金属塑性变形的特点	1
实验二 金属薄板拉伸试验	5
实验三 外摩擦对接触表面上金属质点流动及压力分布的影响	9
实验四 硬化曲线实验	13
实验五 常摩擦系数的测定方法	17
实验六 镦粗不均匀变形的研究	20
实验七 圆柱体自由镦粗实验	23
实验八 变形分布的研究	25
实验九 残余应力的测定实验	28
实验十 金属变形抗力及加工硬化分析	32
实验十一 塑性变形对金属性能的影响	36
第二章 金属材料塑性加工技术实验	38
实验一 挤压过程中挤压力的变化规律	38
实验二 不同挤压条件下的金属流动及挤压力变化的测定	42
实验三 偏心圆孔模挤压时的金属流动实验	46
实验四 分流模挤压对挤压力及制品焊缝质量的影响	48
实验五 拉线的安全系数及拉伸力的测量实验	51
实验六 最大咬入角的测定	55
实验七 平辊轧制前滑的测定	58
实验八 金属轧制过程中轧制力的测定	61
实验九 金属室温压缩及塑性流动规律	64
实验十 环形件模锻研究	67
实验十一 极限拉深系数的研究	71
实验十二 金属板料冲压成形性能实验	73
实验十三 金属薄板成形极限实验	77
第三章 金属材料塑性成形设备及模具实验	81
实验一 冲压模具的组装与测量实验	81

实验二 冲压模具设计	85
实验三 液压机基本参数测定	88
实验四 液压缸应力测定	90
实验五 锻锤打击能量的测定	94
第四章 金属材料塑性成形过程参数测试技术实验	99
实验一 电阻应变片的粘贴及组桥	99
实验二 测力传感器的静态标定	103
实验三 轧制压力的测定	108
实验四 超声无损检测技术实验	110
第五章 金属材料塑性成形综合技术实验	117
实验一 金属塑性成形综合实验	117
实验二 热模拟压缩综合实验	123
实验三 Deform 软件在金属塑性成形中的应用	131
实验四 金属材料塑性成形创新设计型实验	138
参考文献	142

第一章

金属材料塑性加工原理实验

实验一 金属塑性变形的特点

一、专业知识

金属之所以能进行压力加工，是由于金属具有塑性这一特点。所谓塑性，是指金属在外力作用下，能稳定地产生永久变形而不破坏其完整性的能力。金属塑性的大小，可用金属在断裂前产生的最大变形程度来表示。通常称压力加工时金属塑性变形的限度（即塑性极限）为塑性指标。

当外力比较小时变形为弹性变形，也就是外力去除以后变形可以消失，这种可以恢复的变形称为弹性变形。晶体在弹性变形时，应力和应变是直线关系，这个关系称为虎克定理，即在单向拉伸时，拉应力 σ 、弹性模量 E 、伸长应变 ε 之间存在关系 $\sigma = E\varepsilon$ ，在剪切变形时剪应力 τ 、剪切模量 G 、剪应变 γ 之间存在关系 $\tau = G\gamma$ 。但是当外加应力超过一定的值（即屈服极限），应力和应变就不再是线性关系，卸载后变形也不能完全消失，而会留下一定的残余变形或永久变形，这种不可以恢复的变形称为塑性变形或范性变形。

对金属与合金塑性的研究，是压力加工理论与实践的重要课题之一。

二、实验目的

本实验的目的就是通过低碳钢拉伸试验了解金属塑性变形的特点，为学习塑性加工力学打下一定的实践基础。

三、实验原理

低碳钢的拉伸试验可得到如图 1-1 所示的拉伸曲线，该曲线反映了金属塑性变形过程典型的力学行为。图 1-1 中 p 点称为比例极限点，是该曲线的极限部分的顶点， e 点为弹性极限点，已稍稍偏离了直线，当材料的应力小于弹性极限 σ_e ，载荷全部卸去后，试样完全回复到原来的形状尺寸与性能，而且无论是加载还是卸载，试样的形状尺寸与某一瞬时的外载荷有关，沿着完全同一的路径发生，应力应变之间存在统一的关系——虎克定律 $\sigma = E\varepsilon$ 。

当应力达 s 点时，试样在应力不太增加的情况下会发生较大的塑性流动，图 1-1 中出

现一段平台（即屈服平台），这种现象称为材料的屈服。屈服时的最小应力 σ_s 称为材料的屈服极限。应力达到这一数值，材料就从弹性状态转变成塑性状态。

实际上，比例极限 σ_p 、弹性极限 σ_e 和屈服极限 σ_s 三者是非常接近的，故工程上常将三者视为一点而不加以区别，统一用 σ_s 表示，把 σ_s 视为弹性变形与塑性变形的分界点，即认为材料屈服之前为弹性变形阶段，屈服之后为塑性变形阶段。

当试样继续拉伸时，随着应变的增加，应力也需要继续增大，沿着曲线达到最高点——强度极限点 σ_b ，但应注意， σ_b 并不是拉伸过程中作用在实际断面上的最大应力。

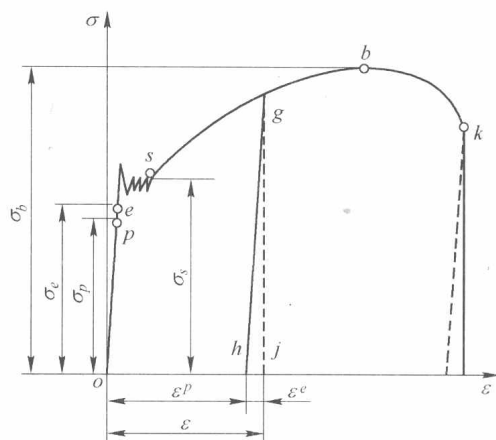


图 1-1 低碳钢的拉伸曲线

当载荷继续增加至 b 点时，试样发生不均匀变形，变形集中在某一局部，截面出现局部变细的缩颈现象，所以 b 点又是简单拉伸时材料失稳的临界点，此处有 $dP=0$ 或 $d\varepsilon=0$ ，缩颈处呈现三向拉应力状态，酝酿着断裂。当变形量迅速增大至 k 点时试样被拉断。可见弹性变形、塑性变形和断裂是金属变形的 3 个基本阶段，这 3 个阶段既有区别，又有联系。如弹性变形是塑性变形的前奏，塑性变形过程中存在弹性变形，同时酝酿着断裂。

在塑性变形阶段上的某点 g ，卸除外载荷时，延伸量已达 oj 的试样将沿 gh 卸载到应力为零，且 gh 几乎平行于 op 。卸载完毕后，试样残存永久变形量 oh ，只有一部分变形量 hj 得到回复。其中能回复的部分为弹性变形，以 ε^e 表示，不能回复的、残存的永久变形部分为塑性变形，以 ε^p 表示，应力应变关系曲线上任一点 $g(\varepsilon, \sigma)$ 所对应的应变是：

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon^p$$

加载时，即 $\sigma d\sigma > 0$ 时，有新的塑性变形发生，应力应变关系一般是非线性的，可表示为：

$$\sigma = f(\varepsilon) = H(\varepsilon^p)$$

卸载时，即 $\sigma d\sigma \leq 0$ 时，不发生新的塑性变形，而只有弹性变形回复，应力应变仍是线性的。

弹性变形、塑变形共存和加载、卸载过程不同的应力应变关系是金属塑性变形的两个基本特点。

加载卸载过程应力应变关系的不同可引出塑性变形的另一重要现象，塑性变形应力应变关系的多值性，即不一一对应。如图 1-1 所示，对于一定 σ_0 ，若中途没有出现卸载，其对应的应变为 ε_0 ，若先加载达到 g 点，经卸载至 σ_0 ，则对应的应变为 ε' 。同样，对于同一应变，有时会对应多个应力。但并不是说，塑性变形的应力应变关系就不能唯一确定了。如果知道加载历史（具体指预变形量），从初始的零状态开始，逐段地跟随加载历史寻找到最终状态的应力 σ ，则应变 ε 还是一定值。应力应变关系与加载历史有关是金属塑性变形的又一重要特点。

在塑性变形阶段，如将卸载过的试样重新加载，即可发现拉伸曲线是以 h 点为起点，几乎沿着 hg 回升，在达到 g 点之前，即使应力可能超过 σ_s ，但试样并不发生屈服，只有当应力达到 g 点后，塑性变形才重新出现，以后的曲线仍然沿着 gbk 发展下去，这时的拉伸曲线就是 $hgbk$ 。 g 点的应力就是试样重新加载时新的屈服应力，如果重复上述卸载、加载过程，就可发现重新加载时屈服应力沿 gb 线上升，这一现象称为应变硬化，工程上又称冷作硬化或加工硬化。表明金属塑性变形过程伴随有力学性能的变化，这是塑性变形的又一显著特点。

四、实验设备及材料

实验所用的设备和材料如下。

(一) 设备

60kN 材料实验机。

(二) 材料

拉伸模架 1 只、拉伸模 1 套、光滑圆柱形低碳钢拉伸试样若干个、游标卡尺和钢尺各 1 把。

五、实验内容及步骤

按照实验内容和步骤进行操作，具体如下：

(1) 试样准备。

先将低碳钢圆棒样表面用砂纸打光；测量断面尺寸，按 10 天确定标距长度；并将标距长度分成 10 等分；用铅笔画上标记点。

(2) 实验过程。

在 60kN 材料实验机上将上述试样进行静态拉伸实验，并记录拉伸载荷曲线上有关载荷和延伸量等数据，见表 1-1，观察屈服现象；屈服后继续拉伸到一定塑性变形量，然后卸载到载荷为零，记录相应的载荷与尺寸。接着重新加载进行拉伸，使之再次发生塑性变形，观察应变硬化现象，并记录下相应的载荷与尺寸，最后拉断。实验过程的安排可参照图 1-1 进行。

表 1-1 实验数据

项 目	屈服点	第一次 卸载	第一次 重新屈服	第二次 卸载	第二次 重新屈服	最大载荷	断裂时
载荷 F/N							
应力 σ/MPa							
长度 η/mm							
长度变化 $\Delta\eta/mm$							
伸长应变 $\varepsilon/\%$							

(3) 测量断口尺寸。

取下试样，测量拉断后的尺寸。如断口不在试样中部，应参照标距与等分线进行必要的修正才可计算出最大延伸量。

六、实验报告要求

实验后每个人都必须书写实验报告，报告要求写明实验名称，主要内容包括：

(1) 实验目的。

(2) 实验内容：实验设备型号及有关参数、试样材质及基本尺寸、实验内容及主要步骤。

(3) 实验结果与分析：

1) 拉伸载荷曲线；

2) 记录实验数据，将相关实验数据记入表 1-1 中；

3) 分析数据：要求根据拉伸曲线与所记录数据，分析塑性变形的各种现象，分析时应善于观察、勤于思考，发挥自己的主观能动性。

(4) 结论：根据上述结果与分析，可以知道金属变形有哪 3 个阶段，金属塑性变形有哪些基本特点。注意不要局限于实验原理中介绍的几点。

(5) 实验报告书写报告人班次、学号及实验报告的日期。

考虑到后继课程还有专门的硬化曲线（即真实应力应变曲线实验），为简便起见，本实验的应力 σ 可采用条件应力，即 $\sigma = P/F_0$ ， F_0 为试样的原始断面积。