



材料科学与工程综合实验教学系列教材

金属塑性成形 综合实验



华中科技大学 夏巨谔 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

材料科学与工程综合实验教学系列教材

金属塑性成形综合实验

主编 夏巨湛
参编 杜 亭
主审 李德群



机械工业出版社

本书分别论述了体积金属塑性成形工艺与模具和板料金属塑性成形工艺与模具共 13 个实验的基本理论、实验目的与内容、实验设备与材料、实验步骤和实验报告内容。

本书可供高等院校材料加工工程专业的本科生和专科生使用,也可供研究生和从事金属塑性加工生产与科研开发的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

金属塑性成形综合实验/夏巨谌主编. —北京:机械工业出版社, 2010.5

(材料科学与工程综合实验教学系列教材)

ISBN 978-7-111-30254-4

I. ①金… II. ①夏… 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 (2010) 第 055193 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:冯春生 责任编辑:冯春生 版式设计:张世琴

责任校对:申春香 封面设计:张静 责任印制:杨曦

北京四季青印刷厂印刷 (三河市杨庄镇环伟装订厂装订)

2010 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·9.75 印张·207 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-30254-4

定价:18.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

序

材料是重要的。材料的进步是科学技术进步的先导。可以说，没有材料就没有世界。材料的研究、制备与加工是影响国家竞争力的关键领域，许多关系到国计民生的重大工程和核心装备的限制性环节往往归结到材料及材料加工上。然而，从本质上讲，这些问题能否科学合理地解决，取决于从事该领域人才的水平与能力。因此，如何培养合格的材料学科人才，特别是培养具有创新精神、实践能力、高素质的材料学科人才是高等学校面临的一个重要课题。

近些年来，华中科技大学材料科学与工程学院在实践教学方面进行了有益的探索，先后承担了教育部“人才培养模式创新实验区”、湖北省“材料学科综合性、开放性实验平台建设的研究与实践”等教学改革项目，目的是研究建立适合新形势下的材料学科创新性、综合性实践教学体系，探索行之有效的实施办法，提高人才培养质量。而提高教学质量是高等学校面对的主要课题。

改革的主要措施之一是在本科实验教学中，建立专门的本科实验教学中心，科学合理地整合本科课程的教学实验，形成了10门独立的综合性实验课程，独立考核、单独记学分。这些独立设课的实验课程涵盖了数门理论课程，使传统依附在理论教学的演示性实验转变为以培养学生动手能力、分析能力及创新能力的综合性实验，显著地提升了实验教学的地位，体现了实验教学在人才培养中的重要作用。

在上述背景下，华中科技大学材料科学与工程学院与机械工业出版社合作，编写出版了本套材料科学与工程综合实验教学系列教材，目的是更好地服务实验教学，不断提高实践教学质量。该系列教材最大的特点就是将材料学科的某一领域（如材料连接、塑料注射成型、金属塑性成形等）的相关实验项目进行提炼，形成各自独立又彼此相关的综合性实验。在编写过程中，还特别注意基础性实验与创新性实验相结合，在切实保障学生达到基本要求的前提下，尽量为培养学生的创新精神与锻炼学生的动手能力提供条件。

我相信，该套综合实验教学系列教材的出版，有助于有效地提高学生的创新、实践能力，对深化材料学科的教学改革、提升人才培养质量具有重要的意义。当然，任何一事物，不可能完美无缺，我也和作者一样，希望读者能对本系列教材的不足之处提出批评与建议。

谨为之序。

中国科学院院士

杨叔子

前 言

材料成形是先进制造技术的一个重要组成部分，它在汽车、铁路机车、船舶、拖拉机、航空航天、军工、家用电器、仪器仪表和轻工等产品的零部件制造业中，得到了广泛的应用。因此，在制造业领域内，对这方面的技术和人才需求迫切，且数量较大。

实验教学是教学实践环节中最为基础最为重要的一个环节。根据教育部有关加强大学本科学生实践动手能力和综合素质培养的精神，独立开设实验教学课，是作为落实这一精神的重要举措。为此，华中科技大学材料科学与工程学院组织有关教师编写了材料科学与工程综合实验教学系列教材，《金属塑性成形综合实验》是此系列教材之一，可作为普通高等教育“十一五”国家级规划教材《材料成形工艺》（第2版）、《金属塑性成形工艺及模具设计》以及其他相关教材配套的实验教学教材。

本实验教学教材与以前的实验指导书的不同与创新之处主要有两点：其一，它将从前的单纯验证性实验转变为验证和研究相结合的综合性实验；其二，每个实验前有基本理论的论述，而这个基本理论部分与课堂教学的相关理论保持一致并互为补充，使实验教学既相对独立，以提高实验教学的地位与重要性，又与课堂教学形成完整而统一的体系。其目的在于培养学生的综合分析与创新的能力。

本书分别论述和介绍了体积金属塑性成形工艺及模具中的“圆柱体自由锻粗”、“圆柱体局部锻粗”、“开式模锻飞边槽”、“闭式模锻分流腔”、“冷挤压工艺”和“用圆环锻粗法测定塑性变形中的摩擦因数”，板料金属塑性成形工艺与模具中的“板料拉伸”、“板料冲裁工艺及冲裁模具间隙”、“板料弯曲成形工艺”、“板料拉深成形工艺”、“模具装拆”、“板料冲压成形数值模拟”和“管料冲压与胀形工艺”共13个实验的基本理论、实验目的及内容、实验设备与材料、实验步骤和实验报告内容。

本书由华中科技大学夏巨湛担任主编，具体参加编写的有夏巨湛（实验一、二、三、四、五、六、七、八、九、十、十一、十三），杜亭、夏巨湛（实验十二）。本书由华中科技大学李德群教授担任主审。

鉴于作者水平有限，书中难免有疏漏和不当之处，诚请读者批评指正。

编 者

目 录

序

前言

概述	1
----------	---

第一部分 体积金属塑性成形工艺与模具实验

实验一 圆柱体自由锻粗实验	3
实验二 圆柱体局部锻粗实验	9
实验三 开式模锻飞边槽实验	15
实验四 闭式模锻分流腔实验	22
实验五 冷挤压工艺实验	42
实验六 用圆环锻粗法测定塑性变形中的摩擦因数	52

第二部分 板料金属塑性成形工艺与模具实验

实验七 板料拉伸实验	56
实验八 板料冲裁工艺及冲裁模具间隙实验	62
实验九 板料弯曲成形工艺实验	73
实验十 板料拉深成形工艺实验	84
实验十一 模具装拆实验	94
实验十二 板料冲压成形数值模拟	101
实验十三 管料的冲压与胀形工艺实验	126
参考文献	149

概 述

一、设置固态金属塑性成形实验课程的作用与意义

“材料成形工艺”是本科材料成形及控制工程专业的一门重要的必修课程，它包括“材料成形工艺”教材、课堂教学、实验教学、电子教案、网络课程、习题与试题库、教学参考书（资料库）、在线视频等内容。而金属塑性成形是材料成形工艺的重要组成部分之一。

华中科技大学材料成形及控制工程专业的培养目的是：培养具备材料成形及控制学科及相关专业学科的基础理论知识与应用能力，能够在工业生产第一线从事材料成形工艺、模具及工装领域内的技术与开发、设计与制造、应用与运营管理等方面工作，富有创新精神，综合素质高的人才。

综合素质高的人才，一是要具有较为扎实的专业理论基础和较宽的专业知识面；二是要具有较强的实践与动手能力即实际工作能力；三是要具有较高的外语和计算机应用水平；四是要具有一定的人文素质和团队精神等。

实践与动手能力是当代大学生及研究生最为缺乏和不足的，实验课和实习则是大学生在学习过程中培养实践与动手能力的重要环节，所以实验课显得尤其重要。

二、实验教学目标

- 1) 掌握实验仪器设备的使用及操作技能和实验方法，培养学生的实践及动手能力。
- 2) 深化教材和课堂理论知识的理解，促进学生综合技术素质和创新能力的培养。

三、实验教学的基本思路

1) 实验教学的内容应当与教材及课堂理论教学的内容保持一致，相互协调呼应，但应将实验由单纯的验证型转变为验证和分析研究相结合的复合型，即所开实验应在验证书本理论的基础上进行延深，作进一步的分析研究，将理论机制与机理彻底弄清搞懂，看看是否还有值得改进和完善的地方，是否能发现新的现象。

2) 将实验课程分为课内必做实验和课外选做创新实验，以课内必做实验为主，同课外选做创新实验相结合。参加课外选做创新实验的学生，本着“学有余力、不影响正常教学安排、确有兴趣、自愿参加”的原则，避免创新实验流于形式或走过场，确保参加创新实验的学生其实际工作能力得到进一步的锻炼，技术创新能力得到培养。

3) 全部实验教学内容与教材和课堂教学内容一样，以工艺及模具为重点，以设备



为辅,使所开的全部单个实验形成一个有机的完整体系,不是各自独立、互不相关,而应是彼此关联的。体现所有实验的整体综合性,有利于培养学生成套技术的完整思维和集成创新的能力。

4) 以硬件为主,软硬结合,即以仪器设备进行实验为主,确保学生动手操作,辅以软件演示塑性变形过程及成形机理,演示在实验室无法实现的现代化塑性成形制造业的典型产品与生产线,扩大学生的知识面,增强学生学习专业知识的积极性。

四、主要实验教学内容

本实验教学内容主要与普通高等教育“十一五”国家级规划教材《材料成形工艺》(第2版)、《金属塑性成形工艺及模具设计》,以及相关的教材与专著内容相呼应。

所设置的主要实验分为两大部分,即第一部分体积金属塑性成形工艺与模具实验,其具体实验有“圆柱体自由镦粗实验”、“圆柱体局部镦粗实验”、“开式模锻飞边槽实验”、“闭式模锻分流腔实验”、“冷挤压工艺实验”、“用圆环镦粗法测定塑性变形中的摩擦因数”;第二部分板料金属塑性成形工艺与模具实验,其具体实验有“板料拉伸实验”、“板料冲裁工艺及冲裁模具间隙实验”、“板料弯曲成形工艺实验”、“板料拉深成形工艺实验”、“模具装拆实验”、“板料冲压成形数值模拟”和“管料的冲压与胀形工艺实验”。两部分共设置了13个教学实验,其目的是供使用者根据自己的教学内容与实验条件进行选择。

第一部分

体积金属塑性成形工艺与模具实验

实验一 圆柱体自由镦粗实验

一、基本理论

使坯料高度减小而横截面增大的锻造工序称为镦粗。坯料侧面无约束的镦粗即为自由镦粗。

镦粗的作用是将高径（宽）比大的坯料锻成高径（宽）比小的饼块锻件；锻造空心锻件时在冲孔前使坯料横截面增大和平整；锻造轴杆锻件时可以提高后续拔长工序的锻造比；提高锻件的横向力学性能和减少力学性能的异向性等。

镦粗的主要方法有平砧镦粗、垫环镦粗和局部镦粗。平砧镦粗最为基础且应用最多，因此本实验着重进行圆柱体平砧镦粗规律的研究。

1. 镦粗过程分析

平砧镦粗是在上下平砧间或镦粗平板间对坯料进行镦粗，如图 1-1 所示。

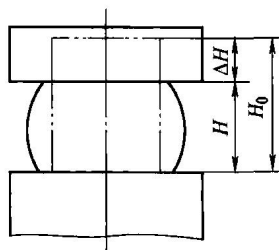


图 1-1 平砧镦粗

镦粗的变形程度除用压下量 ΔH 、相对变形 ϵ_H 、对数变形 ϵ_H 表示之外，常以坯料镦粗前后的高度之比即镦粗比 K_H 来表示，即

$$K_H = \frac{H_0}{H} \quad (1-1)$$

或

$$K_H = e^{\epsilon_H} = \frac{1}{1 - \epsilon_H} \quad (1-2)$$



式中 H_0 、 H ——镦粗前、后坯料的高度；

$$\epsilon_H \text{——坯料高度方向的对数变形, } \epsilon_H = \ln \frac{H_0}{H};$$

$$\epsilon_H \text{——坯料高度方向的相对变形, } \epsilon_H = \frac{H_0 - H}{H_0}。$$

镦粗是自由锻最基本的工序，不仅一些锻件（如饼块锻件、空心锻件）必须采用镦粗成形，在其他锻造工序（如拔长、冲孔等）中也包含镦粗因素。镦粗也是模锻的基本工序。因此，了解镦粗时的变形规律，对掌握锻造工艺具有重要意义。

用平砧镦粗圆柱坯料时，随着高度的减小，金属不断向四周流动。由于坯料和工具之间存在摩擦，镦粗后坯料的侧面将变成鼓形，同时造成坯料内部变形和应力分布不均。通过采用网格法的镦粗实验（见图 1-2、图 1-3、图 1-4）可以看到，根据镦粗后网格的变形程度大小，沿坯料对称面可分为三个变形区。

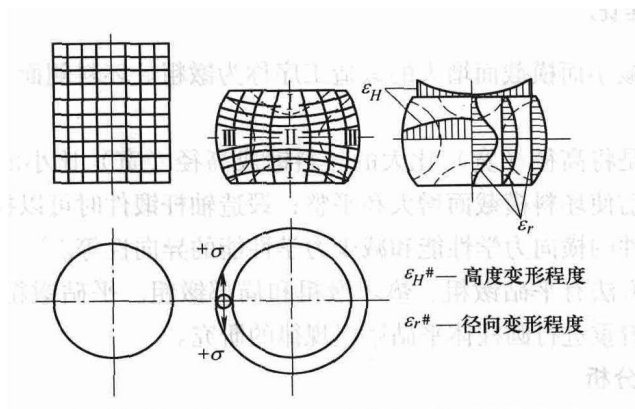


图 1-2 圆柱坯料镦粗时的变形分布

I—难变形区 II—大变形区 III—小变形区

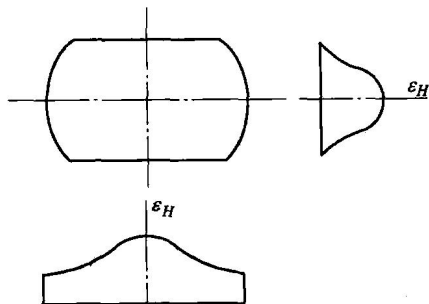


图 1-3 镦粗时变形程度沿轴向和径向的分布

ϵ_H ——高度方向变形程度

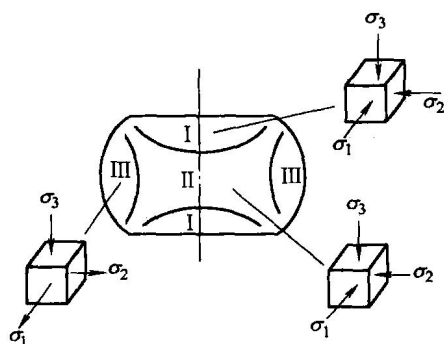


图 1-4 镦粗时按变形程度分区和各区应力情况

区域 I：由于摩擦影响最大，该区变形十分困难，称为“难变形区”。

区域 II：不但受摩擦的影响较小，应力状态也有利于变形，因此该区变形程度最大，称为“大变形区”。

区域 III：其变形程度介于区域 I 与区域 II 之间，称为“小变形区”，其切向受拉应力，越靠近坯料表面切向拉应力越大，当切向拉应力超过材料的强度极限时，容易引起表面产生 45° 方向的裂纹。

对不同高径比的坯料进行镦粗时，产生的鼓形特征和内部变形分布也不同，如图 1-5 所示。

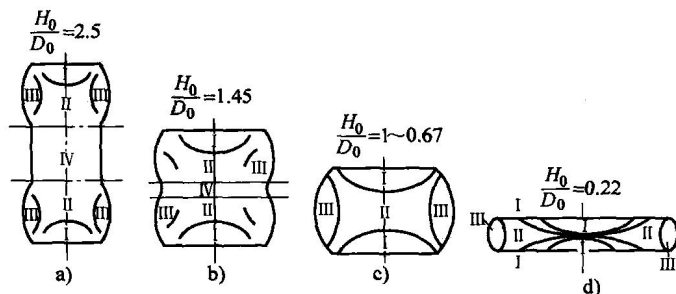


图 1-5 不同高径比坯料镦粗时的鼓形特征与变形分布

I—难变形区 II—大变形区 III—小变形区 IV—均匀变形区

镦粗高径比 $\frac{H_0}{D_0} = 2.5 \sim 1.5$ 的坯料时，开始在坯料的两端先产生双鼓形，形成 I、II、III、IV 四个变形区。其中，区域 I、II、III 同前所述，坯料中部为均匀变形区 IV，该区受摩擦影响小，内部变形均匀分布，侧表面保持圆柱形。如果继续镦粗到 $\frac{H}{D} = 1$ ，坯料则由双鼓形变为单鼓形。

除与毛坯接触面的摩擦影响外，温度不均也是一个很重要的因素。与工具接触的



上、下端金属由于温度降低快,变形抗力大,故较中间的金属变形困难。

由于以上原因,使区域Ⅰ金属的变形程度小和温度低,故镦粗锭料时此区铸态组织不易破碎和再结晶,结果,仍保留粗大的铸态组织。而中间部分(即区域Ⅱ),由于变形程度大和温度高,铸态组织被破碎和再结晶,形成细小晶粒的锻态组织,而且锭料中部的原有孔隙也被焊合了。

由于区域Ⅱ金属变形程度大,区域Ⅲ变形程度小,于是区域Ⅱ金属向外流动时便对区域Ⅲ金属作用有径向作用力,并使其在切向受拉应力,越靠近坯料表面切向拉应力越大。当切向拉应力超过材料当时的强度极限或切向变形超过材料允许的变形程度时,便引起纵向裂纹。

短毛坯($\frac{H}{D} \leq 0.5$)镦粗时,按变形程度大小也可分为三区,但由于相对高度较小,内部各处的变形条件相差不太大,内部变形较一般毛坯($\frac{H}{D} = 0.8 \sim 2.0$)镦粗时均匀些,鼓形度也较小。这时,与工具接触的上、下端金属也有一定程度的变形,并相对于工具表面向外滑动。而一般毛坯镦粗初期端面尺寸的增大主要是靠侧表面的金属翻上去的。

镦粗高径比 $\frac{H}{D} \leq 1$ 的坯料时,只产生单鼓形,形成三个变形区。当镦粗高径比 $\frac{H}{D} \leq 0.5$ 的坯料时,鼓形逐渐减小。

坯料在镦粗过程中,鼓形不断变化,其变化规律如图 1-6 所示。镦粗开始阶段鼓形逐渐增大,当达到最大值后又逐渐减小。如果坯料体积相等,高坯料产生的鼓形比短坯料($\frac{H_0}{D_0}$ 小)产生的鼓形要大。

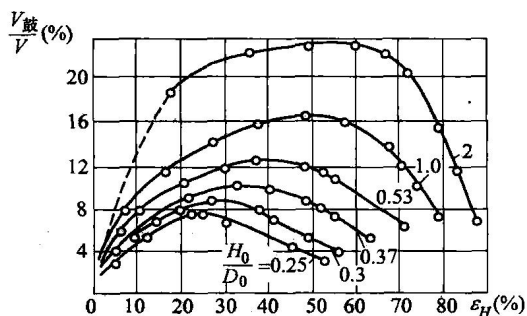


图 1-6 不同高径比坯料镦粗过程的鼓形体积变化

V —坯料体积 $V_{\text{鼓}}$ —鼓形体积



上述平砧锻粗时的金属流动特点,对锻造工艺和锻件质量都很不利。由于坯料侧面出现鼓形,不但要增加修整工序,并且可能引起表面纵裂,对低塑性金属尤为敏感。此外,由于坯料内部变形的不均匀,必然引起锻件晶粒大小不均,从而导致锻件的性能也不均,这对晶粒要求严格的合金钢锻件影响极大。如锻粗圆盘锻件时,在锻件的中部(相当区域Ⅱ),变形程度很大,为三向压应力状态,不但有利于焊合缺陷,还可得到细晶粒组织。而在锻件两端(相当区域Ⅰ),因为属于难变形区,所得组织晶粒粗大。因此,为了保证锻件质量,要求尽量减小鼓形,提高变形的均匀性。

为了研究锻粗坯料的变形和坯料内部及坯料与垫板(砧块)接触面上的应力分布情况,在毛坯端面涂以墨汁,经锻粗后从坯料的端面可以看出粘滞区与滑动区的墨汁变化不同,粘滞区(中心部位)的墨汁薄膜没有损坏,而滑动区(边缘)的墨汁薄膜遭到破坏。当坯料的径长比 $D/H < 1$ 时,几乎看不到滑动区。此时端面直径的增大,主要是由于侧表面的金属流到端面的结果。

摩擦使接触面上的应力分布不均,其不均匀性与摩擦阻力的大小、试件径长比 D/H 有关, D/H 越大,接触面的中心应力也越大,即变形抗力越大。

2. 锻粗时的注意事项

1) 为防止锻粗时产生纵向弯曲,圆柱体毛坯高径比不应超过 $2.5 \sim 3$,在 $2 \sim 2.2$ 的范围内更好。对于平行六面体毛坯,其高度与较小基边之比应小于 $3.5 \sim 4$ 。

锻粗前毛坯端面应平整,并与轴心线垂直。

锻粗前毛坯加热温度应均匀,锻粗时要把毛坯围绕着它的轴心线不断地转动,毛坯发生弯曲时必须立即校正。

2) 锻粗时每次的压缩量应小于材料塑性允许的范围。如果锻粗后需进一步拔长时,应考虑到拔长的可能性,即不要锻得太低。避免在终锻温度以下锻粗。

3) 对有皮下缺陷的锭料,锻粗前应进行倒棱制坯,其目的是焊合皮下缺陷,使锻粗时侧表面不致产生裂纹,同时也去掉钢锭的棱边和锥度。

4) 为减小锻粗所需的力量,毛坯应加热到该种材料所允许的最高温度。

5) 锻粗时毛坯高度应与设备空间相适应。在锤上锻粗时,应使

$$H - H_0 > 0.25H$$

式中 H ——锤头的最大行程;

H_0 ——毛坯的原始高度。

二、实验目的及内容

- 1) 掌握圆柱体锻粗的实验方法和操作要领,增强锻粗成形工艺的感性认识。
- 2) 深化理解圆柱体锻粗的变形规律及变形机理。
- 3) 研究试件与垫板(砧块)接触面上的应力分布情况。
- 4) 深化理解锻粗工艺参数的确定方法及注意事项。

三、实验所用设备、材料、工具

设备：60kN 油压机。

材料： $\phi 25\text{mm} \times 15\text{mm}$ 铅（或塑性泥）试件 3 个； $\phi 25\text{mm} \times 50\text{mm}$ 铅（或塑性泥）试件 3 个。

工具：有缝垫板 1 块；无缝垫板 2 块；测量工具、尺寸控制垫块等。

四、实验步骤

1) 取端面涂有墨汁的 $\phi 25\text{mm} \times 15\text{mm}$ 的试件，在有缝垫板上镦粗，3 个试件的相对变形 ε_H 分别为 40%、60%、80%。

观察以上 3 个试件流入缝中的形状，并观察、分析端面墨汁薄膜的变化情况。

2) 取端面涂有墨汁的 $\phi 25\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的 3 个试件（需测量每个毛坯的直径和高度），在无缝垫板上镦粗。3 个试件的相对变形 ε_H 分别为 30%、50%、70%。

3) 观察鼓形及端面墨汁薄膜的变化情况，并测量试件的有关尺寸，记入表 1-1 中。

表 1-1 试件的有关尺寸

参数	ε_H	D_0	H_0	V_0	$D_{\max}$	$D_{\text{上}}$	$D_{\text{下}}$	$D_{\text{端平}}$	H	$D_{\text{平}}$	δ_a	δ
单位	%	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
有缝垫板镦粗	30											
	50											
	70											
无缝垫板镦粗	30											
	50											
	70											

注： D_0 —毛坯直径； H_0 —毛坯高度； V_0 —毛坯体积； $D_{\max}$ —镦粗后试件最大直径； $D_{\text{上}}$ —镦粗后试件上端面直径； $D_{\text{下}}$ —镦粗后试件下端面直径； $D_{\text{端平}} = (D_{\text{上}} + D_{\text{下}})/2$ ； δ_a —绝对鼓形， $\delta_a = D_{\max} - D_{\text{端平}}$ ； H —镦粗后试件高度； $D_{\text{平}}$ —镦粗后试件平均直径， $D_{\text{平}} = \sqrt{4V_0/\pi h}$ ； δ —相对鼓形， $\delta = (D_{\max} - D_{\text{端平}})/D_{\text{平}}$ 。

五、实验报告内容

1) 分析比较在有缝与无缝垫板中镦粗时，不同的变形程度，其正应力分布曲线有什么不同？

2) 解释鼓形现象及端面墨汁的变化情况。

3) 根据表 1-1 中数值，绘出 δ - ε_H 曲线。

实验二 圆柱体局部镦粗实验

一、基本理论

1. 局部镦粗规则

局部镦粗（聚料）是平锻机和工作台上具有夹紧机构的立式镦锻液压机上模锻的基本工步，与一般立式锻压设备上的一些局部镦粗工步的根本区别是，棒料并非自由放入型槽，而是在局部夹紧的情况下产生金属变形的，所以它具有更大的稳定性。在实验条件下，即毛坯端面平整且垂直于棒料轴线时，其变形部分的长度 l_0 和直径 D_0 之比为 3.2 时，可在平锻机一次行程中自由镦粗到任意尺寸而不产生纵向弯曲，这简称为一次行程镦粗条件，或局部镦粗第一规则。

但是，在生产条件下，棒料端面既不平整且与轴线也不垂直，所以，坯料变形部分的长径比 (l_0/D_0) 的允许值小于 3.2，其值随毛坯直径的减小、端面斜度的增大而减小。此外，还与冲头形状有关，见表 2-1。符合该条件者，将得到满意的镦粗形状，否则，镦粗过程中坯料将产生弯曲，在锻件上产生折皱（见图 2-1）。

表 2-1 局部镦粗第一规则

冲头形状	一次行程局部镦粗条件	说 明
平冲头	$\psi_{\text{允许}} = \frac{l_0}{D_0} = 2 + 0.01D_0 (D_{\text{平均}})$	坯料端面斜度 $\alpha < 2^\circ$ (锯床下料、精密下料、已镦坯料)
平冲头	$\psi_{\text{允许}} = 1.5 + 0.01D_0 (D_{\text{平均}})$	坯料端面斜度 $\alpha < 2^\circ \sim 6^\circ$ (一般剪床下料、平锻机切断模切断)
带凸台冲头	$\psi_{\text{允许}} = 1.5 + 0.01D_0 (D_{\text{平均}})$	坯料端面斜度 $\alpha < 2^\circ$
带凸台冲头	$\psi_{\text{允许}} = 1.5 + 0.01D_0 (D_{\text{平均}})$	坯料端面斜度 $\alpha = 2^\circ \sim 6^\circ$

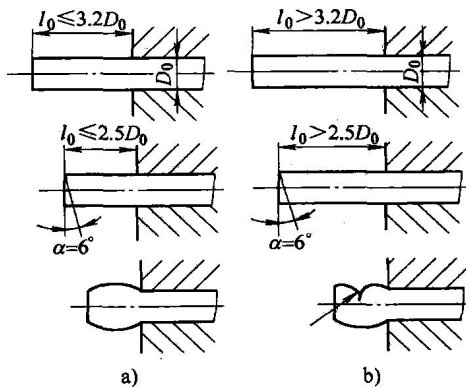


图 2-1 局部镦粗第一规则

a) 无折皱 b) 有折皱



局部镦粗的长径比大于 $\psi_{\text{允许}}$ 时，是否可以进行镦粗，应根据条件而决定。

已知产生塑性变形的力 F 为

$$F = \sigma_s A \quad (2-1)$$

式中 A ——毛坯变形部分的截面面积；

σ_s ——金属塑性变形时的流动极限。

由于毛坯长径比大于 $\psi_{\text{允许}}$ ，必然产生塑性失稳。若有模壁的限制，且塑性变形的外力矩小于杆件的内部的抗力矩，则镦粗时将不产生压杆塑性失稳现象（见图 2-2），即

$$Fe \leq \sigma_s W_p \quad (2-2)$$

$$e \leq \frac{\sigma_s W_p}{F} = \frac{\sigma_s W_p}{\sigma_s A} = \frac{W_p}{A} \quad (2-3)$$

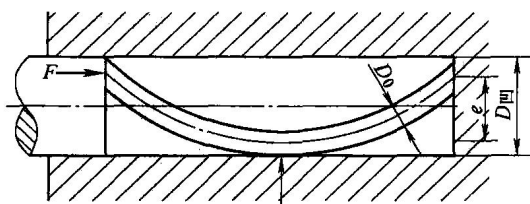


图 2-2 杆的塑性纵弯曲示意图

根据材料力学，对于圆形截面杆件来说， $W_p = \frac{1}{6}D_0^3$ ，而 $A = \frac{\pi}{4}D_0^2$ ，代入上式得

$$e \leq \frac{\frac{1}{6}D_0^3}{\frac{\pi}{4}D_0^2} = \frac{2}{3\pi}D_0 \approx 0.2D_0 \quad (2-4)$$

由式 (2-4) 可以看出，圆形截面杆件在模内压缩时，加载偏心距 $e \leq 0.2D_0$ ，不产生压杆失稳现象。生产中常采用 $D = (1.25 \sim 1.50)D_0$ 。

根据上述原理，还有下列两条镦粗规则：

1) 在凹模中积聚时，当聚料直径 $D_{\text{凹}} = 1.5D_0$ ，坯料伸到凹模外面的长度 $a \leq D_0$ ，或 $D_{\text{凹}} = 1.25D_0$ ， $a \leq 1.5D_0$ ，即使局部镦粗部分长径比超过允许值，也可进行正常的局部镦粗而不产生折叠，这称为局部镦粗第二规则（见图 2-3a）。通常， $D = 1.5D_0$ 适用于 $l_0/D_0 < 10$ 的情况； $D \leq 1.25D_0$ 适用于 $l_0/D_0 > 10$ 的情况。

2) 在冲头的锥形模腔中积聚时，当 $D_{\text{大头}} = 1.5D_0$ ， $a \leq 2D_0$ ；或 $D_{\text{大头}} = 1.25D_0$ ， $a \leq 3D_0$ ，也可进行正常的局部镦粗而不产生弯曲折叠，这称为局部镦粗第三规则，如图 2-3b 所示。

由局部镦粗第二、第三规则可见，在冲头内积聚允许伸到模腔外面的坯料长度大于凹模内积聚的数值。这是因为：积聚时，坯料一端由凹模夹紧，而另一端多为自由端。

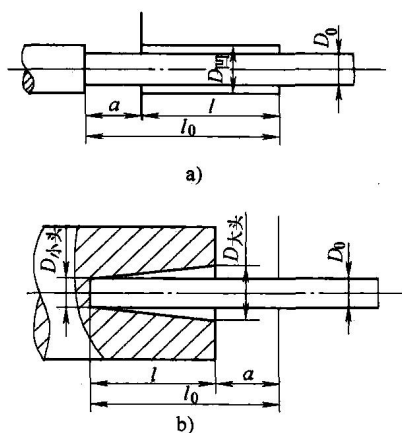


图 2-3 局部镦粗第二、第三规则

坯料弯曲最大处靠近自由端一侧。在弯曲最大处，冲头中的锥形型槽和坯料间的间隙，要比凹模中的圆柱形型槽和坯料间的间隙小得多，因此可以及时地抑制坯料产生弯曲。

上述三条镦粗规则也可简单归纳为两条镦粗规则，即：

① 局部镦粗第一规则。当坯料局部镦粗长径比 $\psi < \psi_{\text{允许}}$ 时，可将坯料一次镦粗成任意形状而不产生缺陷。通常

$$\psi_{\text{允许}} = 1.5 \sim 3.2 \quad (2-5)$$

$\psi_{\text{允许}}$ 与坯料端面状况、冲头形状有关。当端面较平整、直径较大时， $\psi_{\text{允许}}$ 可取较大值（通常以不超过 2.5 为宜；反之，取较小值）。

② 局部镦粗第二规则。当坯料的 $l_0/D_0 > \psi_{\text{允许}}$ 时，坯料一次镦粗成任意形状，则可能发生纵弯，产生折叠。为了避免折叠，必须在型腔（圆柱形或锥形）内积聚。由于侧壁限制而不形成纵弯折叠，经多次积聚，一直积聚到长径比小于 $\psi_{\text{允许}}$ 时，才能最后成形为所需锻件形状。

在凸模中积聚时： $D_{\text{凹}} = 1.5D_0$ ， $a \leq 2D_0$ ； $D_{\text{凹}} = 1.25D_0$ ， $a \leq 3D_0$ 。

在凹模中积聚时： $D_{\text{凹}} = 1.5D_0$ ， $a \leq D_0$ ； $D_{\text{凹}} = 1.25D_0$ ， $a \leq 1.5D_0$ 。

2. 积聚工步的计算

生产中经常出现坯料变形部分的长径比大于允许值的情况。这时，就不能在机器一次行程中镦锻成形，而要按第二、第三规则进行逐次的有限制条件的积聚，直到满足第一镦粗规则时为上。

积聚型槽（工步）可设在冲头、凹模中，或部分设在冲头而另一部分设在凹模中。在凹模中积聚时，易在分模面处产生不规则的纵向毛刺，影响锻件表面质量。而在冲头中积聚时则无此问题，且金属镦粗变形和充满型槽的条件较好，所以，在冲头内积聚应用最广。

根据体积不变条件，锥形体积与坯料变形部分体积相等