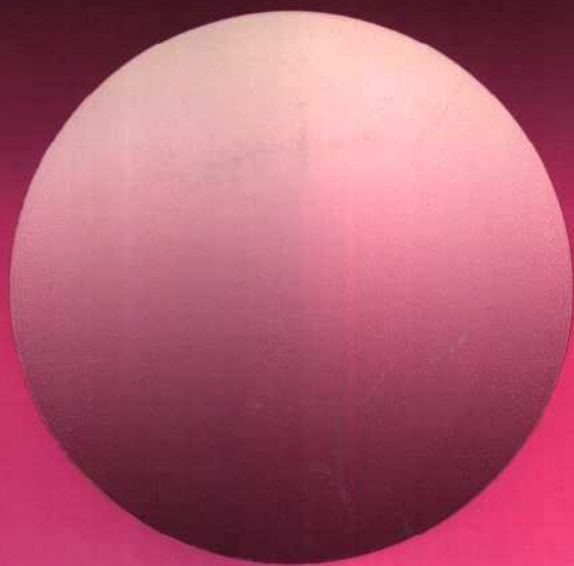


研究生用书●

MODELING THEORY OF  
METAL FORMING

华中理工大学出版社



肖景容 李尚健 主编

# 塑性成形模拟理论

# (鄂)新登字第 10 号

图书再版编目(CIP)数据

塑性成形模拟理论/肖景容,李尚健编著 一武汉:华中理工大学出版社

1994 年 12 月

ISBN 7-5609-1001-7

I. 塑…

II. ①肖… ②李…

III. 塑性成形-模拟-理论

IV. TG39

## 塑性成形模拟理论

肖景容 李尚健主编

责任编辑 叶翠华

\*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮编:430074)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

\*

开本:850×1168 1/32 印张:9.875 插页:2 字数:242 000

1994 年 12 月第 1 版 1994 年 12 月第 1 次印刷

印数:1—1 500

ISBN 7-5609-1001-7/TG·39

定价:6.00 元

60415  
34

## 内 容 提 要

本书介绍了塑性成形模拟理论的发展和应用,叙述了塑性成形模拟理论的主要内容,包括线性弹性问题的有限元法,小变形弹塑性有限元法,刚塑性变形有限元法,有限应变弹塑性有限元法,边界元法和塑性成形过程的模拟实验等。

本书可作为从事金属塑性成形工艺和模具 CAD/CAM 研究的研究生教材,也可供有关工程技术和研究人员参考。

## ABSTRACT

This book presents development and application of theory of metal forming process simulation. The main contents include the linear-elastic finite-element method, the small-strain elastic-plastic finite-element method, the rigid-plastic finite-element method, the finite-strain elastic-plastic finite-element method, the boundary element method and the simulating tests of metal forming processes.

This book can suit the needs of graduates of metal forming technology and die CAD/CAM speciality, and is also useful for engineers and researchers.

## “研究生用书”总序

研究生教材建设是提高研究生教学质量的重要环节,是具有战略性的基本建设。各门课程必须有高质量的教材,才能使学生通过学习掌握各门学科的坚实的基础理论和系统的专门知识,为从事科学研究工作或独立担负专门技术工作打下良好的基础。

我校各专业自 1978 年招收研究生以来,组织了一批学术水平较高,教学经验丰富的教师,先后编写了公共课、学位课所需的多种教材和教学用书。有的教材和教学用书已正式出版发行,更多则采用讲义的形式逐年印发。这些讲义经过任课教师多年教学实践,不断修改、补充、完善,已达到出书的要求。因此,我校决定出版“研究生用书”,以满足本校各专业研究生教学需要,并与校外单位交流,征求有关专家学者和读者的意见,以促进我校研究生教材建设工作,提高教学质量。

“研究生用书”以公共课和若干门学位课教材为主,还有教学参考书和学术专著,涉及的面较广,数量较多,准备在今后数年内分批出版。编写“研究生用书”总的要求是从研究生的教学需要出发,根据各门课程在教学过程中的地位和作用,在内容上求新、求深、求精,每本教材均应包括本门课程的基本内容,使学生能掌握必需的基础理论和专门知识;学位课教材还应接触该学科的发展前沿,反映国内外的最新研究成果,以适应目前科学技术知识更新很快的形势;学术专著则应充分反映作者的科

研硕果和学术水平,阐述自己的学术见解。在结构和阐述方法上,应条理清楚,论证严谨,文字简炼,符合人们的认识规律。总之,要力求使“研究生用书”具有科学性、系统性和先进性。

我们的主观愿望虽然希望“研究生用书”的质量尽可能高一些,但由于研究生的培养工作为时尚短,水平和经验都不够,其中缺点、错误在所难免,尚望校内外专家学者及读者不吝指教,我们将非常感谢。

华中理工大学研究生院院长

黄树槐

1989. 11.

## 前 言

金属塑性成形理论起源于法国工程师 H. Tresca 在 1868 年完成的挤压试验,他首先提出了当最大剪应力达到某一定值时金属才开始塑性变形,以后称为最大剪应力或 Tresca 屈服准则.到 1913 年,为了便于计算,R. Von Mises 提出了形变能屈服准则,又称 Mises 屈服准则,并得到了实验验证.之后,B. Saint Venant, M. Levy, H. Hencky, W. Lode, B. Prager, H. Hill 和 B. B. Соколовский 等人的研究工作,为金属塑性成形理论奠定了基础.随着金属塑性加工工艺在生产中的广泛应用,一些从事塑性成形理论的专家,如 Von Karman, E. Siebel, С. И. Губкий, Е. П. У НКСОВ, А. Д. Томленов, Смирнов-Аляев, М. В. СТОрожев, Е. А. Полов, и. А. Шофман, W. Johnson, B. Avitzur, H. Kudo 和 S. Kobayashi 等,先后提出或发展了塑性成形力学的各种计算方法,其中应用较广泛的有主应力法、滑移线法、上限法、有限元法和边界元法等.

由于数学塑性力学的基本方程中包括 15 个未知量,且为高阶偏微分方程,除少数简单情况外,要求出一般解析解是非常困难、甚至是不可能的.另一方面,由于塑性加工工件的几何形状和边界条件非常复杂,其变形程度和变形速度很大,而且严重分布不均.这样,就不仅大大增加了塑性成形过程力学分析的难度,而且也严重影响了计算结果的精度和可靠性.因此,长期以来,塑性成形理论的研究结果,不能在生产实践中获得广泛应用.

随着汽车、家用电器、仪器仪表等行业的迅速发展,塑性加工工艺在大量生产中已具有明显的优越性(如良好的使用性能,很高

的生产效率和材料利用率等)。因此,近年来一些先进的工业国家,其模具年产值已超过了机床年产值。为了保证塑性成形零件的成形质量,减少废品,保证工艺和模具设计质量,减少模具的返工或报废,缩短模具生产周期和加快机电产品的更新换代,近年来国内外一些从事塑性成形研究的学者,正在充分利用计算机技术和数值分析方法的研究成果,开展塑性成形过程模拟分析的研究,并已开始在生产中应用,为指导塑性成形工艺和模具设计,提供了科学依据,为使塑性成形理论与工艺实际紧密结合提供了新的途径。作者从 80 年代初期开始进行塑性成形过程模拟的研究,并多次获得了国家自然科学基金的资助。结合挤压、精密模锻和板料成形工艺,先后开发了刚塑性有限元、有限应变弹塑性有限元和边界元程序,对汽车轮胎螺帽冷挤压、管接头多向模锻和板料件成形工艺,进行了计算机模拟。同时还研究开发了注塑流动和冷却系统的模拟分析软件,并在生产中开始应用。与此同时,作者已给研究生开设和多次讲授过“塑性成形模拟理论”课程。本书便是在此基础上编写的。由于塑性成形模拟理论属于交叉学科,无论在数学模型、算法、程序编制和实例计算等方面,还存在很多需要进一步研究的问题。因此,作者编写本书,只能是一种抛砖引玉的尝试。敬希读者诸君,不吝指教。

本书由肖景容、李尚健主编,由李赞、陈广霞等参加编写。本书可作为从事金属塑性成形工艺和模具 CAD/CAM 研究的研究生教材,也可供有关工程技术和研究人员参考。

作者

于 1993. 12

# 目 录

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| 前言 .....                 | ( I )   |
| 第一章 概论 .....             | ( 1 )   |
| 1.1 金属塑性成形系统 .....       | ( 1 )   |
| 1.2 金属成形过程分类 .....       | ( 4 )   |
| 1.3 金属成形过程中影响因素的分析 ..... | ( 5 )   |
| 1.4 几种常见的塑性成形工艺 .....    | ( 11 )  |
| 1.5 塑性成形的模拟技术 .....      | ( 18 )  |
| 第二章 线性弹性问题的有限元法 .....    | ( 21 )  |
| 2.1 概述 .....             | ( 21 )  |
| 2.2 基于变分原理的有限元法 .....    | ( 21 )  |
| 2.3 由加权余量法建立的有限元法 .....  | ( 27 )  |
| 2.4 平面问题 .....           | ( 35 )  |
| 2.5 数值计算中的若干问题 .....     | ( 55 )  |
| 2.6 其他问题的有限元法 .....      | ( 69 )  |
| 第三章 小变形弹塑性有限元法 .....     | ( 77 )  |
| 3.1 概述 .....             | ( 77 )  |
| 3.2 小变形弹塑性理论 .....       | ( 77 )  |
| 3.3 弹塑性增量分析中有限元格式 .....  | ( 84 )  |
| 3.4 非线性方程组解法 .....       | ( 95 )  |
| 3.5 数值方法中几个问题 .....      | ( 101 ) |
| 3.6 计算实例 .....           | ( 107 ) |
| 第四章 刚塑性变形有限元法 .....      | ( 111 ) |
| 4.1 概述 .....             | ( 111 ) |
| 4.2 刚塑性变分原理 .....        | ( 113 ) |
| 4.3 刚塑性有限元法 .....        | ( 118 ) |

|            |                               |              |
|------------|-------------------------------|--------------|
| 4.4        | 初始速度场的猜测 .....                | (121)        |
| 4.5        | 罚函数法 .....                    | (123)        |
| 4.6        | 变分原理的新形式 .....                | (124)        |
| 4.7        | 约束的处理 .....                   | (130)        |
| 4.8        | 计算实例 .....                    | (131)        |
| <b>第五章</b> | <b>有限应变弹塑性有限元法 .....</b>      | <b>(143)</b> |
| 5.1        | 物体变形状态的描述 .....               | (143)        |
| 5.2        | 有限应变张量 .....                  | (149)        |
| 5.3        | 应力张量 .....                    | (164)        |
| 5.4        | 大变形弹塑性本构方程 .....              | (171)        |
| 5.5        | 有限应变弹塑性有限元方程 .....            | (186)        |
| 5.6        | 计算实例 .....                    | (207)        |
| <b>第六章</b> | <b>边界元法 .....</b>             | <b>(216)</b> |
| 6.1        | 引言 .....                      | (216)        |
| 6.2        | 弹性边界元法 .....                  | (217)        |
| 6.3        | 弹塑性边界元法 .....                 | (226)        |
| 6.4        | 弹塑性问题的增量计算 .....              | (233)        |
| 6.5        | 体积分的计算 .....                  | (238)        |
| 6.6        | 粘塑性边界元法 .....                 | (246)        |
| 6.7        | 有限变形弹粘塑性边界元法 .....            | (249)        |
| 6.8        | 传热过程的边界元法 .....               | (256)        |
| 6.9        | 应用实例 .....                    | (264)        |
| <b>第七章</b> | <b>塑性成形过程的模拟实验 .....</b>      | <b>(273)</b> |
| 7.1        | 相似理论在塑性成形模拟实验中的应用 .....       | (273)        |
| 7.2        | 塑性成形的近似模拟 .....               | (275)        |
| 7.3        | 模拟实验方法 .....                  | (276)        |
| 7.4        | 板料成形性能的模拟试验 .....             | (282)        |
| 7.5        | 成形极限图(FLD)在板料成形模拟试验中的应用 ..... | (287)        |
| <b>附录</b>  | <b>非线性方程组解法简介 .....</b>       | <b>(295)</b> |

# 第一章 概 论

## 1.1 金属塑性成形系统

金属塑性成形是用模具(或工具)对简单几何形状的毛坯(棒料或板料)进行压力加工,从而获得所需工件的技术.塑性成形过程中所发生的物理现象,很难用定量关系来描述.如金属流动,界面摩擦,塑性变形时热量的产生和传递,坯料显微组织和性能与过程条件之间的关系等,都很难预测和进行定量分析.有时为了获得形状比较复杂的工件,需要几道工序(预成形)才能完成.在每道工序设计中都应考虑:(1)建立坯料和变形体关于形状、应力-应变率、应变之间的关系,预测金属流动;(2)确定成形极限,要求在成形后零件不产生表面和内部缺陷;(3)预测成形力和应力,以选择合适的工具和设备,保证成形工序的顺利完成.

为了全面分析工艺过程和优化成形工序,最好是(1)把金属成形过程当作一个系统;(2)将这些过程按系统进行分组研究.

金属成形系统包括以下变量:坯料(几何形状和材料的成分组织)、模具或工具(几何形状和材料)、坯料与工具的接触表面条件、塑性变形(力学、设备)、工件最终性能和生产环境等.图 1.1 表示了一个简单的模锻系统.

通过对系统的分析,可以研究工艺过程变量对工件质量和过程的影响.金属成形工序成功的关键,是掌握和控制金属的流动,以便获得所需形状和性能的工件.金属流动方向、变形程度和温度对工件性能有重要影响.金属流动决定着与局部变形有关的力学性能和缺陷的产生,如裂纹、折叠等,而局部金属流动又直接受过

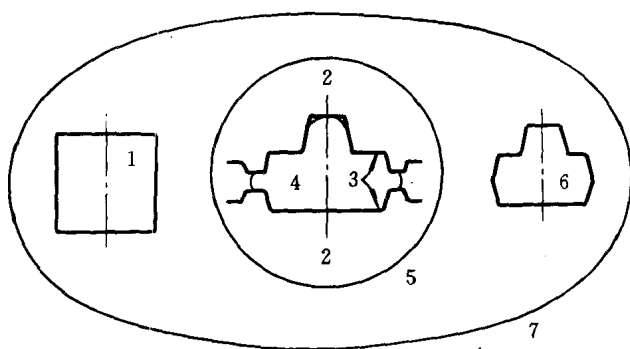


图 1.1 模锻过程

1—坯料；2,3,4,5—过程；6—工件；7—环境

程变量的影响。下面将对系统变量作进一步的讨论。

### 1.1.1 材料变量

当材料的成分、初始变形和热处理历史(微观组织)一定时,流动应力和各向异性便是在分析金属成形过程时的重要变量。

当材料的微观组织一定时,流动应力可表示为应变、应变率和温度的函数。这一函数关系可由扭转、平面应变压缩和轴对称均匀压缩等试验来确定。

材料的成形性能是指材料经塑性变形获得所需工件形状而不破坏的能力。它与(1)变形过程条件(如温度、变形速率、应力和应变历史等), (2)材料变量(如成分、空洞、杂质和原始显微组织等)有关。热变形时,变形体中的温度梯度(如与模具接触表面的局部冷却)也会影响金属流动。

### 1.1.2 工具和设备

设备的最佳选择,除满足成形工艺要求外,尚需考虑整个成形系统,包括生产批量大小、生产条件、环境效应和设备维修等。

工具变量包括(1)设计参数和几何形状;(2)表面粗糙度;(3)刚度;(4)工作时的力学和热学性能。

### 1.1.3 摩擦

工具与坯料接触表面间的摩擦机制非常复杂.要定量表示摩擦只能采用摩擦系数  $\mu$  或摩擦因子  $m$ . 现有几种测定  $\mu$  或  $m$  值的方法,如圆环镦粗法(用于体积成形)、平面应变拉延和拉形——拉延试验(用于板料成形)。

### 1.1.4 变形力学

成形时的金属流动,主要受几种因素影响:(1)工具的几何形状;(2)接触表面的摩擦条件;(3)坯料特性;(4)变形区的热力学状态.而金属流动反过来又影响着工件的质量和性能、过程所需的外力和能量.变形力学是分析金属流动、应变、应变率和应力之间的关系,这些基本关系可由过程模拟确定。

### 1.1.5 工件特性

工件的宏观和微观几何形状,均受过程变量的影响,过程条件(温度、应变、应变率)决定着在变形中微观组织的改变,它往往影响着工件的性能.因此,设计一个合理的系统,必须考虑:(1)坯料成形后的微观组织和性能之间的关系,(2)过程条件对金属流动和

工件微观组织的定量影响。

## 1.2 金属成形过程分类

金属成形过程可分为体积成形和板料成形两大类。

(1) 体积成形过程的分类如表 1.1 所示。

表 1.1 体积成形过程的分类

| 锻 造      | 轧 制    | 挤 压   | 拉 拔    |
|----------|--------|-------|--------|
| 带飞边的闭式模锻 | 板材轧制   | 无润滑热挤 | 拉拔     |
| 无飞边闭式模锻  | 型材轧制   | 有润滑热挤 | 带辊子的拉拔 |
| 压 印      | 管材轧制   | 静液挤压  | 减径拉拔   |
| 电  墩     | 辗  环   |       | 变薄拉拔   |
| 正挤压      | 无缝钢管轧制 |       |        |
| 反挤压      | 齿轮轧制   |       |        |
| 压制凹模腔    | 辊  锻   |       |        |
| 等温锻造     | 横  轧   |       |        |
| 缩口模锻     | 表面辗压   |       |        |
| 开式模锻     | 旋  压   |       |        |
| 摆  辗     | 减径轧制   |       |        |
| 粉末锻造     |        |       |        |
| 径向锻造     |        |       |        |
| 顶  墩     |        |       |        |

(2) 板料成形过程的分类为：弯曲、三辊弯 卷、拉形、型材辊 弯、拉深、旋压、橡皮拉深、电磁成形、爆炸成形和水电成形等等。

变形体与工具接触表面间的摩擦对过程有极大影响。体积模 锻时，毛坯为棒料或块坯，其表面积与体积之比在变形中不断增

大。板料成形时,毛坯和工件的厚度与表面特性变化不大。

体积成形具有下列特征:

- (1)坯料经受很大的塑性变形,其形状和断面变化很大;
- (2)坯料产生的塑性变形,远远大于其弹性变形,故变形后的回弹可以忽略不计。

板料成形具有下列特征:

- (1)坯料经塑性变形获得的工件,形状变化很大,但断面变化很小;
- (2)工件变形在卸载后产生的回弹很大,将直接影响其尺寸精度,不能忽略。

### 1.3 金属成形过程中影响因素的分析

成形过程的设计、控制和优化,既需要分析金属流动、应力和热传导的知识,又需要润滑、加热、冷却、材料传送、模具设计制造和设备方面的知识。

分析金属成形过程的目的:

- (1)建立坯料(或预成形毛坯)与工件之间的运动学关系(形状、速度、应变率、应变),预测成形工序中的金属流动,预测温度和热传导。

- (2)确定成形极限,要求在成形工序后工件不产生内部和表面缺陷(裂纹、折叠);

- (3)预测应力、完成成形工序所需的力和能,这对设计工具 and 选择设备有用。

前面已经指出,为了掌握金属成形过程的变量,最好将过程当作一个系统来考虑,如图 1.1 所示。金属成形时各变量之间的相互作用如图 1.2 所示。可以看出,当坯料和工件的几何形状给定时,变形速度影响着应变率和流动应力。而变形速度、工件几何形状和模具温度影响着工件中温度的分布。最后,流动应力、摩擦和工件

几何形状决定着金属流动、变形力和变形能。

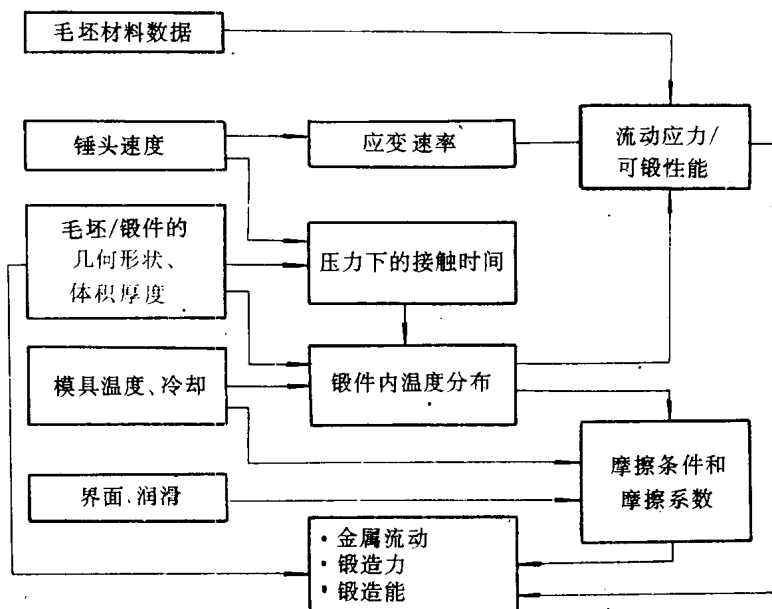


图 1.2 金属成形中各主要变量之间的联系

塑性变形状态可用位移、速度、应变和应变率来描述。现有分析金属成形的各种近似方法，都要求首先给出(1)材料在过程条件下的流动应力；(2)用摩擦因子  $m$  或摩擦系数  $\mu$  来定量描述摩擦。

### 1.3.1 金属的流动应力

单向拉伸或压缩时金属的屈服应力就是流动应力，它是应变、应变率和温度的函数。流动应力受下列因素影响：

(1)与成形过程无关的因素，如化学成分，冶金组织，金相晶粒大小，偏析和应变历史等；

(2)与成形过程有关的因素，如温度、变形程度、变形速率等。变形速率由等效应变  $\bar{\epsilon}$  和等效应率  $\dot{\bar{\epsilon}}$  来测定。因此，流动应力  $\bar{\sigma}$  是温度  $T$ 、应变  $\bar{\epsilon}$ 、应变速率  $\dot{\bar{\epsilon}}$  和显微组织  $s$  的函数，即

$$\bar{\sigma} = f(T, \bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, s)$$

在再结晶温度以上热成形时,应变对流动应力的影响不显著,但应变率(变形速度)的影响很大.反之,在室温下冷成形时,应变率对流动应力的影响可以忽略,而应变对流动应力的影响(应变硬化)则很重要.流动应力受温度的影响,则随材料而异.

图 1.3 和 1.4 表示了在某个特定条件下的试验曲线.

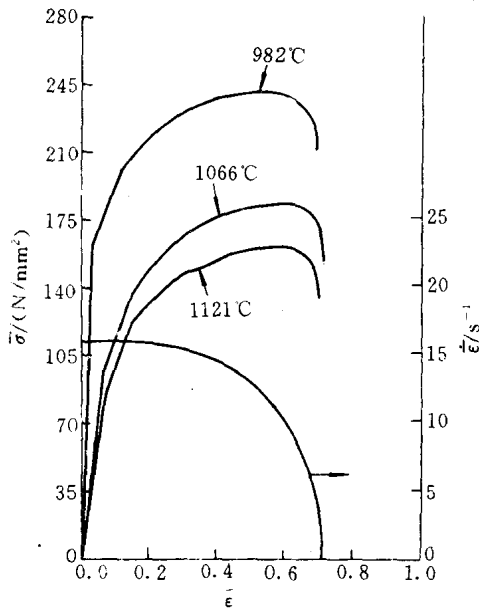


图 1.3 流动应力-应变和应变率曲线

403 不锈钢在 982°C、1066°C 和 1121°C 下,在机械压力机上试验

在给定应变、应变率和温度的条件下,流动应力一般用拉伸、均匀压缩或扭转试验来确定,其中压缩试验应用较广.试验时须使压板与圆柱试件的温度一致,以减少压板对试件的冷却作用,且不

让试件呈鼓形,以保证均匀压缩变形.还必须在试件端面加润滑剂,室温时用聚四氟乙烯和机油;热锻时,铝合金用石墨油剂,钢、钛和高温合金用玻璃粘合剂.试验时测量出变形力和试件高度(或位移),由此可计算每一变形阶段(应变或应变率)的流动应力.

室温下一般金属(除铅外)的流动应力受应变率影响不大,故可用压机或任何设备锻造.

在再结晶温度以上,所有金属的流动应力均与应变率有关,故应采用保持常应变率的机器进行压缩,如凸轮式机械压力机(塑性变形仪)或液压程控试验机(MTS).为了保持等温和均匀压缩,最好在炉内进行试验.

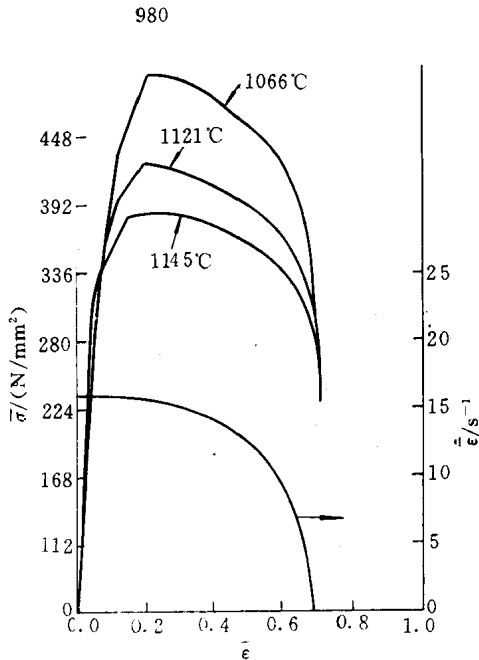


图 1.4 流动应力-应变和应变率曲线  
WASP 合金在 1066°C、1121°C 和 1145°C 下