

金属塑性变形 的实验方法

林治平 谢水生 程军 编著



冶金工业出版社

金属塑性变形的实验方法

林治平 谢水生 程 军 编著

北 京
冶金工业出版社
2002

内 容 简 介

本书在简要介绍金属塑性变形实验所需基础知识——相似理论与模拟材料的基础上,重点介绍了常用的、较为简便的金属塑性变形实验方法,包括缝隙法、硬度法、压痕法、叠层法和记忆材料法。对于应用很广的传感器法和既可定性又可定量分析应力应变的坐标网格法、视塑性法、密栅云纹法、光弹性法和光塑性法,则进行了较为详细的、深入浅出的阐述。本书后4章主要介绍各种实验方法的应用实例,不仅有助于深入理解和掌握各种实验研究方法的原理和使用方法,而且可以从中学习如何根据研究目标选用实验方法和组织实验研究。

本书可作为高等院校金属材料加工工程专业和材料成形与控制工程专业本科生、研究生的教学参考书,也可供材料科学与工程专业师生以及从事塑性加工实验研究工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属塑性变形的实验方法/林治平等编著.

—北京:冶金工业出版社,2002.6

ISBN 7-5024-3003-2

I.金… II.林… III.金属—塑性变形

—实验方法 IV.TG111.7-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 026022 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 张登科 美术编辑 熊晓梅 责任校对 符燕蓉 责任印制 牛晓波

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

2002 年 6 月第 1 版,2002 年 6 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 9.75 印张; 261 千字; 303 页; 1-3500 册

28.00 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(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

近年来,金属塑性成形理论与数值模拟有了很大进展,尤其是金属塑性成形过程的有限元模拟,已成为对塑性成形进行科学预测、工艺优化和定量控制的有效方法。但是,理论研究成果和数值模拟结果,往往由于需要进行一些简化假设、设计数学模型和应用边界条件,会与实际情况有较大出入,这时必须通过实验研究的方法予以检验、修正和补充。编写本书的目的在于,通过对实验方法及其应用的介绍,激发人们对实验工作的兴趣与重视;通过学习和掌握塑性变形实验方法,推进塑性加工技术与理论的进步。

全书共分 11 章。第一章简要介绍了相似理论,以便了解和掌握在金属塑性变形实验研究中,如何考虑相似理论的要求。第二章介绍模拟材料的选用与模拟材料的性能,对高分子材料的特性作了较为详细的阐述。第三章在简便实验方法中介绍了几种常用的实验方法,包括缝隙法、硬度法、压痕法、叠层法和记忆材料法,其中前 4 种方法和坐标网格法则是早期塑性成形理论实验研究中常用的方法。这些方法的原理简单,使用十分方便。在不少情况下,有时只需应用这些实验模拟方法就能满足理论分析的要求。第四章至第七章中介绍了近年来用于分析塑性成形问题应用较广、较为先进的实验方法——传感器法、密栅云纹法、光弹性法和光塑性法;深入浅出地给出了这些方法的基本原理和应用时应注意的问题。第七章还介绍了作者利用有机玻璃模拟金属塑性变形时所获得的有益结论。第八章至第十一章介绍了作者及其他研究者应用上述实验方法研究解决实际问题的例子。所列举的 20 多项实验方法和应用实例中,包括了锻压变形力和变形功、塑性变形流动场和变形区、接触摩擦力和接触面压力分布、塑性变形体应力应变分布和塑性变形体温度分布、各种参数和各种变形行为的预测与测定,每个实例也是一种实现实验目标的实验模拟方法和实

验研究成果。所以,编入这些实例,不仅有助于读者进一步了解和掌握各种实验方法的基本原理和应用方法,而且还可以从实例中学习如何根据研究目标选用实验方法和组织实验研究,促进塑性成形工艺与理论的创新。

本书编入了许多专家、学者的研究成果。例如,在密栅云纹方面有曹起骧教授及其同事谢冰、叶绍英、钟约先等人的成果,在光塑性方面有朱明海、范琳的研究成果,在塑性泥研究方面有董仕深、王连生等人的成果。作者对他们的实验研究工作表示敬佩和尊重,借本书出版之际,作者向这些专家、学者表示衷心的感谢。

本书是在林治平教授教学讲稿和科研基础上编写的,反映了林教授多年教学与科研的部分成果及在实验研究工作方面的经验。北京有色金属研究总院谢水生博士和上海同济大学程军博士参加了本书的编写,书中也反映了他们近年来的研究成果。在实验工作中,有南昌大学和北京有色金属研究总院加工工程研究中心的硕士生、博士生和实验技术人员参加。作者向所有参加和支持实验工作的同事们表示衷心感谢。

本书可作为高等院校金属材料加工工程专业和材料成形与控制工程专业的高年级本科生和研究生“金属塑性成形原理”和“数值模拟”等课程的辅助教材,也可供材料科学与工程专业及从事塑性加工实验研究工作的科技人员参考。

由于作者水平所限,书中不妥之处,欢迎读者批评指正。

作 者
2002年2月

目 录

绪 论	1
第一章 相似理论	4
第一节 相似理论三个基本定理	4
第二节 确定系统相似准则的步骤	8
第三节 塑性成形实验模拟准则	11
第二章 模拟材料	13
第一节 模拟材料的选用	13
第二节 模拟材料的性能	14
第三章 机械式实验方法	30
第一节 简便实验方法	30
一、缝隙法	30
二、硬度法	31
三、压痕法	31
四、叠层法	32
五、记忆材料法	32
第二节 坐标网格法	33
第三节 视塑性法	41
第四章 传感器实验方法	49
第一节 传感器法基本原理	49
第二节 变换器	49
第三节 传感器及其电测系统	66
第四节 点式销钉传感器法	82
第五节 机身模具传感器法	84

第五章 密栅云纹法	89
第一节 基本原理	89
第二节 从云纹图像测量应变的方法	95
第三节 用云纹法实验模拟时的若干问题	107
一、试样制备与云纹拍摄	107
二、获得云纹图像的三种方法	108
三、测量云纹的装置	109
四、云纹图像的分析与处理	109
第六章 光弹性法(偏振光法之一)	116
第一节 偏振光基础知识	116
第二节 光弹性法基本原理	122
第三节 用偏振光法测应力时的若干问题	131
一、光弹仪	131
二、模型试样的制备	131
三、等差线观测	132
四、等倾线观测	132
五、模型材料条纹值的测定	133
第七章 光塑性法(偏振光法之二)	136
第一节 光塑性法与光弹性法的比较	136
第二节 光塑性法基本原理	137
第三节 用有机玻璃作为模型材料的光塑性法	144
一、常温下的实验研究	144
二、冻结温度下的实验研究	148
第四节 光塑性图像的计算机处理技术	153
第八章 机械式实验法应用实例	165
第一节 坐标网格法的应用	165

	一、研究正挤压时金属的流动	165
	二、分析带轂直齿圆柱齿轮精锻的应变分布	167
第二节	视塑性法的应用	171
	一、分析铝合金正挤压时金属的流动与应力 应变分布	171
	二、优化正挤压凹模型线设计	178
第三节	塑性泥实验模拟法的应用	183
	一、用塑性泥模拟研究 WHF 工艺	183
	二、用塑性泥模拟叶片热锻时金属流动和 模具充填	185
	三、用塑性泥模拟实验测定接触面上的 压力分布	187
第四节	记忆材料实验模拟法的应用	190
	一、定性划分塑性变形区	190
	二、测定塑性变形体的应变分布	191
第九章	传感器法的应用实例	196
第一节	测定摩擦压力机上的锻压力	196
第二节	测定锤上锻造时变形力和变形功	211
第三节	测定接触面压力分布	222
	一、测定正挤压时挤压筒筒壁的压力分布	222
	二、测定墩粗时接触面正应力的分布	228
第四节	测定摩擦系数	229
第五节	测定塑性变形温度	231
	一、轴对称挤压时的温度分布	231
	二、形变过程锻件飞边的热状态	232
第十章	密栅云纹法的应用实例	235
第一节	用云纹法定性分析正挤压凹模型线的影响	235
第二节	杯形件冷挤时变形状态的分析	237

第三节	杯形件冷挤时应力状态的分析·····	248
第四节	模锻成形工艺的云纹法研究·····	259
第五节	多锤锻工艺的云纹分析·····	272
第十一章	偏振光法的应用实例 ·····	273
第一节	光弹性法的应用实例·····	273
一、	测定反挤压凹模壁上正应力和切应力的分布·····	273
二、	分析扁挤压筒内部受力情况·····	276
第二节	用光塑性法定性分析金属塑性变形过程·····	280
一、	镦粗过程的模拟分析·····	280
二、	挤压过程的模拟分析·····	280
三、	模锻最终阶段的模拟分析·····	281
第三节	用光塑性法分析塑性成形工步的应力应变分布·····	282
一、	镦粗工步·····	282
二、	开式冲孔工步·····	285
三、	复合挤压工步·····	287
四、	开式模锻工步·····	291
第四节	光弹性与光塑性的联合模拟实验·····	295
一、	联合模拟实验的构想·····	295
二、	齿形凹模光弹模型的制备·····	295
三、	直齿圆柱齿轮精锻模拟实验·····	295
四、	齿形凹模的光弹性实验与分析·····	296
五、	齿轮模型的光塑性实验·····	298
参考文献 ·····		301

绪 论

金属塑性变形实验方法用于研究和测定金属塑性变形所需的变形力和变形功、塑性变形流动规律和变形的不均匀分布、接触面摩擦和压力分布、变形体内应力应变分布和温度分布以及各种因素对塑性变形的影响,为制订合理的加工工艺规范、开发新工艺、验证理论研究成果和选用加工设备提供依据。由于金属塑性变形过程是一个极其复杂的力学和物理-化学变化过程,在大多数情况下无法进行实地测定,例如测试高温高压下的爆炸成形和进行价值数万元以上合金钢大锻件的缺陷分析,只能通过模型模拟实验才能获得规律性认识。因此,塑性变形实验方法既要考虑用于实地测定金属塑性变形过程,同时要更多地考虑用于实验模拟金属塑性变形过程。

金属塑性变形模拟实验是针对实物或模拟材料制成的模型进行的,通过研究模型在各种变形条件下的响应,来推算原型在相应条件下的响应,从而获得对于原型塑性变形过程的认识,因而也可称之为模型实验。金属塑性变形实验模拟是塑性变形模拟技术的基础,是检验理论计算结果是否正确的惟一方法。数值模拟分析软件要达到实用化,也必须应用先进的实验模拟方法来反复修改和完善。实验模拟需要考虑的主要问题有:(1)明确实验目标,即实验需要解决的问题和需要获取的信息;(2)选择何种实验方法实现实验目标,包括选用实验用材料、测试仪器和设计实验装置等;(3)怎样处理和分析实验结果,即数据和资料。其中,实验方法的选用是达到实验目标的关键。

金属塑性变形实验方法的进步,是建立在机械、电子、力学、金属学和光学等多种学科发展的基础之上的,是一种综合和借鉴各学科实验方法,将其用于模拟和测定金属塑性变形的实验方法。早在 20 世纪 30~40 年代,许多实验方法就开始应用于金属塑性

变形的研究了。例如,在 С. И. Губкин 和 Е. П. Унксов 的著作^[9,10,53]中就成功地用坐标网格法、光塑性法和销钉传感器法分析锻压变形过程的金属流动和压力分布。随后,由于钢和合金冷挤冷锻工艺的出现,要求对挤压筒和模具的压力分布进行测定,为模具的强度设计提供依据,这就大大促进了各种实验方法的应用研究。英国伯明翰大学 C. Tuncer 和 T. A. Dean 在文献[64]中介绍了 8 种实验方法及其出现的最早时间和国家,它们分别是:(1)压力传感器,1933 年德国;(2)光弹性,1950 年英国;(3)视塑性,1954 年美国;(4)模具阻尼孔,1961 年原苏联;(5)应变片模具,1961 年日本;(6)剖分模,1971 年英国;(7)带脊金属片,1977 年日本;(8)纸片,1978 年原苏联。20 世纪 80 年代以后,这些实验方法大都得到了改进和发展,光塑性法和密栅云纹法的研究进入实用阶段,不仅能用于定量分析平面变形问题,而且也能用于分析轴对称变形体内的应力应变分布。模拟材料实验技术在 T. Wanheim 等人的研究下有了长足的进步。英国 C. Tuncer、T. A. Dean 和日本米山猛等人对销钉法传感器的改进,更加扩大了传感器法的应用。目前,不论是早期的简便实验方法,还是近期发展的较为精确的实验方法,都在金属塑性变形研究中得到应用,并在应用中进一步改进和发展,对塑性加工工艺和理论的进步起着推动的作用。

关于金属塑性变形实验方法的分类,目前还没有一种严格的标准。可以按实验方法的性质分类,例如机械式(力学式)的、电学式的、光学式的等等;也可以按实验的目标分类,例如测表面压力的方法、测应力应变分布的方法等等。文献[6]全面地把研究金属加工成形过程材料流动的方法归纳为:(1)金属流动(表面:吕德斯带、伸长应变、网格式的变形、脆性涂层,内部:抛光和刻蚀、滑移带、变形区、网格、嵌入、缺陷、宏观检查、热线和相变);(2)金属位移(照相、电接触针、位移转换器);(3)力、应力(载荷传感器、压力针、行程图、薄膜法、贴应变片、X 射线、光弹性、光塑性、光应力、脆性漆、电镀、云纹法和网格法);(4)温度(热电耦、涂料);(5)模型材料(铅、蜡泥塑料、石蜡、超塑性铝、敏感材料、高敏感性材料、脆性

材料、聚氯乙烯、硅橡胶、聚苯乙烯泡沫);(6)金属性能(屈服强度、硬度、晶粒尺寸、各向异性);(7)表面摩擦条件(摩擦系数、摩擦控制、表面研磨、表面变化)。上述所列,实质上包括了模拟、测量方法、性能试验等各方面的内容。本书把模拟材料单列一章,作为实验方法的基础,同时不考虑材料的力学性能试验和金属学实验(除了硬度法),在此基础上,把现有的实验方法归纳为机械式实验法(含简便实验法、坐标网格法和视塑性法)、传感器法、密栅云纹法、偏振光法(含光弹性法和光塑性法)4个大类进行阐述。在简便实验法中汇集了缝隙法、叠层法、硬度法、压痕法和记忆材料法等5种实验方法。

金属塑性变形实验模拟以相似理论为基础,探索以模型研究原型(实物)、以低温研究高温、以易变形材料(金属的与非金属的)研究难变形金属、以简单可视过程研究复杂变形过程,因此本书在论述实验方法之前,首先介绍了相似理论。

掌握和利用现有的实验方法能测定金属塑性变形一系列参数和现象,如塑性变形力、塑性变形时接触面压力分布、塑性变形流动规律、变形体内应力应变分布、金属材料的可塑性、塑性加工工艺性、塑性变形体内温度分布以及各种变形条件对成形件力学和物理化学性能的影响等等。本书最后4章列举的20多项实验方法应用实例,包括上述除材料性能和塑性加工工艺性外的各种塑性变形参数的实验测定和分析方法,部分反映了近半个世纪来实验方法及其应用的进展,每个实例也是一种按实验目标的实验模拟方法和实验研究成果,对从事塑性变形研究具有较大的参考价值。

第一章 相似理论

金属塑性变形实验,除了尺寸较小的工件可用实物原型进行外,通常需要选择合适的模型。当实物尺寸很大时,选用比实物小若干倍的模型。当实物尺寸很小时,选用比实物大若干倍的模型。相似理论则是判别模型与实物是否相似,进而指导模拟实验,并把模型实验结果推广应用于实际的基本理论。使用模型进行实验模拟,须服从相似理论的要求,否则无法将借助模型测出的数据推算出实物原型的数据。模型与原型的相似,包括:几何相似、时间相似、运动相似、动力相似和应力场相似等。也就是说,表征现象的尺寸、位置、轨迹、快慢等量各自互成比例。相似理论的基本内容包含在三个相似定理中。

第一节 相似理论三个基本定理

一、相似第一定理

相似第一定理指出:两个相似现象中,同类物理量成常数比,该比值称相似系数,各相似系数的关系方程与各物理量关系方程相同。例如,进行运动学模拟实验时,原型(以脚标 p 表示)与模型(以脚标 M 表示)的力和加速度的关系分别为

$$F_p = m_p a_p \quad (\text{原型}) \quad (1-1)$$

$$F_M = m_M a_M \quad (\text{模型}) \quad (1-2)$$

式中, F 为作用于质点的力, m 为质点的质量, a 为加速度。

由于此两现象相似,其同类物理量必定存在以下关系,即

$$\left. \begin{aligned} F_M &= C_F F_p \\ m_M &= C_m m_p \\ a_M &= C_a a_p \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中, C_F 、 C_m 、 C_a 为常数, 称为相似系数。

将式(1-3)代入式(1-2)得

$$C_F \cdot F_P = C_m m_P \cdot C_a a_P \quad (1-4)$$

显然, 若式(1-4)不破坏原有的物理方程(1-1), 则必有

$$C_F = C_m C_a \quad (1-5)$$

也就是说, 当模型与原型相似时, 若 a_M 增大 2 倍(即 $C_a = 2$), m_M 增大 3 倍(即 $C_m = 3$), 则 F_M 需增大 6 倍(即 $C_F = C_m \cdot C_a = 6$)。因此, 两相似现象的相似系数之间存在着一定的关系, 其关系式(1-5)与物理关系式(1-1)相同。

由式(1-5)移项可导出相似第一定理的另一表达式, 即

$$\frac{C_F}{C_m C_a} = 1 \quad (1-6)$$

该式是判别现象相似的条件, 称为相似指标。因此, 相似第一定理也可表述为: 彼此相似的现象, 其相似指标等于 1。

将式(1-3)代入式(1-5)得

$$\frac{F_M}{F_P} = \frac{m_M}{m_P} \cdot \frac{a_M}{a_P}, \text{ 即 } \frac{F_M}{m_M a_M} = \frac{F_P}{m_P a_P} = K = \text{idem} \quad (1-7)$$

式中, K 称为相似判据, 为一不变量, 故相似第一定理又可表述为: 彼此相似的现象, 其相似判据为一不变量。该式可用于确定两个相似现象中的物理量之间的关系。

相似判据 K 对所有相似现象是不变常数, 而相似系数 C 只在两个相似现象中是常数, 对第三个与前面两个相似现象相似的现象, 则具有不同的数值。

利用相似第一定理判别现象是否相似的方法, 称为方程分析法。

二、相似第二定理

相似第二定理指出: 表示一现象各物理量之间的关系方程式, 都可转换成无量纲方程, 无量纲方程的各项, 即是相似判据。例如, 将式(1-1)各项除以 F , 即得无量纲方程形式, 即

$$\frac{ma}{F} = 1 \quad (1-8)$$

所得的 $(ma)/F$ 项,即为相似判据,它对各相似现象都是不变的。

若一个问题中诸物理量之间的关系方程式未知,而只知道参与该问题现象有哪些物理量,此时则要用相似第二定理的 π 定理求模型与原型物理量之间的关系式。

π 定理指出:对所要研究的某现象,首先要知道影响该现象的物理量,若有 n 个物理量,则可列出含有 n 个物理量的函数关系方程式,即

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1-9)$$

若这些物理量中有 m 个彼此独立的物理量可作为基本单位,设为 x_1, x_2, \dots, x_m ,则 $x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n$ 为导出单位。这样,便可以用 $(n-m)$ 个无量纲函数式描述该现象的函数关系,即可建立 $(n-m)$ 个无量纲数群,称为 π 项,即

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 &= \frac{x_{m+1}}{x_1^{\alpha_1} \cdot x_2^{\beta_1} \cdots x_m^{\eta_1}} \\ \pi_2 &= \frac{x_{m+2}}{x_1^{\alpha_2} \cdot x_2^{\beta_2} \cdots x_m^{\eta_2}} \\ &\vdots \\ \pi_{n-m} &= \frac{x_n}{x_1^{\alpha_{n-m}} \cdot x_2^{\beta_{n-m}} \cdots x_m^{\eta_{n-m}}} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

式中, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n-m}; \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{n-m}; \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{n-m}$ 称为量纲指数,其值由保证分子、分母的量纲相同求出。因此式(1-9)又可用 $(n-m)$ 个无量纲参数 π 来表示,即:

$$f_1(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}) = 0 \quad (1-11)$$

于是,相似第二定理(π 定理)又可表述为:描述某现象的 n 个物理量的量纲齐次方程,均可化作无量纲综合数群之和的形式,其无量纲数群 π 项的数目为 $(n-m)$ 个。由于任意 π 项都可作为相似判据,因此可建立 $(n-m)$ 个相似判据方程。

利用相似第二定理判别是否相似的方法,称为量纲分析法。

三、相似第三定理

相似第三定理指出:在物理方程相同的情况下,若两现象的单值条件相似,则这两现象必定相似。该定理是相似的充分条件。这些单值条件包括:

(1) 几何相似。即在几何相似系统中,任何相应点(如 i 点)的坐标或对应尺寸应满足

$$X_{p_i} / X_{M_i} = C_L \quad (1-12)$$

或如图 1-1 所示,应有

$$l_p / l_M = m_p / m_M = n_p / n_M = C_L \quad (1-13)$$

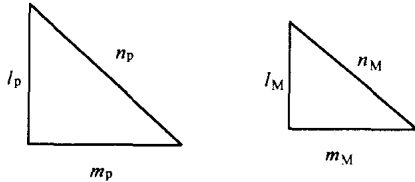


图 1-1 相似系统的对应尺寸

(2) 时间相似。即保持不变的时间比例关系,或对应的时间间隔互成一定的比例

$$t_{p_i} / t_{M_i} = C_t \quad (1-14)$$

或如图 1-2 所示,应有

$$t_{p_1} / t_{M_1} = t_{p_2} / t_{M_2} = t_{p_3} / t_{M_3} = C_t \quad (1-15)$$

(3) 物理参数相似。即保持弹性模量 E 、泊松比 μ 和密度 ρ 等的比例关系

$$E_p / E_M = C_M; \quad \mu_p / \mu_M = C_\mu; \quad \rho_p / \rho_M = C_\rho \quad (1-16)$$

(4) 运动相似。即在原型和模型两个系统中,其对应点在对应时刻的速度(或加速度)互成一定的比例

$$\dot{u}_{p_1} / \dot{u}_{m_1} = \dot{u}_{p_2} / \dot{u}_{m_2} = \dot{u}_{p_3} / \dot{u}_{m_3} = C_u \quad (1-17)$$

(5) 动力相似。即两系统中,其对应点在对应时刻所受的力

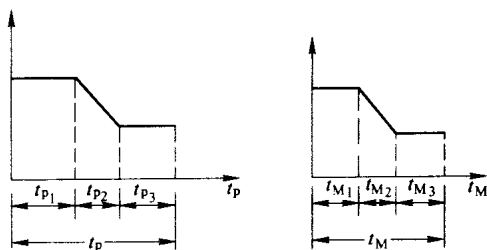


图 1-2 相似系统的对应时间间隔

互成一定比例

$$F_{p_1} / F_{M_1} = (m_{p_1} a_p) / (m_{M_1} a_M) = (m_{p_1} / m_{M_1}) C_a \quad (1-18)$$

(6) 应力场相似。即在对应时刻,对应点上的应力方向一致,而大小互成一定的比例,或者说应力场几何相似,如图 1-3 所示,应有

$$\sigma_{p_1} / \sigma_{M_1} = \sigma_{p_2} / \sigma_{M_2} = \dots = C_\sigma \quad (1-19)$$

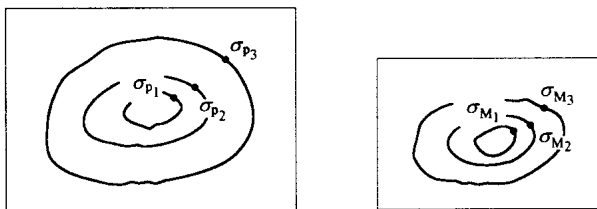


图 1-3 应力相似

此外,与应力场相似一样,还有温度场相似,速度场相似,压力场相似等等,这些都是场的几何相似。显然,相似现象是发生在空间和时间相似的系统。

第二节 确定系统相似准则的步骤

如上所述,应用相似定理解决实际问题有方程分析法和量纲分析法两种,这两种确定相似准则(即相似判据)的方法按以下步