

金属塑性变形阻力

周纪华 管克智 著

中国科学院科学基金资助课题

内 容 简 介

本书作者采用自行设计、制造的凸轮式高速形变试验机，对我国100多个钢种和合金进行了试验，系统地研究了高温、高速下的塑性变形阻力，建立了金属塑性变形阻力试验曲线，并为计算机控制锻压和轧钢生产提供了数学模型。

本书主要内容有：金属塑性变形的组织结构变化；金属塑性变形阻力的研究方法；试验数据的处理；试验得到的变形阻力曲线和数学模型；轧制、锻压塑性变形力的计算。在附录中还提供了作者未及研究的各学者所发表的部分钢种的试验曲线。

全书资料丰富，实用性强，主要供从事金属压力加工的工艺、设备设计和自动化的工程技术人员、研究人员应用，也可供高等学校有关专业教学参考。

本书的第一章由崔文庭撰写。

伦世霖参加了实验研究，孙民生参加了部分实验数据的处理工作。

金属塑性变形阻力

周纪华 管克智 著

中国科学院科学基金资助课题

责任编辑：蒋有彩 责任校对：贾立萍
责任印制：张俊民 版式设计：乔玲

机械工业出版社出版（北京阜成门内大街25号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168¹/₃₂·印张11³/₈·插页2·字数301千字

1989年9月北京第一版 ·1989年9月北京第一次印刷

印数 0,001—2,140·定价：14.00元

科技新书目：200—003

ISBN 7-111-01349-2/TH·228

目 录

第一章 金属热加工塑性变形的组织变化	1
一、钢的热加工塑性变形概述	1
二、热变形中的动恢复	2
三、动再结晶	7
四、热变形间隔时间内组织结构的变化	13
五、钢的奥氏体热加工道次间隔中的静再结晶	18
六、由热变形的奥氏体中析出第二相	20
七、奥氏体组织结构对钢变形阻力的作用	22
第二章 金属塑性变形阻力的研究方法	31
一、金属塑性变形阻力的概念	31
二、金属塑性变形阻力的研究概况	32
三、金属塑性变形阻力的研究方法	35
四、金属塑性变形阻力的测定装置	44
五、金属塑性变形阻力现有实验结果的分析	54
第三章 影响金属塑性变形阻力的因素	59
一、金属的化学成分及组织对变形阻力的影响	60
二、变形温度对变形阻力的影响	63
三、变形程度对变形阻力的影响	70
四、变形速度对变形阻力的影响	79
五、多道次加工中残余应变率（加工硬化累积） 对变形阻力的影响	88
六、金属塑性变形时强化和强化消除的概念	92
七、速度影响理论— $\sigma=f(u)$ 的关系	95
第四章 金属塑性变形阻力的实验研究	99
一、实验设备	99
二、实验方法	107
三、测量装置和测量仪器	114

四、试件的加热和温度控制	123
五、实验数据的处理	126
六、实验误差的分析	131
第五章 金属塑性变形阻力的实验曲线	136
一、普通碳素钢变形阻力的实验曲线	136
二、优质碳素结构钢变形阻力的实验曲线	145
三、低合金高强度钢变形阻力的实验曲线	151
四、合金结构钢变形阻力的实验曲线	164
五、工具钢变形阻力的实验曲线	191
六、弹簧钢变形阻力的实验曲线	198
七、滚动轴承钢变形阻力的实验曲线	201
八、不锈钢变形阻力的实验曲线	204
九、铸钢变形阻力的实验曲线	207
十、耐热合金变形阻力的实验曲线	208
十一、铅变形阻力的实验曲线	210
第六章 金属塑性变形阻力数学模型	211
一、金属塑性变形阻力数学模型的建立	211
二、钢和合金塑性变形阻力数学模型	222
第七章 热塑性加工力的计算	230
一、轧制原理基本知识	230
二、轧制压力计算一般表达式	239
三、初轧机轧制压力的计算	246
四、热轧钢板轧机轧制压力的计算	252
五、型钢、线材轧机轧制压力的计算	277
六、斜轧机轧制压力的计算	293
七、锻压过程变形力的计算	312
第八章 附录	325
一、中合金钢变形阻力实验曲线	326
二、高合金钢及合金变形阻力实验曲线	332
三、有色金属变形阻力实验曲线	344
参考文献	350

第一章 金属热加工塑性变形的组织变化

一、钢的热加工塑性变形概述

变形温度 $T > 0.6T_m$ (T_m 为金属的熔点绝对温度) 称为热加工, 而变形温度 $T \approx 0.6 \sim 0.3T_m$ 为温加工。

热变形可能造成的组织变化为:

热变形过程中发生动恢复、动再结晶、应变诱发沉淀相的动态析出。

热变形道次间可能发生静恢复、静再结晶、应变诱发沉淀相静态析出。

热加工过程中, 由于变形的作用, 金属组织在两个方面发生变化: 一是由于变形, 金属中有加工硬化; 二是由于变形及高温的作用, 金属中发生动态软化。两者同时在热加工过程中发生。由于金属层错能的不同, 动态软化的方式各不相同。层错能高的, 则仅发生动恢复, 如体心立方的铁素体型金属及合金, 以及某些面心立方的金属及其合金 (如 Al 及 Al 基合金)。层错能低的, 则发生动再结晶, 如面心立方的金属 Cu、Ni 及其合金, 还有钢的奥氏体和奥氏体型合金。表 1-1 中列出各种金属与钢在热加工过程中发生的动态软化类型。

金属或钢不仅在热加工过程中发生动态软化, 而且在热加工以后, 或在轧制道次之间, 还会发生组织变化。由于不是在变形过程中同时发生的, 这种组织变化称之为静态变化。

某些合金或某些钢在热加工过程, 还有第二相析出, 这是动态析出。在加工道次之间也还有第二相析出, 这是静态析出。

热加工过程还可能发生相变, 即应变诱发相变。

表1-1 金属及合金热加工时动态软化分类

金属与合金	点阵类型	层错能	动态软化类型	
			小变形量	大变形量
Al	面心立方	高	动恢复	动恢复
Al合金	面心立方	高	动恢复	动恢复
工业纯 α -Fe	体心立方	高	动恢复	动恢复 ⁽¹⁾
高纯 α -Fe	体心立方	中等	动恢复	动再结晶
铁素体型合金 或合金钢	体心立方	高	动恢复	动恢复
Cu及Cu基合金	面心立方	低	动恢复	动再结晶
Ni及Ni基合金	面心立方	低	动恢复	动再结晶
γ -Fe	面心立方	低	动恢复	动再结晶
钢的奥氏体	面心立方	中等	动恢复	动再结晶
奥氏体型合金钢	面心立方	中等	动恢复	动再结晶

热加工中可能发生的组织结构变化，都将直接对热加工的变形阻力[⊖]发生重要影响。

二、热变形中的动恢复

层错能高的金属与合金，即使冷变形量不大，也能发生动恢复，在热加工温度范围进行变形，动恢复明显抵消了变形产生的部分硬化。即使变形量很大，金属内部所累积的畸变能，也达不到动再结晶所需能量，因此这类合金，在热加工中仅能发生动恢复，不能发生动再结晶。

1. 动恢复的组织变化

仅发生动恢复的合金，热变形时的应力-应变曲线可分为如图1-1所示的三个阶段。第一阶段为微量变形区，应变率[⊖]由零开始，一直增大到试验所采用的应变率为止。在这阶段，应力增加很快， σ - γ 曲线的斜率为 $E/5$ （低温高应变率）到 $E/50$ （高温低应变率）。材料的位错密度由原始的 $10^{10} \sim 10^{11} \text{cm}^{-2}$ ，很快增加

⊖ 变形阻力与流变应力、真应力、变形抗力等术语含义相同。

⊖ 变形程度 γ 与应变率、真应变等术语含义相同。

到 $10^{11} \sim 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 。在第一阶段末期， $\sigma - \gamma$ 曲线的斜率就开始下降约一个数量级。

第二阶段，即宏观塑性变形区。在这一阶段中，随变形量的增大，位错密度不断增大，可达 $10^{14} \sim 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 。位错呈缠结，并形成胞状结构。由于动恢复造成软化，使这阶段加工硬化率比第一阶段低得多，约为 $E/100$ （低温高应变率）到 $E/500$ （高温低应变率）。

第三阶段为应力趋于稳态阶段，在这阶段，随应变量增加，加工硬化与动恢复基本达到平衡，随变形增加，应力逐渐趋于稳定值。这个阶段在组织上形成亚晶。亚晶内位错密度较低，位错主要集中在亚晶界，整齐排列成为位错墙。其形貌有如静恢复的多边形化。在这个阶段，随变形量增加，金属的晶粒沿受力方向伸长，沿垂直于受力方向变窄，呈细条状。但亚晶的形貌，却不随变形量增大而变化，仍为等轴状^[2]。

推测认为，这种现象是由于在变形中，已形成的亚晶界不断被瓦解，并且立即又形成新的亚晶界，这样重复的瓦解与生成，就使亚晶的形貌总能维持等轴状，并且亚晶尺寸不发生变化。

热加工过程动恢复所形成的亚晶，其尺寸稍大，亚晶界敏锐，亚晶界上位错密度较低。

2. 动恢复的机制

动恢复：从应力方面看，动恢复是随变形量增加，加工硬化率降低，或者说随变形量增加，切应力增加的速率降低；从应变方面看，动恢复是随切应力的增加，应变增加的速率增大。动恢复可用降低的切应力值表示，也可用增加的应变量来表示。动恢

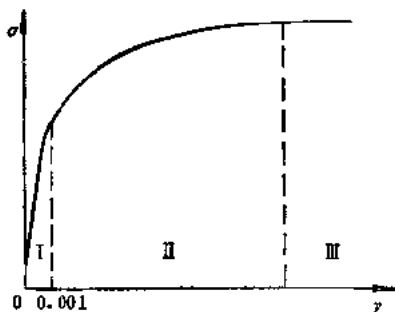


图1-1 热变形仅发生动恢复的应力-应变曲线示意图

I—微量变形 II—宏观塑性变形区
III—趋于稳态阶段

复的机制是复杂的，目前仍存在分歧^[3,4]。经研究，认为动恢复是以下两种机制所产生^[4]：

1) 动恢复由于位错密度降低，造成应力降低而产生的。当没有异号位错抵消时，变形产生 dy 切应变变量，则由于加工硬化，使切应力增加 $d\tau_s$ ，由于发生动恢复，使切应力降低 $d\tau_r$ ，两者具有加和性，最后的切应力增加 $d\tau$ ，其效果如图1-2 a所示。

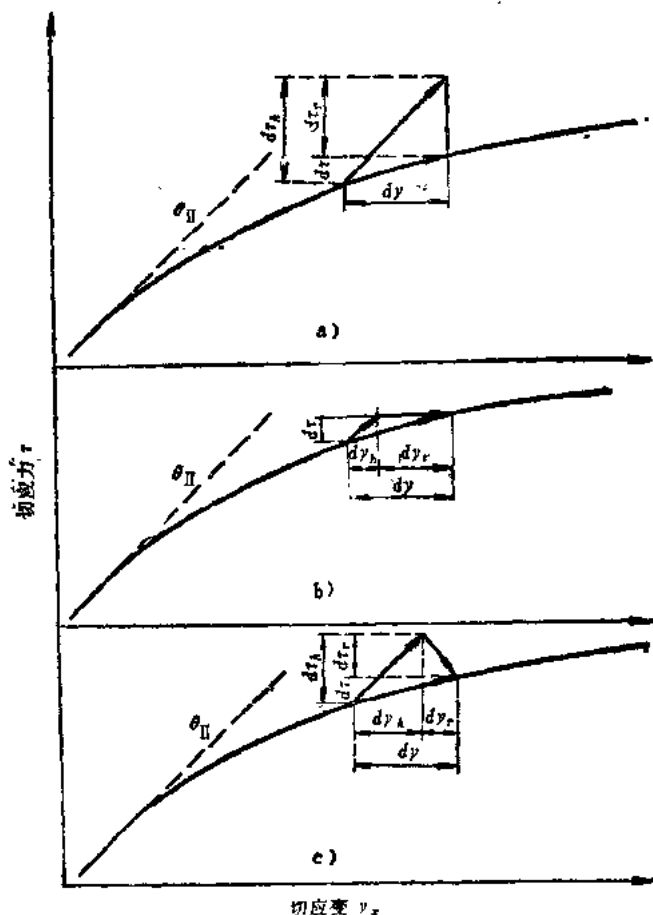


图1-2 加工硬化及动恢复对切应力及切应变变化量的影响
 a) 动恢复仅降低切应力，对切应变无作用 b) 动恢复仅增加切应变，对切应力无作用 c) 动恢复增加切应变及降低切应力

$$d\tau = d\tau_s - d\tau_r = d\tau_s - \Delta\tau_r dN, \quad (1-1)$$

式中 $\Delta\tau_r$ ——动恢复基元降低的切应力；

dN ——单位体积中动恢复基元。

已知 $\tau = aGb\rho^2$

$$\text{则 } \Delta\tau_r = \frac{a^2 G^2 b^2}{2} \frac{\Delta\rho_r}{\tau} \quad (1-2)$$

式中 $\Delta\rho_r$ ——动恢复基元减少的位错密度。

可见动恢复是由于位错密度降低而产生。位错密度的降低，则是由于高温变形。位错可以通过攀移，从一个滑移面转移到另一滑移面，然后发生异号位错对消。

2) 动恢复由于增大位错滑动距离，增大应变量而造成的。由于加工硬化增加的 $d\tau_s$ 切应力所产生的切应变量为 $d\gamma_s$ ；由动恢复降低的切应力 $d\tau_r$ 所产生的切应变量为 $d\gamma_r$ ；则总的切应力变化 $d\tau$ 产生的总切应变量 $d\gamma$ ，如图1-2 b所示，则

$$d\gamma = d\gamma_s + d\gamma_r = d\gamma_s + \Delta\gamma_r dN, \quad (1-3)$$

式中 $\Delta\gamma_r$ ——单位恢复基元所增加的切应变量。

$$\Delta\gamma_r = bL_r \Delta\rho_r, \quad (1-4)$$

即由 $\Delta\rho_r$ 位错在滑移过程中，克服位错的障碍继续滑动 L_r 距离，可产生附加切应变量 $\Delta\gamma_r$ 。由此可见，动恢复是由于位错滑动距离增大而产生。位错在交滑移时，滑动距离明显增大，而位错密度却变化不大，因此交滑移是产生动恢复的原因之一。

动恢复也可由1)、2)两种基本方式的合成造成。

由上述可见，动恢复不仅可由温度，也可由应力启动。

3. 动恢复的稳态变形阻力

稳态变形阻力 σ_s 与变形温度 T 、变形速度 u 的关系为：

$$u = A\sigma_s^n \exp(-Q/RT) \quad (1-5)$$

式中 A ——与钢种有关的常数；

Q ——扩散激活能 (J/mol分子)；

R ——气体常数 [J/(kg·K)]；

T ——绝对温度 (K)， $T = t + 273$ 。

提高变形温度 T 及减小变形速度 u ，都可使稳态变形阻力 σ_s 降低。

反之，则可使 σ_s 提高。指数 n 则与金属类型有关，层错能高的金属 n 值低。

变形阻力随 T 及 u 的关系，是与内部组织结构的变化有关。

试验发现，当达到稳态 σ_s 后，亚晶尺寸与应变量无关，但却与 T 、 u 有密切关系。 T 降低或 u 增大，亚晶平均直径 d 减小，亚晶界增厚，反之，则 d 增大亚晶界减薄，如图1-3所示。亚晶平均直径 d 与 T 、 u 有如下关系⁽⁶⁾

$$d^{-1} = a + b \log Z \quad (1-6)$$

$$Z = u \exp(Q/RT) \quad (1-7)$$

式中 a 、 b ——经验常数项；

Z —Zener-Holloman参数，表示了温度与变形速度之间的等效关系。

根据式(1-5)、(1-6)、(1-7)，得到 σ_s 与亚晶尺寸关系⁽⁶⁾如图1-4所示，并可表示为：

$$\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-P} \quad (1-8)$$

式中 σ_0 ——启动位错的有效应力，可近似认为塑性变形开始的屈服应力；

K ——常数；

$$P = 1.15。$$

因此，变形温度低或变形速度高，产生细小的亚晶及厚的亚晶界，导致变形阻力增加。

达到稳态变形阻力值的变形程度 γ ，也与 T 、 u 有相似关系。 T 与 u 对应力 σ_s 及变形程度 γ 以及亚晶尺寸 d 的作用，都可

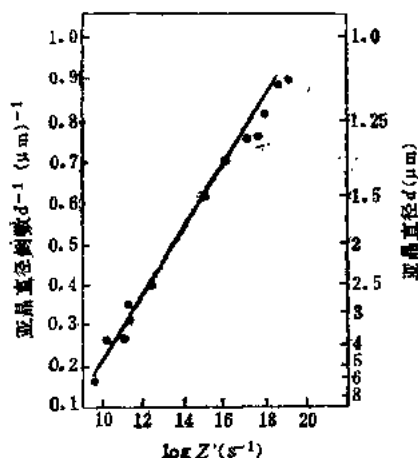


图1-3 Al热变形参数 Z 与亚晶尺寸 d 的关系

从加工硬化及动恢复软化机制中得到解释。

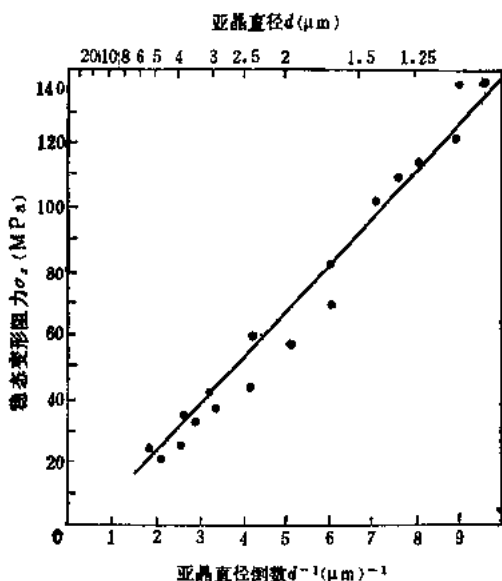


图1-4 稳态变形阻力 σ_s 与亚晶直径 d 的关系

三、动再结晶

发生动再结晶的热加工应力-应变曲线，一般如图1-5所示有三个阶段。第一阶段为动恢复阶段。如金属的层错能低时，热加工过程中，发生动恢复较迟缓，动恢复不能完全消除加工硬化，而是随变形增大，位错密度不断增高。当变形量达到一定程度后，金属位错应力场造成的畸变能累积达到一定程度，将促使金属发生另一种变化，即产生新的再结晶晶粒，为动再结晶。动再结晶的发生，使更多的位错突然消失，使金属的变形阻力突然下降，这是应力-

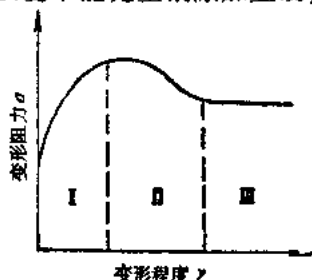


图1-5 发生动再结晶的 σ - γ 曲线一般形式

I—动恢复 II—动再结晶
III—连续动再结晶

应变曲线的第二阶段的开始。随变形量增大，再结晶继续发展，使变形阻力继续下降，直到金属全部发生动再结晶为止。变形阻力下降到最低值，然后开始第三阶段。

1. 动再结晶的组织变化

动再结晶是在变形过程中产生与发展的。变形停止，动再结晶停止。在室温下，观察高温加工的动态变化，常需要采用一些措施或选择合适的金属与合金，或变形后，在极短时间内快冷到室温。图1-6是一种奥氏体 1100°C ， $u = 0.5\text{s}^{-1}$ 条件下变形的 $\sigma-\gamma$ 变化，及不同 γ 下的组织变化^[7]。在动态再结晶开始前，原晶粒界先发生弓弯（图1-6 a）。继而，在原晶粒界产生新的未经形变的小再结晶核心，即动再晶开始（图1-6 b）。直到原晶粒界上全布满再结晶核心后，又在已再结晶与未再结晶的界面产生新的核心（图1-6 c）。随变形量增大，直到全部发生再结晶为止（图1-6 d）。动再结晶组织与静再结晶组织的最主要区别是：动再结晶晶粒内，仍有细小的亚晶。这是因为，动再结晶是在变形过程中发生的，动再结晶核心的形成与长大的同时，变形仍在继

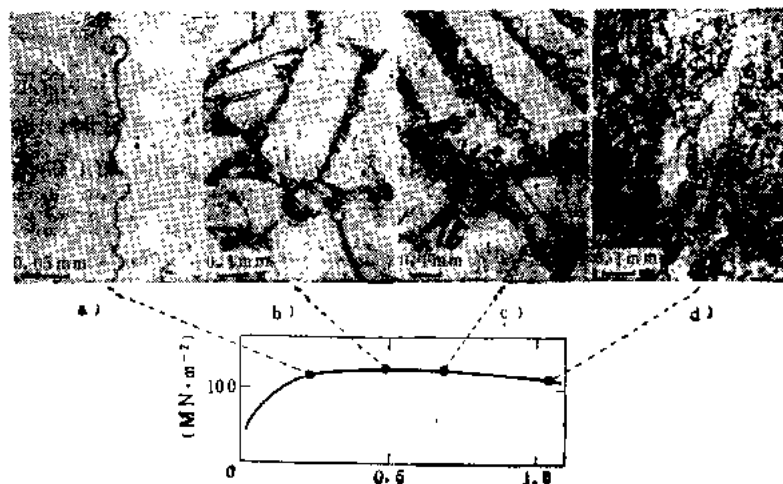


图1-6 18Ni-9Cr不锈钢热加工的应力-应变曲线以及不同变形量时发生动再结晶的组织变化

续进行，这样新产生的再结晶晶粒，继续受到变形，产生加工硬化，富集新的位错，并发生动恢复，从而产生新的亚晶。

2. 连续动再结晶与断续动再结晶

金属在变形中全部发生动再结晶后，继续变形一定程度后，

才开始发生第二轮动再结晶，为断续动再结晶。反之，前一轮动再结晶结束之前，在已发生动再结晶的部分中，继续变形，又重新发生动再结晶，则为连续动再结晶。断续动再结晶的应力-应变曲线为波浪形^[8]，即出现多个应力峰（图1-7 a）。而连续动再结晶的应力-应变曲线则为单个应力峰^[8]，然后进入稳态应力值 σ_{st} （图1-7 b）。如发生动再结晶的临界变形程度为 γ_c ，当 $\gamma > \gamma_c$ 后，动再结晶开始，继续变形，未发生再结晶的部分继续发生动再结晶，已发生再结晶的部分，继续受到变形，增加加工硬化。由动再结晶开始到全部完成第一轮动再结晶所需要的变形程度为 γ_r （图1-7）。即当金属全部完成了第一轮再结晶时，已再结晶的晶粒中，重新累积的最大变形程度为 γ_r ，如 $\gamma_r < \gamma_c$ ，尚达不到动再结晶临界变形程度，不能发生第二轮再结晶。如再继续变形

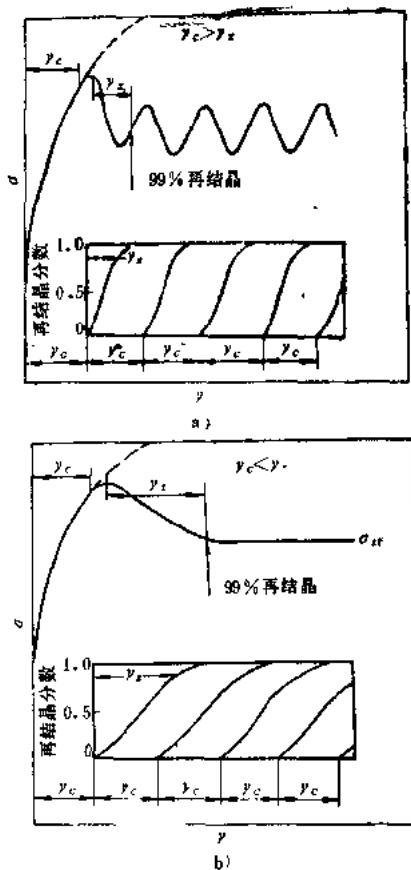


图1-7 热加工两种动再结晶的 σ - γ 曲线
a) 断续动再结晶 b) 连续动再结晶

再结晶临界变形程度，不能发生第二轮再结晶。如再继续变形

$\Delta\gamma$, 使金属中位错密度增大, 并由此所产生的畸变能继续增高, 当 $(\Delta\gamma + \gamma_c)$ 达到 γ_c 时, 将开始第二轮动再结晶。在继续变形 $\Delta\gamma$ 的过程中, 由于仅发生动恢复, 这时应力值不断增高。当第二轮再结晶开始, 变形阻力又突然下降, 因此, 应力-应变曲线出现了第二个应力峰。如此重复, 出现第三、第四轮断续动再结晶。

当 $\gamma_c > \gamma_c$ 时, 即当金属完成第一轮动再结晶以前, 已在动再结晶的晶粒中, 重新累积的最大变形量 γ_c , 已超过发生动再结晶临界变形程度 γ_c , 在某些部位, 就可开始第二轮动再结晶。变形使应力增高, 不断的动再结晶使应力下降, 综合结果, 使应力处于稳定, 不再出现应力峰。

5. 产生和完成动再结晶的临界变形程度 (γ_c 及 γ_c) 及其影响因素

1) 动再结晶临界变形程度 γ_c , 与 $\sigma-\gamma$ 曲线上第一应力峰所对应的变形程度 γ_c , 几乎相等。一般认为 $\gamma_c = \alpha\gamma_c^{(9, 8)}$, $\alpha = 0.7 \sim 0.8$, 有少数人得到 $\alpha = 0.83 \sim 0.86^{(10, 11)}$ 同一钢种, 变形温度 T 及变形速度 u 可改变 $\sigma-\gamma$ 曲线的形状, 因此也就改变了 γ_c 与 γ_c 。提高 T , 降低 u , 都使 γ_c 降低, 减少 γ_c , 使动再结晶易于发生。反之, 降低 T , 增大 u , 增大动再结晶的临界变形程度 γ_c , 甚至不能发生动再结晶, 而仅为动恢复。由于

$$Z = u \exp(Q/RT)$$

因此, 常用 Z 表示 T 与 u 的综合结果。图 1-8 为 γ_c 与 Z 值的关系⁽¹²⁾。

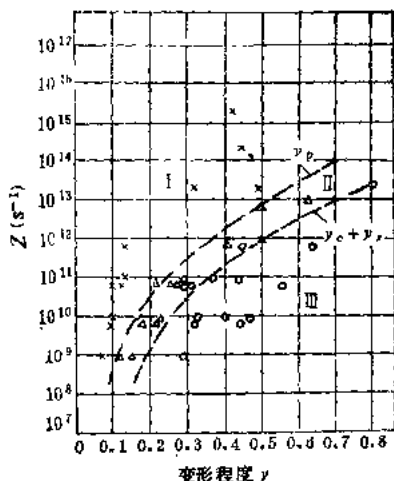


图 1-8 Ni18% 马氏体时效钢变形参数 Z 、变形程度 γ 与高温变形组织的
I—加工硬化未再结晶区 II—一部分动再结晶区 III—完全动再结晶区

变形前的奥氏体晶粒 D_0 ，可改变 $\sigma-\gamma$ 曲线形状，影响热变形中发生的组织变化。细小的原始晶粒的加工硬化能力更高，不需要更大的变形程度，就可使材料变形内贮能达到形成再结晶核心，即 D_0 细小， γ_p 及 γ_r 降低。图1-9是碳钢的几种不同奥氏体晶粒尺寸，对 $\sigma-\gamma$ 曲线及对 γ_p 的作用^[9]。

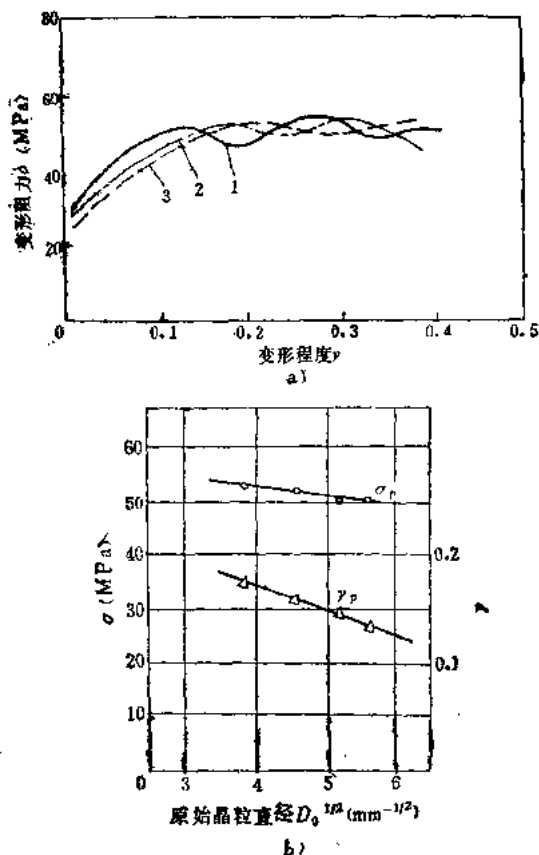


图1-9 C0.16%钢原始奥氏体晶粒 D_0 的作用 ($t=940^\circ\text{C}$,
 $\dot{\epsilon}=2 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ 时)

a) D_0 对 $\sigma-\gamma$ 曲线的影响 b) D_0 对 σ_p 、 γ_p 的作用

1— $D_0=31.5\mu\text{m}$ 2— $D_0=48.0\mu\text{m}$ 3— $D_0=68.8\mu\text{m}$

C·N·Sellars^[13]总结了很多作者对低合金钢及碳钢的研究结果，将 γ_p 与 Z 与 D_0 之间关系，用经验公式表示

$$\gamma_p = AD \frac{1}{2} Z^n \quad (1-9)$$

式中 n ——常数, $n = 0.125 \sim 0.175$ 。

$$\gamma_p = 4.9 \times 10^{-4} D_0^{\frac{1}{2}} Z^{0.16} \quad (1-10)$$

热轧时, Z 值最小为 10^{11}s^{-1} (当 $t = 1250^\circ\text{C}$, $u = 2 \text{s}^{-1}$)。

按上式计算的 γ_p 为:

t ($^\circ\text{C}$)	u (s^{-1})	Z (s^{-1})	D_0 (μm)	γ_p	γ_c (%)
1200	2	2.35×10^{11}	100	0.249	19.4
900	5	3.98×10^{14}	30	0.416	30.2

按此计算, 可认为中厚板轧制时, 不容易达到 γ_p , 而薄板、棒材轧制能够发生动再结晶。各热加工方式的 u 差异很大, 例如

轧钢 $u = 1 \sim 10^2 \text{s}^{-1}$

挤压 $u = 10^{-2} \sim 10^5 \text{s}^{-1}$

液压机锻造 $u = 10^{-2} \sim 10^2 \text{s}^{-1}$

自由锻 $u = 10 \sim 10^3 \text{s}^{-1}$

其中, 挤压发生动再结晶的可能性最大, 而自由锻加工中, 基本不能发生动再结晶。

钢中的合金元素含量高时, 都能增高 γ_p , 阻止动再结晶的发生。当 $\gamma = 0.5$, u 为 $10^{-1} \sim 10^{-3} \text{s}^{-2}$ 时, 18-8 不锈钢发生动再结晶的下限温度, 要比低合金钢高 $200 \sim 300^\circ\text{C}$ [14]。

钢中微量 Nb 的作用最为突出, 其 γ_p 可比碳钢高一倍 [15]。钢中微量 V 也使 γ_p 提高 [16]。

2) 变形条件对完成动再结晶变形量 γ_c 的作用, 与对 γ_p 的作用相似, 只不过影响的程度更大些。图 1-10 是 σ_p (应力峰值) 与 γ_p 、 γ_c 的关系 [17]。 σ_p 为参数 Z 所控制, $\log Z - \log \sigma_p$ 呈直线关系 [8]。因此, γ_p 随 Z 增大而增大。当 Z 大于某值, $\gamma_p > \gamma_c > \gamma_p$, 即 Z 大时 (T 低或 u 高), 发生连续动再结晶。当 Z 小时 (T 高或 u 低), $\gamma_p < \gamma_c < \gamma_p$, 发生间断动再结晶。

4. 动再结晶后晶粒细化效应

动再结晶完成后, 其平均晶粒尺寸 D 与变形条件 (T 、 u 、

γ) 及钢的成分有关。一般认为 $Z = AD^{-m}$, 在低温高变形速度下, 可使动再结晶晶粒细化更显著。图1-11中 $m \approx 2.4^{(18)}$ 。动再结晶后, 晶粒尺寸与变形前的原始晶 D_0 和 γ 无关, 这是动再结晶与静再结晶的重要区别。

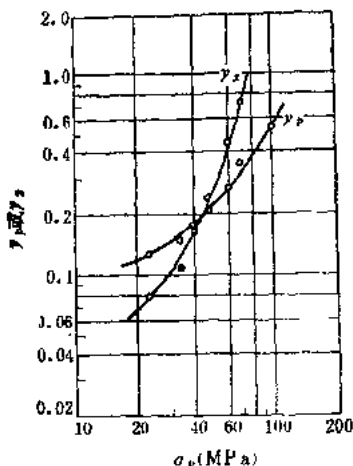


图1-10 γ_s 、 γ_p 与 σ_p 的关系 (C0.25%的铁)

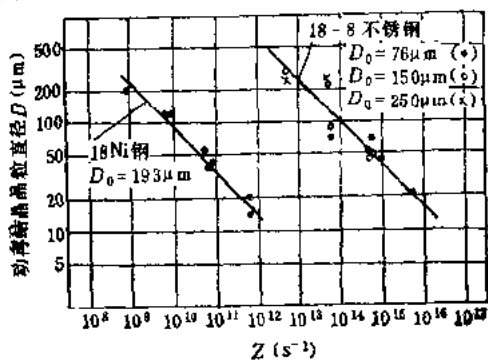


图1-11 动再结晶晶粒直径与变形参数 Z 的关系
 D_0 —变形前奥氏体晶粒直径

四、热变形间隔时间内组织结构的变化

钢加热到奥氏体区, 并在奥氏体区进行热加工, 不论采用怎