

⑩ 952-955

In718 合金锤击锻造过程中的本构方程*

胡建平 庄景云 杜金辉 邓群 冯涤 仲增慵

(北京钢铁研究总院高温材料研究所, 北京 100081)

Peter Janschek Jürgen Kramer

(德国蒂森变形技术公司)

TG 311
TG 146-15

Janschek P ✓

摘要 采用对复杂的多道次变形的应力-应变曲线进行简化的新思路,建立了能反映 In718 合金高应变速率锤击锻造过程中的应变、变形速率、变形温度、变形道次与间隙时间等参数间综合影响的本构方程。借助有限元计算方法实现了工业涡轮盘高应变速率锤击锻造过程的数值模拟。

关键词 本构方程, 高应变速率, 多道次变形, 锤击锻造

In718合金

中图分类号 TG113.25, O242

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2000)09-0952-04

CONSTITUTIVE EQUATION OF HAMMER FORGING FOR SUPERALLOY IN718 PROCESS

HU Jianping, ZHUANG Jingyun, DU Jinhui, DENG Qun, FENG Di, ZHONG Zengyong
High Temperature Materials Research Institute, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081

Peter Janschek, Jürgen Kramer
Thyssen Umformtechnik GmbH, Germany

Correspondent: HU Jianping, Tel: (010)62184622, Fax: (010)62172725, E-mail: hjp@chnmail.com
Manuscript received 2000-02-21, in revised form 2000-05-08

ABSTRACT For developing constitutive equation in superalloy In718 hammer forging process, the effect of the forging parameters, such as, strain, strain rate, deformation temperature, deformation steps, and the interval times between two steps, on the flow rule of turbo disc was analyzed in detail. Simplification of the multi-pass stress-strain curves has been adopted during the developing of constitutive equation. With the FEM program, the verification of the constitutive equation has been completed at forging shop.

KEY WORDS constitutive equation, high strain rate, multi-pass deformation, hammer forging process

研究和建立高温合金盘件的热加工工艺参数与锻件组织间对应关系的数值模型,以实现在工业生产中盘件锻造过程的全程控制,是世界上冶金工作者的一个研究热点^[1-4]。工业性生产盘件的工艺是多种多样的,如水压机锻饼和锻盘、等温锻锻饼和锻盘,均属于低变形速率的热加工工艺;锤击方式锻饼和锻盘属于高应变速率变形工艺。而采用等温锻造锻饼和对击锤锻盘工艺是低、高变形速率热加工工艺的结合。本文作者已研究了 In718 合金等温锻造过程中热加工工艺参数,如加热温度、应变、变形速率与流动应力、晶粒组织间的数值关系,建立了本构方程和组织模型。结果与实验数据及实际锻造的分析结果

相吻合^[1,2],本文在此基础上,研究对击锤锻造涡轮盘过程中的本构方程,即高变形速率条件下的本构方程。

1 实验方法

对击锤与等温锻造变形方式的最大区别是:等温锻造是一次变形到位,对击锤锻盘是多次累积变形,属多道次变形,两变形道次之间有间隙时间,在此间隙时间内会发生静态回复和再结晶。这些因素对变形过程中的流动应力和显微组织均会产生影响。

高应变速率变形压缩实验是在德国亚琛 (Aachen) 大学的高速变形试验机上进行。为使实验方法尽量接近实际生产过程,采用的实验参数如下:

变形温度: 960, 980, 1000, 1020, 1040 °C。工程应变: 0.1, 0.4, 0.7。变形速率: 10 /s(低变形速率为: 0.001 /s—1.0 /s)。

* 收到初稿日期: 2000-02-21, 收到修改稿日期: 2000-05-08

作者简介: 胡建平,男,1972年生,博士生

变形道次：对击锤生产中，虽然需经过 30 多锤才能完成锻盘过程，但 70% 的变形量是集中在前几道次中，锻造过程中，每道次的变形量是逐渐减小的，所以实验中采用 5 道次变形，变形量分配如下：

- 0.1- --- 一道次变形到位.
- 0.4- --- 二道次变形到位 $0.25+0.15=0.4$.
- 0.7- --- 五道次变形到位
 $0.25+0.15+0.15+0.10+0.05=0.7$.

为研究变形道次数量的影响，也进行了三道次的对比实验，变形分配量如下：

- 0.1- --- 一道次变形到位.
- 0.4- --- 一道次变形到位.
- 0.7- --- 三道次变形到位， $0.4+0.2+0.1=0.7$.

为模拟锤击间的时间间隙，道次之间在卸载状态下保持 5 s.

德国 Thyssen 锻造技术公司提供了直径 300 mm × 40 mm 的圆片，在圆片的中心、R/2 和边缘处由于宏观偏析引起组织存在细微的差别，为使实验中试样的原始组织基本一致所以在圆片的 R/2 处进行取样，试样在圆片上的取样位置和试样尺寸 (mm) 分别见图 1a、b。每个试样的两端面均涂玻璃润滑剂减小试样和模具之间的摩擦，试样加热到试验温度后保温 30 min，开始压缩，完成变形全过程后立即卸载和出炉水淬。

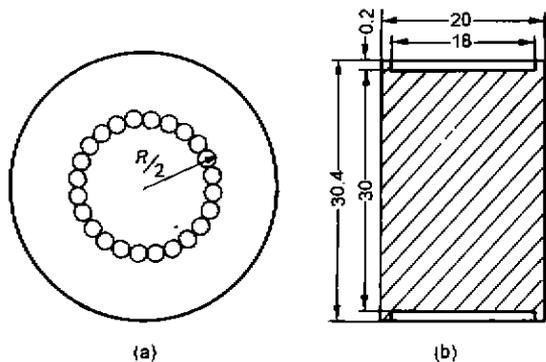


图 1 试样的取样位置和尺寸

Fig.1 Sampled location (a) and size (mm) (b) of compression specimens

通过计算机控制压缩变形过程和记录应力 - 应变曲线，经实验后的试样沿中心切开后进行晶粒度的评定。

2 实验结果和分析

2.1 应力 - 应变曲线的处理方法

图 2 显示试样在压缩变形过程中 3 道次和 5 道次变形的应力 - 应变曲线，建立低应变速率条件的本构方程时，采用每道次变形到达预定值时的应力值作为建立本构方程的原始数据，也采用与此对应的显微组织作为建立组织模型的原始数据，但模拟锤锻时高应变速率的应力 - 应

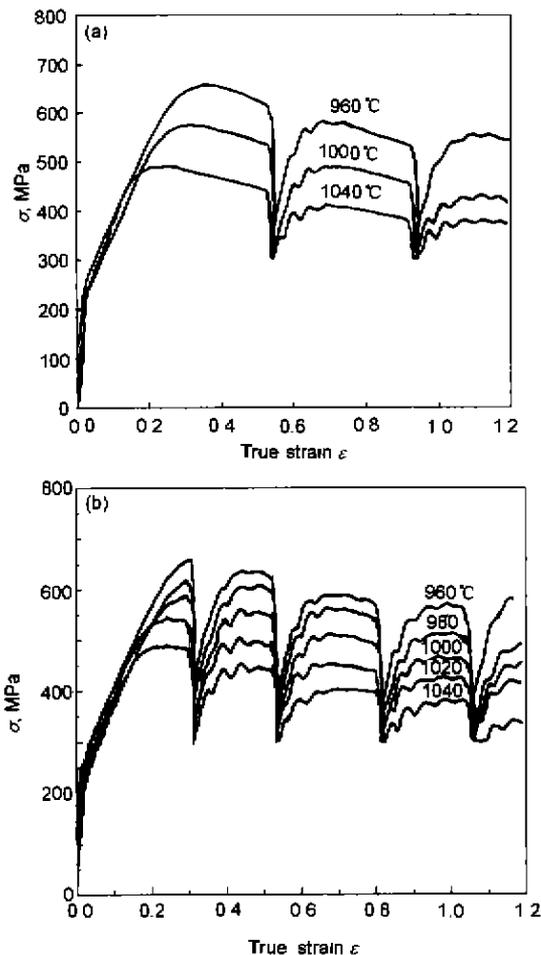


图 2 In718 合金不同道次下的真应力 - 应变关系
Fig.2 True stress-true strain curves of In718 alloy under different multi-pass deformations
(a) n=3 (b) n=5

变曲线在道次之间有间隙，即有卸载和再次加载过程，如果按每道次的起试点和终止点的变化增量值处理多道次变形过程的应力 - 应变曲线 [3,4]，则数据繁多，处理过程非常复杂，从已研究过的低应变速率条件下的本构方程的情况看，如果能从高应变速率的应力 - 应变曲线中寻找与低应变速率条件下的应力 - 应变曲线的相似之处，那么就可以对多道次锤击锻造过程中的数据进行简化处理。

图 2 中看到每道次的变形是开始硬化 (应力升高)，随后软化 (应力下降) 的过程，三道次变形中，因道次少，每道次的变形量大，此变化过程更明显，从整体看，随着变形量增加，应力逐渐下降，随着变形温度的升高，应力依次降低，这三点与低变形速率的应力 - 应变曲线的变化相同，所以可以将高应变速率条件下多道次变形的应力 - 应变曲线按图 3 的方法简化，即将每道次变形终止点的应力值连接起来，观察到的变形组织也与这些变形终止点对应，应该说该曲线是综合了变形硬化和软化及变形道

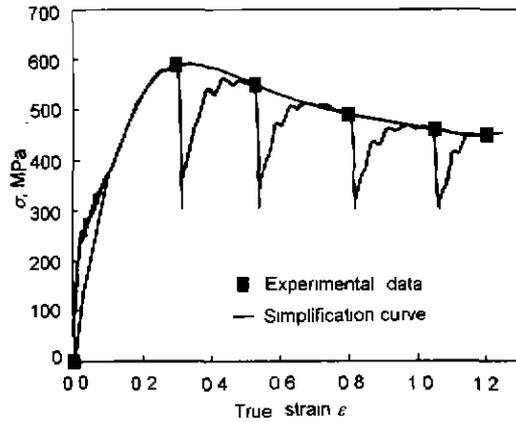


图3 多道次变形的应力-应变曲线简化图

Fig.3 Simplification figure of true stress-strain curve for multi-pass deformation (n=5)

次与道次间隙中的软化效应。这种简化处理方法的可行性需要在实践中进一步验证。

2.2 高变形速率条件下流动应力的变化规律

按图3方法处理实验所得的应力-应变曲线, 获得一系列的流动应力数据, 图4显示了三道次和五道次变形工艺条件下, 应力随应变的变化散点图。其中, 在图4中采用了工程应变而不是真应变, 那是由于工程应变更为常用。从图4可看出, 应力随应变的变化规律如下:

1) 在各变形温度下, 流动应力均是开始随变形量增加而上升, 再随变形量的增加而下降, 说明合金开始变形时形变硬化占主导, 随变形量的增加, 因变形能和变形温升的增高, 促使回复和再结晶过程的进行, 导致形变软化占主导, 所以流动应力下降。显微组织的变化规律是在各变形温度下, 小变形时(工程变形量是0.1), 晶粒组织与原始状态一样, 随变形量的增加, 再结晶晶粒的数量增多, 再结晶程度提高, 这与流动应力的硬化、软化的变化规律是相符的。

仅在960℃变形量达到0.7时, 流动应力略有升高, 这恰好反映了该合金在低温高变形速率条件下多道次变形的特点: 总变形量达到0.7时, 无论是在3道次或5道次变形, 最后道次的变形量是属于小变形(3道次时是0.1; 5道次时是0.05)。低温小变形的形变硬化效应高, 所以变形抗力增大。

2) 图4中显示当变形量相同时, 流动应力随变形温度的升高而降低。In718合金在960℃以上加热, 合金中的强化相γ'和γ''已完全溶解, 所以这种变化完全是加热温度升高的温升效应促使回复和再结晶过程的进行, 使形变软化程度增高, 变形抗力降低, 因而流动应力随之下降。

显微组织的变化也显示了在变形量相同的条件下, 随变形温度的升高, 再结晶晶粒的数量增加, 再结晶程度增

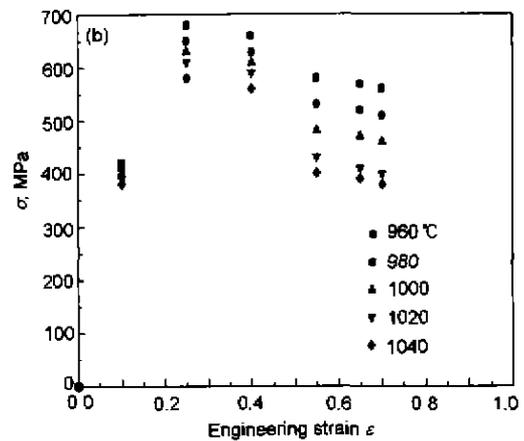
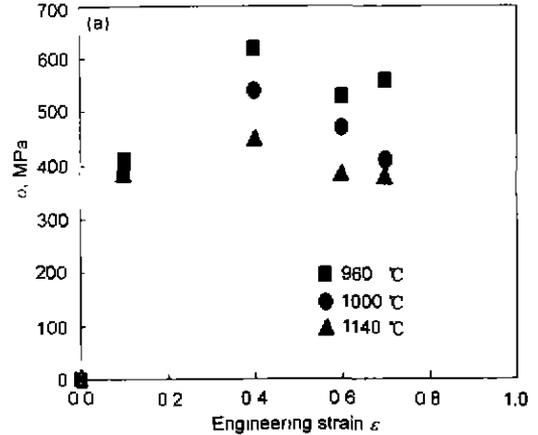


图4 应力随应变变化的散点图

Fig.4 Scatter figures of the change of stress with the engineering strain

(a) n=3 (b) n=5

高, 晶粒尺寸也相应增大, 证明形变软化程度随加热温度的升高而提高, 与流动应力随变形温度的升高而降低的规律相符。

上述结果说明采用图3的简化处理方法, 流动应力的变化规律与显微组织的变化规律相对应, 与热加工变形过程中的硬化和软化的物理意义也相符。

2.3 变形速率 10/s 条件下的本构方程

从流动应力的实验数据值显示流动应力是工程应变的函数:

$$\sigma_1 = A\epsilon^n \exp(F(\epsilon)) \tag{1}$$

流动应力是变形温度的函数:

$$\sigma_2 = B_0 + B_1 \exp(-(Z - B_2)/B_3) \tag{2}$$

式(1)、(2)中 A, B₀, B₁, B₂, B₃ 是常数, ε 是应变, Z = (t-940)/20.0, t 是变形温度(℃)。

在变形速率是恒量(10/s)条件下, 综合式(1)、(2)

得到本构方程如下:

$$\sigma = A\varepsilon^n \exp(F(\varepsilon))(B_0 + B_1 \exp(-(Z - B_2)/B_3)) \quad (3)$$

图 5 显示了按本构方程计算的模拟曲线与实验值吻合状况. 证明高变形速率条件下应力 - 应变曲线的简化处理方法是可行的. 曲线也显示 960 °C 变形, 当变形量达到 0.7 时, 实验点与本构方程计算曲线的差异, 因在实际模锻生产中, 960 °C 的变形区域均分布在紧挨模具的变形死区或边角位置. 变形量均属小变形范围不会出现达到 0.7 这样的大变形量所致.

上述结果证明所建立的本构方程是合理和可行的. 采

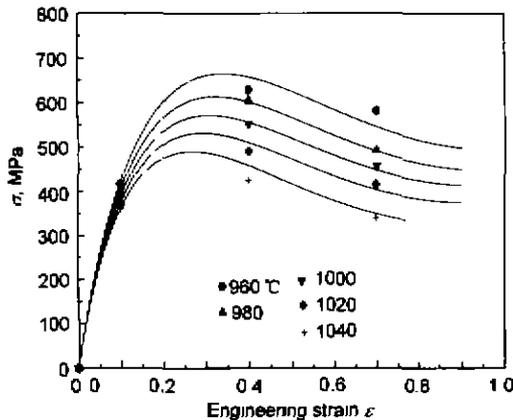


图 5 模拟应力 - 应变曲线

Fig.5 Simulated results of stress-strain curve ($n=5$)

用的高变形速率条件下的应力 - 应变曲线的简化方法也是可行的, 为确定其可靠性, 应另选两个变形速率进行实验和再次验证.

3 结论

(1) In718 合金在变形速率为 10 /s 条件下热变形过程的本构方程是:

$$\sigma = A\varepsilon^n \exp(F(\varepsilon))(B_0 + B_1 \exp(-(Z - B_2)/B_3))$$

(2) 本文研究的 In718 合金高变形速率锤击变形过程中采用的应力 - 应变曲线的简化方法是可行的. 处理后的计算结果与实验值吻合良好.

参考文献

- [1] Zhang J M, Ma L Z, Zhuang J Y, Deng Q, Du J H, Zhong Z Y, Zhang Z W. In: Loria E A ed. *Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives*, U.S.A.: The Minerals, Metals and Materials Society, 1997: 183
- [2] Zhang J M, Gao Z Y, Zhuang J Y, Zhong Z Y. *Metall Mater Trans*, 1999; 30A: 2701
- [3] Zhao D, Guillard S, Male A T. In: Loria E A ed. *Superalloys 718, 706, 625 and various derivatives*, U.S.A.: The Mineral, Metals & Materials Society, 1997: 193
- [4] Na Y S, Kim I S, Kim D H, Choe S J, Park N K, Yum J T. In: Loria E A ed. *Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives*, U.S.A.: The Minerals, Metals & Materials Society, 1997: 173