

Hot Deformation Behavior and Hot Processing Map of 4Cr5MoSiV1 Steel*

Fuwei Kang^{1#}, Huanmin Wang², Xuemin Zhang¹, Xin Bai¹, Qiang Zhang¹, Erjun Guo¹

¹School of Materials Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin

²AVIC Harbin DongAn Engine (Group) Corporation Ltd., Harbin

Email: [#]fuwei_kang@163.com

Received: Nov. 25th, 2012; revised: Dec. 19th, 2012; accepted: Dec. 28th, 2012

Abstract: The hot deformation characteristics of 4Cr5MoSiV1 steel have been investigated by hot compression tests in the temperature range of 950°C to 1100°C at strain rates of 0.01 s⁻¹ to 10.0 s⁻¹ and maximum engineering strain of 50% by means of Gleeble-1500D thermal mechanical simulator. The results show that the true stress-strain curves exhibited oscillation behavior at strain rates of 10.0 s⁻¹. The activation energy of 4Cr5MoSiV1 steel was calculated as 416.16 kJ·mol⁻¹ and the constitutive equation was developed, namely $\dot{\epsilon} = 6.8 \times 10^{15} [\sinh(0.00605\sigma)]^{6.4} \exp\left(-\frac{50055.3}{T}\right)$ on the basis of the testing data. The constitutive equation and testing results were nearly consistent by verification. The hot processing map developed base on dynamic materials model was divided into two domains. The stability domain appeared at lower strain rates (0.01 s⁻¹ and 0.1 s⁻¹), and at testing temperature 1050°C, with a peak efficiency of power dissipation of 0.3. The instability domain appeared at higher strain rates (1 s⁻¹ and 10 s⁻¹). The optimum hot working condition was determined in the stability domain by combining with microstructure analysis.

Keywords: 4Cr5MoSiV1 Steel; Activation Energy; Constitutive Equation; Hot Processing Map

4Cr5MoSiV1 钢的热变形行为及热加工图*

康福伟^{1#}, 王焕敏², 张雪敏¹, 白鑫¹, 张强¹, 郭二军¹

¹哈尔滨理工大学材料科学与工程学院, 哈尔滨

²中航工业哈尔滨东安发动机(集团)有限公司, 哈尔滨

Email: [#]fuwei_kang@163.com

收稿日期: 2012年11月25日; 修回日期: 2012年12月19日; 录用日期: 2012年12月28日

摘要: 利用 Gleeble-1500D 热模拟试验机对 4Cr5MoSiV1 钢在 950°C~1100°C, 应变速率为 0.01 s⁻¹~10.0 s⁻¹, 最大应变量为 50% 的条件下进行了热压缩实验。结果表明: 真应变-应力曲线在应变速率为 10 s⁻¹ 时出现波动现象; 经计算得到 4Cr5MoSiV1 钢的激活能为 416.16 kJ·mol⁻¹, 建立该合金的本构方程形式为

$\dot{\epsilon} = 6.8 \times 10^{15} [\sinh(0.00605\sigma)]^{6.4} \exp\left(-\frac{50055.3}{T}\right)$, 经验证与实验结果吻合较好; 基于动态材料模型建立的热加工图可分为两个区域, 在低应变速率 0.01 s⁻¹ 和 0.1 s⁻¹ 时为加工稳定区, 且变形温度为 1050°C 时, 能量耗散功率达到最大值 0.3; 在高应变速率 1 s⁻¹ 和 10 s⁻¹ 时为加工失稳区。结合变形组织的分析, 合金在稳定区下具有较好的热加工性能。

关键词: 4Cr5MoSiV1 钢; 激活能; 本构方程; 热加工图

*资助信息: 黑龙江省自然科学基金资助(E201107)。

#通信作者。

1. 引言

4Cr5MoSiV1 钢(相当于美国 AISI H13 钢)是国际上广泛应用的一种空冷硬化热作模具钢。该钢在 600℃~650℃下具有良好的抗拉强度、冲击韧性、热稳定性以及抗疲劳性能,因此广泛用于制作中型锤锻模、中小机锻模、热挤压模以及铝、镁合金压铸模等^[1-3]。其失效形式主要表现为塑性变形、疲劳断裂、磨损等,通过对其热加工及后续热处理工艺的优化,可以显著改善合金组织,提高合金性能,延长模具使用寿命。目前关于 4Cr5MoSiV1 钢的热处理工艺优化问题国内外学者已做了大量的研究^[4-6],但是在热加工方面研究的还比较少^[7]。本文主要通过热模拟实验研究 4Cr5MoSiV1 钢的变形特性,建立本构方程及热加工图,优化该合金的热加工工艺。

2. 实验材料及方法

实验所用材料为 4Cr5MoSiV1 钢,其化学成分如

表 1 所示。将其加工成尺寸为 $\Phi 8 \times 12$ mm 的圆柱体压缩试样若干,在 Gleeble-1500D 热模拟机上进行高温压缩实验。实验温度为 950℃、1000℃、1050℃、1100℃,应变速率为 0.01 s^{-1} 、 0.1 s^{-1} 、 1.0 s^{-1} 、 10.0 s^{-1} ,最大变形量为 50%。为减小试样与压头之间的摩擦,压缩前在试样两端粘贴石墨片做为润滑剂。压缩结束后试样立即水冷保留高温组织以便观察。

3. 实验结果及分析

3.1. 真应力 - 真应变曲线

图 1 为 4Cr5MoSiV1 钢在不同变形温度和应变速率下的真应力 - 真应变曲线。从图 1 可见,4Cr5MoSi-

Table 1. Chemical composition of 4Cr5MoSiV1 steel (mass fraction %)

表 1. 4Cr5MoSiV1 钢的化学成分(质量分数%)

C	Cr	Si	Mo	Mn	V	P	S	Fe
0.38	5.12	1.02	1.32	0.35	0.85	0.02	0.01	余

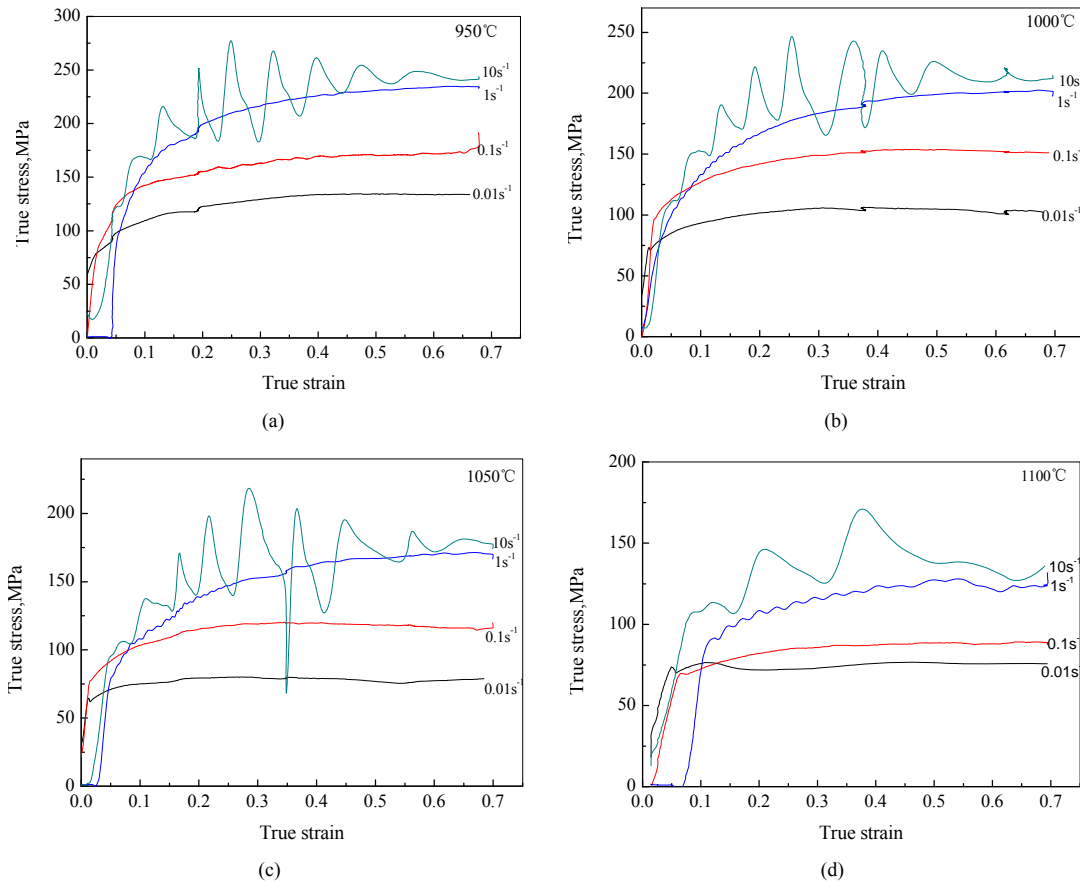


Figure 1. The true stress-strain curves of 4Cr5MoSiV1 steel: (a) 950°C; (b) 1000°C; (c) 1050°C; (d) 1100°C

图 1. 4Cr5MoSiV1 钢的真应力 - 应变曲线: (a) 950°C; (b) 1000°C; (c) 1050°C; (d) 1100°C

V1 钢既是温度敏感材料也是应变速率敏感材料, 在温度 950°C~1100°C, 应变速率 0.01 s⁻¹~10.0 s⁻¹ 范围内, 流变应力随着变形温度的降低和应变速率的增加而增大。在变形初期, 流变应力随着应变的增加而迅速升高, 之后随着应变的增加, 曲线呈现近水平状态, 即稳态流变特征, 而且在小应变速率下的流变曲线均为平滑直线, 说明变形过程中的主要变形机制是典型的动态回复。但在应变速率为 10.0 s⁻¹ 时, 曲线呈现锯齿形波动。分析认为, 4Cr5MoSiV1 钢热导率低, 在高应变速率下, 变形时间变短, 合金产生的位错数量急剧增加, 从而导致流变应力增大; 同时高应变速率条件下, 合金因摩擦而产生的热量增加, 软化作用增强, 两者共同作用, 导致曲线出现锯齿形波动现象。

3.2. 4Cr5MoSiV1 钢本构关系的建立

金属和合金的热变形过程是一个热激活过程, 通常, 稳态流变应力与应变速率、变形温度之间的关系可用蠕变方程式(1)表示^[8-11]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = f(\sigma) \quad (1)$$

式中: Z 为 Zener 和 Hollomon 提出的“温度补偿应变速率参数”; $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, s⁻¹; R 为气体常数, J/(mol·K); T 为绝对温度, K; Q 为热激活能, KJ/mol。应力方程 $f(\sigma)$ 可表示如下三种形式:

$$f_1(\sigma) = A\sigma^p \quad (\alpha \cdot \sigma < 0.8) \quad (2)$$

$$f_2(\sigma) = B \exp(\beta\sigma) \quad (\alpha \cdot \sigma > 1.2) \quad (3)$$

$$f_3(\sigma) = C [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (\text{全部应力}) \quad (4)$$

式中: A, B, C, α, β 为常数, p 为应力指数, 且 $\alpha = \beta/p$ 。式(2)、(3)、(4)分别称为指数方程、幂函数方程和双曲正弦方程。一般情况下, 指数方程适用于流 $\alpha = \beta/p$ 变应力较高的热变形过程($\alpha \cdot \sigma < 0.8$), 幂函数方程适用于流变应力较低的热变形过程($\alpha \cdot \sigma > 1.2$), 而双曲正弦方程在两种情况下都有较好的适用性。

从式(1)和式(4)可见, 只要确定不同应变下的参数 Q, C 和 α 的值, 就可以确定材料在不同变形条件下的应力。

将(2)、(3)式分别代入(1)式整理得到:

$$\dot{\epsilon} = B' \sigma^p \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon} = B'' \exp(\beta\sigma) \quad (6)$$

式中: B' 和 B'' 是与变形温度无关的材料常数。对式(5)和(6)两边分别取自然对数得:

$$\ln \dot{\epsilon} = p \ln \sigma + \ln B' \quad (7)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \beta\sigma - \ln B'' \quad (8)$$

将峰值应力带入式(7)、(8), 分别做 $\ln \dot{\epsilon} \sim \ln \sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon} \sim \sigma$ 关系图, 并进行线性拟合, 如图 2 所示。取 (a)、(b) 中各直线斜率的平均值即可求得式(7)、(8)中 p 和 β , 分别为 8.85 和 0.0535。则可得到 $\alpha = \beta/p = 6.05 \times 10^{-3}$ 。

为计算变形激活能从式(1)和(4)可得:

$$Q = R \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]} \bigg|_T \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \bigg|_{\dot{\epsilon}} = R \cdot n \cdot s \quad (9)$$

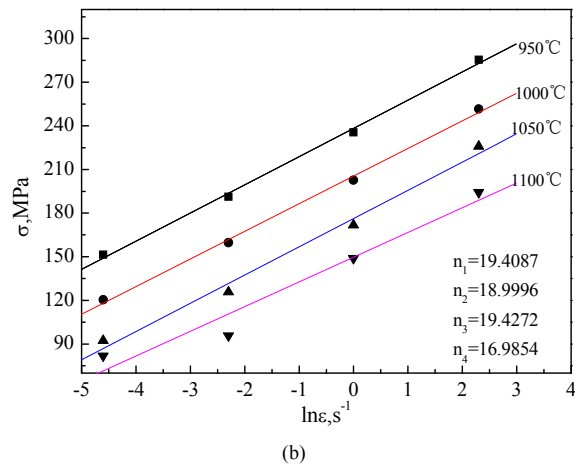
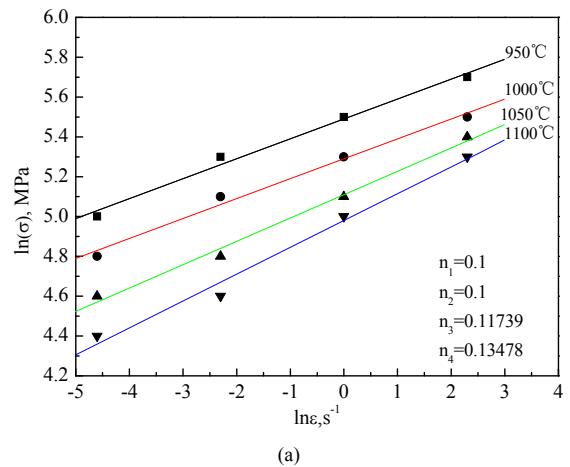


Figure 2. Relationships between strain and flow stress: (a)

$\ln(\sigma) \sim \ln(\dot{\epsilon})$; (b) $\sigma \sim \ln(\dot{\epsilon})$

图 2. 4Cr5MoSiV1 钢应变速率与流变应力的关系: (a)

$\ln(\sigma) \sim \ln(\dot{\epsilon})$; (b) $\sigma \sim \ln(\dot{\epsilon})$

式中, $n = \left. \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]} \right|_T$, $s = \left. \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right|_{\dot{\epsilon}}$.

将 α 值代入式(9), 做 $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma_p)]$ 、 $\ln [\sinh(\alpha\sigma_p)] - 1/T$ 之间的关系曲线如图 3 和图 4 所示, 通过线性拟合确定出 n 和 s 值分别为 6.370 和 7858, 所以激活能

$Q = R \cdot n \cdot s = 8.314 \times 6.370 \times 7858 = 416.16 \text{ KJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.

由(1)和(4)式变形得:

$\ln Z = \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT} = n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] + \ln C$ (10)

做 $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线如图 5 所示, 并得到拟合直线 $\ln Z = 36.46 + 6.4 [\sinh(\alpha\sigma_p)]$ 。与式(10)通过系数对比可得, $C = 6.8 \times 10^{15}$, $n = 6.4$ 。所以 4Cr5MoSiV1 钢的本构方程为:

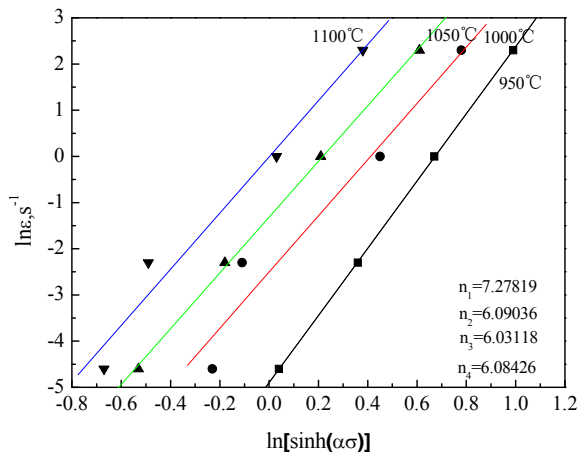


Figure 3. The n value at peak stress of 4Cr5MoSiV1 steel
图 3. 4Cr5MoSiV1 钢在峰值应力处的 n 值

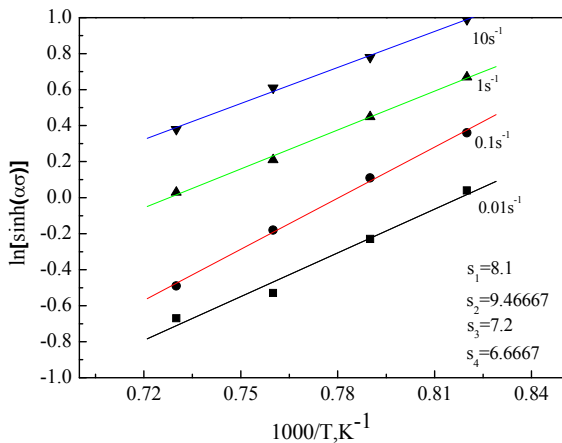


Figure 4. The s values at peak stress of 4Cr5MoSiV1 steel
图 4. 4Cr5MoSiV1 钢在峰值应力处的 s 值

$\dot{\epsilon} = 6.8 \times 10^{15} [\sinh(0.00605\sigma)]^{6.4} \exp\left(-\frac{50055.3}{T}\right)$ (11)

图 6 是 4Cr5MoSiV1 钢在不同应变速率和不同变形温度下峰值应力计算值和实验值的比较情况。从图中可以看出, 计算结果与实验数据吻合较好, 除少数点外, 实验值误差基本在 10%以内。

3.3. 4Cr5MoSiV1 钢的热加工图

材料热加工图包括热激活能图、功率耗散图和失稳图, 通常基于动态材料模型(DMM)建立的能量耗散率图和失稳图叠加而成为热加工图^[11,12]。DMM 认为: 变形体(热加工工件)作为一个功率耗散体, 在塑性变形过程中, 将外界输入变形体的功率消耗在以下两个

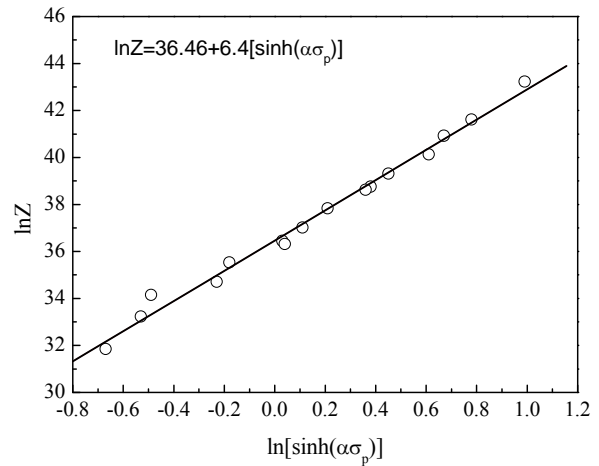


Figure 5. Relationship between $\ln Z$ and $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$
图 5. $\ln Z$ 与 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 之间关系

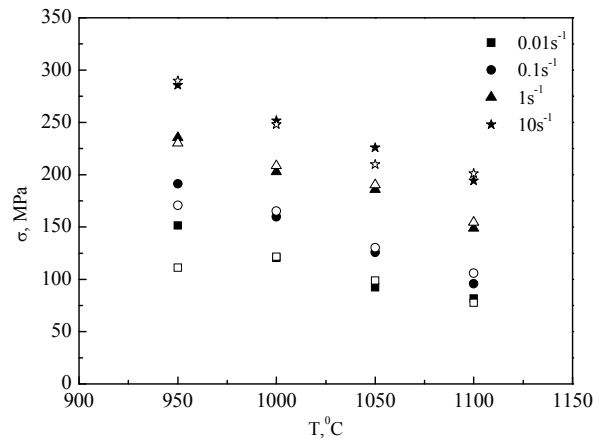


Figure 6. Error between experimental peak stress and calculated of 4Cr5MoSiV1 steel
图 6. 4Cr5MoSiV1 钢峰值应力实验值与计算值误差图

方面, 1) 塑性变形引起的粘塑性热, 用 G ($G = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma \cdot d\dot{\epsilon}$) 表示; 2) 变形过程中组织变化而消耗的功率, 用 J ($J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} \cdot d\sigma$) 表示。工件在热加工过程中单位体积内吸收的功率 P 可分为两部分, 综合表示为式(12):

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma \cdot d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} \cdot d\sigma \quad (12)$$

在恒定温度和应变条件下, 工件材料在经受热变形时的动态反映可以用下面的方程来表示:

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \quad (13)$$

式中, K, m 均为常数。而应变速率敏感指数 m 决定了在热变形过程中材料塑性变形而消耗的能量 G 和材料组织动态变化所消耗的能量 J, J 与 G 的变化率就构成了应变速率敏感指数的定义式, 即:

$$\left[\frac{\partial J}{\partial G} \right]_{\dot{\epsilon}, T} = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \Big|_{\dot{\epsilon}, T} \quad (14)$$

当材料处于理想的线性耗散状态时($m = 1$), J 达到了最大值 J_{\max}

$$J = J_{\max} = P/2 \quad (15)$$

此时, 材料处于非线性耗散过程, 能量消耗效率表示为^[12]:

$$J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} \cdot d\sigma = \frac{m\sigma\dot{\epsilon}}{1+m} \quad (16)$$

即,

$$\eta = \frac{2m}{1+m} \quad (17)$$

功率耗散率 η 随温度和应变速率的变化就构成了功率耗散图, 它可以定量描述合金的热加工过程中组织变化特征。

材料内部的可加工性能并不是能量消耗功率越大而越好, 还取决于加工失稳区能量消耗的功率, 因为在此区域能量消耗的功率也可能会高, 所以有必要先判断出合金的加工失稳区。在动态材料模型中, 加工失稳区判据是由 Prasad 等人提出来的, 该判据可以表示为如下形式^[12]:

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln \left(\frac{m}{1+m} \right)}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (18)$$

按照式(14)、(17)、(18)计算出 4Cr5MoSiV1 钢在不同

应变, 变形温度和应变速率下的 m, η, ξ 值。从而绘制 4Cr5MoSiV1 钢在工程应变为 50% 时的能量热加工图如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 热加工图明显分为两个区域: 加工稳定区和失稳区。实验材料在 1000°C~1050°C、应变速率为 0.01 s⁻¹~0.1 s⁻¹ 能量耗散率 η 值大于 0.25, 在应变速率为 0.01 s⁻¹, 变形温度为 1050°C, 能量消耗效率 η 达到峰值, 约为 0.3。加工失稳区发生在高应变速率条件 1 s⁻¹~10 s⁻¹。这与 4Cr5MoSiV1 钢的应力 - 应变曲线相符合。

图 8 为 4Cr5MoSiV1 钢在 $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$, $T = 1050^\circ\text{C}$ 条件下变形试样显微组织照片。图中组织呈现明显的动态再结晶特征, 没有出现楔形裂纹和内部空穴等缺陷, 此变形条件下, 为变形安全区。能量耗散率 η 值最大, 变形组织易于控制。因此变形温度为 1050°C, 应变速率为 0.1 s⁻¹ 是最佳的变形条件。该结果为 4Cr5MoSiV1 钢热加工工艺的制定提供了依据。

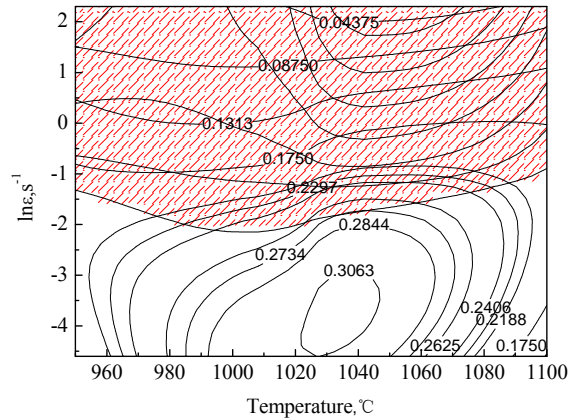


Figure 7. The hot processing map of 4Cr5MoSiV1 steel
图 7. 4Cr5MoSiV1 钢的热加工图

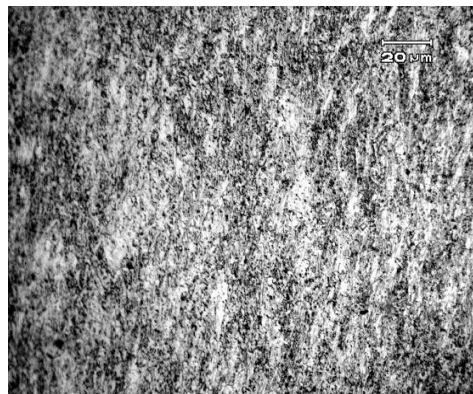


Figure 8. The microstructure at deformation condition 0.1 s⁻¹, 1050°C

图 8. $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$, $T = 1050^\circ\text{C}$ 变形条件下的显微组织

4. 结论

1) 4Cr5MoSiV1 钢既是温度敏感材料, 也是应变速率敏感材料, 在应变速率为 10 s^{-1} 时, 曲线出现了波动。

2) 4Cr5MoSiV1 钢热变形激活能为 $416.16 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, 热变形方程为:

$$\dot{\epsilon} = 6.8 \times 10^{15} \left[\sinh(0.00605\sigma) \right]^{6.4} \exp\left(-\frac{50055.3}{T}\right)$$

该方程与实验结果吻合较好。

3) 建立了 4Cr5MoSiV1 钢的热加工图, 变形温度为 1050°C , 应变速率为 0.1 s^{-1} 为较佳的热加工工艺参数。

参考文献 (References)

- [1] 潘健生, 胡明娟. 热处理工艺学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 247-253.
- [2] 周敬恩. 模具材料选用、热处理与使用寿命[J]. 金属热处理, 1999, 5: 1-13.
- [3] 干勇, 田志勇, 董瀚. 中国材料工程大典[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 97-99.
- [4] 刘以宽, 李润宝, 毛文华. H13 钢铝合金压铸模的研制和使用[J]. 金属热处理, 1990, 35(2): 51-55.
- [5] 陈杰. H13 钢及其热处理[J]. 热处理技术与装备, 2008, 29(4): 44-46.
- [6] 晏广华, 黄新民, 褚作朋等. 不同热处理工艺下 H13 钢组织性能的变化[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, 34(6): 834-837.
- [7] C. Tekmen, M. Toparli, I. Ozdemir, et al. High temperature behaviour of H13 steel. *Materials Research and Advanced Techniques*, 2005, 96(12): 1431-1433.
- [8] R. Milovic, D. Manojlovic and M. Andjelic. Hot workability of M2 type high-speed steel. *Steel Research*, 1992, 62: 78-84.
- [9] W. Roberts. Dynamic changes that occur during hot working and their significance regarding microstructural development and hot workability. G. Krauss. *Deformation, processing and structure. Metals Park: American Society for Metals*, 1984: 109-184.
- [10] H. J. McQueen, N. D. Ryan. Constitutive analysis in hot working. *Materials Science and Engineering*, 2002, 322(1-2): 47.
- [11] Y. Prasad, T. Seshacharyulu. Modeling of hot deformation for microstructural control. *International Materials Reviews*, 1998, 43(6): 243-258.
- [12] Y. V. R. K. Prasad, H. L. Gegel, S. M. Doraivelu, J. C. Malas, J. T. Morgan, K. A. Lark and D. R. Barker. Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: Forging of Ti-6242. *Metallurgical Transactions A*, 1984, 15(10): 1883-1892.