

## NM360 耐磨钢的高温变形行为

李 龙<sup>1</sup> 祝志超<sup>2</sup> 查春和<sup>3</sup>

(1 银邦金属复合材料股份有限公司技术研究院, 无锡 214145;

2 中国一重能源装备材料科学研究所, 天津 300457; 3 冶金工业信息标准研究院, 北京 100730)

**摘 要** 试验用 NM360 钢 (/% : 0.17C, 0.38Si, 1.28Mn, 0.014P, 0.005S, 0.23Cr, 0.14Mo, 0.02Ti, 0.04Al) 30 mm 厚板的生产工艺流程为 90 t EAF-LF-VD-180 mm × 1 330 mm 坯连铸-轧制 30 mm 板-950 °C 淬火, 350 °C 回火。利用 Gleeble-3500 热模拟试验机研究了耐磨钢 NM360 在 900 ~ 1 200 °C, 应变速率为 0.1、1、10 s<sup>-1</sup> 下的变形行为, 确定了 NM360 耐磨钢的热变形方程, 建立了热加工图。结果表明, 利用 Zener-Hollomon 参数可很好描述 NM360 钢热压缩变形时的流变特性, 计算的动态再结晶激活能为 305 kJ/mol。随着温度升高以及应变速率降低, 能量耗散效率逐渐升高; 在 1 100 °C, 应变速率为 0.1 s<sup>-1</sup> 时, 变形能量耗散效率达到最大值 0.34。该耐磨钢在 1 070 ~ 1 170 °C, 应变速率 0.1 ~ 0.5 s<sup>-1</sup> 时, 具有较好的变形能力。通过优化工艺的生产结果表明, 180 mm 铸坯 (1 200 ± 20) °C 加热, (1 050 ± 10) °C 开轧, (950 ± 10) °C 终轧成 30 mm 板、水冷, 350 ~ 550 °C 回火 1 h, NM360 钢 HB 硬度值为 368 ~ 385, 屈服强度 830 ~ 920 MPa, 抗拉强度 1 030 ~ 1 120 MPa, 延伸率 10% ~ 15%, 具有良好的力学性能。

**关键词** NM360 耐磨钢 热压缩 激活能 热加工图

## Deformation Behavior of Wear-Resistant Steel NM360 at High Temperature

Li Long<sup>1</sup>, Zhu Zhichao<sup>2</sup> and Zha Chunhe<sup>3</sup>

(1 Technology Research Institute, Yinbang Clad Material Co Ltd, Wuxi 214145;

2 Materials Research Institute for Energy Equipments, China First Heavy Industry, Tianjin 300457;

3 Metallurgy Industries Information Standard Research Institute, Beijing 100730)

**Abstract** The production process flowsheet of tested steel NM360 (/% : 0.17C, 0.38Si, 1.28Mn, 0.014P, 0.005S, 0.23Cr, 0.14Mo, 0.02Ti, 0.04Al) 30 mm plate is 90 t EAF-LF-VD-180 mm × 1 330 mm slab casting-rolling to 30 mm plate-quenching at 950 °C and tempering at 350 °C. With using the Gleeble-3500 thermal simulation testing machine, the deformation behavior of wear resistant steel NM360 at 900 ~ 1 200 °C with strain rate 0.1, 1 and 10 s<sup>-1</sup> has been studied to define the thermal deformation equation and the hot working map of steel is established. Results show that the flow behavior of steel NM360 at thermal compressing deformation could be well described by the Zener-Hollomon parameter and the calculated dynamic activation energy is 305 kJ/mol. With increasing temperature and decreasing strain rate, the efficiency of energy dissipation gradually increases; as at 1 100 °C with strain rate 0.1 s<sup>-1</sup>, the efficiency of deformation energy dissipation is up to max value 0.34. The wear steel has better deformability at 1 070 ~ 1 170 °C with strain rate 0.1 ~ 0.5 s<sup>-1</sup>. The production results show that with optimization process-180 mm casting slab heating at (1 200 ± 20) °C, beginning rolling at (1 050 ± 10) °C, finishing rolling at (950 ± 10) °C to 30 mm plate, water cooling, tempering at 350 ~ 550 °C for 1 h, the NM360 steel HB hardness value is 368 ~ 385, yield strength is 830 ~ 920 MPa, tensile strength is 1 030 ~ 1 120 MPa and elongation is 10% ~ 15%, it has better mechanical properties.

**Material Index** Wear Resistant Steel NM360, Hot Compression, Activation Energy, Hot Working Map

全国每年各种金属耐磨件的消耗量在数百万吨以上<sup>[1]</sup>。NM360 属于调质型高强度耐磨钢板, 具有较高的抗磨损能力且易加工, 因而被广泛应用于冶金、矿山、煤炭等领域<sup>[2-13]</sup>。NM360 钢作为耐磨材料得到更加广泛的应用。

本文利用热加工模拟试验机获得耐磨钢 NM360 高温变形过程的应力-应变曲线, 主要研究了变形温度、应变速率等参数的影响, 建立了 NM360 钢的热加工图, 研究结果为制定耐磨钢 NM360 的热加工工艺, 控制产品的组织性能, 保证产品质量提供

依据。

### 1 试验材料及方法

试验钢板为国内钢厂生产的 NM360 钢板, 生产工艺流程为: 90 t 电弧炉冶炼 → LF 精炼 → VD 真空处理 → 连铸 → 铸坯加热 → 轧制 → 矫直 → 淬火加回火处理 → 钢板切割 (取样)。连铸坯的断面尺寸为 180 mm × 1 330 mm。轧板的状态为调质状态, 淬火温度为 950 °C, 回火温度为 350 °C, 轧板最终厚度为 30 mm。利用 CS600 碳硫测定仪对试验所用的 NM360

表 1 试验 NM360 钢的化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of tested steel NM360 /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Al
0.17	0.38	1.28	0.014	0.005	0.23	0.034	0.14	0.02	0.04

钢板的碳元素含量进行分析,其它元素使用 ICAP6500 等离子体发射光谱仪进行分析,化学成分分析结果见表 1。

在厚度为 30 mm 的 NM360 钢板的 1/4 厚度处制取试样,加工成  $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$  的圆柱样品,轴向平行于板面法线方向。在 Gleeble-3500 热力模拟试验机上进行等温压缩试验。热压缩试验过程如图 1 所示,首先对试样进行加热,加热速度为  $5 \text{ }^\circ\text{C/s}$ ,在  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  保温 5 min。试验温度为  $900 \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 、应变速率为  $0.1, 1, 10 \text{ s}^{-1}$ 、总应变量  $900 \sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$  为 58.3%,  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  为 70%。由计算机系统自动采集应力、应变、压力、位移、温度及时间等数据,绘制真应力-真应变曲线。NM360 钢板的金相组织使用 Axiovert 200 MAT 光学显微镜分析。

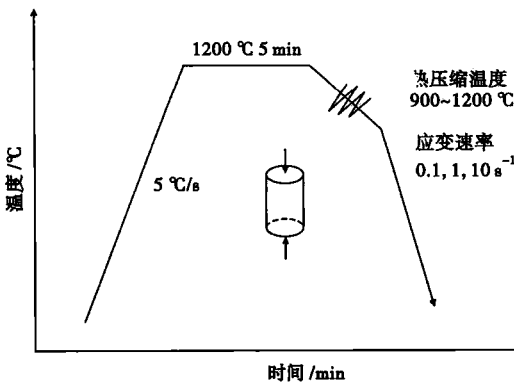


图 1 NM360 钢热压缩试验过程示意图

Fig. 1 Schematics of hot compression test process of steel NM360

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 真应力-真应变曲线

图 2 为 NM360 钢高温压缩变形时不同温度和不同应变速率条件下的真应力-真应变曲线。

金属材料在高温下变形时,热塑性流变行为与变形体内的位错组态密切相关,同时存在加工硬化和动态软化两个过程<sup>[14-20]</sup>。

在变形温度为  $900 \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$  和应变速率为  $0.1, 1, 10 \text{ s}^{-1}$  变形条件下, NM360 钢变形时发生动态硬化,流变应力先随应变的增加迅速升高。当真应变继续增加,动态回复软化机制导致真应力趋向平稳,即呈现稳态流变特征。当应变速率在  $0.1 \text{ s}^{-1}$  以及  $1 \text{ s}^{-1}$  高温条件下时,应力应变曲线上则呈现出明显的峰值应力,然后明显下降,出现应力不连续屈服现象,通常这种不连续屈服现象可能是由于材料内部组织发生动态再结晶、动态失效或者局部流变所致;而应变速率在  $10 \text{ s}^{-1}$  时,由于变形速率较快,动态硬化、动态回复及再结晶共同作用使得应力应变呈现出明显的波状曲线。另外,在同一应变速率下,随变形温度的升高,真应力水平明显下降;在同一变形温度下,随应变速率增加,真应力水平升高,说明合金在该试验条件下具有正的应变速率敏感性。

### 2.2 本构方程

本构关系是材料的流变应力与热加工参数之间最基本的函数关系,是进行金属塑性变形工艺设计和控制的基础。对于常规热变形,应力  $\sigma$ 、应变速率  $\dot{\epsilon}$  和温度  $T$  之间的关系可表示为<sup>[16]</sup>:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma_p)]^n \exp[-Q/(RT)] \quad (1)$$

式中:  $\dot{\epsilon}$ - 应变速率;  $A$ - 结构因子;  $\alpha$ - 应力水平参数;

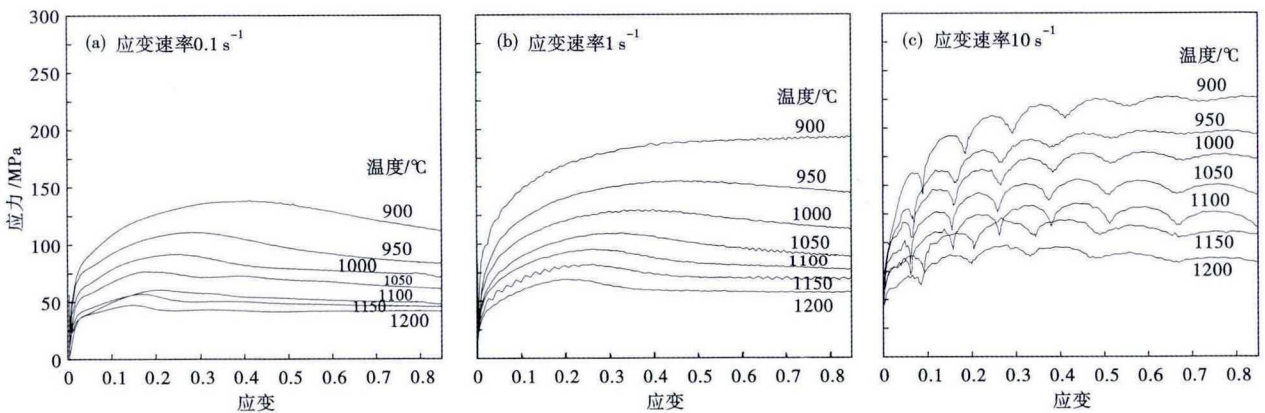


图 2 NM360 钢的真应力-真应变曲线:应变速率/ $\text{s}^{-1}$ : (a) 0.1; (b) 1; (c) 10

Fig. 2 True stress-strain curves of steel NM360; strain rate/ $\text{s}^{-1}$ : (a) 0.1; (b) 1 and (c) 10

$\sigma_p$ - 峰值应力; $n$ - 应力应变指数;  
 $Q$ - 热变形激活能; $R$ - 气体常数;  
 $T$ - 绝对温度。根据  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$  和  
 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$  关系获得  $\alpha = 0.008986$   
 $\text{mm}^2/\text{N}$ 。

假定热变形激活能  $Q$  与温  
度  $T$  无关,对式(1)两边分别取  
对数,整理得:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A - Q/(RT) + n \ln [\sinh(\alpha \sigma_p)] \quad (2)$$

将不同温度下 NM360 钢流  
变应力结果进行回归分析,获得

不同温度下应变速率对峰值应力的影响,如图 3(a)  
所示, $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$  符合线性关系。图 3(b)  
给出了 NM360 钢在不同的应变速率下,热变形峰值  
应力与变形温度的关系,应变速率一定时, $\ln [\sinh$   
 $(\alpha \sigma_p)]$  与  $1/T$  呈线性关系。随着变形温度的升高,  
热变形峰值应力迅速降低。

图 3(a) 中  $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$  关系直线的斜率  
 $n=4.999$ 。图 3(b) 中  $\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$  与  $1/T$  关系曲  
线的斜率为  $Q/nR=7.329$ ,由此可求得变形激活能  
 $Q=304.59 \text{ kJ/mol}$ 。通过截距求得结构因子  $A =$   
 $4.97 \times 10^{11}/\text{s}$ 。则 NM360 钢的热变形方程为:

$$\dot{\epsilon} = 4.97 \times 10^{11} [\sinh(0.09\sigma_p)]^5 \exp[-304590/(RT)] \quad (3)$$

另外,钢在热变形时的应力-应变关系曲线由变  
形温度、变形速率通过温度补偿变形速率因子 Ze-  
ner-Hollomon 参数决定<sup>[16]</sup>,即:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (4)$$

$Z$  参数是综合描述热加工过程形变温度及应变  
速率等影响的一个重要参数,通过已求得的热变形  
激活能  $Q$ ,可以计算出 NM360 钢的  $Z$  参数。由  $\ln Z$   
和  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  关系曲线(图 4)可以看出,增加  $Z$   
值,材料的峰值应力也逐渐增加。

流变应力方程亦可用包含 Arrhenius 项的  $Z$  参  
数表述为:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \left[ \left( \frac{Z}{A} \right)^{2/n} + 1 \right]^{1/2} \right\} = \frac{1}{8.986 \times 10^{-3}} \ln \left\{ \left( \frac{Z}{4.97 \times 10^{11}} \right)^{1/4.999} + \left[ \left( \frac{Z}{4.97 \times 10^{11}} \right)^{2/4.999} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (5)$$

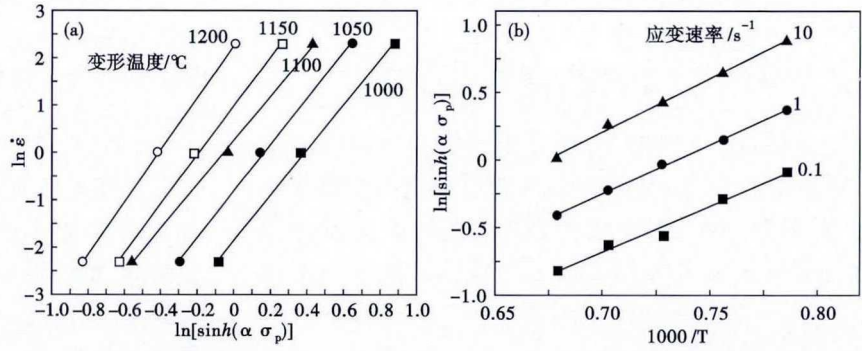


图 3 NM360 钢(a)峰值应力与应变速率;(b)峰值应力与变形温度的关系  
Fig. 3 Relation between peak stress and strain rate (a), and relation between peak stress and deformation temperature (b), steel NM360

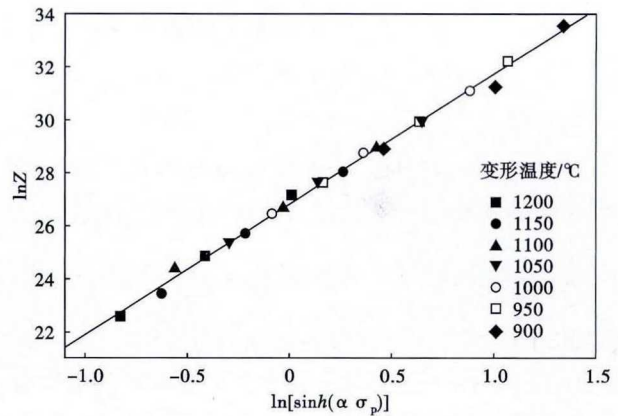


图 4 NM360 钢的  $Z$  参数与峰值应力的关系  
Fig. 4 Relation between  $Z$  parameter and peak stress of steel NM360

上述结果表明,NM360 耐磨钢高温压缩变形时的  
流变应力受应变速率和变形温度的强烈影响,可  
采用 Zener-Hollomon 参数来描述其流变应力行为。

### 2.3 热加工图

基于动态材料模型的加工图能够很好地描述材  
料高温变形时塑性变形机制、组织变化和塑性参数  
间的关系,对选择合理的加工区域、控制热变形过程  
中,材料的组织和性能是决定产品质量的主要因素。  
单位体积材料的瞬时消耗功  $P$  为流变应力与应变  
速率的乘积<sup>[21]</sup>:

$$P = \sigma \cdot \dot{\epsilon} = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \quad (6)$$

式中: $G = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon}$ ,  $J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma$ 。

恒定温度和应变下,流变应力和应变速率的一  
般关系为:

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m |_{\epsilon, T}$$

因此可得：

$$G = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} = \frac{1}{m+1} \dot{\epsilon} \sigma, J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma = \frac{m}{m+1} \dot{\epsilon} \sigma$$

由式(6)可以看出,热变形过程中材料的能量消耗包括两部分,即材料塑性变形而消耗的能量  $G$  以及材料组织动态变化所消耗的能量  $J$ ,应变速率敏感性指数  $m$  可认为是两部分能量之间的分配系数,即  $m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}}$ 。

对于理想的线性消耗过程有：

$$J = J_{\max} = \frac{\sigma \cdot \dot{\epsilon}}{2}$$

对于非线性消耗过程,能量消耗效率为：

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1}$$

利用图 2 的真应力-真应变曲线得出不同变形条件下的真应力  $\sigma$ ,采用 3 次样条差值函数拟合  $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$  关系曲线,然后根据  $m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}}$  得到  $m$  值后

计算出  $\eta$ 。在  $T - \ln \dot{\epsilon}$  平面内作  $\eta$  等值轮廓线的功率耗散图(图 5)。功率耗散图可表示材料微观组织变化的能量耗散情况以及变形过程中形成裂纹、回复和再结晶等的耗散能量,因此可以根据功率耗散图来分析材料的变形机理<sup>[21]</sup>。功率耗散系数越高,说明材料由于组织变化而引起功率耗散增加,材料易发生动态再结晶等软化过程,材料的变形抗力越低,加工性能越好。随着变形温度的升高及应变速率的降低, $\eta$  值逐渐增加,即动态能量消耗能力增强。在真应变为 0.2,变形温度 1 100 °C 左右、应变速率为

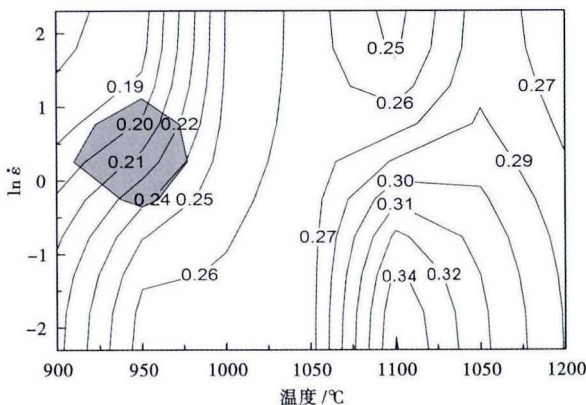


图 5 NM360 钢的热加工图(功率耗散与失稳叠加)

Fig. 5 Hot work map of steel NM360, superposition of energy dissipation and instability

0.01 s<sup>-1</sup>时,能量消耗效率最高可以达到 0.34。

根据不可逆热力学极值原理,可以定义塑性变形时的连续失稳判据  $\xi(\dot{\epsilon})$  为<sup>[22]</sup>：

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \partial \ln [m / (m + 1)] / \partial \ln \dot{\epsilon} + m \quad (7)$$

流变失稳图叠加于功率耗散图之上即得到其热加工图,它可定量描述材料的热加工过程中组织变化特性,NM360 钢的热加工图(深灰色部分为流变失稳区,等高线中的数字表示能量耗散效率)如图 5 所示。

从图 5 中也可看出,NM360 钢在试验条件下存在一个失稳区域:变形温度在 910 ~ 990 °C,应变速率为 0.77 ~ 2.1 s<sup>-1</sup>。当变形温度较低时,原子运动能力偏低,开启位错运动所需的能量更大,位错被钉扎不容易运动,材料易发生不均匀变形,容易产生裂纹,此时应变速率低,在应力作用下容易形成裂纹并发生裂纹扩展<sup>[15-17]</sup>。在变形温度较低时虽易产生裂纹,但应变速率相当大时能够瞬间焊合裂纹,加工可以继续,但此时不易发生动态再结晶,功率耗散系数较低,不是最适宜加工条件。变形温度的升高,能够降低位错运动的能量,使材料逐渐发生动态回复或动态再结晶,降低材料的变形抗力,裂纹不易形成,同时较低的应变速率使动态软化过程充分发生,使材料顺利加工。在失稳区进行加工有裂纹和区域变形的危险产生,所以热加工过程中应尽量避开失稳区域<sup>[20-21]</sup>。

### 2.4 试验钢的轧制工艺

从热加工图得到,NM360 钢的理想加工区域为变形温度 1 070 ~ 1 170 °C 及应变速率 0.1 ~ 0.5 s<sup>-1</sup>。在该区域内加工,功率耗散系数越高,加工性能好。故在变形温度为 1 100 °C 及应变速率为 0.1 s<sup>-1</sup> 下变形是 NM360 钢最适合的加工条件。结合热加工图及 NM360 钢的性能要求,优化了 NM360 钢的热轧工艺,并进行了热轧工业试验研究。原始铸坯厚度为 180 mm,加热温度 (1 200 ± 20) °C,开轧温度 (1 050 ± 10) °C,轧制速度为 0.12 s<sup>-1</sup>,终轧温度 (950 ± 10) °C,终轧厚度为 30 mm,之后进行水冷淬火处理,回火温度控制在 350 ~ 550 °C,回火时间 1 h。经力学性能检测,NM360 钢的 HB 硬度值为 368 ~ 385,屈服强度在 830 ~ 920 MPa,抗拉强度在 1 030 ~ 1 120 MPa,延伸率在 10% ~ 15%,具有良好的力学性能。

### 3 结论

(1) NM360 钢在高温下压缩变形时,存在加工

硬化和动态软化两个过程,其再结晶温度随应变速率的降低而降低,当应变速率从  $10\text{ s}^{-1}$  降低到  $0.1\text{ s}^{-1}$  时,再结晶温度从  $1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  降低到了  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。另外,高温流变应力随应变速率的增加而增加,随温度的升高而降低。

(2) 利用 Zener-Hollomon 参数的双曲正弦形式描述了该 NM360 耐磨钢热压缩变形时的流变特性,通过数值处理计算得到了 NM360 钢复合板材料高温压缩变形时的流变应力本构方程,并计算了应力指数为 4.999,动态再结晶的激活能为  $305\text{ kJ/mol}$ 。

(3) 随着变形温度的升高及应变速率的降低,  $\eta$

值逐渐增加,即动态能量消耗能力增强。在变形温度  $1\ 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右、应变速率为  $0.01\text{ s}^{-1}$  时,能量消耗效率最高可以达到 0.34。NM360 钢较为理想的加工区域为变形温度  $1\ 070\sim 1\ 170\text{ }^{\circ}\text{C}$  及应变速率  $0.1\sim 0.5\text{ s}^{-1}$ 。

(4) NM360 耐磨钢板经调质处理后,平均 HB 硬度值为 375,并具有良好的综合力学性能。

江苏省基础研究计划(自然科学基金)-面上研究项目资助(BK20161151)

参考文献

[1] 唐琳琳. 高铬耐磨复合板的性能特点及应用领域[J]. 露天采矿技术, 2011(2): 82-83.

[2] 李 龙, 陈梅艳. 耐磨复合钢板的生产技术及工业应用[J]. 宽厚板, 2016, 22(2): 38-43.

[3] 张 平, 张元好, 常庆明. 双金属复合导板的研究与发展现状[J]. 铸造设备与工艺, 2012, 2(1): 53-55.

[4] 徐滨士, 刘世参. 表面工程新技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

[5] Schrama R C. Housing and Chock Clearances and Liner Materials for Steel Mill Rolling Mills[J]. Lubrication Engineering, 1994, 50(6): 438-447.

[6] 李处强, 王洪尧, 徐绍文, 等. 新型球磨机耐磨复合衬板的研究[J]. 黄金, 1994, 15(6): 46-47.

[7] 阎志醒, 孟昭宏. 耐磨复合钢板及其应用[J]. 冶金设备, 1997, 6(3): 55-57.

[8] 张 龙. 中碳低合金耐磨钢的研制及在衬板上的应用[J]. 铸造技术, 2003, 24(5): 411-413.

[9] Barbezat G. Advanced thermal Spray Technology and Coating for Lightweight Engine Blocks for the Automotive Industry[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200(5-6): 1990-1993.

[10] 符寒光, 黄兆军, 宋锦春, 等. 轧机复合衬板工作层材料的研究和应用[J]. 钢铁钒钛, 2005, 26(1): 5-9.

[11] 温新林, 王秀梅, 袁兴华, 等. 复合耐磨材料在发电厂耐磨件上的应用[J]. 热处理, 2011, 26(3): 56-59.

[12] Qiu X W, Zhang Y P and Chun G L. Study on Ware Resistance of Laser Hardening Rolling Mill Liner[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 121-126: 3551-3554.

[13] 赵金山. ZGMn13Cr2RE 强韧性高锰钢衬板的开发和应用[J]. 铸造技术, 2008, 29(8): 1149-1151.

[14] 梁皖伦, 方金凤, 曹 军. 热模拟试验在金属热变形研究中的应用[J]. 理化检验, 2001, 37(11): 470-473.

[15] 王祖唐, 关廷栋, 肖景容, 等. 金属塑性成形理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989: 17-47.

[16] Zener C and Hollomon H. Effect of Strain-Rate upon the Plastic Flow of Steel[J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15(1): 22-27.

[17] 黄 姣, 柏振海, 罗兵辉, 等. 5A01 铝合金热变形行为和加工图[J]. 铝加工, 2004(1): 4-9.

[18] 蔡大勇, 熊良银, 孙贵东, 等. GH708 高温合金的热变形行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(A02): 40-42.

[19] Gronostajski Z. The Deformation Processing Map for Control of Microstructure in CuAl9.2Fe3 Aluminium Bronze[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125-126(9): 119-124.

[20] Park Nho-Kwan, Yeom Jong-Taek and Na Young-Sang. Characterization of Deformation Stability in Hot Forging of Conventional Ti-6Al-4V Using Processing Maps[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130-131(2): 540-545.

[21] 陈 楚, 何 毅, 黄军波, 等. 高速列车车轴钢 30CrNiMoV12 的热变形行为[J]. 特殊钢, 2014, 35(5): 57-60.

[22] 曾卫东, 周义刚, 周 军, 等. 加工图理论研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(5): 673-677.

李 龙(1977-), 男, 博士(2007 年东北大学), 高级工程师, 2000 年内蒙古科技大学(本科)毕业, 金属及金属层状复合材料开发. E-mail: Lichen040928@163.com

收稿日期: 2017-08-05

欢迎订阅《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号: 38-183

定价: 16.00 元/期 96.00 元/年

邮编: 435001

地址: 湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社