

## 0.03Nb-0.15Ti 微合金化低碳高强度钢的动态再结晶

甘晓龙 韩斌 汪水泽 蔡珍 朱万军

(武汉钢铁(集团)公司研究院,武汉 430080)

**摘要** 通过 Gleeble 1500 热模拟试验机试验研究了 Nb-Ti 微合金化低碳钢(0.06C, 0.22Si, 1.80Mn, 0.03Nb, 0.15Ti,  $\leq 0.007\text{N}$ ,  $\leq 0.002\text{S}$ ) 10 mm 带钢在 850 ~ 1100 °C, 以应变速率 0.1 ~ 20.0 s<sup>-1</sup>, 总变形量 75% 单道次压缩变形时动态再结晶, 由真应力-真应变曲线, 结合加工硬化率曲线, 得出动态再结晶临界应变 0.4 ~ 0.7 和完全再结晶应变 1.1 ~ 1.4。该钢的热变形激活能为 618.225 kJ/mol。根据试验结果得到 Zener-Hollomon 方程和动态再结晶状态图, 利用 Johnson-Mehl-Avrami (JMA) 方程法得到再结晶体积分数实际值, 采用 Epsilon-P 模型对实验数据进行回归, 得到试验钢的再结晶动力学模型。

**关键词** Nb-Ti 微合金化 低碳高强度钢 动态再结晶 加工硬化率 动力学模型

### Dynamic Recrystallization of 0.03Nb-0.15Ti Microalloying Low-Carbon High-Strength Steel

Gan Xiaolong, Han Bin, Wang Shuize, Cai Zhen and Zhu Wanjun

(Research and Development Institute, Wuhan Iron and Steel (Group) Co., Wuhan 430080)

**Abstract** The dynamic recrystallization of 10 mm strip of Nb-Ti microalloying low-carbon steel (0.06C, 0.22Si, 1.80Mn, 0.03Nb, 0.15Ti,  $\leq 0.007\text{N}$ ,  $\leq 0.002\text{S}$ ) in single pass compression with strain rate 0.1 ~ 20.0 s<sup>-1</sup>, total deformation 75% at 850 ~ 1100 °C has been tested and studied by using Gleeble 1500 hot simulator. Based on true stress-true strain curves combined work-hardening rate curve it is obtained that the dynamic recrystallization critical strain is 0.4 ~ 0.7 and the complete recrystallization strain is 1.1 ~ 1.4. The hot deformation activation energy of steel is 618.225 kJ/mol. And based on the Zener-Hollomon equation and dynamic recrystallization status diagram by tested results, it is obtained the dynamic model of recrystallization of test steel by using Johnson-Mehl-Avrami (JMA) equation method to get the real value of recrystallization volume fraction and by using Epsilon-P model to regress on the test data.

**Material Index** Nb-Ti Microalloying, Low-Carbon High Strength Steel, Dynamic Recrystallization, Work Hardening Rate, Dynamic Model

微合金钢是在普通低碳钢或者普通高强度低合金钢化学成分的基础上添加微合金元素, 通过析出强化、阻止高温下奥氏体晶粒再结晶和晶粒长大, 改善钢材的机械性能。微合金化元素有钛、钒、铌、硼、铝、锆、钼等, 微合金化元素与钢中碳、氮、氧及硫等元素可形成多种化合物, 从而对钢的性能产生多种影响。钢的微合金化技术现在正被用于更加广泛的领域, 如中碳非调质钢、钢筋钢、高碳轨钢、耐热工具钢、不锈钢等, 这些钢可在相当低的成本下达到良好的强度、韧性、成型性及焊接性相结合的综合使用性能<sup>[1]</sup>。

本文在 Gleeble 1500 热模拟试验机上进行了 Nb-Ti 微合金钢的单道次压缩变形实验, 采用应变硬化率方法得到稳态应变, 应用 Johnson-Mehl-Avrami (JMA) 方程法计算得到再结晶体积分数。根据实验结果建立了 Zener-Hollomon 参数方程, 给出动态再结晶状态图, 并回归再结晶体积分数计算模型, 为该钢种热轧工艺参数的制定提供理论依据。

### 1 试验材料和工艺

试验钢为热轧带钢厂生产的 Nb-Ti 微合金化汽车大梁钢, 其化学成分(%)为 0.06C, 0.22Si, 1.80Mn, 0.15Ti, 0.03Nb, 0.03Cr,  $\leq 0.007\text{N}$ ,  $\leq 0.002\text{S}$ , 带钢加热温度 1250 °C, 保温 1 h, 终轧温度为 880 °C, 带钢成品厚度为 10 mm, 累计压下率 > 90%, 取热轧成品试样加工成  $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$  的圆柱体。在 Gleeble 1500 热模拟机上进行单道次压缩试验, 所有试样以 5 °C/s 的速度加热到 1250 °C, 保温 480 s, 使其奥氏体化。然后试样以 5 °C/s 的冷却速度分别冷却到 850、900、950、1000、1050、1100 °C 进行变形, 变形速率分别为 0.1、1.0、10.0、20.0 s<sup>-1</sup>, 总变形量均为 75%, 最后淬火至室温。试验过程中, 记录变形过程中的应力-应变数据。

### 2 试验结果

#### 2.1 真应力-真应变曲线

按照设定工艺进行试验, 得到试验钢高温单道

次压缩变形的真应力-真应变实验曲线,图 1 给出了部分实验结果。从图 1(a)可以看出,在相同的变形温度下,随着应变速率的增大,应力也随之增大,当应变速率达到  $10 \text{ s}^{-1}$  时,继续增大应变速率,应力变化很小,在  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 、4 种不同的应变速率下,试样都发生了明显的动态再结晶现象。图 1(b) 则说明在应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$ 、不同的应变温度下,试样也发生了动态再结晶,而且随着变形温度的升高,应力峰值向真应变减小的方向移动,动态再结晶更容易发生。金属的高温变形是一个热激活过程,热激活能随着温度升高而增大,使位错具有足够的活动能力,克服钉扎作用而运动。同时,在升温过程中,由加工硬化造成的位错密度会有所下降,宏观上表现为应力峰值下降,热激活决定了形核和再结晶的过程,所以随着温度的升高,金属再结晶形核率增加,促使动态再结晶的发生。

### 2.2 模型特征值

建立再结晶动力学模型需要 3 个变形特征值,分别为临界应变  $\varepsilon_c$ 、峰值应变  $\varepsilon_p$  和稳态应变  $\varepsilon_s$ 。峰值应变  $\varepsilon_p$  可由应力-应变曲线上对应的峰值应力得到。临界应变由  $\varepsilon_c = (0.60 \sim 0.85) \varepsilon_p$  计算得到<sup>[2]</sup>,本文取  $\varepsilon_c = 0.8 \varepsilon_p$ 。对于  $\varepsilon_s$ ,一般是通过应力-应变曲线确定或者采用加工硬化率  $\theta$  与应变  $\varepsilon$  的关系曲线确定<sup>[3]</sup>,通过应力-应变曲线上的稳态段来确定稳态应力带有主观因素,有一定的误差,本文采用应变硬化率方法来确定该应力值。

$$\text{应变硬化率定义为: } \theta = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \approx \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (1)$$

式中: $\Delta\sigma$ - 真应力增量; $\Delta\varepsilon$ - 真应变增量。

由热模拟试验数据可作出如图 2 所示的加工硬化率  $\theta$  与应变  $\varepsilon$  的关系曲线,从图 2 中可以看出,随着应变  $\varepsilon$  的增加,加工硬化率  $\theta$  逐渐降低到小于 0 的一个极小值,而第一个  $\theta=0$  时对应的应变值就是  $\varepsilon_p$ ;随着  $\varepsilon$  的增加,若  $\theta$  又增加到 0 且维持在 0 值,说明此时发生的动态再结晶为连续型的;若  $\theta$  又在 0 值上下波动,则动态再结晶为周期型的。在动态再结晶模型中,把  $\theta$  第 1 次恢复到 0 时的应变作为稳态应变  $\varepsilon_s$ ,由此可以得到不同变形条件下的稳态应变  $\varepsilon_s$ 。

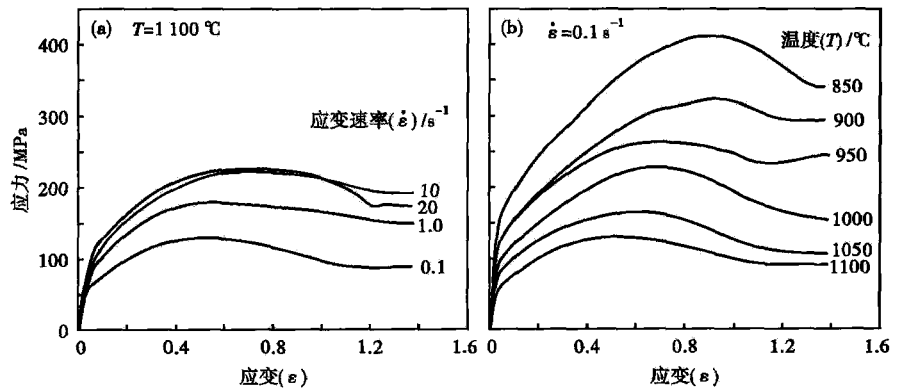


图 1 0.03Nb-0.15Ti 微合金化低碳高强度钢的真应力-真应变曲线:(a)应变温度  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)应变速率  $0.1 \text{ s}^{-1}$

Fig. 1 True stress-true strain curves of 0.03Nb-0.15Ti microalloying low-carbon high strength steel: (a) strain temperature  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (b) strain rate  $0.1 \text{ s}^{-1}$

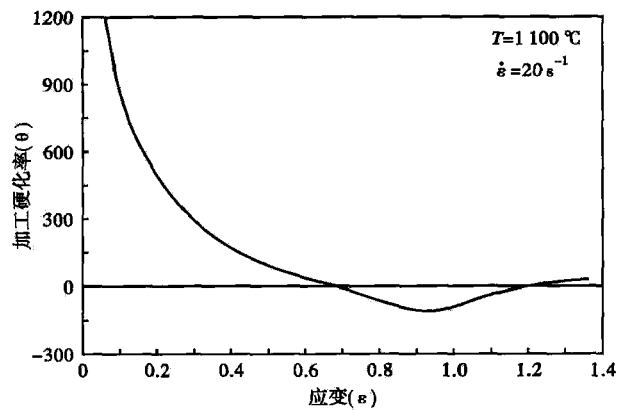


图 2 试验钢加工硬化率-应变曲线

Fig. 2 Work hardening rate-strain curve of test steel

## 3 动态再结晶动力学模型

### 3.1 Z 参数方程和再结晶状态图

动态再结晶是一个热激活过程,热变形激活能  $Q_{\text{def}}$  由公式(2)计算<sup>[4]</sup>:

$$Q_{\text{def}} = Rnb \quad (2)$$

式中: $R$ - 常数,  $R=8.3144 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

根据试验数据,可以画出  $1/T$  与  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$  ( $\alpha$ , 常数  $0.012$ ) 之间的关系曲线回归所得其平均斜率即为  $b$  值。画出不同温度下  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$  与  $\ln \dot{\varepsilon}$  的曲线,回归所得斜率倒数的平均值即为  $n$  值。通过实验数据得到的回归  $b$  值和  $n$  值的曲线分别见图 3(a, b), 回归得到  $b = 19.674$ ,  $n = 3.7794$ , 所以热变形激活能  $Q_{\text{def}} = 618.225 \text{ kJ/mol}$ 。

Zener-Hollomon 参数为<sup>[4]</sup>:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q_{\text{def}}}{RT}\right) \quad (3)$$

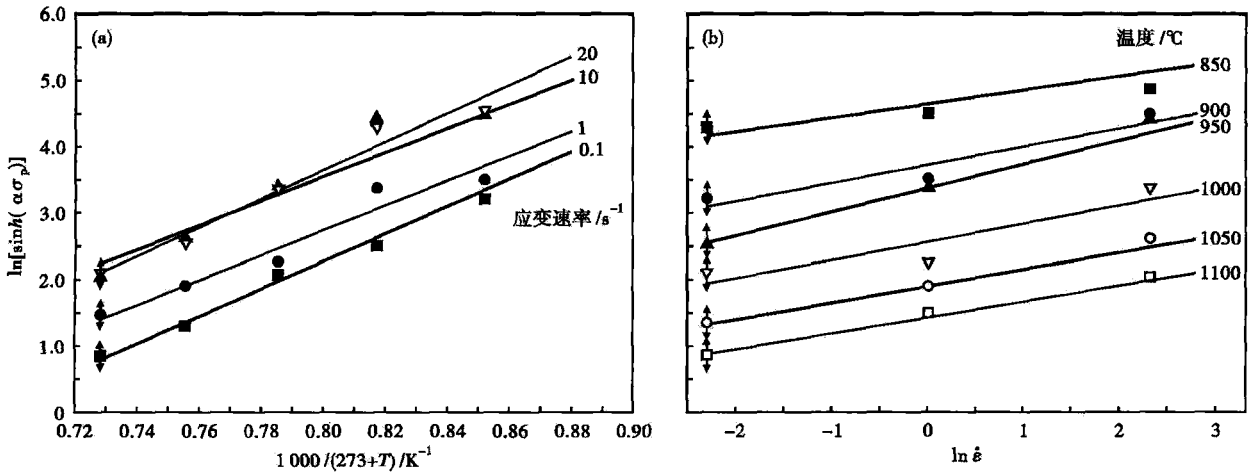


图 3  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$  和  $[(273+T)/1000]^{-1}$  (a)  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$  与  $\ln \dot{\epsilon}$  (b) 的关系曲线

Fig. 3 Curves of relation between  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$  and  $[(273+T)/1000]^{-1}$  (a) and between  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$  and  $\ln \dot{\epsilon}$  (b)

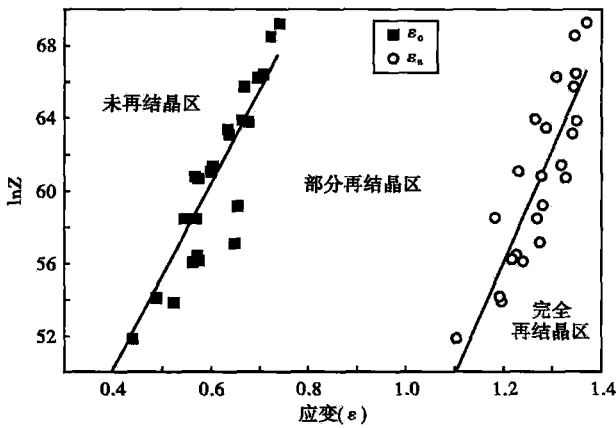


图 4 试验 0.03Nb-0.15Ti 微合金化低碳高强度钢动态再结晶状态图

Fig. 4 Status diagram of dynamic crystallization of test 0.03Nb-0.15Ti microalloying low-carbon high strength steel

试验钢动态再结晶状态图示于图 4。

### 3.2 动态再结晶动力学方程

目前,对于动态再结晶的研究,一般有 3 种不同的方法确定再结晶体积分数。第 1 种方法是金相法<sup>[5]</sup>,即把发生不同程度动态再结晶的试样从高温淬火到室温,通过观察其显微组织中再结晶晶粒的多少来确定高温变形状态下再结晶体积分数。这种方法实验复杂,而且在观察显微组织时,有时很难区别再结晶晶粒和未再结晶晶粒,往往造成精度不高。第 2 种方法是  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线法<sup>[6-7]</sup>,这种方法认为变形组织的外推流变应力是  $\sigma_d$ ,再结晶组织的流变应力是  $\sigma_s$ ,则热变形发生动态再结晶过程中流变应力为  $\sigma$  时对应的动态再结晶体积分数为  $X_d = (\sigma_d - \sigma) / (\sigma_d - \sigma_s)$ 。在不同的变形条件下不同,用外推法很难准确确定变形组织的流变应力  $\sigma_d$ ,而且采用这种

方法的文献也没有给出具体的流变应力  $\sigma_d$  的确定方法。第 3 种方法是常用的 Johnson-Mehl-Avrami (JMA) 方程法<sup>[2,8]</sup>,本文也采用这种方法来确定动态再结晶的体积分数。JMA 方程为:

$$f_{\text{dyn}} = 1 - \exp(-bt^n) \quad (4)$$

对于 Avrami 系数  $n$  和  $b$  在不同的变形条件下不是一个常数,而是与变形参数有关。Johnson-Mehl-Avrami (JMA) 方程可以改写为:

$$f_{\text{dyn}} = 1 - \exp[-b(Z)t^{n(Z)}] \quad (5)$$

式中:  $f_{\text{dyn}}$ - 动态再结晶体积分数/%;  $b(Z)$ 、 $n(Z)$ - 变形参数  $Z$  的函数。

假定达到临界应变  $\epsilon_c$  时,再结晶体积分数为 0.5%, 稳态应变  $\epsilon_s$  对应的再结晶体积分数为 99%, 式(5)可改写为:

$$f_{1\text{dyn}} = 0.005 = 1 - \exp[-b(Z)t_c^{n(Z)}] \quad (6)$$

$$f_{2\text{dyn}} = 0.99 = 1 - \exp[-b(Z)t_s^{n(Z)}] \quad (7)$$

由以上两式可得:

$$n(Z) = \frac{\ln\left(\frac{1-0.005}{1-0.99}\right)}{\ln\frac{t_c}{t_s}} \quad (8)$$

$$b(Z) = -\frac{\ln(1-0.005)}{t_c^{n(Z)}} \quad (9)$$

式中:  $t_c = \epsilon_c / \dot{\epsilon}$ ,  $t_s = \epsilon_s / \dot{\epsilon}$ 。

由式(8)和(9)得到不同变形条件时的  $n(Z)$  和  $b(Z)$  值,代入式(5)可得到不同变形条件下的动态再结晶 Johnson-Mehl-Avrami 方程。然后,可由此方

程计算得到不同变形条件下的动态再结晶分数随时间变化情况。

### 3.3 动态再结晶动力学模型

目前,广泛采用的动态再结晶动力学模型(体积分数的模型)有两种。有些文献采用 Epsilon-S-Epsilon-C 模型<sup>[9-10]</sup>,其它文献则应用 Epsilon-P 模型<sup>[2,11]</sup>。热变形过程中,当变形达到临界应变  $\varepsilon_c$  时,动态再结晶(DXR)开始,但由于此时加工硬化占主导地位,所以应力仍然呈现上升趋势,经过峰值应变  $\varepsilon_p$  时,DXR 开始占主导地位,应力开始下降,直到应变达到稳态应变  $\varepsilon_s$  时,DXR 结束。一般认为,将 Johnson-Mehl-Avrami 方程(4)转变为应变的函数,即可得到再结晶体积分数的预报模型的基础形式。可采用如下 JMA 方程来描述 DXR 动力学<sup>[12]</sup>:

$$\text{Epsilon-P: } X_{\text{dyn}} = 1 - \exp\{-k[(\varepsilon - \varepsilon_c)/\varepsilon_p]^m\} \quad (10)$$

根据热模拟实验数据,对式(10)进行非线性回归,得到表 1 中方程式(10)的系数,回归得到动态再结晶体积分数的方程为:

$$X_{\text{dyn}} = 1 - \exp\{-5.547[(\varepsilon - \varepsilon_c)/\varepsilon_p]^{3.393}\} \quad (11)$$

试验钢动态再结晶动力学曲线实测值与计算值比较示于图 5。利用回归软件可以计算出相关系数为 0.982。

由试验钢种的动态再结晶研究结果可知,临界应变为 0.4~0.7,完全再结晶应变量为 1.1~1.4。因此在现场的轧制过程中,前面几个机架必须为大

表 1 动态再结晶体积分数的系数

Table 1 Coefficient of dynamic recrystallization volume fraction equation

| k     | m     | 相关系数  |
|-------|-------|-------|
| 5.547 | 3.393 | 0.982 |

### 参考文献

[1] 侯 晶,王 飞,赵国英,等.微合金钢的研究现状及发展趋势[J].材料导报,2007,21(6):91-95.  
 [2] 徐 光,张丕军.金属低温变形与技术[M].北京:冶金工业出版社,2007:157.  
 [3] 徐 光,徐楚韶.Ti-IF 钢动态再结晶模型[J].特殊钢,2006,27(6):13-14.  
 [4] 沈丙振,方能炜,沈厚发,等.低碳钢奥氏体再结晶模型的建立[J].材料科学与工艺,2005,13(5):516-520.  
 [5] 关 云,李平和,陈庆丰.变形温度对 ULCB 钢动态再结晶的影响[J].武钢技术,2007,45(5):15-18.  
 [6] 程晓茹,李虎兴,葛懋琦,等.管线钢 X65 高温变形动态再结晶研究[J].金属学报,1997,33(12):1275-1280.  
 [7] 张 毅,刘 平,田保红,等.Cu-Ni-Si-Ag 合金动态再结晶数学模型[J].特种铸造及有色合金,2010,30(9):797-790.  
 [8] Kirihaata A, Siciliano F, Maccagno T M, et al. Mathematical Modelling of Mean Flow Stress during the Hot Strip Rolling of Multiply-Alloyed Medium Carbon Steels[J]. ISIJ International, 1998, 38(2):187-195.

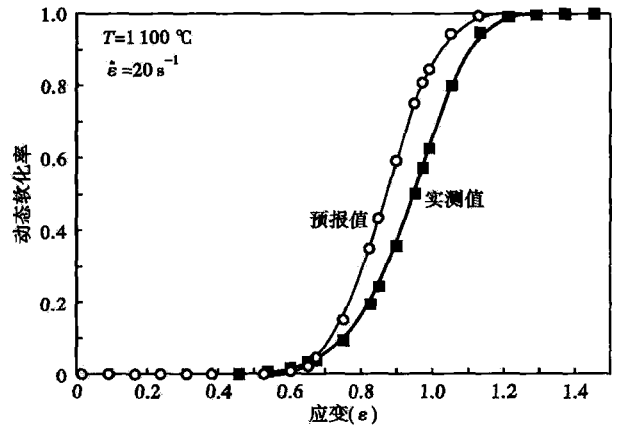


图 5 试验 0.03Nb-0.15Ti 微合金化低碳高强度钢动态再结晶动力学曲线实测值与预报值比较

Fig.5 Comparison of dynamic curves between measured value and predicted value of dynamic recrystallization at test 0.03Nb-0.15Ti microalloying low-carbon high strength steel

压下量,压下率大于临界应变(真应变)才能使组织在前几个道次得到充分再结晶,细化晶粒,而在最后一到两个轧制道次,应采用较小的压下量,使组织不发生再结晶,有利于冷却相变过程中的晶粒细化,同时小压下有利于控制板型。

### 4 结论

- (1) 试验钢的热变形激活能为  $Q_{\text{def}} = 618.225$  kJ/mol。
- (2) 建立了试验钢的再结晶动力学模型:  $X_{\text{dyn}} = 1 - \exp\{-5.547[(\varepsilon - \varepsilon_c)/\varepsilon_p]^{3.393}\}$ 。
- (3) 试验钢的临界应变为 0.4~0.7,完全再结晶应变量为 1.1~1.4。在热轧过程中,前面几个机架必须为大压下量,最后一到两个轧制道次应采用较小的压下量。

[9] 吴瑞恒,朱洪涛,张鸿冰,等.0.95C-18W-4Cr-1V 高速钢动态再结晶的数学模型[J].上海交通大学学报,2001,35(3):339-341.  
 [10] 余驰斌,叶传龙,赵 刚,等.Nb-Ti 钢高温变形时动态再结晶行为及模型探讨[J].武汉科技大学学报(自然科学版),2003,26(4):334-336.  
 [11] 张春玲,孙睿璇,蔡大勇,等.Cu-P-Cr-Ni-Mo 耐候钢高温变形奥氏体的动态再结晶[J].特殊钢,2010,31(4):43-45.  
 [12] 王晓明,洪惠平,王 孟,等.37Mn5 钢高温变形抗力模型及动态再结晶动力学模型研究[J].武汉科技大学学报(自然科学版),2010,33(5):497-500.

甘晓龙(1984-),男,博士生(武汉大学),工程师,武汉大学(本科)毕业,金属加工工艺和组织性能控制。

E-mail: GXL1028@126.com

收稿日期:2015-04-20