

控轧控冷工艺参数对冷镦钢 10B21 组织影响的热模拟研究

蒋波 张朝磊 刘雅政 周乐育
(北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要 通过 Gleeble-1500 热模拟实验机对冷镦钢 10B21 (/%: 0.20C, 0.02Si, 0.85Mn, 0.014P, 0.005S, 0.0018B) 精轧前 $\Phi 28$ mm 圆坯进行控轧控冷工艺热模拟试验, 以研究变形速率 20 s^{-1} , 变形量 65% 时终轧温度 (850 ~ 1000 °C)、吐丝温度 (820 ~ 940 °C) 和相变区冷却速度 (0.2 ~ 1.0 °C/s) 对该钢组织的影响。结果表明, 增加吐丝温度和相变区冷却速度可明显提高钢中铁素体含量, 增加相变区冷却速度, 可有效地改善钢的带状组织。为了获得较高的铁素体含量、粗大的铁素体晶粒且较均匀的组织, 以提高钢的冷镦性能, 较佳的控轧控冷工艺为终轧温度 950 °C、吐丝温度 910 °C、相变区冷却速度 1.0 °C/s。

关键词 冷镦钢 10B21 控轧控冷工艺参数 铁素体体积分数 铁素体平均晶粒尺寸 带状组织

Thermal Simulation Study of Effect of Controlling Rolling and Cooling Process Parameters on Structure of Cold Heading Steel 10B21

Jiang Bo, Zhang Chaolei, Liu Yazheng and Zhou Leyu
(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract The simulation test on controlling rolling and cooling process for $\Phi 28$ mm round billet of cold heading steel 10B21 (/%: 0.20C, 0.20Si, 0.85Mn, 0.014P, 0.005S, 0.0018B) to be going to finishing rolling has been carried out by using Gleeble-1500 thermal simulation machine to study the effect of finishing rolling temperature- 850 ~ 1000 °C with deformation rate 20 s^{-1} and reduction- 65%, loop-laying temperature 820 ~ 940 °C and cooling rate in phase transformation range- 0.2 ~ 1.0 °C/s on structure of steel. Results show that with increasing loop-laying temperature and cooling rate in phase transformation range the volume fraction of ferrite in steel increases obviously and with increasing cooling rate in phase transformation range the banded structure of steel is improved available. In order to get higher ferrite volume fraction, coarser ferrite grain and more homogeneous structure to increase the cold heading performance, the optimum controlling rolling and cooling process parameters are finishing temperature- 950 °C, loop-laying temperature- 910 °C and cooling rate in phase transformation range- 1.0 °C/s.

Material Index Cold Heading Steel 10B21, Controlling Rolling and Cooling Process Parameter, Volume Fraction of Ferrite, Average Grain Size of Ferrite, Banded Structure

冷镦钢线材一般用低、中碳优质碳素结构钢和合金结构钢生产。目前广泛用于制造螺栓、螺母、螺钉、铆钉、自攻螺钉等紧固件和各种冷镦成形的零配件^[1]。目前国内冷镦钢线材质量与国外相比还存在一定的差距, 主要在于国内冷镦钢冷镦的过程中产生开裂。冷镦钢 10B21 的组织以铁素体为主, 影响其冷镦性能的主要因素是组织中铁素体含量、晶粒大小及组织均匀性。高的铁素体含量和均匀粗大的晶粒有利于提高钢的冷镦性能^[2]。因此通过对冷镦钢 10B21 的控轧控冷工艺的研究, 可以为生产优质冷镦性能的冷镦钢 10B21 提供依据。

控轧控冷技术的目的主要在于控制最终的成品组织状态, 最终组织状态主要取决于钢的化学成分和控轧控冷工艺参数^[3]。实验设计分析了斯太尔摩冷却线上终轧温度、吐丝温度和相变区冷却速度 3 个控轧控冷工艺参数对冷镦钢组织中铁素体体

积、晶粒尺寸以及均匀性的影响。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

实验钢取自钢厂冷镦钢 10B21 进精轧前的坯料, 坯料尺寸为 $\Phi 28$ mm 圆坯, 化学成分 (%) 为 0.20C, 0.02Si, 0.85Mn, 0.014P, 0.005S, 0.0018B。在坯料边部取 $\Phi 8$ mm \times 20 mm 的热模拟圆柱形试样。现场终轧温度为 950 °C, 吐丝温度为 860 ~ 910 °C, 相变区冷却速度为 0.4 ~ 0.7 °C/s。热模拟实验在 Gleeble-1500 热模拟实验机上进行。

1.2 实验方法

根据热模拟机的性能技术参数以及现场生产线的技术特点和工艺规程, 制定了下列热模拟实验方案: 采用 2 道次压缩实验, 以 10 °C/s 的速度将实验钢试样加热至 1050 °C, 保温 3 min, 以 10 °C/s 的速度冷却至变形温度 (850 ~ 1000 °C), 10 s 之后进行

第 1 道次变形, 变形速率 20 s^{-1} , 变形量 $\varepsilon_1 = 35\%$, 3 s 之后进行第 2 道次变形, 变形速率 20 s^{-1} , 变形量 $\varepsilon_2 = 30\%$, 变形完毕后 3 s 冷却到吐丝温度 ($820 \sim 940 \text{ }^\circ\text{C}$), 再模拟斯太尔摩冷却线先以 $1.5 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的冷却速度冷却至 $740 \text{ }^\circ\text{C}$, 接着分别以 $0.2 \sim 1.0 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的相变区冷却速度冷却至 $690 \text{ }^\circ\text{C}$ 后, 再以 $1.5 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的冷却速度冷却至 $530 \text{ }^\circ\text{C}$, 最后空冷至室温, 如图 1 所示。

将热模拟后的试样从垂直于轴向的方向用线切割机切开。经机械打磨抛光后, 再用 4% 硝酸酒精侵蚀, 在金相显微镜下随机至少选取 15 个视场对金相组织进行观察, 得到不同工艺参数下的金相组织形貌, 并提高图片的对比度以利于两相对比。用 Image Tool 软件测量金相照片中铁素体的百分含量以及平均晶粒尺寸。

2 实验结果与讨论

2.1 终轧温度的影响

图 2 为吐丝温度 $850 \text{ }^\circ\text{C}$ 、相变区冷却速度 $0.4 \text{ }^\circ\text{C/s}$, 不同终轧温度 ($850, 900, 950, 1000 \text{ }^\circ\text{C}$) 下组织形貌。图 3 为不同工艺参数下的铁素体体积分数和铁素体平均晶粒尺寸的统计图。从图 3 中可以看出, 随着终轧温度的升高, 铁素体的体积分数降低, 铁素体平均晶粒尺寸呈现增大的趋势, 但变化均不明显。不同终轧温度下, 组织都不均匀, 有明显的带状组织。

终轧温度的提高, 一方面, 奥氏体尺寸增大, 减小了晶界面积, 形核位置减少, 奥氏体晶粒边界的铁素体形核率降低, 铁素体体积分数降低^[4,5]。另一方面, 终轧温度的提高降低了变形晶粒内部位错密度, 降低变形储能, 铁素体内部形核率降低, 同时降低了奥氏体发生相变的自由能, 抑制铁素体相变^[6-7]。因此, 终轧温度的提高将降低铁素体的体积分数。

终轧温度高于 A_{r3} 点, 当终轧温度提高时, 奥氏体变形温度升高, 奥氏体在高温处停留时间增加, 奥氏体尺寸增大, 遗传到铁素体中; 同时晶粒内部位错密度降低, 降低了奥氏体内的变形储能, 铁素体形核驱动力减小, 形核率降低, 从而使铁素体平均晶粒尺寸增大^[8-9]。终轧温度每提高 $50 \text{ }^\circ\text{C}$, 铁素体体积分数约降低 1.0% , 铁素体平均晶粒尺寸增大 $0.5 \text{ } \mu\text{m}$ 。可见终轧温度的变化对组织的影响并不明显。

2.2 吐丝温度的影响

图 4 为终轧温度 $950 \text{ }^\circ\text{C}$ 、相变区冷却速度 $0.4 \text{ }^\circ\text{C/s}$, 不同吐丝温度 ($820, 850, 880, 910, 940 \text{ }^\circ\text{C}$) 下的光学组织形貌, 结合图 3 与图 4 可以看出, 随着吐丝温度的升高, 铁素体体积分数和平均晶粒尺寸都呈现增大的趋势, 但铁素体平均晶粒尺寸变化不大, 没有铁素体体积分数变化明显。不同吐丝温度下, 组织都不均匀, 有明显的带状组织。

吐丝温度的提高主要增加了铁素体相变的过冷

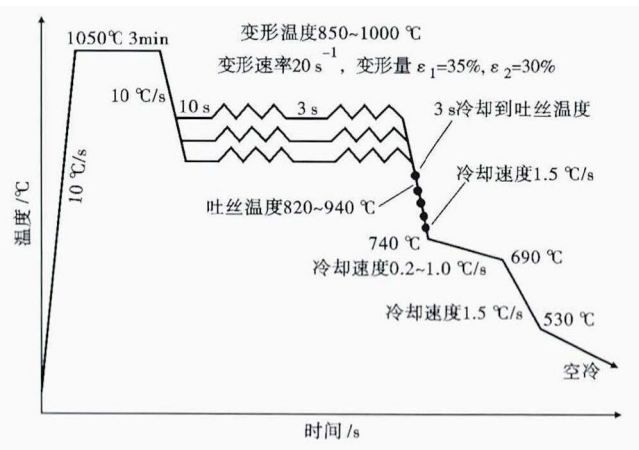


图 1 热模拟实验工艺示意图
Fig. 1 Schematics of thermal simulation test process

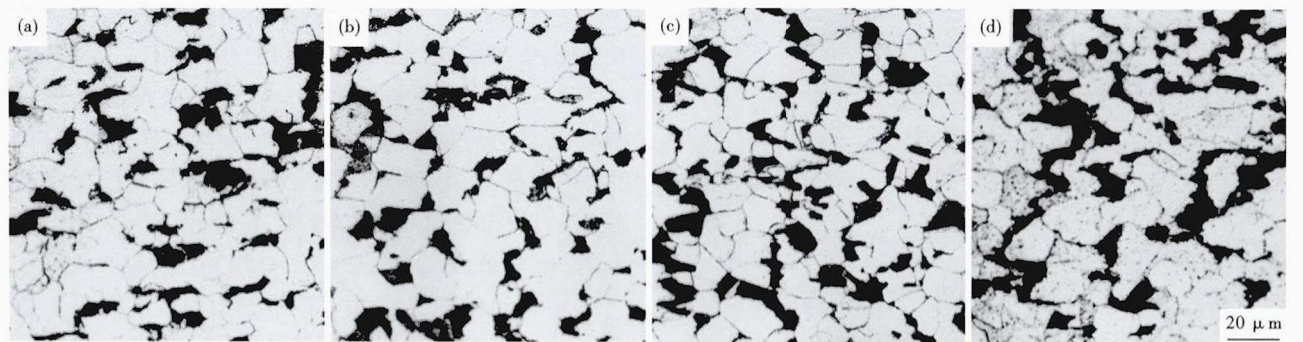


图 2 终轧温度 $850 \text{ }^\circ\text{C}$ (a), $900 \text{ }^\circ\text{C}$ (b), $950 \text{ }^\circ\text{C}$ (c) 和 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ (d) 对冷镦钢 10B21 组织形貌的影响, 吐丝温度 $850 \text{ }^\circ\text{C}$, 冷却速度 $0.4 \text{ }^\circ\text{C/s}$

Fig. 2 Effect of finishing rolling temperature- $850 \text{ }^\circ\text{C}$ (a), $900 \text{ }^\circ\text{C}$ (b), $950 \text{ }^\circ\text{C}$ (c) and $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ (d) on structure morphology of cold heading steel 10B21, loon-laying temperature at $850 \text{ }^\circ\text{C}$ and cooling rate $0.4 \text{ }^\circ\text{C/s}$

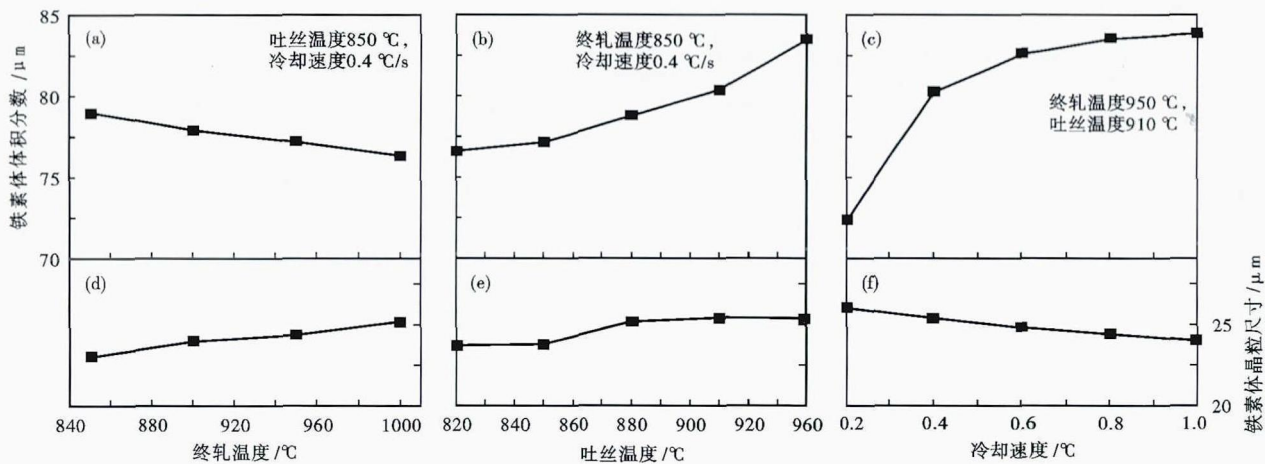


图 3 终轧温度(a)(d)、吐丝温度(b)(e)和冷却速度(c)(f)对冷镢钢 10B21 铁素体体积分数(a)(b)(c)和平均晶粒尺寸(d)(e)(f)的影响

Fig. 3 Effect of finishing rolling temperature (a) (d), loop-laying temperature (b) (e) and cooling rate (c) (f) on volume fraction (a) (b) (c) and average grain size (d) (e) (f) of ferrite in cold heading steel 10B21

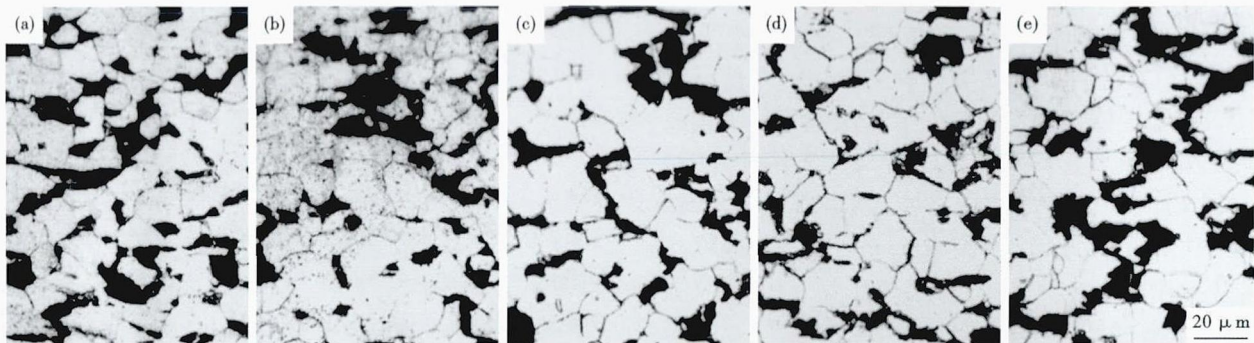


图 4 吐丝温度 820 °C (a)、850 °C (b)、880 °C (c)、910 °C (d) 和 940 °C (e) 对冷镢钢 10B21 组织形貌的影响, 终轧温度 950 °C, 冷却速度 0.4 °C/s

Fig. 4 Effect of loop-laying temperature- 820 °C (a), 850 °C (b), 880 °C (c), 910 °C (d) and 940 °C (e) on structure morphology of cold heading steel 10B21, finishing rolling temperature at 950 °C and cooling rate 0.4 °C/s

度, 提高铁素体的形核率, 促进铁素体的形成进而提高了铁素体体积分数。同时吐丝温度的提高有利于奥氏体尺寸的增大, 导致铁素体的形核率降低、长大速率增加, 因此铁素体平均晶粒尺寸增大^[10], 但由于双重作用的叠加, 增大不明显。吐丝温度每提高 50 °C, 铁素体体积分数约提高 2.9%, 铁素体平均晶粒尺寸增大 0.7 μm。可见吐丝温度的提高对铁素体平均晶粒尺寸影响并不大, 这与终轧温度的影响相同; 但对铁素体体积分数来说, 吐丝温度的影响要明显大于终轧温度。

2.3 相变区冷却速度的影响

图 5 为终轧温度 950 °C、吐丝温度 910 °C、不同相变区冷却速度(0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 °C/s)下的光学组织形貌, 结合图 3 和图 5 可以看出, 随着相变区冷却速度的提高, 铁素体的体积分数增大, 铁素体

平均晶粒尺寸略有减小, 但带状组织明显改善。

控轧控冷工艺参数对晶粒尺寸的控制主要通过形核率和长大速率的控制而实现。当形核率的影响占主要作用时, 铁素体平均晶粒尺寸减小; 当长大速率的影响占主要作用时, 平均晶粒尺寸增大^[11]。相变区冷却速度每提高 0.2 °C/s, 铁素体体积分数约提高 2.5%, 铁素体平均晶粒尺寸降低 0.4 μm。可见相变区冷却速度对铁素体平均晶粒尺寸影响不大, 对铁素体体积分数影响较明显。故在相变区冷却速度为 0.2 ~ 1.0 °C/s, 形核率和长大速率对铁素体晶粒尺寸影响作用抵消, 对晶粒的尺寸影响不大。当冷却速度增加时, 奥氏体相变的过冷度增加, 相变的形核驱动力增加, 铁素体形核点增多, 在晶粒尺寸不变的情况下, 铁素体的体积分数增加^[12]。相变过程中, 贫溶质区形成铁素体时所排出的碳在珠光体产

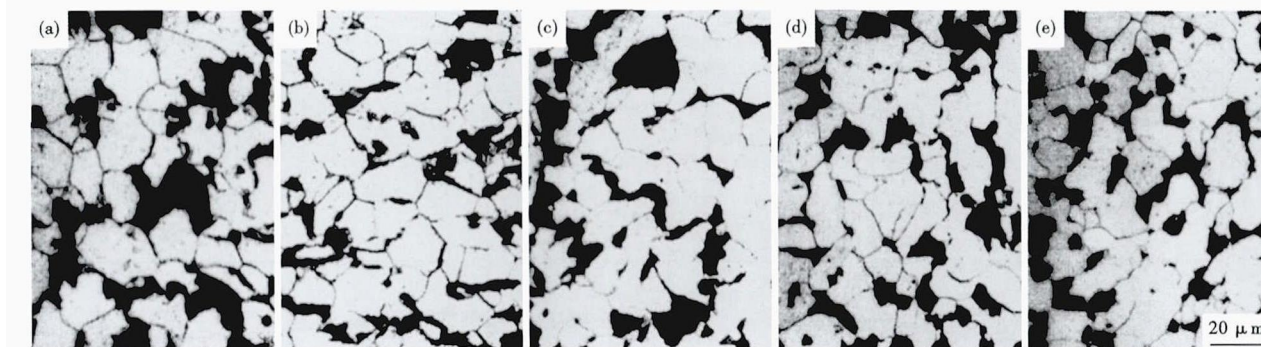


图 5 冷却速度 0.2 °C/s(a), 0.4 °C/s(b), 0.6 °C/s(c), 0.8 °C/s(d) 和 1.0 °C/s(e) 对冷镦钢 10B21 组织形貌的影响, 终轧温度 950 °C, 吐丝温度 850 °C

Fig. 5 Effect of cooling rate-0.2 °C/s (a), 0.4 °C/s (b), 0.6 °C/s (c), 0.8 °C/s (d) and 1.0 °C/s (e) on structure morphology of cold heading steel 10B21, finishing rolling temperature at 950 °C and loop-laying at 850 °C

生之前所扩散的距离是影响带状程度的决定因素。随着冷却速度的增大, 贫溶质区碳扩散的距离减小, 因此珠光体的形核点分布均匀, 带状组织改善^[13]。

3 结论

(1) 终轧温度从 850 °C 升高到 1000 °C, 每增加 50 °C, 组织中 铁素体含量降低 1.0%, 铁素体平均晶粒尺寸增加 0.5 μm; 吐丝温度从 820 °C 升高到 940 °C, 每增加 50 °C, 组织中 铁素体含量增加 2.9%, 铁素体平均晶粒尺寸增加 0.7 μm; 相变区冷却速度从 0.2 °C/s 增加到 1.0 °C/s, 每增加 0.2 °C/s, 组织中 铁素体含量增加 2.5%, 铁素体平均晶粒尺寸降低 0.4 μm。吐丝温度和相变区冷却速度对组织中 铁

素体含量影响较大, 终轧温度影响不大; 不同工艺参数对组织中 铁素体平均晶粒尺寸影响均不明显。

(2) 终轧温度和吐丝温度的变化对带状组织影响均不明显, 相变区冷却速度的增加可以有效地改善带状组织。

(3) 为了得到拥有高的铁素体体积分数和粗大均匀的铁素体平均晶粒尺寸的组织, 吐丝温度越高越好, 但超过 910 °C 铁素体平均晶粒尺寸变化不大, 同时考虑氧化铁皮的影响, 选取吐丝温度为 910 °C。再综合终轧温度和相变区冷却速度的影响, 选取最终控轧控冷工艺为终轧温度 950 °C, 吐丝温度 910 °C, 相变区冷却速度为 1.0 °C/s。

参考文献

- [1] 强十涌, 乔德庸, 李曼云. 高速线材生产[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [2] 孙维, 华刚, 许健, 等. 免退火高强度冷镦钢盘条 SWRCH35K-M 的研制[J]. 安徽工业大学学报, 2007, 24(1): 25-28.
- [3] Elena P, Boyd J D. Effects of Simulated on Line Accelerated Cooling Processing on Transformation Temperatures and Microstructure in Microalloyed Steels[J]. Materials Science and Technology, 1996, 12(12): 1043-1052.
- [4] Hurley P J, Hodgson P D. Effect of Process Variables on Formation of Dynamic Strain Induced Ultrafine Ferrite during Hot Torsion Testing[J]. Materials Science and Technology, 2001, 17(11): 1360-1368.
- [5] 田鹏, 惠卫军, 刘荣佩, 等. 形变参数对中碳钢组织演变的影响[J]. 材料热处理学报, 2005, 26(4): 69-73.
- [6] Han D, Sun X J. Deformation Induced Ferrite Transformation in Low Carbon Steels[J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2005, 9(6): 269-276.
- [7] 肖国华, 王福明, 李长荣, 等. 钕钒微合金化高强度船板钢的连续冷却转变规律[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(5): 496-498.
- [8] Yuan W H, Fu Q, Zhou H. The Effect of Controlled Rolling and Cooling on the Microstructure Evolution of Boron Microalloyed Medium-carbon Steel[J]. Advanced Materials Research, 2011(146-147): 1305-1309.
- [9] 许云波, 刘相华, 王国栋. 奥氏体控轧控冷条件下相变后 α 晶粒尺寸的预测[J]. 东北大学学报, 2002, 23(2): 144-146.
- [10] Ai J H, Zhao T C, Gao H J, et al. Effect of Controlled Rolling and Cooling on the Microstructure and Mechanical Properties of 60Si2MnA Spring Steel Rod[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 160(3): 390-395.
- [11] 王有铭, 李曼云, 韦光. 钢材的控制轧制和控制冷却[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- [12] 艾家和, 赵同春, 高慧菊, 等. 控轧控冷工艺参数对 60Si2MnA 线材中珠光体形态的影响[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(5): 503-504.
- [13] 蔡珍, 黄运华, 张跃, 等. 冷却速度对铁素体-珠光体带状组织的影响机制[J]. 钢铁研究学报, 2012, 24(6): 25-30.

蒋波(1990-), 男, 博士生(北京科技大学), 2010 年北京科技大学(本科)毕业, 特殊钢变形工艺和组织性能的研究。

收稿日期: 2013-07-05