

冷轧压下率和再结晶退火温度对 Ti-IF 钢织构和成型性能的影响

罗海燕¹ 肖欢² 赵刚² 余冲² 孙宏云² 魏俊杰² 樊雷³

(1 广西冶金研究院, 南宁 530023; 2 武汉科技大学材料加工工程系, 武汉 430081; 3 广西柳州钢铁(集团)公司, 柳州 545002)

摘要 采用背散射衍射技术(EBSD)研究了 3.13 mm 热轧板的冷轧压下量(65%~80%)和再结晶退火温度(660~780 °C)对 0.64~1.10 mm Ti-IF 钢冷轧板(∕%:0.02C,0.01Si,0.10Mn,0.013P,0.011S,0.064Ti,0.028Al,0.0020N)的织构和成型性能应变硬化指数(n)、塑性应变比(r)的影响。结果表明,Ti-IF 钢冷轧板在冷轧压下率为 75% 时 $\{111\}$ 织构含量最大,成型性能最佳;在 740 °C 以下再结晶退火时材料 $\{111\} <110>$ 织构含量高,高于 740 °C 时材料 $\{111\} <112>$ 织构含量高;在 660~780 °C 再结晶退火随温度增高,材料 $\{111\}$ 织构含量增加,成型性能提高。

关键词 Ti-IF 钢 冷轧板 压下率 退火温度 织构 成型性

Influence of Cold Rolling Reduction and Annealing Temperature on Texture and Formability of Ti-IF Steel

Luo Haiyan¹, Xiao Huan², Zhao Gang², Yu Chong², Sun Hongyun², Wei Junjie² and Fan Lei³

(1 Guangxi Metallurgy Research Institute, Nanning 530023; 2 Department of Materials Processing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 3 Guangxi Liuzhou Iron and Steel Co, Liuzhou 545002)

Abstract The influence of cold rolling reduction (65%~80%) of 3.13 mm hot rolled plate and recrystallization annealing temperature (660~780 °C) on texture and formability-train-hardening exponent (n) and plastic strain ratio (r) of 0.64~1.10 mm cold rolled sheet of Ti-IF steel (∕%:0.02C,0.01Si,0.10Mn,0.013P,0.011S,0.064Ti,0.028Al,0.0020N) has been studied by electro backscattering diffraction method. Results show that with cold rolling reduction 75% the $\{111\}$ texture content in Ti-IF cold rolled sheet is highest and the formability is optimum; with recrystallization annealing at ≤ 740 °C the $\{111\} <110>$ texture content in material is high and with annealing at more than 740 °C the $\{111\} <112>$ texture content in material is high; and as recrystallization annealing at 660~780 °C, with rising annealing temperature the $\{111\}$ texture content in material increases and the formability of material also increases.

Material Index Ti-IF Steel, Cold Rolled Sheet, Reduction, Annealing Temperature, Texture, Formability

Ti-IF(Interstitial Free)钢为 Ti- 无间隙原子钢,是在普通超低碳钢中加入一定量的 Ti,使钢中的 C、N 原子被固定成了 Ti(C,N),从而得到了纯净的铁素体。由于材料中基本无间隙原子存在,有利于后续生产过程中再结晶 $\{111\} // ND$ 织构的优先发展,从而获得优良的冲压性能和非时效性,被广泛运用在以汽车工业为代表的现代工业中^[1]。在传统的 IF 钢生产流程连铸-热轧-酸洗-冷轧-退火-平整中,冷轧工序使产品发生极大的塑性变形,产生大量的晶体缺陷,赋予材料极大的晶格畸变能,为之后的再结晶过程提供能量;退火工序直接给予晶粒能量发生再结晶以及晶粒的长大^[2]。

实验参照钢厂冷轧生产线 SPCC-YT 生成工艺,以钢厂热轧生产线生产的 DC03 板作为基板,采用背散射衍射技术(EBSD)研究了冷轧以及热处理工艺对于产品织构及其性能的影响。

1 实验方法

实验用 Ti-IF 钢热轧基板取自钢厂热轧生产线上的 DC03 热轧板,其化学成分(∕%)为:0.02C、0.01Si、0.10Mn、0.013P、0.011S、0.0020 N、0.001Nb、0.0003 V、0.064Ti、0.028Al、0.029Cu、0.023Cr、0.0008 Mo、0.014Ni。其原始厚度为 3.13 mm,奥氏体区进行轧制的终轧温度为 910 °C。在实验室条件下用 65%、70%、75%、80% 四种总压下量冷轧实验材料,材料在轧制之后的厚度分别为 1.10、0.94、0.78、0.64 mm。再将其中 65%、70%、75% 三种压下量的试样分别在实验室罩式退火炉中以 660、700、740、780 °C 四种退火温度进行罩式退火;将 80% 压下量的材料在氮气保护条件下进行 700 °C 保温 5 h^[3] 退火。将完成退火的实验材料在实验室轧机下进行压下量小于 1% 的平整轧制之后,在 Zwick/roll 材料力学性能试验机上进行拉伸

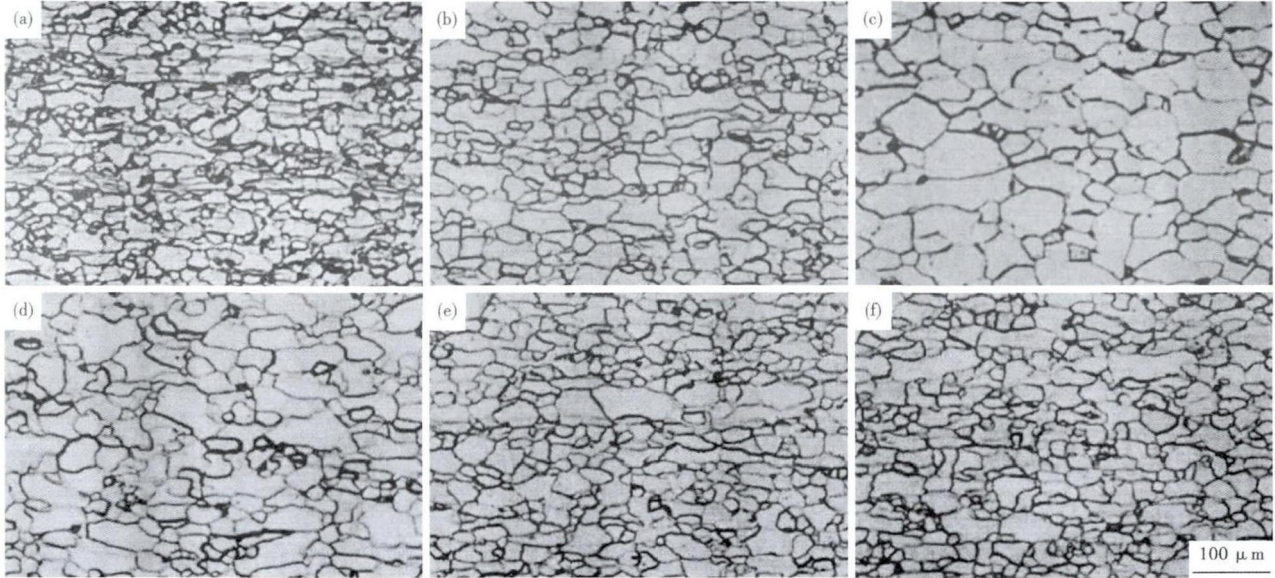


图 1 Ti-IF 钢冷轧板退火后组织形貌:(a)70% ,660 °C;(b)70% ,700 °C;(c)70% ,780 °C;(d)65% ,700 °C;(e)75% ,700 °C;(f)80% ,700 °C

Fig. 1 Morphology of structure of annealed Ti-IF steel cold rolled sheet: (a) 70% , 660 °C; (b) 70% , 700 °C; (c) 70% , 780 °C; (d) 65% , 700 °C; (e) 75% , 700 °C; (f) 80% , 700 °C

应变硬化指数(n 值)、塑性应变比(r 值)的测试。并且取样在实验室 Zeiss Axioplan 万能金相光学显微镜上进行金相观察。随后,分别在上述实验中取样,经过电解抛光后在实验室配置了 EBSD 探头的 NOVA400 Nano SEM 场发射扫描电子显微镜上进行织构数据采集。

2 实验结果与分析

从图 1 中可以看出,随着冷轧压下率的增加,材料中产生的晶格畸变数量增加,从而使再结晶退火过程中的形核点增多,退火后的晶粒有所细化。其中 75% 和 80% 压下量的晶粒大小差距不大,这个可能是由于退火保温时间为 5 h,给了晶粒足够的长大时间,故晶粒大小差距不明显。随着退火温度的升高,再结晶过程中的原子扩散能力增强,有利于退火

再结晶晶界的迁移,故退火后的晶粒明显长大。

2.1 冷轧压下率对于材料织构和性能的影响

图 2 是 700 °C 条件下罩式退火后各压下率试样的 1/2 板厚处 $\Phi_2 = 45^\circ$ 的 ODF 截面图。从图 2 中可以看到,经过 700 °C 的再结晶退火之后,材料的最强织构类型都在 $\{111\} // ND$ 轴附近,但各个冷轧压下量的样品织构强度上有一定区别。随着冷轧压下量增大,材料在 $\{111\} // ND$ 轴上的织构强度呈增加趋势,在冷轧压下率为 75% 时达到最大,其最强点达到了 11 级。之后冷轧压下率再增加,材料在 $\{111\} // ND$ 轴上的织构强度反而有所减小。

图 3 是相对应的 α 取向线 $\langle 110 \rangle // RD$ 以及 γ 取向线 $\langle 111 \rangle // ND$ 上织构的分布图。从图 3 中可以看出,当在 α 取向线上,冷轧压下量为 65% 时,退

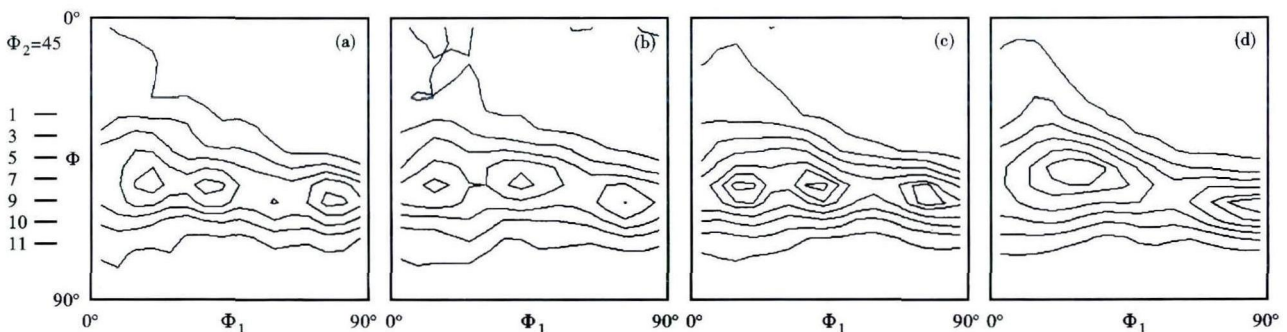


图 2 冷轧压下量 60% (a), 70% (b), 75% (c), 80% (d) 的 Ti-IF 钢冷轧板 700 °C 退火的 $\Phi_2 = 45^\circ$ 的取向分布函数 (ODF) 图
Fig. 2 Orientation distribution function (ODF) drawing with sectional $\Phi_2 = 45^\circ$, Ti-IF steel cold rolled sheet with reduction 60% (a), 70% (b), 75% (c) and 80% (d), annealed at 700 °C

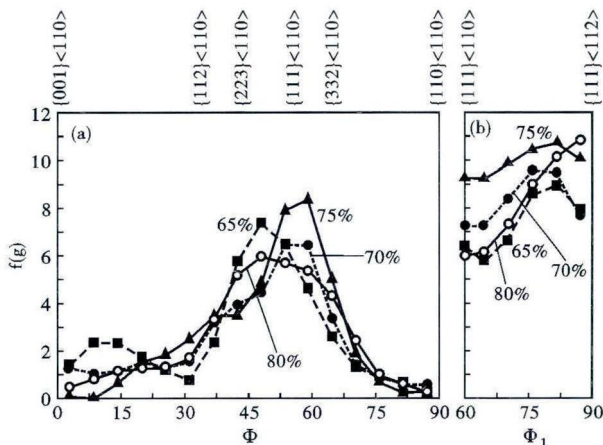


图 3 冷轧压下率对于 Ti-IF 冷轧板 α (a)、 γ (b)取向线强度分布的影响(700 °C退火)

Fig. 3 Influence of cold rolling reduction on oriented intensity scatter function of α (a) and γ (b) oriented line, Ti-IF steel cold rolled sheet (annealed at 700 °C)

火后样品的织构峰值集中在 $\{223\} \langle 110 \rangle$ 附近;当冷轧压下量达到 70% 时,样品织构的峰值移动到了 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 附近,对成品的深冲性能有利;继续提升冷轧压下量到 75%,样品织构的峰值集中区域没有太大的变动,仍然在 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 附近,但是强度较 70% 压下量时有所提高;当冷轧压下量达到 80% 时,样品织构的峰值又再次回到了 $\{223\} \langle 110 \rangle$ 附近,集中在 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 至 $\{332\} \langle 110 \rangle$ 的范围内且织构强度较 75% 的时候有所降低。根据相关文献[3-4],出现这种现象的原因是由于 $\{223\} \langle 110 \rangle$ 是较为稳定的织构,随着冷轧压下量的增加,再结晶退火后的最终织构将按照 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 、 $\{554\} \langle 225 \rangle$ 、 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 、 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{223\} \langle 110 \rangle$ 的顺序,最终向着 $\{223\} \langle 110 \rangle$ 织构的方向发展^[5]。对于实验材料,在压下率增大的过程中,再结晶退火后织构先是向 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 的方

向转变,当冷轧压下量超过 75% 时,织构将向 $\{223\} \langle 110 \rangle$ 方向转变。

从图 4 中可知,在 65% 至 75% 阶段材料的 r 值随着冷轧压下率的增加而增加; n 值随着压下率的增加呈现先增加后减小的趋势。这与材料结构的分析结果相符,由于冷轧压下量在 65% 至 75% 范围内增加的过程中,材料的织构朝着 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 方向转变,使材料的 $\{111\}$ 织构比例上升,使得 n 值、 r 值增大;在冷轧压下率超过 75% 后材料的织构朝着 $\{223\} \langle 110 \rangle$ 方向转变,使材料的 $\{111\}$ 织构比例下降,最终导致 n 值、 r 值下降。

2.2 退火温度对于材料织构和性能的影响

图 5 为在冷轧压下率为 70% 条件下,不同退火温度试样的 1/2 板厚处 $\Phi_2 = 45^\circ$ 的 ODF 截面图。从图 5 中可见,随着退火温度的升高,样品在 γ 取向线 $\langle 111 \rangle // ND$ 附近的织构强度逐渐升高,由 660 °C 时的 9 级强度提升到 780 °C 时的 11 级强度,且整体织构向着 γ 取向线聚集。

图 6 为其相对应的 α 取向线 $\langle 110 \rangle // RD$ 以及 γ 取向线 $\langle 111 \rangle // ND$ 上织构的分布图。随着退火温度的升高,从 660 °C 到 700 °C,在 α 取向线上织构的集中区域由 $\{223\} \langle 110 \rangle$ 附近向 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 附近转变,从 700 °C 到 780 °C, α 取向线上织构的集中区域没有发生大幅变化,仅仅是 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 织构的强度由 6 级提升到了 10 级。出现这种变化的原因是由于样品在经冷轧后,产生大量的 $\{112\}$ 、 $\{110\}$ 织构,并且在再结晶退火过程中向着 $\{111\}$ 织构转变^[6]。在退火温度为 660 °C 时,由于退火温度较低,试样本身再结晶不完全,织构的峰值集中区域介于 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 与 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 之间。当退火温度达到 700 °C 时,试样本身再结晶过程基本完成,织构峰值集中区域在 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 附近。之后,随着退火温度的升高,再结晶过程中试样的织构继续向着 $\{111\}$ 织构转变,从而提高了 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 织构的强度。

在 γ 取向线上,随着退火温度的升高, $\{111\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构强度均呈增大趋势,但在 660 °C 至 740 °C 之间, $\{111\} \langle 110 \rangle$ 织构强度小于 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构;但在 780 °C 时, $\{111\} \langle 110 \rangle$ 织构强度大于 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构。出现

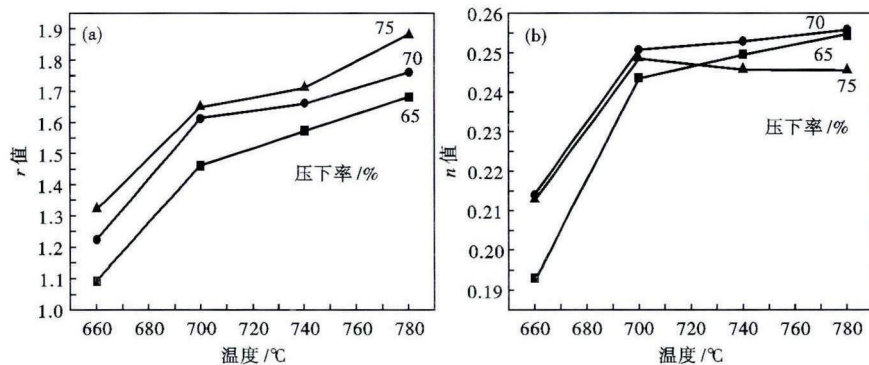


图 4 冷轧压下率对于 Ti-IF 冷轧板 r 值(a)和 n 值(b)的影响

Fig. 4 Influence of cold rolling reduction on r value (a) and n value (b) of Ti-IF steel cold rolled sheet

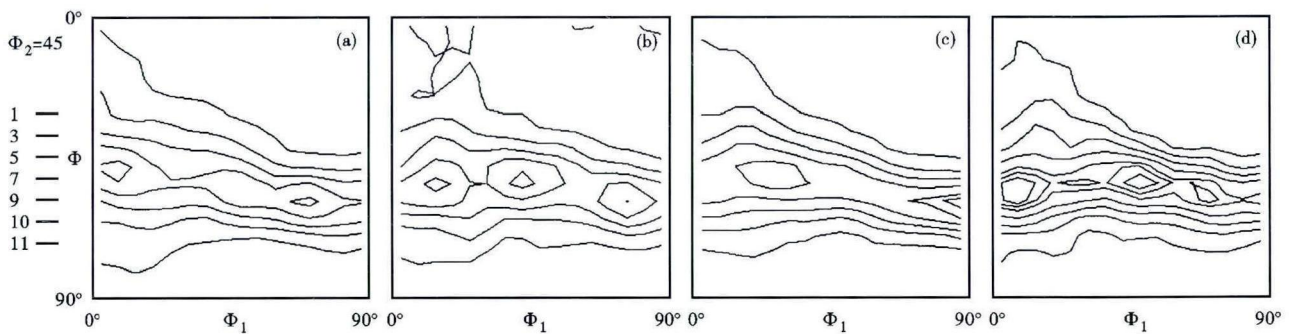


图5 660 °C (a), 700 °C (b), 740 °C (c) 和 780 °C (d) 退火对 70% 压下率的 Ti-IF 钢冷轧板的 $\Phi_2 = 45^\circ$ 的取向分布函数(ODF)图
Fig. 5 Orientation distribution function (ODF) drawing with sectional $\Phi_2 = 45^\circ$, Ti-IF steel cold rolled sheet with reduction 70%, annealed at 660 °C (a), 700 °C (b), 740 °C (c) and 780 °C (d)

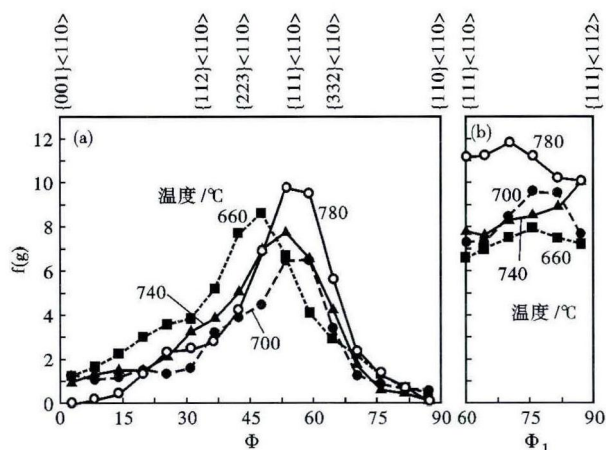


图6 退火温度对于 Ti-IF 钢冷轧板 α (a)、 γ (b) 取向线强度分布的影响(压下率 70%)

Fig. 6 Influence of annealing temperature on oriented intensity scatter function of α (a) and γ (b) oriented line, Ti-IF steel cold rolled sheet (reduction 70%)

这种现象的原因是由于在晶体内部的形变储能的大小关系是: $E_{\{110\} \langle 110 \rangle} > E_{\{111\} \langle 110 \rangle} > E_{\{111\} \langle 112 \rangle} > E_{\{112\}} > E_{\{001\} \langle 110 \rangle} > E_{\{110\} \langle 001 \rangle}$ [7], $\{111\} \langle 112 \rangle$ 取向的晶粒可以通过形变时相同取向晶粒的内部按照“原位”的方式形成, 而 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 取向的晶粒一般是在形变的 $\{111\}$ 晶界上形成的 [8]。因此在再结晶初期 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构要比 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 强; 随着退火温度的升高, 再结晶过程的深入进行, 由于 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 织构的储能比 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 高, 晶粒会优先在 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 取向上生长, 从而使 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 织构的强度高于 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构。

从图4可见, 从 660 °C 到 700 °C, 试样的 n 值和 r 值增幅很大, 这正是由于 660 °C 再结晶不完全, 样品的 $\{111\}$ 织构比例很低, 使得材料的性能不佳。在 700 °C 之后, 随着退火温度的升高, 样品的 $\{111\}$ 织构比例逐渐升高, 使得 n 值 r 值均呈平稳递增趋势。

3 结论

(1) 实验 Ti-IF 钢的冷轧压下率应控制在 75% 左右, 继续增大压下量, 材料退火后的 $\{111\}$ 织构比例反而降低, 影响其成型性能。该钢的退火温度应 ≥ 700 °C, 才能基本完成再结晶过程。

(2) 实验 Ti-IF 钢的 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 、 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 织构在退火温度为 660 ~ 740 °C 时 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构的含量相对较高, 提高退火温度后, $\{111\} \langle 110 \rangle$ 织构的含量将会相对提高。该钢在 660 ~ 780 °C 的退火温度越高, 越有利于提高材料 $\{111\}$ 织构的含量和材料的成型性能。

2012 年国家自然科学基金项目“基于 CSP 热轧带钢生产 HiB 取向硅钢组织演变和织构形成机理的研究”(51274155)

参考文献

- [1] 傅作宝. 冷轧薄钢板生产[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- [2] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理(第2版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] 王昭东, 李自刚, 何晓明, 等. 冷轧压下量对铁素体区热轧 Ti-IF 钢冷轧板的再结晶结构特点和深冲性能的影响[J]. 金属学报, 2000, 36(6): 613-617.
- [4] 郑之旺, 刘庆春, 李叙生, 等. 冷轧压下率对连续退火 Ti-IF 钢组织和织构的影响. 钢铁钒钛[J]. 2010, 31(1): 40-45.
- [5] Karel Elout. Texture Evolution during Cold Rolling and Recrystallisation of IF Steel with Strong $\{111\}$ Hot Band Texture[J]. ISIJ International, 1998, 38(6): 602-609.
- [6] 高鲁峰, 康永林, 吕超, 等. Ti-IF 钢退火再结晶结构的实验研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(22): 45-48.
- [7] Yasunobu Nagataki, Yoshihiro Hosoya. Origin of the Recrystallization Texture Formation in an Interstitial Free Steel[J]. ISIJ International, 1996, 36(4): 451-460.
- [8] 杨平, 李志超, 毛卫民, 等. 钢中 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 再结晶结构的形成[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(3): 46-52.

罗海燕(1962-), 女, 硕士, 高级工程师, 1987 年武汉科技大学(原武汉钢铁学院)毕业, 材料成型过程控制、材料的组织及性能控制研究。E-mail: lhykb1@163.com

收稿日期: 2013-06-14