

## P 和 B 对高强度 Ti-IF 钢再结晶组织和力学性能的影响

彭堃 宋新莉 朱微微 朱上 贾涓 袁泽喜

(武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081)

**摘要** 利用电子背散射技术(EBSD)等研究了 4 种 P-B 成分(‰: 0.076 ~ 0.110P 和 0 ~ 0.005 2B)对 Ti-IF 钢(‰: 0.001 ~ 0.003C, 0.06 ~ 0.08Si, 0.32 ~ 0.38Mn, 0.002 ~ 0.008S, 0.036 ~ 0.076Ti, 0.002 0 ~ 0.004 0N) 0.75 mm 冷轧板 810 °C 120 s 空冷退火后再结晶组织、强度、伸长率、加工硬化指数( $n$ )和塑性应变比( $r$ )的影响。结果表明, 4 种 P-B 成分冷轧 Ti-IF 钢退火后均发生了完全再结晶, 获得多边形铁素体晶粒, 主要组织组分是  $\{111\} <112>$  和  $\{111\} <110>$ 。当 P 含量较高(0.110%)、B 含量较低(0.000 6%)时钢的强度较高(抗拉强度 387.5 MPa, 屈服强度 260 MPa), 但  $r$  值较低(1.5); P、B 含量适量(0.089% P、0.005 2% B), 强度和  $r$  值均较高(抗拉强度 367.3 MPa, 屈服强度 201.5 MPa,  $r$  值 1.95)。

**关键词** 高强度 Ti-IF 钢 磷 硼 再结晶组织 力学性能

## Effect of P and B on Recrystallization Textures and Mechanical Properties of High Strength Ti-IF Steel

Peng Kun, Song Xinli, Zhu Weiwei, Zhu Shang, Jia Juan and Yuan Zexi  
(Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education,  
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

**Abstract** The effect of 4 group P-B content (‰: 0.076 ~ 0.110P, 0 ~ 0.005 2B) on recrystallization textures, strength, elongation, work hardening exponent ( $n$ ) and plastic strain ratio ( $r$ ) of Ti-IF steel (‰: 0.001 ~ 0.003C, 0.06 ~ 0.08Si, 0.32 ~ 0.38Mn, 0.002 ~ 0.008S, 0.036 ~ 0.076Ti, 0.002 0 ~ 0.004 0N) 0.75 mm cold rolled sheet after annealing at 810 °C for 120 s air cooling has been studied by using electron backscatter diffraction (EBSD) technique etc. Results show that all annealed Ti-IF steels with 4 group P-B content have fully recrystallized to get polygonal ferrite with main texture components  $\{111\} <112>$  and  $\{111\} <110>$ . As higher P content (0.110%) and lower B content (0.000 6%) the strength of steel is higher (tensile strength 387.5 MPa, Yield strength 260 MPa) but the  $r$  value is lower (1.5); as with suitable P and B content (0.089% P and 0.005 2% B), the strength and  $r$  value are all higher (tensile strength 367.3 MPa, yield strength 201.5 MPa and  $r$  value 1.95).

**Material Index** High Strength Ti-IF Steel, Phosphorus, Boron, Recrystallization Texture, Mechanical Properties

21 世纪最受关注的环境问题之一是汽车排放 CO<sub>2</sub> 的增加。汽车所排放的 CO<sub>2</sub> 中 90% 是在行驶中产生的, 因此耗油量越大排放的 CO<sub>2</sub> 就越多<sup>[1]</sup>。如果车身板减薄至 0.7 ~ 0.8 mm, 汽车自重减少 15% ~ 20%, 可降低油耗 8% ~ 15%<sup>[2]</sup>。为了减轻汽车的耗油量, 世界各国将实现汽车的轻量化提上了日程。由此, 高强度 IF(无间隙原子)钢(Interstitial-free high-strength steels)应运而生, 其具有更高的强度与优良的深冲性能, 被广泛应用于制造汽车面板。

高强度 IF 钢主要是通过添加 P、Si、Mn 等元素来实现固溶强化, 其中 P 是最经济且固溶强化作用最大的元素, 并且不至于损害过多的深冲性能。然而, 高强度 IF 钢通过添加 Ti 或 Nb 后固定了钢中的

C 和 N, 晶界变得清洁, 使晶界强度降低, 而且 P 元素很容易偏聚到晶界, 这是导致钢板二次冷加工脆性的主要原因。有研究表明<sup>[3-5]</sup>, 在 IF 钢中加入 B 元素, 能够显著降低韧脆转变温度, 改善了钢的冷加工脆性, 但会一定程度影响深冲性能。

衡量高强度 IF 钢的深冲性能最重要的指标是塑性应变比( $r$ 值)。 $r$ 值越高, 钢的深冲性能越好。 $r$ 值与钢的微观组织有关, 再结晶退火后形成强烈的  $<111> // ND$  组织有利于深冲性能, 而  $<100> // ND$  组织是有害的。目前 P、B 含量对高强度 IF 钢的力学性能与再结晶组织的影响规律还不清楚。针对本实验冶炼的几种不同 P、B 含量的高强度 Ti-IF 钢, 研究在相同的工艺下, P、B 含量对再结晶组织与力学性能的影响。

### 1 材料及实验方法

在实验室 50 kg 真空炉中冶炼了 4 种不同 P、B 含量的高强度 Ti-IF 钢,化学成分见表 1,其中 0<sup>#</sup>钢为不含 B 的对比试样,1<sup>#</sup>钢比其余实验钢含 P 略高。将钢锭加热到 1 200 ℃ 保温 2 h,将钢板热轧至厚度为 3.5 mm,终轧温度为 920 ℃,热轧板酸洗以后冷轧至 0.75 mm,压下率为 75%,最后在盐浴炉中模拟连续退火,退火温度为 810 ℃,保温 120 s 后空冷至室温。将处理后的钢板加工成标准拉伸试样,在万能试验机上测量力学性能。借助 FEI 公司 NOVA400 Nano-SEM 场发射扫描电镜上配置的电子背散射衍射仪 (EBSD) 对退火后的试样进行织构检测。

表 1 实验 Ti-IF 钢化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of test Ti-IF steel /%

编号	C	Si	Mn	P	Als	S	N	B	Ti
0	0.003	0.07	0.34	0.076	0.022	0.006	0.004 0	0	0.076
1	0.002	0.06	0.38	0.110	0.076	0.008	0.002 0	0.000 6	0.036
2	0.001	0.08	0.33	0.085	<0.03	0.002	0.002 2	0.002 6	0.041
3	0.001	0.06	0.32	0.089	<0.03	0.002	0.002 0	0.005 2	0.041

### 2 实验结果及分析

#### 2.1 微观形貌

图 1 所示为 4 种实验钢在 810 ℃ 退火 120 s 后的取向成像图。从图 1 中可以看出,4 种钢均发生了完全再结晶,获得多边形铁素体晶粒,晶粒大小不均匀。同时可以发现,不含 B 的 0<sup>#</sup> 及含 B 量较高的 3<sup>#</sup> 试样中大部分晶粒取向为 <111> // ND, 而含 P 量较高,添加微量 B 的 1<sup>#</sup> 试样大多数晶粒取向为 <001> // ND, <111> // ND 晶粒数量较少。

#### 2.2 再结晶织构

图 2 为实验钢退火后  $\varphi_2 = 45^\circ$  的 ODF 截图。从图 2 中可以发现,4 种实验钢均有不同程度的 {111} 面织构。不含 B 的 0<sup>#</sup> 钢获得比较均匀的 {111} 面织构,极密度等高线最大值为 9.08,出现在  $\gamma$  取向线上  $\varphi_1 = 0^\circ$  的位置,对应于 {111} <110> 组分。含 B 的 3 种钢中,随着 B 含量的增加,极密度等高

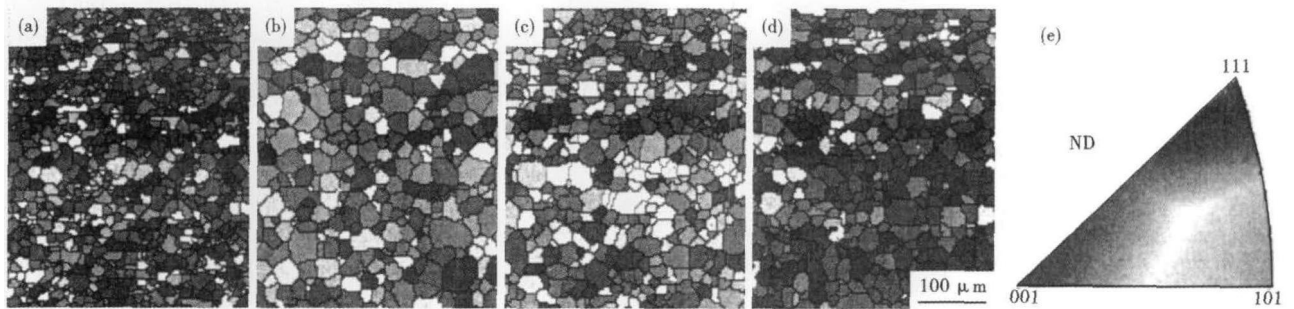


图 1 实验高强度 Ti-IF 钢 810 ℃ 120 s 退火后的取向成像图/%: (a) 0.076P-0B; (b) 0.110P-0.000 6B; (c) 0.085P-0.002 6B; (d) 0.089P-0.005 2B; (e) 反极图

Fig. 1 Orientation imaging maps of high strength Ti-IF steel annealed at 810 ℃ for 120 s, /%: (a) 0.076P-0B; (b) 0.110P-0.000 6B; (c) 0.085P-0.002 6B; (d) 0.089P-0.005 2B; (e) IPF

线越来越向  $\gamma$  取向线上聚集,但 {111} 面织构不均匀,且聚集出现在  $\varphi_1 = 30^\circ$  和  $60^\circ$  的位置,对应于 {111} <112> 组分。随着 B 含量的增加,{111} <112> 织构组分的极密度依次增强,最高达到 21.16。

图 3 为不同 P、B 含量高强度 IF 钢  $\gamma$  取向线上的强度分布图,从图 3 中可以看出,1<sup>#</sup> 实验钢  $\gamma$  取向线上的强度最弱,在  $\varphi_1 = 30^\circ$  和  $90^\circ$  处出现极大值,对应于 {111} <112> 织构组分,在  $\varphi_1 = 0^\circ$  和  $60^\circ$  附近出现极小值,对应于 {111} <110> 织构组分。2<sup>#</sup> 钢的  $\gamma$  取向线上的强度比 1<sup>#</sup> 钢强,同样极大值出现在 {111} <112> 织构组分,极小值出现在 {111} <110> 织构组分,整个曲线的趋势和 1<sup>#</sup> 钢相比变

化不大。3<sup>#</sup> 钢的  $\gamma$  取向线上的强度是含 B 实验钢中最强的,与 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 钢相同,极大值也出现在 {111} <112> 织构组分,极小值出现在 {111} <110> 织构组分。随着 B 含量的增加,在 {111} <112> 织构组分强度增强明显,在 {111} <110> 织构组分强度增强不大,所以增大了整个曲线波动性。不含 B 的 0<sup>#</sup> 钢的  $\gamma$  取向线上的强度比 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 钢强,但比含 B 量最高的 3<sup>#</sup> 钢弱。与 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 钢相反的是在 {111} <110> 织构组分处出现波峰,在 {111} <112> 织构组分处出现波谷。但曲线的波动性较平稳, $\gamma$  取向线上的强度均匀性是 4 个试样中最好的。

由图 3 可知,P、B 含量对高强度 IF 钢 {111} 面织构及其组分有显著影响。不含 B 时,含 P 高强度

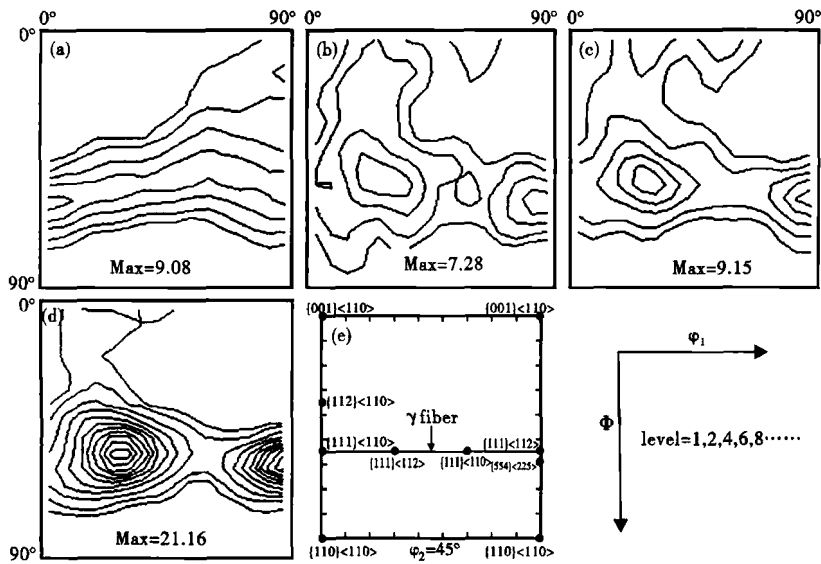


图 2 实验高强度 Ti-IF 钢的 ODF (取向分布函数) 截面 ( $\varphi_2 = 45^\circ$ ), /% : (a) 0.076P-0B; (b) 0.110P-0.0006B; (c) 0.085P-0.0026B; (d) 0.089P-0.0052B; (e) 各组织组分在  $\varphi_2 = 45^\circ$  的 ODF 截面对应位置

Fig. 2 Orientation distribution function (ODF) sections ( $\varphi_2 = 45^\circ$ ) of test high strength Ti-IF steel, /% : (a) 0.076P-0B; (b) 0.110P-0.0006B; (c) 0.085P-0.0026B; (d) 0.089P-0.0052B; (e) Corresponding location of each texture component at ODF section with  $\varphi_2 = 45^\circ$

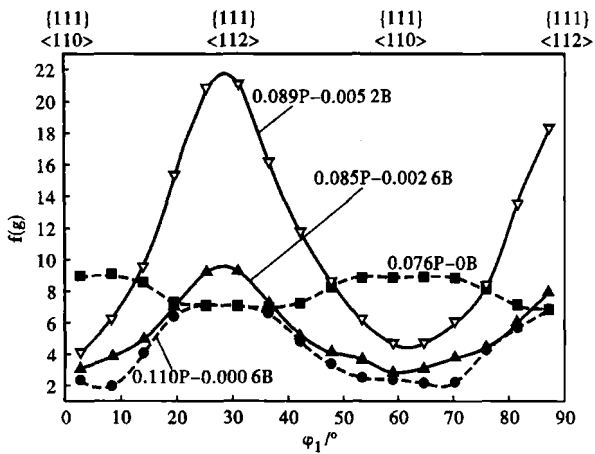


图 3 实验高强度 Ti-IF 钢  $\gamma$  取向线强度分布图

Fig. 3 Intensity scatter diagram of  $\gamma$  fiber of test high strength Ti-IF steels

IF 钢主要获得  $\{111\} \langle 110 \rangle$  组分为主的  $\gamma$  纤维组织,但是当含 P 高强度 IF 钢中添加 B 以后,  $\{111\} \langle 112 \rangle$  组织比例相对较高。文献[6]报道,高强度 IF 钢冷轧后主要由强的  $\{001\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{112\} \langle 110 \rangle$  组织以及弱的  $\gamma$  纤维组织构成。再结晶退火后  $\{001\} \langle 110 \rangle$  和  $\{112\} \langle 110 \rangle$  组织逐渐消失并形成强烈  $\gamma$  纤维组织构成,主要由  $\{111\} \langle 112 \rangle$  与  $\{111\} \langle 110 \rangle$  两类组织组成。但是,当 IF 钢中 P 元素含量较高时, P 偏聚到晶界能够抑制  $\{111\}$

$\langle 112 \rangle$  的进展<sup>[7]</sup>。因此 0<sup>#</sup> 钢中的  $\{111\} \langle 112 \rangle$  受到了抑制,含量甚至低于  $\{111\} \langle 110 \rangle$ 。而在含 B 高强度 IF 钢中 B 与 P 会发生竞争晶界偏聚<sup>[8]</sup>。因此 1<sup>#</sup> ~ 3<sup>#</sup> 实验钢中, B 的添加会抑制 P 在晶界的偏聚,使 P 在晶界的偏聚量减少,削弱了 P 对  $\{111\} \langle 112 \rangle$  组织的抑制作用。另外, Nagataki 等<sup>[9]</sup>研究了含 B 添加 IF 钢及未含 B 的 IF 钢中再结晶组织演变发现,含 B 的 IF 中 B 的晶界偏聚增大了晶界强度,冷轧变形时,基体变形不均匀,变形储存能增大,因此冷轧钢再结晶退火过程中基体中原位形核得到较多的  $\{111\} \langle 112 \rangle$  取向的再结晶晶粒。

2.3 力学性能

图 4 为 P、B 含量对高强度 Ti-IF 的力学性能的影响。由图 4 可见,随着钢中 P 及 B 含量不同屈服强度与抗拉强度变化幅度较大,而塑性应变比  $r$  值的变化规律与强度变化相反。不含 B 的 0<sup>#</sup> 钢屈服强度 ( $R_{e1}$ ) 和抗拉强度 ( $R_m$ ) 最低,  $R_{e1}$  为 175 MPa,  $R_m$  为 345 MPa, 塑性应变比  $r$  值为 1.7 左右。而含 P 量为 0.110%, B 含量只有 0.0006% 的 1<sup>#</sup> 钢屈服强度和抗拉强度最大,分别达到 260 MPa 和 387.5 MPa, 但是  $r$  值只有 1.5。随着钢中 B 含量的继续增加, P 含量降低,屈服强度和抗拉强度逐渐呈下降趋势。B 含量超过 0.0026% 后,强度下降趋势变得平稳, P 含量为 0.089%, B 含量为 0.0052% 的 3<sup>#</sup> 钢屈服强度 201.5 MPa, 抗拉强度 367.5 MPa,  $r$  值达到 1.95。

4 种钢的伸长率和应变硬化率  $n$  值 (加工硬化指数或应变硬化指数) 随钢中 P 和 B 含量不同波动不大,伸长率为 32% ~ 35%,  $n$  值为 0.25 ~ 0.26。由图 4 可知,高强度 IF 钢中添加适当的 P、B 可以获得强度较高及塑性应变比  $r$  值也较高的钢,有利于同时获得好的深冲性能和强度高的钢种。高强度 IF 钢中 P 含量越高, B 含量较低时,钢的屈服强度和抗拉强度就越大。P 在高强度 IF 钢主要起到固溶强化作用,以间隙固溶形式存在的 P 造成了晶格点阵畸变,形成的应力场与位错应力场发生弹性交互作用,阻碍了位

4 种钢的伸长率和应变硬化率  $n$  值 (加工硬化指数或应变硬化指数) 随钢中 P 和 B 含量不同波动不大,伸长率为 32% ~ 35%,  $n$  值为 0.25 ~ 0.26。

由图 4 可知,高强度 IF 钢中添加适当的 P、B 可以获得强度较高及塑性应变比  $r$  值也较高的钢,有利于同时获得好的深冲性能和强度高的钢种。高强度 IF 钢中 P 含量越高, B 含量较低时,钢的屈服强度和抗拉强度就越大。

P 在高强度 IF 钢主要起到固溶强化作用,以间隙固溶形式存在的 P 造成了晶格点阵畸变,形成的应力场与位错应力场发生弹性交互作用,阻碍了位

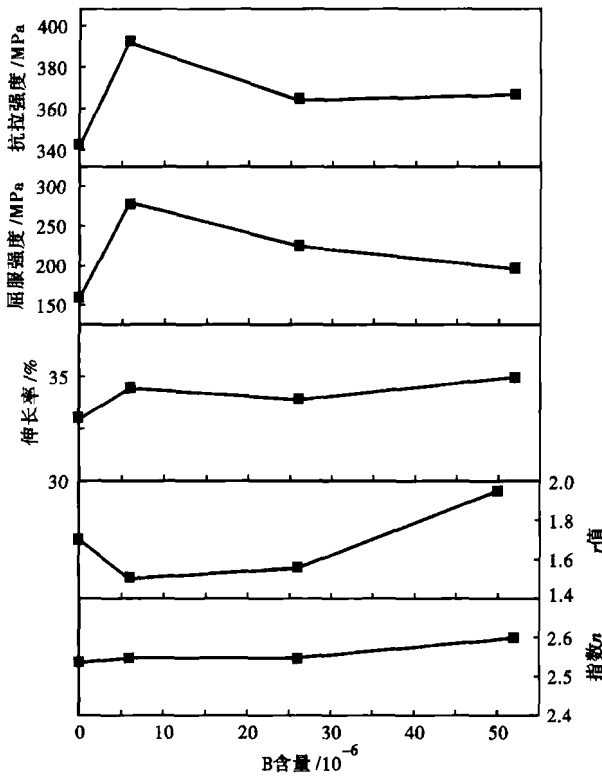


图 4 退火高强度 Ti-IF 钢的力学性能: r 值- 塑性应变比; n 指数- 应变硬化指数

Fig. 4 Mechanical properties of annealed high strength steel Ti-IF; r value- plastic strain ratio; n exponent- strain-hardening exponent

错的运动,提高强度。同时,P 也是一种易于发生晶界偏聚的元素,也会与基体中 Ti,Fe 反应形成 FeTiP 析出,均会降低 P 在钢中的固溶强化效果。

参考文献

[1] 瀬沼武秀,高橋学. 環境負荷低減に貢献する自動車用鋼板 [J]. まてりあ,2005,44(6):489-493.

[2] 李守华,李俊. 汽车用高强度 IF 钢的研究进展 [J]. 上海金属, 2007,29(5):66-70.

[3] 須田豊治,荒木健治,和田守弘. 日本鉄鋼協会第 106 回講演大会講演概要集(Ⅱ)その 7 [J]. 鉄と鋼,1983,69:S1365.

[4] 高橋延幸,柴田政明. 日本鉄鋼協会第 100 回講演大会講演概要集その 11 [J]. 鉄と鋼,1980,66:S1127.

[5] Yasuhara E, Sakata K, Kata T, et al. Effect of Boron on the Resistance to Secondary Working Embrittlement in Extra-low-C Cold-rolled Steel Sheet [J]. ISIJ International, 1994, 34(1):99-107.

[6] Ray R K, Jonas J J, Hook R E. Cold Rolling and Annealing Textures in Low Carbon and Extra Low Carbon Steels [J]. International Materials Reviews, 1994, 39:129-172.

高强度 Ti-IF 钢中添加适量的 B,一方面 B 的偏聚会强化晶界,另外 B 会与 P 在晶界发生竞争偏聚,降低 P 在晶界的浓度,使更多的 P 固溶在晶内,更好地起到固溶强化效果。

另外,P、B 含量的变化对塑性应变比 r 值影响也较明显,4 种实验钢中 P 与 B 含量适当的 3# 钢获得较高的强度及塑性应变比 r 值,而 P 含量较高、B 含量相对较低的 1# 钢得到较高的强度但 r 值较低,P 的晶界偏聚及 FeTiP 析出对 4 种实验钢强度及 r 值影响规律有待进一步研究。

3 结论

(1)不同 B 含量的高强度 Ti-IF 钢退火后均为多边形铁素体晶粒,高强度 IF 钢中 P 含量较高时, {111} 面织构强度降低,而 P、B 含量适当,得到较高强度的 <111> // ND 织构,主要织构组分是 {111} <112> 和 {111} <110>。

(2)含 P 高强度 Ti-IF 钢中 P、B 含量对强度及塑性应变比 r 值影响较显著。钢中 P 含量为 0.110%,B 含量为 0.0006% 时,屈服强度和抗拉强度分别达到 260 MPa 和 387.5 MPa,但是 {111} 面织构最大强度只有 7.28,塑性应变比 r 值只有 1.5,而 P 含量为 0.089%,B 含量为 0.0052% 时,钢的屈服强度和抗拉强度分别为 201.5、367.5 MPa, {111} 面织构强度最大为 21.16,r 值达到 1.95。

国家自然科学基金 51101114 和 50901054 资助项目

[7] 贾涓,宋新莉,袁泽喜,等. P、Ti 对高强 IF 钢 {111} 面织构的影响 [J]. 材料研究学报,2011,19(5):656-660.

[8] Song Xinli, Yuan Zexi, Jia Juan. Boron and Phosphorus Segregation Behavior at Grain Boundary in a Ti-IF Steel After Annealing [J]. Advanced Materials Research, 2011, 152-153:320-325.

[9] Nagataki Y, Hosoya Y. Origin of the Recrystallization Texture Formation in an Interstitial Free Steel [J]. ISIJ International, 1996, 36(4):451-460.

彭堃(1984-),男,硕士生,高性能金属材料强韧化研究。

收稿日期:2012-10-15

欢迎全国各冶金机械及相关行业  
 在《特殊钢》杂志上刊登宣传广告