

·综述·

## 微合金化超深冲-无间隙原子(IF)钢生产技术的进展

张鹏 汪凌云

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

任正德

(重庆科技学院, 重庆 400050)

**摘要** 无间隙原子(IF)钢的C、N含量均在 $30 \times 10^{-6}$ 以下,并用微量Ti(过剩Ti 0.02%~0.04%)或Ti-Nb(过剩Nb < 0.02%)合金化以固定钢中残留C和N,使钢成为无间隙原子状态,从而具有优异的深冲性能和非时效性,广泛应用于汽车工业。叙述了IF钢的冶炼和成分控制,热轧,一次和二次冷轧技术,退火工艺;介绍IF钢生产的基础理论研究进展和讨论了IF钢的二次加工脆性、性能的稳定性的稳定性。

**关键词** 无间隙原子钢板 冶炼 轧制 退火 进展

## Advance on Process Technology of Extra-deep Drawing - Interstitial Atom Free (IF) Sheet Steel

Zhang Peng and Wang Lingyun

(College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

Ren Zhengde

(Chongqing College of science and technology, Chongqing 400050)

**Abstract** As both C and N content in steel are no more than  $30 \times 10^{-6}$  and the steel is turned into interstitial atom free status by added micro Ti (excess Ti 0.02%~0.04%) or Ti-Nb (excess Nb < 0.02%) alloying to compound residual C and N in steel, the interstitial atom free (IF) sheet steel has excellent deep drawing properties and non-ageing behavior, it is widely used in auto industry. The steelmaking process and chemical composition control, hot rolling, first and second cold rolling technology and annealing process for the IF steel are summarized, the progress of foundation theories for IF steel production is presented, and the secondary working embrittlement and property stability of IF steel are discussed in this paper.

**Material Index** Interstitial Atom Free Sheet Steel, Steelmaking, Rolling, Annealing, Advance

微合金化超深冲钢也称为无间隙原子钢(IF steel-Interstitial atom free steel)。通常钢中添加元素的原子以间隙和固溶两种方式溶入钢的晶格点阵中。形成间隙固溶时,间隙原子必须比铁原子体积小,因此它们在铁原子之间比较易移动,同时在钢中铁原子分布有较多的晶格缺陷——位错,间隙原子较易集中在这些位置。当钢发生变形时,铁原子会由于应力的作用发生位移,同时位错也会发生运动。如果位错处有间隙原子,就需要很大的能量才会发生移动,与没有间隙原子处的位错运动相比,变形较小,造成不均匀变形,使钢的塑性降低<sup>[1,2]</sup>。

现代冶炼技术可以使钢中的间隙原子C、N降低到超低水平, $C < 30 \times 10^{-6}$ ,  $N < 30 \times 10^{-6}$ ,再加微量Ti或Ti-Nb来固定钢中残留C和N,即可生产出无间隙原子(IF)钢。由于IF钢,没有间隙原子,因此具有优异的深冲性能和非时效性,在以

汽车(尤其是轿车)工业为代表的现代工业中得到了大量的应用。目前主要用于汽车极深冲级(EDDQ)和超深冲级(SEDQQ)冲压件(轿车覆盖件)的生产。要求钢板性能高度稳定,性能参数分散度小,屈服比低,塑性应变比 $r$ 值及加工硬化指数 $n$ 值高。IF钢优异的深冲性能主要来源于其具有(111)织构<sup>[3,4]</sup>。

20世纪90年代以来,随着冶金生产技术的进步和汽车工业的发展,IF钢得到了迅速发展。以IF钢为基础发展起来的深冲热镀锌IF钢板、深冲高强度烘烤硬化板等系列,已形成了第三代汽车冲压钢板。IF钢的生产已经成为一个国家汽车钢板发展水平的标志,降低生产成本并开发出物美价廉的品种是目前IF钢研究和生产的趋势<sup>[5-7]</sup>。

### 1 IF钢的生产工艺要点

IF钢的生产工艺流程为转炉冶炼→RH真空

脱气→连铸→热轧→冷轧→退火→平整。生产过程的每一步工序,都对 IF 钢的性能产生影响。为了获得优异的深冲性能,应特别掌握下列三个关键因素<sup>[8]</sup>:

- (1) 发展强的(111)退火织构,以获得高的深冲性能;
- (2) 获得足够粗大的均匀的铁素体晶粒,以获得低的  $\sigma_s/\sigma_b$  和高的加工硬化指数(n);
- (3) 控制第二相粒子(碳、氮化物)的析出,以控制时效效应,改善塑性。

## 2 IF 钢的生产技术

### 2.1 微合金化 IF 钢分类及微合金元素在 IF 钢中的作用

微合金化 IF 钢主要分为两类。一类只添加微合金元素钛的 IF 钢,主要成分(%):0.003C、0.04Si、0.15Mn、0.007P、0.004S、0.06Ti、0.001 9N。另一类为复合添加微合金元素钛和铌的 IF 钢,主要成分(%):0.003C、0.04Si、0.15Mn、0.007P、0.004S、0.036Ti、0.011Nb、0.001 9N。

微合金元素 Ti 和 Nb 与 IF 钢中的碳氮结合

成碳氮化物,以第二相粒子的形式析出,固定了钢中残留的 C 和 N,使钢中没有形成间隙原子的碳和氮,成为无间隙原子状态,从而使钢的深冲性能得以提高。

### 2.2 冶炼技术

IF 钢成分设计的基本思想是将钢中间隙固溶的 C、N 原子完全消除。为获得 IF 钢成品钢材的高延展性、高 r 值以及优良的表面性能,要求钢中碳、氮、全氧及夹杂物的含量尽可能低。大量研究表明:IF 钢中的碳、氮含量和微合金元素含量对钢的性能有至关重要的影响,现在先进的炼钢工艺已把钢中的碳氮含量降低到  $30 \times 10^{-6}$  以下。通过热力学分析和对析出物的 TEM 分析表明,由于碳硫析出物的存在,S 在固定 C 原子方面起到了积极的作用,据此,保持钢中适度的 S/C 比,可充分发挥 S 的作用,以形成有利的固定 C 的产物<sup>[9,10]</sup>。

#### 2.2.1 IF 钢的冶炼成分控制

IF 钢根据各企业在冶炼、连铸、轧钢过程及钢中的其他元素控制标准而定。典型的 IF 钢成分如表 1 所示。

表 1 IF 钢的典型成分/%

Table 1 Chemical composition of typical IF steel /%

项目	C	Si	Mn	P	S	Als	Ti	O	N
企业标准	≤0.003	≤0.03	0.1~0.20	≤0.006	≤0.007	0~0.05	0~0.08	≤0.003 0	≤0.004
内控	≤0.003	≤0.02	0.1~0.20	≤0.006	≤0.007	0~0.04	0~0.08	≤0.003 0	≤0.004
目标	≤0.003	≤0.02	0.15	≤0.005	≤0.006	0.03	0.06	≤0.002 5	≤0.003

#### 2.2.2 冶炼工艺路线

IF 钢的典型冶炼工艺路线为:铁水预处理脱硫→复吹转炉→RH/TB 精炼→板坯连铸。

铁水脱硫,采用喷吹金属镁粉粒和钝化的活性石灰对铁水进行脱硫,要求处理后入转炉的铁水中  $S \leq 0.003\%$ 。复吹转炉冶炼采用精料废钢和活性石灰(硫的质量分数  $\leq 0.040\%$ )冶炼,冶炼全程底吹氩气,钢包内预加活性石灰,出钢过程不脱氧,只进行锰合金化处理,采用无碳包衬的钢包盛装钢水。对复吹转炉冶炼的粗钢成分要求如表 2 所示。

#### 2.2.3 RH/TB 真空精炼

二次精炼是近年来发展和普及的一项冶炼新技术。由转炉或电弧炉冶炼的钢水再在钢包中进行以调温、脱气、去夹杂、变性处理、成分微调及均

表 2 复吹转炉冶炼粗钢成分要求/%

Table 2 Requirement for chemical composition of raw molten steel melting by combined blown converter /%

C	Si	Mn	P	S	O	N
≤0.03	≤0.02	0.10~0.20	≤0.007	≤0.006	0.04~0.06	≤0.002 5

匀化为目的第二次冶炼,称为精炼,或叫二次冶金。随着钢铁生产装备的不断进步,提供了生产“洁净钢”的可能性。通常采用顶吹氧循环式真空脱气方法(RH/TB)<sup>[11,12]</sup>精炼 IF 钢。通过该技术,可以使钢中的有害元素及夹杂得以控制和去除,提高钢的纯净度,确保钢中的成分得到有效控制。IF 钢冲压时,在外力作用下,间隙原子或夹杂周围是微空洞有可能合并、长大以至断裂。所以,IF 钢精炼工序的任务是钢水的洁净化、夹杂物的形

态控制,偏析控制的最优化以及微合金化和成分微调。

研究表明,IF钢冷轧板表面缺陷是由夹杂物引起的,夹杂物为 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 系的复杂氧化物,其来源很可能是中间包覆盖渣与浸入式水口内堵塞物的结合物。在轧制过程中,夹杂物的脆性部分被碾碎,呈颗粒状零散分布;塑性部分被碾平,不均匀地分布在铁基体表面上。所以,二次精炼技术对于IF钢是必要的。同时在二次精炼时对成分进行控制:

(1) 脱[C]。采用6级8个泵连续抽真空,真空压力可达0.1 kPa以下,钢水循环量为130 t/min。RH/TB处理IF钢时,采取轻处理和深度处理相结合的真空精炼处理方法,即钢水到RH真空精炼之后,先采用大泵抽真空,当真空度达到1~2 kPa后连续对钢水处理13~15 min。之后采取进一步降低真空度(0.1 kPa),降低 $P_{\text{CO}}$ 分压,加强钢液循环等措施进行深度脱碳。完成脱碳脱氧任务后,再进行脱氧及钛合金化。

(2) [N]的控制。进行全程保护,防止处理过程增[N]是IF钢冶炼过程中[N]控制的有效手段。

(3) 严格控制合金元素含量<sup>[13-15]</sup>。IF钢的碳氮含量很低,通常在钢中加入的合金元素主要为Ti和Nb,Ti和Nb与碳氮结合成碳氮化物,以第二相粒子的形式析出,使钢成为无间隙原子状态,提高了钢的深冲性能。但如果钢中的合金元素过多,不仅增加成本而且还使固溶的钛(或铌)量增多,再结晶温度升高,对产品的性能不利。因此冶炼时应注意适当控制合金元素的添加量,对于加钛IF钢,过剩钛含量以0.02%~0.04%为宜;Nb+Ti复合处理的IF钢,过剩铌以<0.02%为宜。

### 2.3 热轧工艺

热轧板的组织和析出物的形态对IF钢最终性能有很大的影响。热轧得到粗大均匀的铁素体组织和粗大的析出物,有利于r值和塑性的提高;细小弥散的析出物阻碍再结晶和晶粒的长大,对r值不利。当成分不变时,热轧板的组织和析出物的形貌取决于热轧参数,低的板坯加热温度、高温终轧、终轧后快冷、增大热轧压下率、增大变形速率、高温卷取等都有利于提高IF钢的深冲性能。

#### 2.3.1 板坯加热温度及加热速度

为了获得粗大的第二相质点,在加热时应防止其溶解,因此加热温度不宜过高。所以在保证终轧温度的前提下,加热温度应尽量低,一般应在1 050~1 200℃之间。

由于IF钢属于超低碳钢,导热性较好,允许采用较快的加热速度进行加热,一般加热速度应控制在1~3 min/mm之间。

#### 2.3.2 热轧

在奥氏体区变形时,随变形温度的降低流变应力增加,而在两相区变形时,随变形温度的降低流变应力降低。Ti-IF钢的铁素体动态再结晶受变形温度的影响最大,在铁素体变形高温区可以发生动态再结晶,铁素体区变形高温区域的变形抗力显著降低。

IF钢在奥氏体再结晶区热轧时,其道次变形量不能太小(<8%),否则,就会产生奥氏体部分再结晶,形成混晶组织,对IF钢的深冲性能不利。在奥氏体再结晶区热轧总变形量越大,则在轧制时发生的形变-再结晶次数越多,热轧后得到的铁素体晶粒就越均匀,越有利于得到等轴状的铁素体晶粒,研究表明晶粒呈等轴状时有利于IF钢深冲性能的提高<sup>[16]</sup>。

#### 2.3.3 热轧润滑技术

织构分析表明,铁素体区润滑热轧的IF钢具有较强的{111}//ND再结晶织构组分,铁素体区轧制时的润滑条件对低碳加Ti冷轧钢板r值和n值有较显著的影响,通过热轧润滑技术,生产出了r值达到3.0的超级深冲钢<sup>[17,18]</sup>。

#### 2.3.4 卷取温度

研究表明:卷取温度的变化,对TiN、TiS和 $\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$ 粒子的影响不大,但对TiC粒子的影响较大;高温卷取有利于TiC粒子的析出、长大;高温卷取有利于铁素体晶粒的长大;碳含量较高时,会析出较多的TiC粒子。卷取温度的大小,直接影响到第二相质点的析出及析出物的形态、大小、分布,较高的卷取温度有利于第二相质点的析出及粗化,有利于提高IF钢的深冲性能<sup>[19,20]</sup>。

### 2.4 冷轧技术

冷轧工艺主要对IF钢的r值和(111)织构产生较大的影响,在材料成分和热轧工艺一定的条件下,冷轧总压下率增加,有利于深冲性能的提高。目前采用的冷轧工艺主要有:一次冷轧和二

次冷轧。二次冷轧还处于实验研究阶段。

#### 2.4.1 一次冷轧

一次冷轧主要控制总压下率。随着冷轧总压下率的增加,塑性应变比  $r$  值增加,但当总压下率达到 75% 左右时,  $r$  值不增加反而下降,即 IF 钢的  $r$  值随冷变形量的增加会达到一个峰值,随后加大冷变形率,将使  $r$  值降低。所以,一次冷轧的总变形率应控制在 80% 以内<sup>[21,22]</sup>。

#### 2.4.2 二次冷轧

采用两次冷轧技术,在总压下率一定的情况下,两次冷轧压下率的分配是影响 IF 钢深冲性能的关键。实测轧制试件的  $r$  值,得出在总压下率一定时,两次冷轧比一次冷轧的塑性应变比  $r$  值要高;同时得出二次冷轧生产时,一次冷轧阶段的压下率较小,二次冷轧阶段的压下率较大时,可使  $r$  值提高;如果冷轧总压下率适当提高,也可使  $r$  值提高;两次冷轧压下率均为 75% 时,  $r$  值可达 3.2 以上。经两次冷轧及两次退火后,IF 钢的深冲性能获得了明显的良性遗传,在应变硬化指数  $n$  有所提高的情况下,塑性应变比  $r$  超出一次冷轧工艺相应值的 30% 左右<sup>[23]</sup>。

#### 2.5 退火工艺

退火是 IF 钢冷轧板生产中决定最终产品性能的关键工艺,退火工艺参数的不稳定和退火不充分是成品性能不佳、不稳定的一个重要因素。IF 钢的性能随退火加热温度和保温时间的增加而改善。冷轧后可通过 3 种途径实现 IF 钢的再结晶退火:(1) 连续热镀锌;(2) 连续退火;(3) 罩式退火。目前国外 IF 钢的退火主要采用连续退火,国内则主要采用的是罩式退火炉退火。采用连续退火或连续热镀锌,可使 IF 钢各部分组织性能均匀,表面质量更好,并能很方便地控制退火工艺参数,但由于其初期投资大,因此目前国内主要以罩式退火为主。

目前,我国科技工作者<sup>[24-27]</sup>,针对 IF 钢罩式退火炉退火的实际情况,研究并开发了适合罩式退火炉退火工艺,并取得了较好的效果。

罩式退火分为常规罩式退火和全氢罩式退火,退火温度一般为 700~750℃,保温时间常为 4 h 左右。通过该工艺退火后,可使超纯 Ti-IF 深冲钢板的屈强比达到  $\sigma_s/\sigma_b = 0.3 \sim 0.4$ ,应变硬化指数  $n \geq 0.3$ <sup>[24,25,28]</sup>。

### 3 基础理论研究方面的进展

IF 钢在基础理论研究方面已取得了较大的进展:(1) 研究了冷轧压下量对 IF 钢板的纤维织构演变影响,其织构演变主要在  $\{111\}$ //ND、 $\langle 110 \rangle$ //RD、 $\{100\}$ //ND、 $\langle 112 \rangle$ //RD 组分之间;退火时  $\langle 110 \rangle$ //RD 组分一部分转化为  $\{111\}$ //ND,一部分转化为  $\langle 112 \rangle$ //RD。(2) 建立了 IF 钢退火过程中再结晶织构演变的 Monte Carlo 模型,得到了 IF 钢退火过程中形核和长大的机制为定向形核-选择长大。(3) 利用 BP 神经网络算法,开发了 ANN 学习预测系统,用于 IF 钢大生产产品性能的预测,达到了较高的预测精度。(4) 研究了 IF 钢的静态再结晶行为,得到了铁素体静态再结晶激活能为  $Q_{\text{rec}} = 173 \text{ kJ/mol}$ 。(5) 研究了 IF 钢在  $\alpha$ - $\gamma$ - $\alpha$  相变过程中取向对应关系,结果表明: $\alpha + \gamma$  两相区加热过程中, $\gamma$  纤维铁素体晶粒向奥氏体转变较慢,在  $\gamma$ - $\alpha$  转变中新旧相的晶粒取向有确定的对应关系,并提出了说明取向对应关系的转变模型。(6) 研究了 IF 钢表面形貌及组织的变化规律,探讨了超低碳钢韧性断裂中内部孔洞形成机理,并指出超低碳钢中的微孔洞不是主要由夹杂物或第二相粒子产生,而是因为位错的滑移、集聚,在原有损伤处形成。(7) 研究了“IF 钢的再结晶行为”和“无间隙原子钢的沉淀与固溶行为”。(8) “IF 钢冷轧和退火过程中  $\{111\}$ 、 $\langle 110 \rangle$  和  $\{111\}$ 、 $\langle 112 \rangle$  织构的形成研究”<sup>[20,29-32]</sup> 等。

### 4 存在的问题

#### 4.1 IF 钢的二次加工脆性

二次加工脆性是钢板冲压成型后,工件在冲击应力的作用下抵抗开裂的能力。IF 钢二次加工脆性的产生是因为 IF 钢中由于碳氮被固定,晶界清洁, P 有偏析的倾向,由于 IF 钢晶界上没有固定的碳和氮,因而晶界强度极低,极易产生断裂,尤其是在冷加工后这种趋势更加强烈。为解决 IF 钢二次加工脆性,提高 IF 钢性能,已有多方面的研究,但至今仍然未解决<sup>[30]</sup>。

#### 4.2 IF 钢的性能稳定性和性能分散度

IF 钢作为深冲级和超深冲级冲压件的原料,主要用于冲制形状特别复杂及拉深系数大的冲压件生产,要求冲压用板料各处的性能均匀,且通常冲压工艺及冲模不会经常修改,因此要求 IF 钢的

性能稳定。

目前,我国由于生产 IF 钢的冶炼技术、轧制技术、退火工艺还存在一些问题,生产的 IF 钢的性能稳定性和性能分散度都还不够理想<sup>[6,7]</sup>。

## 5 IF 钢生产展望

微合金超深冲钢(IF 钢)与低碳深冲钢板材生产有许多共同的冶金学特点,可充分借鉴低碳深冲钢板材冲压成形性能研究、开发、生产的经

验,结合微合金深冲板固有的特点,采用以理论计算和模拟为基础、基础实验为先导、工艺实验为主体,与各种先进分析手段相结合的研究方法。以提高 IF 钢组织稳定性,减小性能参数分散度,降低屈强比,提高冷轧板材的  $r$  值及  $n$  值,通过合理的成分设计,热轧工艺研究,冷轧工艺研究,退火工艺研究,组织分析和织构分析,以提高微合金化超深冲(IF)钢的冲压性能,实现汽车覆盖件材料的国产化。

## 参考文献

- 1 刘国勋.金属学原理.北京:冶金工业出版社,1983
- 2 杨觉先.金属塑性变形物理基础.北京:冶金工业出版社,1988
- 3 Parks W H, Haggerty C S, Rock T R. Iron and Steel Engineer, 1997, 76(10):35
- 4 Langner H, Bleck W, Greisert C. Metallurgical Aspect of Ferrites Hot Rolling. In Bleck W ed. Proceedings of Inter Symp on Modern L C and ULC Sheet Steel for Cold Forming. Ashen: Processing and Properties, 1998, 301
- 5 马鸣图,沙维.材料科学和工程研究进展(第一集).北京:机械工业出版社,2000,590
- 6 马鸣图.我国汽车钢板研究与应用进展.钢铁,2001,36(8):64
- 7 王先进,茹铮,马衍伟.我国汽车用钢板的现状和研究进展.钢铁,1998,33(10):1
- 8 马衍伟,王先进,孔冰玉.宝钢 IF 钢生产工艺与改进建议.钢铁,1998,33(6):32
- 9 胡晓军.硫在 Ti-IF 钢中的作用.北京科技大学学报,2001,23(3):275
- 10 Yoshinaga N. Precipitation Behavior of Sulfides in Ti-added Ultra Low-carbon Steels in Austenite. ISIJ Int, 1994, 34:24
- 11 余志祥.钢水精炼技术在武钢的开发应用.炼钢,2001,17(6):1
- 12 东涛,孟繁茂,傅俊岩.微合金化钢知识讲座.北京:北京理工大学出版社,2001,40
- 13 程国平,茹静,袁明生.钛铌添加量对超深冲 IF 钢板力学性能的影响.钢铁,1999,34(5):47
- 14 Yoda Rika, Tsukatani Ichiro, Inoue Tsuyoshi, et al. Effect of Chemical Composition on Recrystallization Behavior and  $r$ -value in Ti-added Ultra Low Carbon Sheet Steel. ISIJ International, 1994, 34(1):70
- 15 Tither G, Garcia C I, Hua M, et al. Precipitation Behavior and Solute Effects in Interstitial Steels, Proceedings of International Forum for Physical Metallurgy of IF Steels. ISIJ International, 1994(5):293
- 16 王作成,关小军,王先进,等.热轧工艺因素对拉延用热轧 IF 钢性能的影响.特殊钢,1999,20(2):43
- 17 陈新平,鲍平,蒋浩民.润滑条件对超深冲 IF 钢成形性能的影响.金属成形工艺,2002,20(2):8
- 18 Meuleman D J, Siles J L, Zoidak J J. The Limiting Dome Height Test for Assessing the Formability of Sheet Steel. International Congress & Exposition, Detroit, Michigan, 1985
- 19 商建辉,王先进,蒋冬梅,等.卷取温度对 Ti-IF 钢第二相粒子及晶粒尺寸的影响.钢铁,2002,37(3):43
- 20 Tither G, Garcia C I, Hua M, et al. Precipitation Behavior and Solute Effects in Interstitial-free Steels. International Forum for Physical Metallurgy of IF Steels, T. Sakuma, Tokyo: The Iron and Steel Institute of Japan, 1994, May 10-11, 293
- 21 Park, Kestens L, Jonas J J. Effect of Internal Stresses in Cold Rolled IF Steel on the Orientations of Recrystallized Grains. ISIJ International, 2000, 40(4):393
- 22 李艳娇,刘战英,李晋霞,等.冷轧压下率对铁素体区热轧 Ti-IF 钢冷轧板深冲性能的影响.钢铁研究学报,2003,15(1):34
- 23 刘战英,李晋霞,刘相华,等.两次冷轧压下率分配对 IF 钢深冲性能的影响.东北大学学报(自然科学版),2004,25(3):254
- 24 马虹蔚.无间隙原子 IF 钢罩式退火工艺的研究.轧钢,2002,19(1):18
- 25 茹铮,曹全禹,彭璇,等. IF 钢冷轧薄板罩式退火工艺的优化.北京科技大学学报,2000,22(3):223
- 26 叶卫平. IF 钢 SEM 原位加热再结晶过程的研究.特殊钢,2001,22(4):13
- 27 叶卫平. IF 钢罩式退火再结晶晶粒分布函数.特殊钢,2001,22(2):22
- 28 Jonas J J, Urabe T. Oriented Nucleation and Selective Growth during Annealing of IF Steels. International Forum for Physical Metallurgy of IF Steels. Tokyo, 1994
- 29 Barnett M R, Kestens L. Formation of  $\{111\}\langle 110\rangle$  and  $\{111\}\langle 112\rangle$  Textures in Cold Rolled and Annealed IF Sheet Steel. ISIJ International, 1999, 39(9):923
- 30 李伯龙,张宁,刘庆.用电子背散射衍射技术研究 IF 钢再结晶行为.电子显微学报,2002,21(5):727
- 31 赵昆,李自刚,何晓明,等. Ti-IF 钢铁素体区热变形行为研究和 Zener-Hollomen 参数方程的建立.材料科学与工艺,2000,8(4):6
- 32 初元璋,潘岩. IF 钢的二次加工脆性及其评定方法.特殊钢,2000,21(1):36

张鹏,男,39岁,在读博士,副教授。工作单位:重庆科技学院,主要从事控制轧制和控制冷却技术的应用及轧制工艺优化的研究。

收稿日期:2004-09-08