



热轧工艺对低强度 IF 钢组织和性能的影响

刘 干^{1,2}, 艾毓坤³, 李江委³, 孔祥磊^{1,2}, 王 杨^{1,2}, 黄明浩^{1,2}

(1 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 鞍山 114009; 2 鞍钢集团钢铁研究院, 鞍山 114009;
3 鞍钢股份有限公司鲅鱼圈钢铁分公司, 营口 115007)

摘要:在某热轧厂产线成功开发出铁素体区轧制工艺技术的基础上,对比研究了铁素体区轧制和奥氏体区轧制两种热轧工艺对低强度 IF 钢组织、析出相、宏观织构及力学性能的影响。采用 OM、TEM 和 XRD 衍射仪等检测方法,对两种工艺下热轧、冷轧退火 IF 钢金相组织、析出相以及宏观织构的差异进行对比研究,同时采用拉伸试验机检测冷轧退火后 IF 钢三向拉伸力学性能。研究表明,奥氏体区热轧金相显微组织为等轴状铁素体晶粒,铁素体区热轧组织晶为粒沿轧向被拉长呈纤维状;相比奥氏体区热轧工艺,铁素体区轧制最佳工艺参数为加热温度 1 150 °C+终轧温度 800 °C+卷取温度 720 °C,在此工艺下显著降低了屈服强度 $R_{p0.2}$,析出相尺寸整体大 70~85 nm,但 TiN 析出相尺寸无明显差异;织构方面,冷轧退火 IF 钢 γ 织构更强,主要织构各组分取向分布更集中且强度差异较小,相应 r 值提高 0.64, Δr 值降低 0.35,大大提高了其深冲成型性能,为推广铁素体轧制工艺的应用提供了技术参考。

关键词:低强度 IF 钢; 铁素体; 轧制; 组织性能; 析出物; 织构

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00148 **中图分类号:**TG335.5

Influence of Hot Rolling Process on Microstructure and Properties of Low-strength IF Steel

Liu Gan^{1,2}, Ai Chengshen³, Li Jiangwei³, Kong Xianglei^{1,2}, Wang Yang^{1,2}, Huang Minghao^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Metal Materials and Application for Marine Equipment, Anshan 114009, China; 2 The Iron and Steel Research Institute of Ansteel Group, Anshan 114009, China; 3 Bayuquan Iron and Steel Branch Company of Angang Steel Co., Ltd., Yingkou 115007, China)

Abstract: On the basis of the successfully developed ferrite zone rolling process technology in a hot rolling plant production line, a comparative study was conducted to investigate the effects of two hot rolling processes, on the metallographic microstructure, precipitation phases, macroscopic texture and mechanical properties of low-strength IF steel. OM, TEM and XRD diffraction were used to compare and analyse the differences in metallographic microstructure, precipitation phases and macroscopic texture of IF steel in hot-rolled and cold-rolled annealed condition under the two rolling processes, and at the same time, the three-way tensile mechanical properties of IF steel were tested by the ZWICK tensile tester after cold-rolled annealing. The results show that the microstructure of hot-rolled IF steels in the austenitic zone was equiaxed grains, while the grains of hot-rolled IF steel in the ferrite zone are elongated and fibrous along the rolling direction; Compared with the austenitic zone hot rolling process, the optimum process parameters for ferrite zone rolling are heating temperature 1 150 °C+final rolling temperature 800 °C+coiling temperature 720 °C, in which the yield strength $R_{p0.2}$ is significantly reduced, and the size of precipitated phases is overall larger by 70-85 nm, but there is no significant difference in the size of TiN precipitated phases; In terms of texture, cold-rolled annealed IF steel γ texture is stronger, and the orientation distribution of each component in the main texture is more concentrated with smaller differences in strength. The corresponding r value increases by 0.64, while the Δr value decreases by 0.35, significantly improving its deep drawing formability. This provides a technical reference for promoting the application of ferrite rolling technology.

Key Words: Low-strength IF Steel; Ferrite Rolling; Microstructure Property; Precipitate; Texture

IF 钢又称为无间隙原子钢,因其无明显屈服,同时具有高延伸率、高塑性应变比 r 值、高应变硬化指数 n 值以及良好的非时效等特点,使其具有优异的深冲性能备受市场青睐,在汽车、家电、精密电子、建筑五金等领域得到广泛应用^[1-4],其中塑性应变比(r 值)是评价金属薄板深冲性能的重要参数,是指单向拉伸过程中,试样板宽方向真实应变与厚

度方向真实应变的比值, r 值越大,表示产品冲压或拉伸过程中抵抗失稳变薄的能力越强,深冲性能也就越好。随着我国经济进入高质量发展阶段,绿色低碳高精度 IF 钢的应用范围不断扩大,需求量快速上升,尤其是我国华东华南地区有旺盛的市场需求^[5-6]。

薄规格 IF 钢性能不仅与冷轧、退火过程相关,

与热轧工艺也存在很大关系。目前,奥氏体区轧制和铁素体区轧制工艺常用于 IF 钢生产,其中奥氏体区热轧工艺具有生产效率高、轧机负荷低、产品强韧性、延伸性以及加工性较好等优点,但同时存在生产成本低、能耗高、产品表面质量差等缺点,铁素体热轧工艺因具有降低能耗、提高产品成材率和表面质量、以热代冷降低生产成本、降低冷轧轧制负荷、提高冷轧生产率等诸多优点得到国内外钢铁企业的广泛应用^[7-10],但同时存在一些局限性,如:精轧前需待温,轧制速度低,影响生产效率、轧机负载不稳定、流变应力模型复杂,带钢厚度控制难度增大等。国内对铁素体轧制工艺的研究较晚,随着轧制工艺发展以及工装设备的不断改进,近年来铁素体轧制工艺取得了重大进展,已进入快速产业化阶段,国内部分钢铁企业例如鞍钢、宝钢、首钢等已成功将铁素体轧制工艺应用于工业生产中^[11-14],但是随着下游用户对产品质量和性能要求的提高,采用铁素体轧制工艺的目的随之发生转变,从最初的以热代冷转变为降低最终产品厚度同时提高产品 r 值。当前,关于铁素体轧制工艺生产超薄规格冷轧 IF 钢研究相对较少,针对奥氏体区轧制和铁素体区轧制两种热轧工艺下 IF 钢的组织及性能差异性的研究也相对较少。

在某热轧带钢厂 1580 产线通过铁素体区热轧工艺成功生产出 IF 钢的基础上,本文对比研究了两种不同热轧工艺下全生产流程中 IF 钢的金相组织、析出物、宏观织构以及冷轧退火成品力学性能的差异性,在为后续工艺优化指明方向的同时也为 IF 钢热轧板的生产提供了有效技术方案,对开发高质量薄规格 IF 钢具有较强的理论意义和实用价值。

1 试验材料及方法

试验材料为鞍钢某炼钢厂生产的 IF 钢连铸坯,为生产厚度规格为 2.75 mm IF 钢热轧卷提供原材

料,其具体化学成分见表 1。

该 IF 钢热轧卷具体生产工艺流程如下:铁水前处理→转炉冶炼→炉外精炼(RH)→连铸→板坯检查→板坯加热→1580 机组轧制→层流冷却→卷取→检验→入库。在某热轧厂 1580 产线完成两种热轧工艺下薄规格 IF 钢的轧制,具体热轧工艺参数见表 2。其中采用的铸坯尺寸为 230 mm×1 270 mm×12 000 mm,热轧 IF 钢尺寸为 1 265 mm×2.75 mm,热轧 IF 钢经过酸洗、冷轧、脱脂、退火及平整工序后得到最终产品,其尺寸为 1 250 mm×0.4 mm,冷轧总压下率控制在 85% 左右,冷轧后在连续退火机组进行退火处理。

在热轧板和冷轧退火带钢宽度 1/4 位置处取样,进行金相组织和析出相观察、宏观织构和力学性能检测。热轧、冷轧板金相试样经镶嵌研磨抛光腐蚀后,采用 DMI5000M 型光学金相显微镜观察金相组织;对试样进行真空喷碳,萃取出复型碳膜,在 Tecnai G220 型透射电镜下观察试样析出物;将试样表面研磨抛光至表面干净后,利用 X'PERT PRO MRD X 光衍射仪(采用 Co 靶、电压 35 kV、电流 40 mA)进行宏观织构测试分析。

2 试验结果与分析

2.1 显微组织

两种热轧工艺下 IF 钢的金相显微组织如图 1 所示,从图 1 可以看出,奥氏体区轧制热轧 IF 钢的金相组织为典型的等轴状铁素体晶粒,沿厚度方向上从表面到心部均为再结晶晶粒,晶粒尺寸分布较为均匀,再结晶过程充分发生;但是对于铁素体区轧制热轧 IF 钢的金相组织为纤维状铁素体+极少量细小等轴状铁素体,晶粒沿轧向呈现明显拉长状态,形成形变带,为纤维状非再结晶组织,同时在纤维状铁素体带上分布着极少量细小的等轴状铁素体,再结晶转变不够充分。

表 1 IF 钢主要化学成分(质量分数)

Table 1 The main chemical composition of IF steel

								%
C	Si	Mn	P	S	Alt	O	N	Ti
<0.002	<0.006	0.03~0.08	<0.005	<0.006	<0.06	<0.002	<0.004	0.03~0.07

表 2 热轧主要工艺参数

Table 2 The main process parameters of hot rolling

轧制工艺	加热温度/°C	在炉时间/min	终轧温度/°C	卷取温度/°C	成品厚度/mm
铁素体轧制	1 140~1 160	≥180	790~810	720~730	2.75
奥氏体轧制	1 230~1 240	≥180	900~930	720~750	2.75

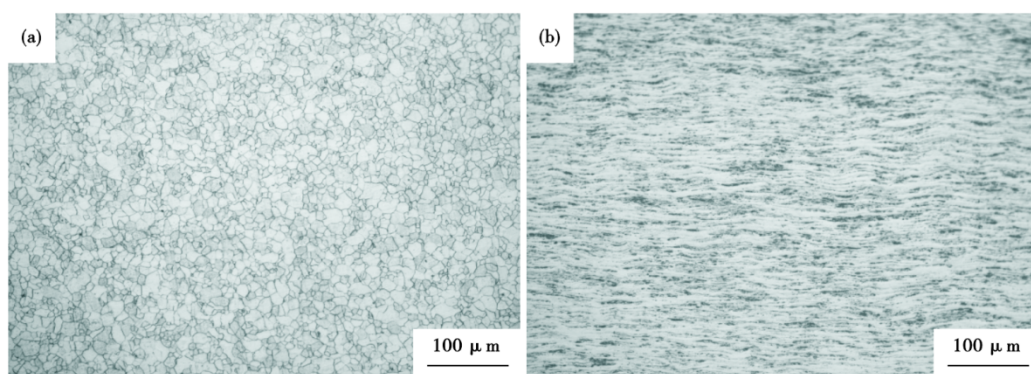


图 1 两种热轧工艺下热轧 IF 钢显微组织:(a)奥氏体区轧制,(b)铁素体区轧制

Fig. 1 Microstructure of hot-rolled IF steel under two different hot rolling processes : (a)austenitic zone rolling, (b)ferrite zone rolling

两种热轧工艺下冷轧退火后 IF 钢显微组织如图 2 所示,从图 2 可以看出,冷轧退火后两种工艺下 IF 钢显微组织均为多边形铁素体,与奥氏体热轧工艺相比,铁素体区轧制工艺下退火后 IF 钢整体晶粒尺寸较为粗大。这是由于铁素体轧制工艺下的热轧 IF 钢显微组织为纤维状组织,其经过冷轧后积累较大畸变能,在退火过程中晶粒形核和长大能够提前发生,因此,在退火工艺下,其晶粒长大较充分,尺寸较大。

2.2 析出物

在 IF 钢中通过单独添加 Ti 元素来固定钢中的间隙原子 C 和 N,所以,IF 钢中主要存在 TiN、TiS、 $Ti_4C_2S_2$ 、TiC 等析出物。据相关研究^[15],在 Ti-IF 钢中,TiN 的析出温度为 1 508 °C;TiS 开始析出温度为 1 401 °C,在 1 000 °C 左右完成析出; $Ti_4C_2S_2$ 开始析出温度为 1 280 °C,在 960 °C 左右完成析出;TiC 的析出温度为 887 °C,Ti(C,N)析出相在高温下以 TiN 相为主,在低温下以 TiC 相为主。

奥氏体轧制工艺下热轧 IF 钢的析出物如图 3 所示。经透射电镜观察,主要存在 $Ti_4C_2S_2$ 、TiN、TiS 和 TiC 析出相,析出相种类较多且尺寸比较细小。其中,图 3(a)中的 $Ti_4C_2S_2$ 析出物平均尺寸为 220 nm 左右,形状多为椭圆形和蠕虫状,其能谱分析如图 4(a)所示;图 3(b)中的 TiN 析出物平均尺寸大约为 140 nm,形状多为长方形和正方形;图 3(c)中的 TiS 析出物平均尺寸大约为 240 nm,形状多为圆球形;图 3(d)中的 TiC 析出物平均尺寸大约为 45 nm,形状多为点状、圆球形和椭圆形,其能谱分析如图 4(b)所示。

铁素体轧制工艺下热轧 IF 钢的析出物如图 5 所示。经透射电镜观察,主要存在 $Ti_4C_2S_2$ 、TiN、和 TiC 析出物, $Ti_4C_2S_2$ 分布较多,总体上析出物数量较少且尺寸较粗大。其中图 5(a)中的 $Ti_4C_2S_2$ 析出物平均尺寸大约为 290 nm,形状多为椭圆形和蠕虫状,其能谱分析如图 6(a)所示;图 5(b)中的 TiN 析出物平均尺寸大约为 145 nm,形状多为长方形和正方形;

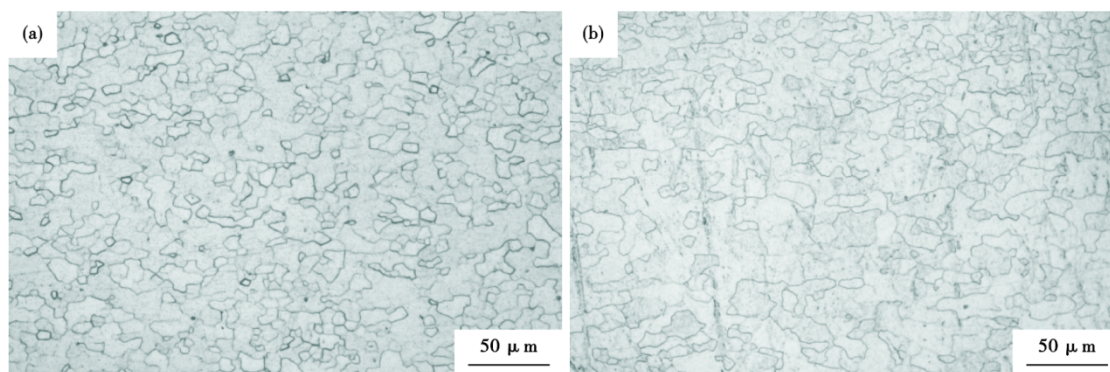


图 2 两种热轧工艺下冷轧退火 IF 钢显微组织:(a)奥氏体区轧制,(b)铁素体区轧制

Fig. 2 Microstructure of cold rolled annealed IF steel under two different hot rolling processes : (a)austenitic zone rolling, (b)ferrite zone rolling

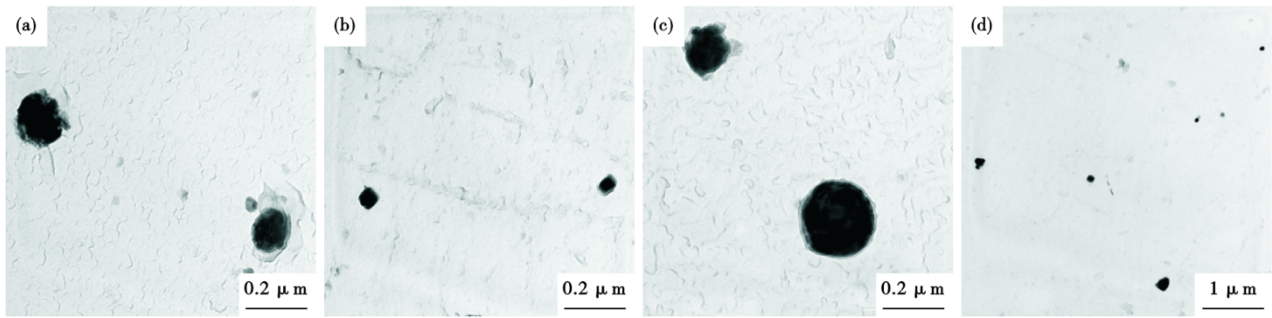


图3 奥氏体区轧制工艺下热轧IF钢中的析出物:(a)Ti₄C₂S₂析出物,(b)TiN析出物,(c)TiS析出物,(d)TiC析出物
 Fig. 3 Precipitates in hot-rolled IF steel under austenitic rolling process : (a)Ti₄C₂S₂precipitate, (b)TiN precipitate, (c)TiS precipitate, (d)TiC precipitate

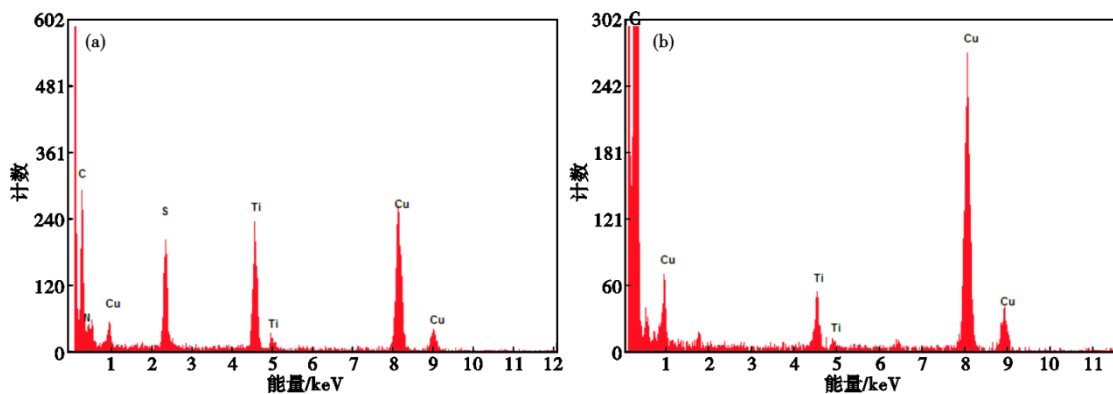


图4 奥氏体区轧制工艺下热轧IF钢中Ti₄C₂S₂、TiC析出物能谱分析:(a)Ti₄C₂S₂析出物能谱分析,(b)TiC析出物能谱分析
 Fig. 4 Energy spectral analysis of precipitates in hot-rolled IF steel under austenitic rolling process : (a)energy spectrum analysis of Ti₄C₂S₂precipitate, (b)energy spectrum analysis of TiN precipitate

图5(c)中的TiC析出物平均尺寸大约为130 nm,形状多为点状、圆球形和椭圆形,其能谱分析如图6(b)所示。

与奥氏体区轧制工艺相比较,总体上铁素体区轧制IF钢的析出物尺寸较大,细小弥散的析出物的数量较少,有利于IF钢的深冲性能。这主要是由于析出相的形态大小以及分布与铸坯加热温度有密

切关系,加热过程主要发生析出相的回溶,铁素体轧制工艺因具有较低的加热温度,不仅能够降低析出相的反向溶解量,有利于获得粗大的Ti₄C₂S₂相,同时,Ti(C,N)析出物数量变少,且未溶解的Ti(C,N)尺寸变得粗大。

2.3 织构

铁素体区轧制和奥氏体区轧制两种不同热轧

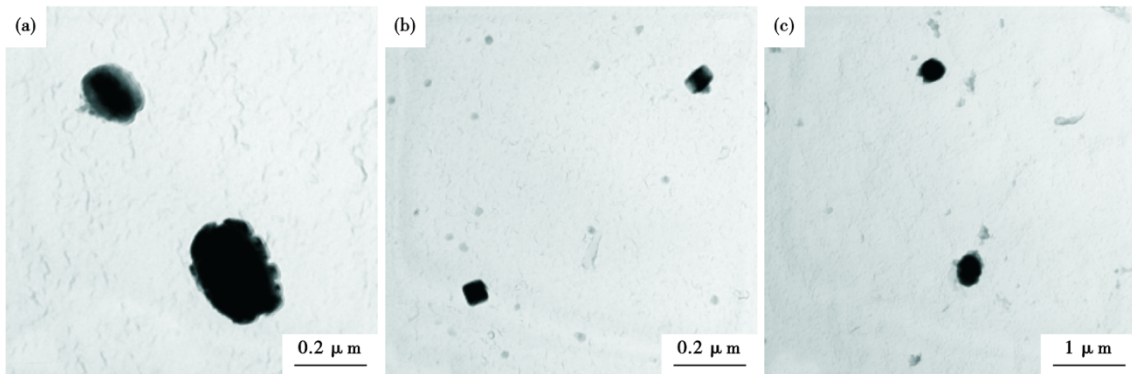


图5 铁素体区轧制工艺下热轧IF钢中的析出物:(a)Ti₄C₂S₂析出物,(b)TiN析出物,(c)TiC析出物
 Fig. 5 Precipitates in hot-rolled IF steel under ferrite rolling process : (a)Ti₄C₂S₂precipitate, (b)TiN precipitate, (c)TiC precipitate

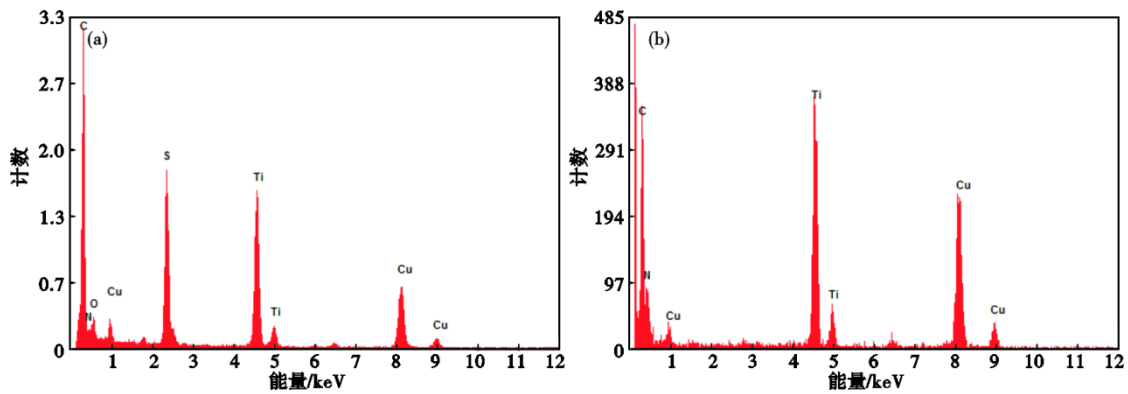


图 6 铁素体轧制工艺下热轧 IF 钢中 $Ti_4C_2S_2$ 、TiC 析出物能谱分析:(a) $Ti_4C_2S_2$ 析出物能谱分析,(b)TiC 析出物能谱分析
Fig. 6 Energy spectral analysis of precipitates in hot-rolled IF steel under ferrite rolling process : (a)energy spectrum analysis of $Ti_4C_2S_2$ precipitate, (b)energy spectrum analysis of TiN precipitate

工艺下热轧 IF 钢宏观织构 ODF 截面图如图 7 所示,从图 7 可以看出,奥氏体热轧工艺下,试样织构主要为 $\{110\}\langle 001\rangle$,强度为 1.844,奥氏体区轧制热轧 IF 钢织构很弱,这主要是由于奥氏体区轧制加热温度较高,基本在 1 230 °C 以上,再结晶过程充分发生期间晶粒取向不断产生变化,最终导致热轧变形后晶粒取向无明显规律。铁素体轧制工艺下,试样表面织构主要为 $\{110\}\langle 001\rangle$,强度为 2.9, $\{110\}\langle 110\rangle$,强度为 1.2,相对于奥氏体区轧制, $\langle 110\rangle//RD$ α -纤维织构明显增强,这是由于铁素体热轧工艺轧制温度较低,带钢表层组织因剪切变形受到更大的剪切作用,且具有了一定程度冷轧织构特征,有较为明显向 $\{111\}\langle 110\rangle$ 组元聚集的趋势。同时可看出,两种不同热轧工艺下热轧 IF 钢中的 $\langle 111\rangle//ND$ 织构强度均较弱,主要是由于热轧 IF 钢尺寸规格较厚,精轧压下率较小造成的。

两种不同热轧工艺下冷轧退火 IF 钢织构 ODF

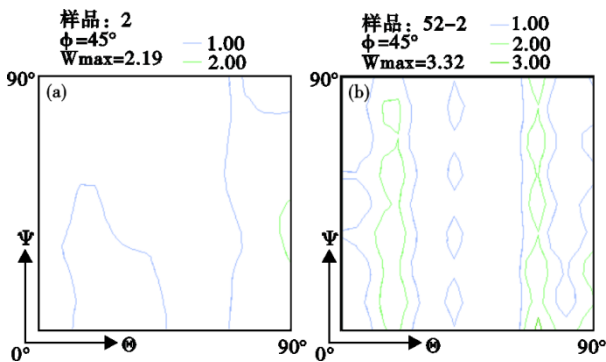


图 7 两种热轧工艺下热轧 IF 钢试样 $\phi=45^\circ$ ODF 截面图:(a)奥氏体区轧制,(b)铁素体区轧制
Fig. 7 $\phi=45^\circ$ ODF section of hot-rolled IF steel sample under two different hot rolling processes : (a)austenitic zone rolling, (b)ferrite zone rolling

截面图如图 8 所示,从图 8 可以看出,奥氏体热轧工艺下,试样织构主要为 $\{111\}\langle 112\rangle$ 和 $\{111\}\langle 110\rangle$,强度分别为 3.128、4.614,铁素体热轧工艺下,试样织构同样为 $\{111\}\langle 112\rangle$ 和 $\{111\}\langle 110\rangle$,强度分别为 6.977、7.023。对比发现:两种热轧工艺下冷轧 IF 钢经退火处理后均形成了较强的 γ 织构,但铁素体热轧工艺下退火 IF 钢形成的织构各组元间强度差异较小且取向分布较为集中,织构强度也更高。这可能是由于铁素体区热轧 IF 钢形成的部分 γ 织构遗传到了冷轧带钢中,导致最终退火后得到了更高的 γ 织构,提高了 IF 钢的深冲性能。

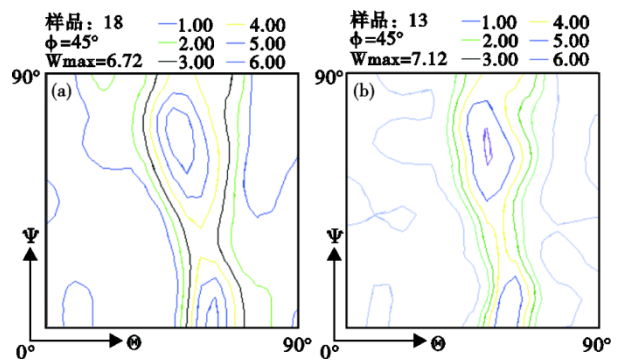


图 8 两种热轧工艺下冷轧退火 IF 钢试样 $\phi=45^\circ$ ODF 截面图:(a)奥氏体区轧制,(b)铁素体区轧制
Fig. 8 $\phi=45^\circ$ ODF section of cold rolled annealed IF steel sample under two different hot rolling processes : (a)austenitic zone rolling, (b)ferrite zone rolling

2.4 力学性能

通过 ZWICK 拉伸试验机进行两种热轧工艺下冷轧退火 IF 钢沿轧向、 45° 方向、横向三向拉伸试验,具体力学性能试验结果见表 3。由表 3 可知,与奥氏体区轧制工艺相比较,铁素体区轧制工艺下退

表 3 两种热轧工艺下退火 IF 钢拉伸力学性能

Table 3 Tensile mechanical properties of the annealed IF steel under two different hot rolling processes

轧制工艺	试样方向/(°)	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A_{50}/\%$	n	r	\bar{r}	Δr
奥氏体轧制	0	168	286	43.2	0.224	2.62		
	45	169	289	42.9	0.225	2.28	2.49	0.43
	90	172	296	42.3	0.225	2.79		
铁素体轧制	0	151	273	44.2	0.225	3.13		
	45	151	272	44.5	0.227	3.09	3.13	0.08
	90	153	276	43.8	0.225	3.21		

火带钢屈服强度 $R_{p0.2}$ 低 18 MPa 左右, 抗拉强度 R_m 低 13~20 MPa, 断面延伸率 A_{50} 和加工硬化指数 n 无明显差异。奥氏体热轧工艺下冷轧退火 IF 钢 r 值范围为 2.28~2.79, \bar{r} 为 2.49, Δr 为 0.43; 铁素体热轧工艺下其 r 值范围为 3.09~3.21, \bar{r} 为 3.13, Δr 为 0.08。可以看出, 在两种热轧工艺下退火 IF 钢均具有较高的塑性、塑性应变比 r 值和深冲成型性能, 相比奥氏体区热轧工艺, 铁素体轧制工艺下退火 IF 钢 \bar{r} 值提高了 0.64, Δr 值降低了 0.35, 说明铁素体轧制工艺下退火 IF 钢深冲成型性能更高, 平面各向异性较小, 冲压过程中各方向变形较均匀, 有效避免冲压制耳缺陷的出现。

3 结论

(1) 奥氏体区热轧 IF 钢显微组织为等轴状铁素体晶粒, 晶粒尺寸较为均匀; 铁素体区热轧 IF 钢晶粒沿轧向呈现明显拉长状态, 为纤维状, 同时在纤

维状铁素体带上分布着少量细小的等轴状铁素体。

(2) 与奥氏体轧制工艺相比, 铁素体区轧制工艺下热轧 IF 钢的 $\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$ 、TiC 析出物尺寸较大, TiN 析出物尺寸大小无明显差异; 铁素体热轧工艺下退火 IF 钢形成的织构各组元间强度差异较小且取向分布更为集中, 织构强度更高。

(3) 与奥氏体轧制工艺相比, 铁素体轧制工艺下冷轧退火 IF 钢 \bar{r} 值提高了 0.64, Δr 值降低了 0.35, 说明铁素体轧制工艺下退火 IF 钢深冲成型性能更高, 平面各向异性较小, 冲压过程中各方向变形较均匀, 有效避免冲压制耳缺陷的出现。

(4) 铁素体轧制最佳工艺参数为加热温度 1 150 °C+终轧温度 800 °C+卷取温度 720 °C, 奥氏体轧制最佳工艺参数为加热温度 1 230 °C+终轧温度 930 °C+卷取温度 750 °C, 此时获得的产品能够具有较低强度较高延伸率特点, 满足用户个性化需求。

参考文献

- [1] 孙超凡, 周 旬, 方 圆, 等. 热轧工艺对超薄规格冷轧 IF 钢织构及成形性能的影响[J]. 轧钢, 2023, 40(3): 40-46+71.
- [2] 王建功, 王晓东, 周 旬, 等. 铁素体轧制工艺热轧板显微组织研究与分析[J]. 中国冶金, 2018, 28(3): 54-59.
- [3] 程晓杰, 李 振, 蔡阿云, 等. 连续退火温度对 390 MPa 级 IF 钢组织、织构和力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2014, 35(3): 53-55.
- [4] 李四军, 曲家惠, 王 福, 等. 铁素体区热轧 IF 钢冷轧退火时织构的形成与演变[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(3): 345-348.
- [5] 吕国成, 包丽明, 朱金禄. IF 钢 210 t RH 精炼过程中调钛时机对洁净度的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(6): 25-28.
- [6] 何国宁, 蒋 波, 胡学文, 等. 铁素体轧制关键技术与机制研究现状[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(9): 895-906.
- [7] 冯岩青, 王福明. 冷轧变形量对 Nb-Ti 微合金化 IF 钢组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2012, 33(1): 65-68.
- [8] 王昭东, 郭艳辉, 孙大庆, 等. IF 钢铁素体区热轧和退火过程中织构的演变[J]. 材料研究学报, 2006, 20(4): 399-402.
- [9] 刘战英, 周满春, 王 涛, 等. IF 钢铁素体区热轧工艺参数对深冲性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(4): 44-46+94.
- [10] 张志鸿, 李成亮, 曹晓恩, 等. DC06 超低碳钢铁素体轧制工艺生产实践[J]. 轧钢, 2021, 38(3): 104-108.
- [11] 刘启龙, 邓 勇, 李华刚, 等. IF 钢板坯结晶器电磁搅拌数值模拟与工艺实践[J]. 特殊钢, 2023, 44(6): 83-88.
- [12] 夏小明, 裴新华, 徐国利, 等. IF 钢铁素体轧制关键工艺参数的确定及实践[J]. 轧钢, 2022, 39(5): 93-98+107.
- [13] 王建功, 周 政, 郝磊磊, 等. 铁素体轧制工艺对超深冲钢织构的影响[J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(2): 157-164.
- [14] 张建华, 高 燕, 刘战英, 等. 铁素体区轧制工艺参数对 IF 钢深冲性能的影响[J]. 轧钢, 2007, 24(2): 18-21.
- [15] 韩 贇, 邱木生, 邹 英, 等. 高塑性应变比 Ti-IF 钢组织性能及析出相[J]. 钢铁, 2021, 56(3): 77-83.