

## 深冲用超低碳冷轧带钢铁素体区热轧的现场试验

肖鸿飞<sup>1</sup> 李壮<sup>2</sup> 吴迪<sup>3</sup> 王昭东<sup>3</sup>

(1 沈阳大学理工学院, 沈阳 110044; 2 沈阳航空工业学院材料科学与工程学院, 沈阳 110034;

3 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110004)

**摘要** 研究和对比了经1 880 mm 热轧机组在奥氏体区(945~848 ℃)和铁素体区(803~755 ℃)热精轧, 卷取温度700 ℃以及73%压下率冷轧的3.0 mm 超低碳带钢(%:0.008C, 0.029Als, 0.000 8B, 0.001 4N)退火后的组织和性能。结果表明, 与奥氏体区轧制比较, 热轧采用铁素体区轧制的710 ℃退火后冷轧带钢具有较高的伸长率、塑性应变比( $r$ 值)和应变硬化指数( $n$ ), 因而具有较好的深冲性能。

**关键词** 超低碳冷轧带钢 铁素体区轧制 深冲性能

## Pilot Production of Hot Rolling in Ferrite Region for Cold Rolled Extra-low Carbon Steel Strip for Deep Drawing

Xiao Hongfei<sup>1</sup>, Li Zhuang<sup>2</sup>, Wu Di<sup>3</sup> and Wang Zhaodong<sup>3</sup>

(1 College of Science, Shenyang University, Shenyang 110044;

2 School of Materials Science & Engineering, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110034;

3 Stat Key Lab of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004)

**Abstract** Structure and properties of 3.0 mm extra-low carbon steel strip (%: 0.008C, 0.029Als, 0.000 8B, 0.001 4N) hot finish-rolled by 1 880 mm hot rolling mill train in austenite region (945~848 ℃) and in ferrite region (803~755 ℃), coiled at 700 ℃, then cold rolled with 73% reduction and annealed have been studied and compared. Results showed that as compared with austenite region rolling, with ferrite region rolling the cold rolled steel strip annealed at 710 ℃ had higher elongation, plastic strain ratio ( $r$ ) and strain-hardening exponent ( $n$ ), therefore it had better deep drawability.

**Material Index** Cold Rolled Extra-low Carbon Steel Strip, Rolled in Ferrite Region, Deep Drawability

深冲用冷轧带钢的碳含量很低, 热轧时因其奥氏体与铁素体的转变温度较高, 实现在奥氏体区的终轧(奥氏体区轧制)非常困难, 而粗轧在奥氏体区轧制、精轧在  $Ar_3$  以下, 实现铁素体区轧制较为容易。铁素体区轧制具有明显的优点, 加热温度低, 轧制温度低, 钢板表面的氧化铁皮薄, 经高温卷取后, 形成了很强的变形组织<sup>[1]</sup>, 冷轧成品钢板的深冲性能非常好。因此, 这一轧制技术正在被广为研究和应用<sup>[2]</sup>。

钢厂对深冲用冷轧带钢, 热轧时采用奥氏体区轧制和铁素体区轧制二种工艺制度进行现场试验, 试验结果表明, 深冲用冷轧带钢热轧时采用铁素体区轧制, 所得到的成品可获得符合标准和更加优良的深冲性能。

### 1 试验材料及方法

试验用钢(表1)碳含量相对较低, 而且几乎不含有微合金元素。轧制工业试验在钢厂现场进行, 采用如下生产工艺流程: 铁水预处理→冶炼→RH

表1 深冲用冷轧带钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of cold rolled strip steel for deep drawing / %

C	Si	Mn	P	S	Als	B	N
0.008	0.01	0.18	0.011	0.010	0.029	0.000 8	0.001 4

精炼→均热炉→1 880 mm 轧机(粗轧→快冷→精轧)→层流冷却→卷取→冷轧→再结晶退火。

铁素体轧制试验在薄板坯连铸连轧生产线上实现, 其中荒轧和精轧机组之间装备有快速冷却装置, 精轧机组各机架都有润滑系统。板坯加热温度1 100 ℃, 粗轧温度>920 ℃, 卷取温度700 ℃, 冷轧压下率73%。采用罩式退火, 退火温度710 ℃, 保温4 h。产品规格为3.0 mm×1 030 mm。试验用钢采用奥氏体区和铁素体区两种制度轧制, 具体工艺参数见表2。其中E1表示立辊温度, RDT和FDT分别表示粗轧出口和精轧出口温度, R1和R2表示粗轧道次温度, F1、F2、F3、F4和F5分别表示各精轧道次温度。在粗轧和精轧机组之间装备有快速冷却

表2 奥氏体轧制与铁素体轧制道次参数对比  
Table 2 Comparison between passes parameters of austenite region rolling and ferrite region rolling

工艺	参数	E1	R1	R2	RDT	F1	F2	F3	F4	F5	FDT
普通轧制	板带温度/℃	1 045.3	1 017.0	1 001.6	993.0	944.8	923.9	897.1	877.7	855.9	847.6
	轧制力/t	43.1	1 893.4	2 441.4	-	2 162.3	1 655.4	1 237.7	791.4	630.5	-
	轧制扭矩/(t·m)	1.6	103.6	125.1	-	58.6	29.1	15.8	6.7	4.2	-
铁素体轧制	板带温度/℃	1 062.1	1 031.2	1 013.8	1 005.1	803.2	790.0	776.9	770.2	759.0	754.9
	轧制力/t	65.6	1 706.5	1 761.3	-	1 609.4	1 464.0	1 572.6	1 168.3	925.1	-
	轧制扭矩/(t·m)	2.9	113.3	89.7	-	55.3	34.1	27.9	13.8	7.8	-

装置,快冷装置的总水流量在2 500 m<sup>3</sup>/h。

将退火后的样品按GB/6397-1986加工成拉伸试样,在WED-2型20 kN电子万能材料试验机上进行力学试验,测量试样轧向,垂直于轧向和与轧向呈45°方向的屈服、抗拉强度和伸长率( $A_{50}$ )、 $r$ (塑性应变比)值、 $n$ (加工硬化指数)值,计算出平均值。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 显微组织

图1为两种工艺制度轧制后成品的金相组织。由图1可见,带钢经热轧、冷轧后,由于又经过了罩式炉的再结晶退火,在加热过程中组织发生了回复再结晶转变,经两种制度轧制,组织中铁素体基本上均为多边形等轴晶粒。然而,采用铁素体区轧制所得到的铁素体晶粒明显比经奥氏体区轧制后晶粒要粗大。

### 2.2 力学性能

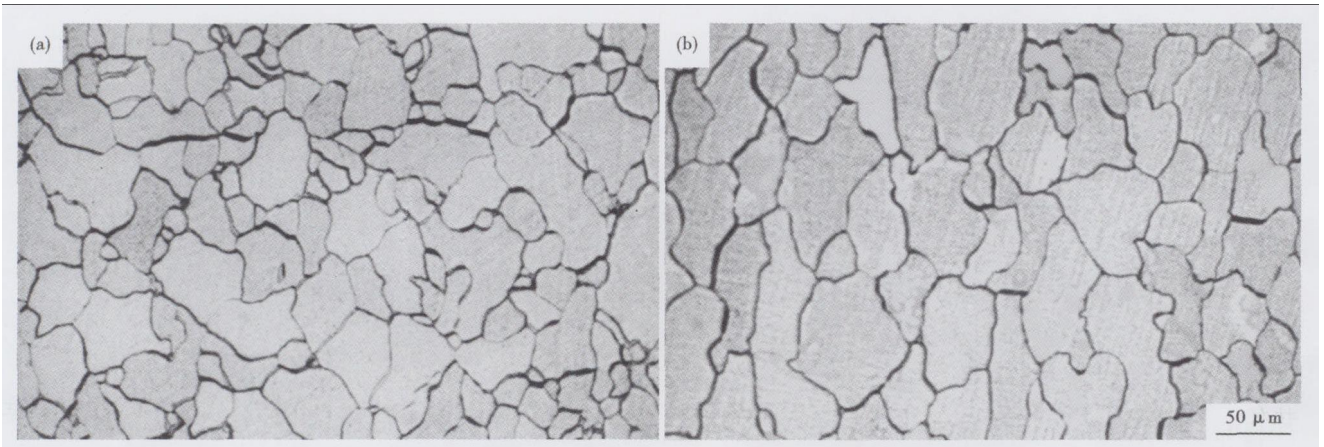


图1 冷轧成品带钢的710 °C退火组织形貌:(a)奥氏体A区轧制;(b)铁素体F区轧制

Fig. 1 Morphology of structure of cold rolled strip products annealed at 710 °C: (a) with rolling in austenite A region; (b) with rolling in ferrite F region

带钢经两种工艺制度轧制所得到成品的力学性能以及该钢种相应规格的技术要求(BX125-2006)见表3。

由表3可见,带钢经奥氏体区轧制后具有较高的屈服强度和抗拉强度,而经铁素体区轧制后得到

表3 奥氏体区轧制和铁素体区轧制的成品带钢的力学性能对比

Table 3 Comparison between mechanical properties of steel strip products processed with austenite region rolling and ferrite region rolling

性能指标	$R_{el}$ /MPa	$R_m$ /MPa	$A_{50}/\%$	$n$	$r$
A区轧制	164	285	42	0.25	1.50
F区轧制	159	278	45	0.26	1.53
技术要求	120~210	≥270	39	≥0.18	≥1.5

了更高的伸长率和更高的 $n$ 值和 $r$ 值,表明后者具有更高的深冲性能。

### 2.3 铁素体区轧制对带钢组织性能的影响

热轧工艺制度的不同决定了带钢力学性能的差异。表2中两种工艺制度轧制精轧温度不同,得到的组织不同。采用奥氏体区热轧,在奥氏体再结晶区的变形可以通过奥氏体再结晶过程的反复进行而使奥氏体晶粒得到细化;采用铁素体区热轧,在奥氏体未再结晶区的变形可以得到形变的奥氏体晶粒,在变形奥氏体中形成变形带,而这形变带也可以作为铁素体的形核部位<sup>[3]</sup>,因而有利于铁素体的晶粒细化。关于这类深冲用冷轧带钢,文献[4]指出:奥氏体区热轧后,铁素体晶粒呈等轴状;而铁素体区热

轧后,大部分组织为沿轧向的变形带,还有少部分等轴晶粒形成。带钢采用铁素体区热轧后,随着钢中剪切带的增加,平均位错密度增高,由于这些晶粒更高的储能,退火时再结晶晶粒优先在剪切带上形核<sup>[5]</sup>。因此,带钢铁素体区热轧后,组织中的铁素体晶粒大小极为不均。

铁素体区轧制终轧温度较低(表2),其储存的能量较高,再结晶的驱动力也较大,不但再结晶温度相对较低,同时退火时再结晶速度也较快。因此,尽管铁素体区轧制后因变形带的出现可能使热轧后的组织细化,但如前所述,铁素体区热轧后,除组织中的变形带,还有部分等轴晶粒存在。因此,冷轧后再结晶退火得到的组织晶粒较为粗大。两种不同工艺制度轧制得到的组织不同,其力学性能也不相同。奥氏体区轧制得到的成品由于铁素体晶粒细化而具有相对较高的屈服强度和抗拉强度,但其伸长率及 $n$ 值与 $r$ 值则相对较低;铁素体区轧制后的成品虽然强度略低,但上述表征其深冲性能的系列指标则更高(表3)。

深冲用冷轧带钢经铁素体区轧制后得到了良好的深冲性能,还与其热轧后的高温卷取,形成很强的变形织构有关<sup>[1]</sup>。对于这类IF钢,文献[6]指出:铁素体热轧后已经形成较完整、且比较强的 $\gamma$ 织构组分,由于织构的遗传性在随后的冷轧和再结晶中,经铁素体热轧的板材中表现出强的 $\gamma$ 织构组分。铁素体区轧制使得带钢有利织构充分发展。更低的热轧温度,使带钢的深冲性能得到了改善<sup>[2]</sup>。因此,同奥氏体区轧制相比,铁素体区轧制表现出了明显的优势。

试验用钢不含微合金元素,热轧时采用铁素体区轧制现场试验,不仅性能指标完全合格(表3),而且,由于工艺参数控制合理,反映深冲性能的 $r$ 值和 $n$ 值都高于文献[7]所述采用同样工艺下的Ti-IF钢的相应性能。

在试验中对整个生产过程进行了全程跟踪观察,热轧原料钢板表面质量和酸洗后钢板的表面质

量均较好。冷轧时轧制过程顺利,冷轧钢板板形与表面质量状况良好。由于该厂轧机具备低碳钢铁素体区轧制的能力,开发铁素体轧制功能,充分利用轧机的潜力,可降低能耗,节约生产成本,并提高成品钢板的成型性能。

### 3 结论

(1)带钢采用铁素体区轧制工艺,经热轧、冷轧后,再结晶退火得到的铁素体晶粒比较粗大。

(2)采用铁素体区轧制得到的带钢成品具有较高的伸长率和 $n$ 值与 $r$ 值,同奥氏体区轧制相比,铁素体区轧制表现出了更明显的优势。

(3)本试验工艺参数控制合理,采用铁素体区轧制现场试验方案可行,深冲用冷轧带钢性能达到相应标准要求,能够得到满意的深冲性能。

国家自然科学基金资助项目(50104004)

### 参考文献

- 1 郭艳辉,王昭东,孙大庆,等.铁素体区热轧高温卷取条件下IF钢的组织特征.钢铁研究学报,2007,19(8):37
- 2 Zhao H, Rama S C, Barber G C, et al. Experimental Study of Deep Drawability of Hot Rolled IF Steel. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 128(1~3):73
- 3 田村今男.高强度低合金钢的控制轧制与控制冷却.王国栋,刘振宇,熊尚武,译.北京:冶金工业出版社,1992
- 4 郭艳辉,王昭东,李守卫,等. IF钢与 ELC 钢织构及性能的对比.东北大学学报,2007,28(12):1713
- 5 Liu D S, Alan O H, Mohammad R T, et al. The Deformation Microstructure and Recrystallization Behavior of Warm Rolled Steels. ISIJ International, 2002, 42(7):751
- 6 刘沿东,贺 彤,蒋奇武,等.铁素体轧制对Ti-IF钢微观组织和性能的影响.稀有金属,2006,30(9):148
- 7 景财年,王作成,韩福涛,等.铁素体区热轧Ti-IF钢的组织 and 性能.特殊钢,2006,27(2):23

肖鸿飞(1961-),女,教授,硕士生导师,1983年辽宁大学毕业,理论物理、力学与应用研究。

李 壮(1964-),男,博士后,副教授,1986年吉林工业大学毕业,钢铁材料组织和性能研究。

收稿日期:2008-11-20

## 欢迎订阅 2009 年《特殊钢》杂志

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

需订阅 2009 年下半年《特殊钢》可在 6 月 15 日前至当地邮局订阅