

316 奥氏体不锈钢中厚板轧制晶粒度控制研究

杨相歧¹ 庄迎² 李吉东² 尹巍²

(1 山西太钢不锈钢股份有限公司临汾分公司, 临汾 041000; 2 山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心, 太原 030003)

摘要 针对 316 不锈钢中厚板晶粒度控制问题在实验室进行了一系列的轧钢试验, 分别对钢坯原始组织状态、总轧制压缩比、单道次变形率 3 个因素进行分析。试验结果表明, 当轧制压缩比超过 6 时, 钢坯原始组织状态对中厚板全厚度晶粒均匀性无明显影响; 钢坯加热温度、道次压下量相同时, 总压缩比为 6 生产工艺能够轧制出全厚度晶粒均匀的钢板; 当轧制总压缩比为 4 时, 单道次压下率超过 30% 时, 钢板表面晶粒度为 2 级和 7 级混晶组织; 单道次轧制变形量均小于 10% 时, 即使轧制总压缩比足够大, 钢板热轧态晶粒度依然不均匀。

关键词 316 不锈钢中厚板 热轧 晶粒度 变形率

Research on Grain Size Control of 316 Austenitic Stainless Steel Heavy and Medium Plate Rolling

Yang Xiangqi¹, Zhuang Ying², Li Jidong² and Yin Wei²

(1 Lisco Branch Company, Shanxi Taigang Stainless Steel Co., Ltd., Linfen 041000;
2 Technology Center, Shanxi Taigang Stainless Steel Co., Ltd., Taiyuan 030003)

Abstract The influence of the status of billet steel, rolling compression ratio, deformation rate per pass on grain of 316 austenitic stainless steel medium plate was done in laboratory. The results explain that the total compression ratio is more than 6, the original structure of steel billet has no influence on grain size of hot rolling plate, when the total compression ratio is more than 6, the homogeneous grain in the whole thickness is obtained in condition of same billet steel heating-up temperature and deformation rate per pass. But when the total compression ratio is more than 6, the 2 grade and 7 grade duplex grain are obtained even though the deformation rate per pass is more than 30%, and when the total compression ratio is less than 10%, the grain is heterogeneous even though the total compression ratio is big enough.

Material Index 316 Stainless Steel Medium Plate, Hot Rolling, Grain Size, Deformation Rate

316 不锈钢中厚板具有较高的高温强度、较好的耐腐蚀性能及加工性能, 被广泛应用于工程建设的各个方面。然而, 在某些特殊领域^[1-3], 出于安全性考虑, 需用较高强度厚度大于 40 mm 的 316 不锈钢特厚板, 由于 316 不锈钢特厚板的重量和尺寸大, 在轧制过程中轧制力的不均匀传递, 很难做到全厚度方向上性能的均匀性, 如工艺设计和执行不当, 不能满足用户的使用要求。

316 不锈钢中厚板厚度方向性能的均匀性主要包括: 全厚度方向晶粒度均匀性、力学性能均匀性、成分均匀性等等。因此, 晶粒度对材料的性能有着重要的影响作用。在核电主管道中, 要求钢板全厚度方向晶粒度 3 级或更细^[4-7]。

太钢 316 不锈钢中厚板生产工艺流程为: (1) 板坯、铸坯→轧制→固溶酸洗; (2) 模铸锭→轧制→固溶酸洗; (3) 模铸锭→电渣重熔并锻造板坯→轧制→固溶酸洗。

一般民用的 316 不锈钢中板厚度大于 40 mm 以下时采用第一种工艺流程; 当用于特殊用途, 如压

力容器、核电用反应器时, 对钢板指标要求较高^[8-12], 需采用第 3 种工艺流程。

1 坯料原始组织状态对中厚板晶粒度的影响

本试验选取 200 mm 厚 316 不锈钢连铸坯和 200 mm 厚 316 不锈钢电渣锻造坯进行相同钢坯加热温度、相同轧制变形量的轧制试验, 轧制成品钢板厚度为 30 mm, 两种钢坯原始组织如图 1 所示。

200 mm 厚连铸坯冶炼工艺为: 180 t EAF + AOD + LF + CC, 轧制前连铸坯尺寸为: 3 000 mm (长) × 2 000 mm (宽) × 200 mm (厚)。200 mm 厚电渣锭锻造坯生产工艺为: 80 t EAF + AOD + LF + 模铸 + 电渣 + 锻造, 电渣锭直径为 1 200 mm, 锻造坯尺寸为 3 000 mm (长) × 1 800 mm (宽) × 200 mm (厚)。

由图 1 可以看出, 316 不锈钢连铸坯的组织比锻造坯的组织粗大, 锻造坯经过电渣锭的反复加热及锻造, 原始凝固的柱状晶组织已经消失。

两种钢板轧制前的加热温度均为 1 150 °C, 钢坯保温时间为 2 h, 轧制开始后始终以 15% 的变形率轧制到目标厚度。

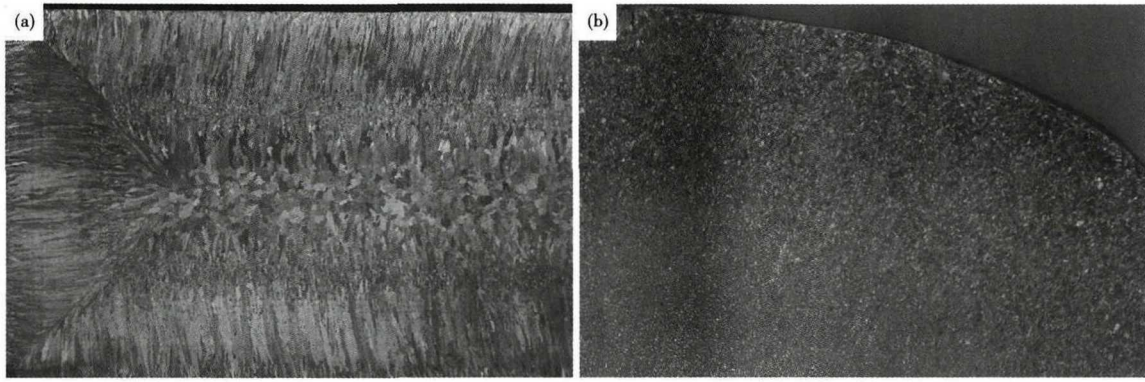


图1 316钢连铸坯(a)与锻造坯(b)低倍组织
Fig.1 Macrostructure of 316 steel continuous billet (a) and forging billet (b)

检验结果表明,即使钢坯原始状态不一致,在压缩比够大的前提下,轧制后的钢板热轧态晶粒度仍然能够均匀,连铸坯轧后的钢板晶粒度为7级,锻造坯轧后的钢板晶粒度为7.5级。

2 总压缩比对316不锈钢中厚板晶粒度的影响试验

2.1 轧制试验 I

两种钢坯轧制前的加热温度均为1 150 ℃,钢坯保温时间为2 h,轧制变形量变化如表1所示。

200 mm厚316不锈钢锻造坯轧制的50 mm厚钢板全厚度晶粒度情况如图2所示。由图2可以看出,钢板全厚度方向晶粒度都不均匀。晶粒度最大超过0级,最小小于7级。

300 mm厚316不锈钢电渣锭锻造坯轧制的50 mm厚钢板全厚度晶粒度情况如图3所示。由图3可以看出,钢板表面个别位置有3.5级晶粒外,其余厚度处晶粒为均匀的6级组织。

2.2 轧制试验 II

本试验采用200 mm厚316不锈钢锻造坯,设置轧制前的加热温度为1 150 ℃,钢坯保温时间为2 h,

表1 316不锈钢中板各道次压下量和变形率
Table 1 Reduction and deformation rate in each pass of 316 stainless steel medium plate

轧制道次	锻坯厚度/mm					
	200			300		
	轧坯厚度/mm	压下量/mm	变形率/%	轧坯厚度/mm	压下量/mm	变形率/%
1	170	30	15	255	45	15
2	144	26	15	217	38	15
3	122	22	15	184	33	15
4	104	18	15	156	28	15
5	88	16	15	133	23	15
6	65	13	15	113	20	15
7	58	7	11	96	17	15
8	50	8	14	82	14	15
9				70	12	15
10				59	11	15
11				50	9	18

加大单道次变形量,如表2所示。

轧制后钢板热轧态全厚度晶粒度如图4所示,钢板表面晶粒度最大2级最小7级,晶粒度级差较大,一般用户不接受这样的组织,而钢板中心晶粒度稍好可以评为4.5级。

当塑性变形小时,随着变形量增加变形抗力增

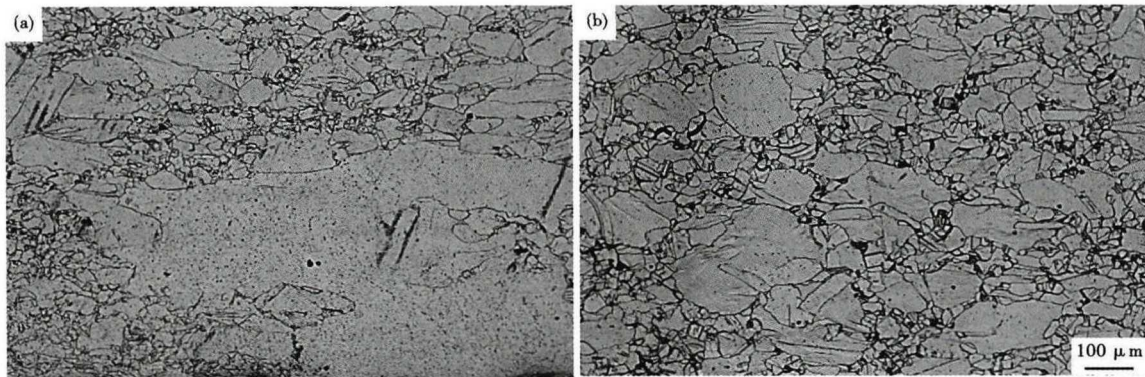


图2 316钢200 mm锻坯8道次轧成的50 mm板表面(a)和中心(b)晶粒形貌

Fig.2 Morphology of grain at surface (a) and center (b) of 50 mm plate of steel 316 rolled from 200 mm forged billet by 8 pass

表 2 316 钢 200 mm 锻坯 5 道次轧成 50 mm 板各道次压下量和变形率

Table 2 Reduction and deformation rate in each pass of steel 316 rolled from 200 forged billet to 50 mm plate by 5 pass

轧制道次	坯厚/mm	压下量/mm	变形率/%
1	150	50	25
2	105	45	30
3	75	30	28
4	60	15	20
5	50	10	17

加,达到最大值时,发生塑性变形,位错密度不断增加,引起变形应力不断达到峰值,会发生奥氏体的动态回复。厚板轧制过程中如变形量不足以使全部的晶粒进行再结晶时,在以后的轧制道次中,即便再给压下量也不会引起再结晶细化,而已发生再结晶的晶粒继续在后续的轧制道次中进行再结晶细化,是产生钢板晶粒度两级分化的原因。

3 轧制变形量对 316 不锈钢中厚板晶粒度的影响试验

本试验选取两块 300 mm 厚 316 不锈钢电渣锭锻造坯,加热

表 3 316 钢 300 mm 锻坯 18 道次轧成的 50 mm 板各道次压下量和变形率

Table 3 Reduction and deformation rate in each pass of steel 316 rolled from 300 mm forged billet to 50 mm plate by 18 pass

轧制道次	坯厚/mm	压下量/mm	变形率/%
1	276	24	8
2	254	22	8
3	229	25	10
4	206	23	10
5	185	21	10
6	166	19	10
7	149	17	10
8	134	15	10
9	121	13	10
10	109	11	10
11	98	11	10
13	88	10	10
14	79	9	10
15	71	8	10
16	64	7	10
17	58	6	10
18	50	8	14

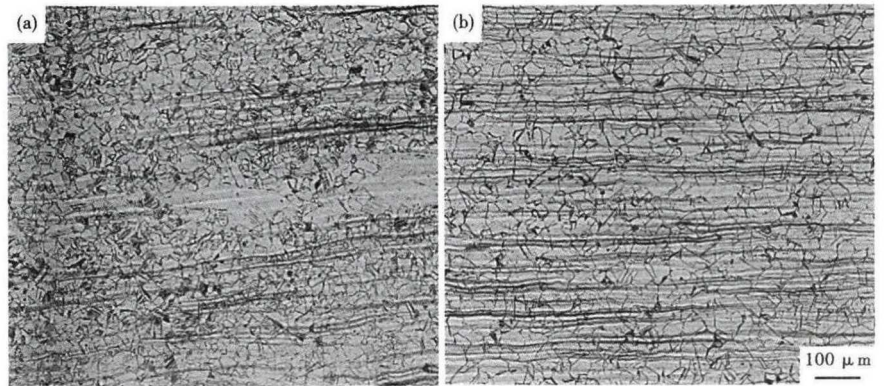


图 3 316 钢 300 mm 锻坯 11 道次轧成的 50 mm 板表面(a)和中心(b)晶粒形貌
Fig.3 Morphology of grain at surface (a) and center (b) of 50 mm plate of steel 316 rolled from 300 mm forged billet by 11 pass

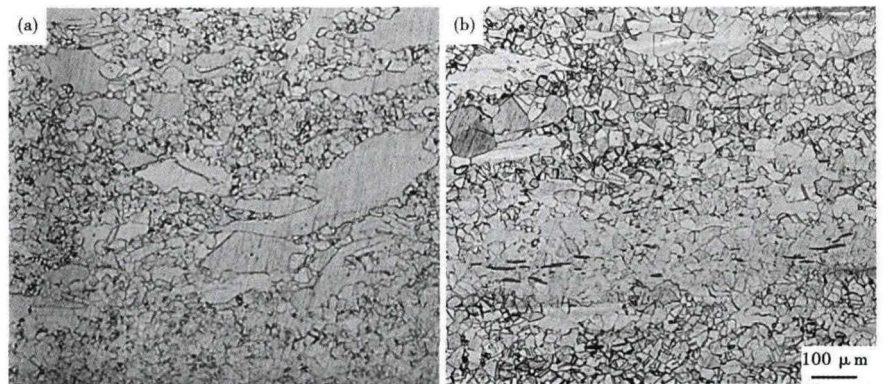


图 4 316 钢 200 mm 锻坯 5 道次轧成的 50 mm 板表面(a)和中心(b)晶粒形貌
Fig.4 Morphology of grain at surface (a) and center (b) of 50 mm plate of steel 316 rolled from 200 mm forged billet by 5 pass

表 4 316 钢 300 mm 锻坯 6 道次轧成的 50 mm 板各道次压下量和变形率

Table 4 Reduction and deformation rate in each pass of steel 316 rolled from 300 mm forged billet to 50 mm plate by 6 pass

轧制道次	坯厚/mm	压下量/mm	变形率/%
1	240	60	20
2	180	60	25
3	130	50	28
4	90	40	30
5	66	24	27
6	50	16	24

温度为 1 150 ℃,保温 2 h,轧制道次变形量如表 3、表 4 所示,考察相同条件下,轧制变形量对 316 不锈钢中厚板热轧态晶粒度的影响。

小变形轧制试验分 18 道次将 300 mm 厚 316 不锈钢锻造坯轧制成 50 mm 厚钢板,每道次压下量最小 8%,最大一道 14%。

大变形轧制试验共 6 道次,将 300 mm 厚 316 不锈钢锻造坯轧制成 50 mm 厚钢板,每道次压下量最

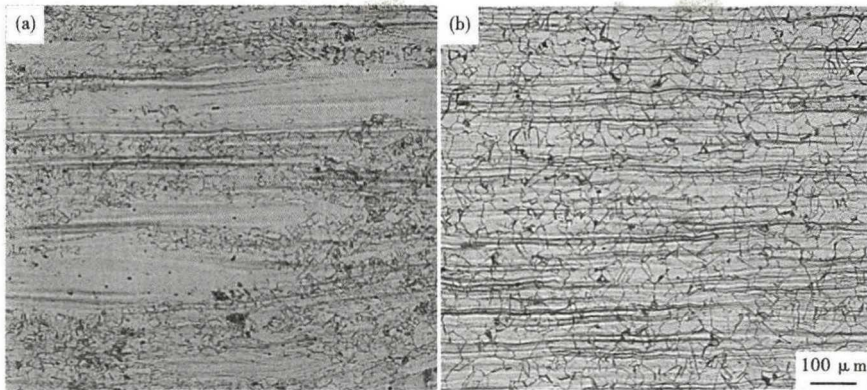


图5 316钢300 mm锻坯18道次轧成50 mm板表面(a)和中心(b)晶粒形貌
Fig.5 Morphology of grain at surface (a) and center (b) of 50 mm plate of steel 316 rolled from 300 mm forged billet by 18 pass

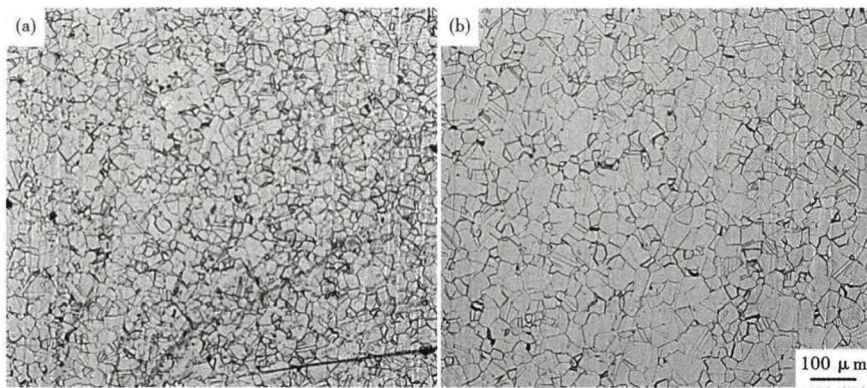


图6 316钢300 mm锻坯6道次轧成50 mm板表面(a)和中心(b)晶粒形貌
Fig.6 Morphology of grain at surface (a) and center (b) of 50 mm plate of steel 316 rolled from 300 mm forged billet by 6 pass

小20%,最大30%。

在总轧制压缩比相同,钢坯加热温度相同的条件下,轧制过程中每道次都采用极小的变形量轧制,轧制过程中再结晶不充分,也会使热轧态晶粒度不均匀,尤其表面未回复的轧制条带较多,如图5所示。

当变形量很大时,50 mm厚316不锈钢中厚板的晶粒均为8级,如图6所示。

4 结论

(1)当316钢的中厚板轧制压缩比大于6时,坯料的原始组织状态不影响钢板晶粒度均匀性。

(2)当钢坯轧制总压缩比为4时,单道次压下率超过30%时,钢板表面晶粒度为2级和7级混晶组织。

(3)当钢坯总压缩比为6时,单道次轧制变形量均小于10%时,钢板热轧态晶粒度依然不均匀。

参考文献

- [1] 张润国,栗和平,张东溟. 不锈钢连铸坯轧制中板工艺研究[J]. 山西冶金,2000,(2):45-47.
- [2] 董红亮. 变形量对304奥氏体不锈钢组织和性能的影响[D]. 南京:南京理工大学,2010.
- [3] 侯小振,郑文杰,宋志刚,等. 冷加工对316L不锈钢力学行为和组织的影响[J]. 钢铁研究学报,2013,25(7):53-57.
- [4] 朱亮,苏婷婷,侯国清. 多道次热轧过程中奥氏体不锈钢的氧化皮演变机制[J]. 金属铸锻焊技术,2012,41(21):8-12.
- [5] 周毛熊. 热轧高铝304、316L奥氏体不锈钢组织性能及铝元素的作用机制[D]. 兰州:兰州理工大学,2011.
- [6] 喇培清,姚亮,孟倩,等. 含铝304和316L奥氏体不锈钢热轧板材焊接性能[J]. 钢铁,2013,48(11):60-66.
- [7] 宋仁伯,项建英,侯东坡,等. 316L不锈钢热加工硬化行为及机制[J]. 金属学报,2010,46(1):57-61.
- [8] 胡贤磊,赵忠,敬国,等. 中厚板轧制过程的温度变化规律分析[J]. 钢铁研究学报,2010,22(1):14-17.
- [9] 庄惟琦,卢斌. 奥氏体不锈钢加热工艺研究与实践[J]. 宝钢技术,2005,(4):40-43.
- [10] 张克辉. 409L不锈钢板轧制过程有限元模拟[D]. 兰州:兰州理工大学,2012.
- [11] 岳祥重,张立文,廖舒纶. GCr15钢奥氏体晶粒长大规律研究[J]. 材料热处理学报,2008,29(1):94-97.
- [12] 丰涵,宋志刚,郑文杰. 固溶处理对Inconel 690合金组织和力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2009,21(3):46-50.

杨相歧(1982-),男,硕士(2014年太原科技大学),工程师,2005年太原科技大学(本科)毕业,不锈钢中厚板工艺技术研究。E-mail:Yangxiangqi2009@163.com

收稿日期:2018-12-20