

不锈钢板坯的高温力学性能及连铸二次冷却工艺中的应用

谢长川¹ 韩丽娜¹ 胡波¹ 崔立新² 艾健³

(1 中冶连铸技术工程股份有限公司, 武汉 430073; 2 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083;

3 泰山钢铁公司不锈钢厂, 莱芜 271100)

摘要 泰山不锈钢厂采用 60 t 电弧炉-GOR 底吹转炉精炼-160 mm × 1 600 mm 板坯连铸的工艺流程冶炼不锈钢。通过 Gleeble-1500D 热模拟试验机试验研究了奥氏体不锈钢 201 (6.54Mn-16.71Cr-3.62Ni) 和 J4 (8.93Mn-14.84Cr-1.08Ni-1.25Cu), 铁素体不锈钢 430 (16.29Cr) 和马氏体不锈钢 410S (13.5Cr) 连铸板坯的高温力学性能。结果表明, 各不锈钢的Ⅲ脆性温度区分别为 201 钢-665 ~ 990 °C, J4 钢-600 ~ 950 °C, 430 钢-600 ~ 700 °C 和 410S 钢-720 ~ 930 °C; 201 和 J4 钢采用较弱二次冷却, 矫直温度分别控制为 ≥1 010 °C 和 ≥995 °C, 430 钢用较强二次冷却, 矫直温度 900 ~ 950 °C; 410S 钢用较弱二次冷却, 矫直温度 ≥980 °C。

关键词 奥氏体 铁素体 马氏体 不锈钢 板坯 高温性能 连铸 二次冷却

High Temperature Properties of Slab of Stainless Steels and Application in Concasting Secondary Cooling Process

Xie Changchuan¹, Han Lina¹, Hu Bo¹, Cui Lixin² and Ai Jian³

(1 CCTEC Engineering Co Ltd, Wuhan 430073; 2 Metallurgical and Ecological Engineering School, University of Science and Technology, Beijing 100083; 3 Stainless Steel Works, Taishan Iron and Steel Co, Laiwu 271100)

Abstract The production flow sheet for stainless steels steelmaking at Taishan Steel Works is 60 t EAF-GOR bottom blowing converter refining-160 mm × 1 600 mm slab casting process. With using Gleeble-1500D thermal simulation testing machine, the high temperature properties of casting slab of austenite stainless steel 201 (6.54Mn-16.71Cr-3.62Ni) and steel J4 (8.93Mn-14.84Cr-1.08Ni-1.25Cu), ferrite stainless steel 430 (16.29Cr) and martensite stainless steel 410S (13.5Cr) have been tested and studied. Results show that the Ⅲ brittle temperature region of each stainless steel is respectively steel 201- 665 ~ 990 °C, steel J4- 600 ~ 950 °C, steel 430- 600 ~ 700 °C and steel 410S- 720 ~ 930 °C; It is available for steel 201 and J4 to use weaker secondary cooling and to straighten respectively at ≥1 010 °C and ≥995 °C, for steel 430 to use stronger secondary cooling and to straighten at 900 ~ 950 °C, and for steel 410S to use weaker secondary cooling and to straighten at ≥980 °C.

Material Index Austenite, Ferrite, Martensite, Stainless Steel, Slab, High Temperature Properties, Concasting, Secondary Cooling

通过 Gleeble-1500D 型热模拟试验机, 对泰山不锈钢厂 160 mm × 1 600 mm 不锈钢板坯铸机生产的 201、J4、430、410S 共 4 个钢种的高温力学性能进行研究。找到其裂纹易发的温度区间, 从而确定出合理的弯曲矫直温度和二次冷却强度。

表 1 试验不锈钢的钢种化学成分 / %

Table 1 Analysis of test stainless steel grade / %

不锈钢类别	钢号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	N
奥氏体	201	0.08	0.47	6.54	0.036	0.007	16.71	3.62	0.24	≤0.25
奥氏体	J4	0.07	0.52	8.93	0.021	0.005	14.84	1.08	1.25	≤0.20
铁素体	430	0.10	0.32	0.73	0.033	0.004	16.29	0.10	-	-
马氏体	410S	0.04	0.36	0.31	0.023	0.004	13.50	0.08	-	-

1 试验内容和试验方法

泰山不锈钢厂通过 60 t 电弧炉冶炼、GOR 底吹转炉精炼的工艺流程冶炼不锈钢, 采用 160 mm × 1 600 mm 板坯铸机浇铸不锈钢铸坯。试样尺寸为 Φ10 mm × 120 mm, 两侧端部 10 mm 部分加工螺纹。取样位置垂直于拉坯方向, 与柱状晶的生长方向一致。

4 个钢种连铸坯的化学成分见表 1。采用 Gleeble-1500D 热模拟试验机对铸坯进行高温拉伸

试验。在试样安装好后, 为了防止试件在高温下的氧化现象, 试样室通入流量为 1 L/min 的氩气流, 并以 10 °C/s 的速度加热至 1 350 °C 并保温 1 min, 然后以 3 °C/s 的速度降到测试温度, 保温 1 min 后以 1 × 10⁻³ s⁻¹ 的应变速率对试样进行拉伸直至断裂。430 钢真应力、真应变曲线见图 1。

2 试验结果与分析

2.1 不同钢种的断面收缩率和抗拉强度

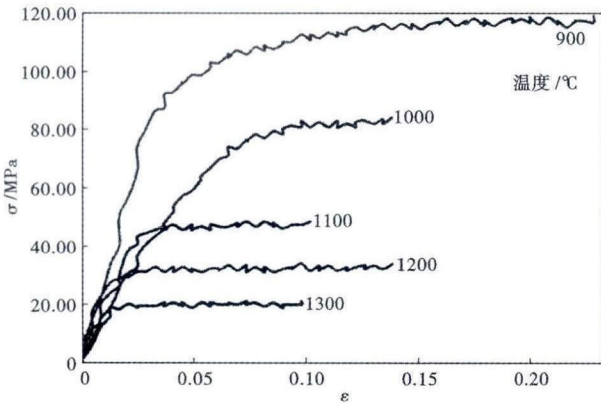


图 1 430 铁素体不锈钢的真应力、真应变曲线

Fig. 1 True stress-true strain curves of ferrite stainless steel 430

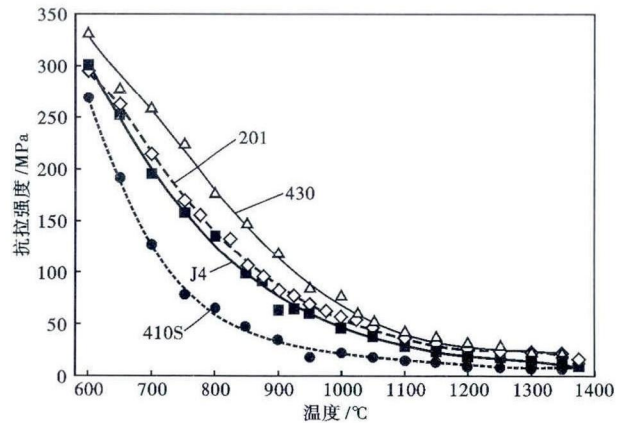


图 3 温度对不锈钢铸坯抗拉强度的影响

Fig. 3 Effect of temperature on tensile strength of casting slab of stainless steels

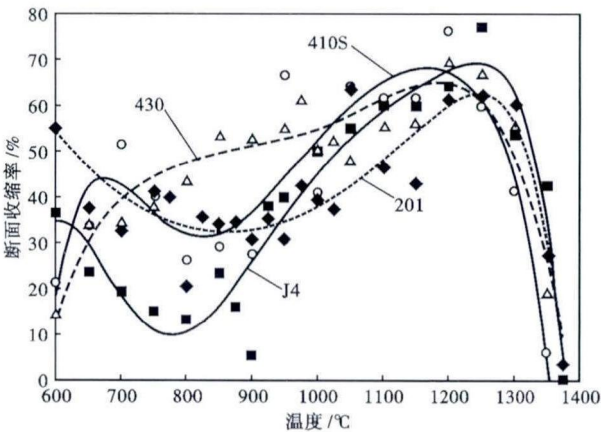


图 2 温度对不锈钢铸坯断面收缩率的影响

Fig. 2 Effect of temperature on reduction of area of casting slab of stainless steels

4 个钢种的断面收缩率如图 2 所示。

在钢的熔点至 600 °C 的温度区间内存在 3 个明显的脆性温度区^[1-2],第 I 脆性区温度范围为 $T_m \sim 1200$ °C^[3-5],第 II 脆性区^[6]出现在应变速率大于 $10^{-2}/s$ 时,与连铸过程关系不大。第 III 脆性温度区 (900 ~ 600 °C) 主要在比较低的应变速率下出现,所以连铸过程中产生的裂纹与第 III 脆性区有着密切的关系^[7]。

钢的 R_A (断面收缩率) 值低于 40% 时铸坯表面裂纹增加,据此以 R_A 低于 40% 作为脆性判断依据^[8]。由图 3 可见,201 钢的第 I 脆性温度区为凝固温度 ~ 1336 °C,第 III 脆性区为 665 ~ 990 °C。J4 钢的第 I 脆性温度区为凝固温度 ~ 1345 °C,第 III 脆性区为 600 ~ 950 °C。这两个钢种在低温区都有着随着温度降低而断面收缩率提高的趋势。430 钢第 I 脆性温度区为凝固温度 ~ 1322 °C,第 III 脆性区

为 600 ~ 700 °C。410S 钢第 I 脆性温度区为凝固温度 ~ 1310 °C,第 III 脆性区为 720 ~ 930 °C。这两种钢在低温区的断面收缩率都有进一步下降的趋势。

由图 3 可见,4 个钢种抗拉强度都是随着温度的升高而降低。在相同温度条件下,430 钢的强度最大,201 和 J4 钢居中,而 410S 钢的强度最低。

2.2 铸坯冷却制度的确定

对于奥氏体不锈钢 201、J4,结晶器内的初生坯壳由高温铁素体向奥氏体转变过程中,会发生包晶反应的相变过程,带来坯壳的强烈收缩,导致初生坯壳厚度不均。奥氏体不锈钢具有较大的膨胀系数 (表 2)^[9],使初生坯壳脱离结晶器而造成坯壳的不均匀性。同时由于奥氏体不锈钢的导热系数低^[10],坯壳生长缓慢而且晶粒粗大,进一步加大了这种不均,非常容易在铸坯上出现凹陷、纵裂等表面缺陷。

因此 201、J4 钢应采用较弱二次冷却,矫直区温度控制在 1010 °C 和 995 °C。由于 J4 钢的高温强度低于 201 钢,为了减小铸坯上部的鼓肚对液面的影响,要适当加大 J4 不锈钢铸坯前部的冷却强度。

430 不锈钢在结晶器内的初生坯壳收缩量很小,要适当加大结晶器的冷却水量,加强散热。430 钢铸坯晶粒粗大,同时具有非常发达的柱状晶组织,必须采用二冷区电磁搅拌,以扩大中心等轴晶区,否

表 2 304 奥氏体不锈钢、430 铁素体不锈钢和碳钢的热膨胀系数对比表

Table 2 Comparison of coefficient of thermal expansion between austenite stainless steel 304, ferrite stainless steel 430 and plain carbon steel

钢种	线膨胀系数/ $^{\circ}C^{-1}$	与碳钢相比
奥氏体 304	18.36×10^{-6}	+56%
铁素体 430	11.34×10^{-6}	-3.1%
碳钢	11.70×10^{-6}	-

则容易造成轧后出现瓦楞状曲线。而且由于铁素体不锈钢的高温蠕变特性,导致铸坯出现宽展现象,降低成品收得率。同时 430 钢全凝固后不会出现固态相变,如果冷却强度低会导致晶粒粗大。因此要采用二冷区强冷区加电揽的生产工艺,将进矫直区温度控制在 $\geq 950\text{ }^{\circ}\text{C}$,矫直后区域加大二冷水量,出扇形段时铸坯表面温度控制在 $\geq 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

由图 3 可见,410S 钢的高温强度远低于其它不锈钢,铸坯非常容易出现裂纹。在板坯浇铸过程中,鼓肚、辊子不对中、热应力等都很容易导致裂纹的出现。同时为了在避免马氏体相变过程中出现裂纹,要求进缓冷坑前铸坯表面温度 $\geq 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此 410S 钢采用较弱的冷却强度,进矫直区温度控制在 $\geq 980\text{ }^{\circ}\text{C}$,控制扇形段温降速率每米 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

根据以上的分析,通过离线软件的模拟计算,可以确定出各钢种的二次冷却曲线,如图 4 所示。按

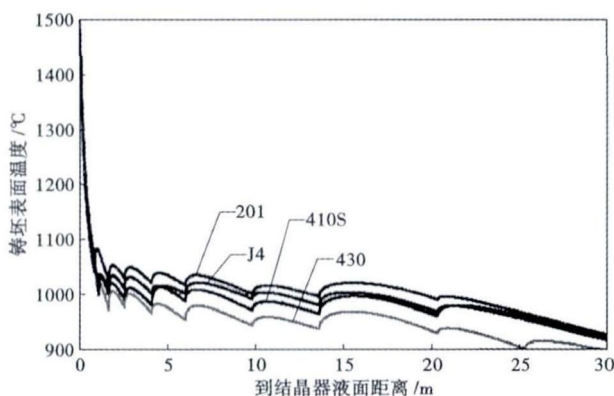


图 4 201、J4、430 和 410S 钢铸坯表面温降曲线

Fig. 4 Surface temperature decreasing curves of casting slab of steel 201, J4, 430 and 410S

参考文献

- [1] Hirowo G Suzuki, Satoshi Nishimura, Shigehiro Yamaguchi. Characteristics of Embrittlement in Steels Above $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ [J]. Tetsu-To-Hagane, 1979, 65(14): 2038-2043.
- [2] Mintz B, Arrowsmith J M. Hot-ductility Behavior of C-Mn-Nb-Al Steels and its Relationship to Crack Propagation during the Straightening of Continuously Cast Strand [J]. Metals Technology, 1979, 6(1): 24-32.
- [3] Atsuhiko Yoshie, Masaaki Fujioka, Yoshiyuki Watanabe. Modelling the Micro-structural Evolution and Mechanical Properties of Steel Plates Produced by Thermo-mechanical Control Process [J]. ISIJ International, 1992, 32(3): 395-404.
- [4] Kim Kyung-hyun, Yeo Tae-jung, Oh Kyu Hwan. Effect of Carbon and Sulphur in Continuously Cast Strand on Longitudinal Surface Cracks [J]. ISIJ International, 1996, 36(3): 284-289.
- [5] Won Young Mok, Kim Kyung-hyun, Yeo Tae-jung. Effect of Cooling Rate on ZST, LIT and ZDT of Carbon Steel Near Melting Point [J]. ISIJ International, 1998, 38(10): 1093-1099.
- [6] Hirowo G Suzuki, Satoshi Nishimura, Jun Imamura. Hot Ductility in

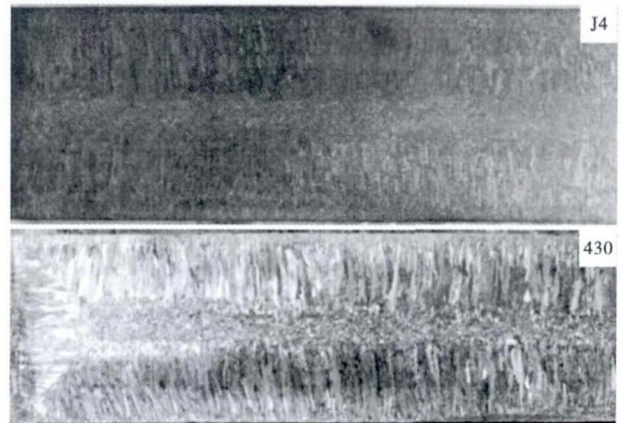


图 5 J4 和 430 钢铸坯低倍组织形貌

Fig. 5 Macro structure morphology of casting slab of steel J4 (top) and steel 430 (bottom)

照以上冷却工艺制度生产出了合格的不锈钢铸坯,表面质量良好,内部质量的各项指标都达到了 0.5 级,铸坯低倍照片如图 5 所示。

3 结论

(1) 201、J4、430、410S 不锈钢的Ⅲ脆性温度区为:201 钢 $665\sim 990\text{ }^{\circ}\text{C}$; J4 钢 $600\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$; 430 钢 $600\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$; 410S 钢 $720\sim 930\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 201、J4 钢应采用较弱的二次冷却,进入矫直区时温度分别控制在 $1010\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $995\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。430 钢采用较强的二次冷却,矫直区温度控制在 $900\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。410S 钢要采用较弱的冷却制度,而且使铸坯温降均匀,进矫直区温度控制在 $980\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。

(3) 生产出的不锈钢铸坯质量良好,内部质量检测各项指标均达到 0.5 级。

Steels in the Temperature Range Between 900 and $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ [J]. Tetsu-To-Hagane, 1981, 67(8): 1180-1189.

- [7] Medina S F, Mancilla J E. Static Re-crystallization Modelling of Hot Deformed Steels Containing Several Alloying Elements [J]. ISIJ International, 1996, 36(8): 1070-1076.
- [8] Mintz B. The Influence of Composition on the Hot Ductility of Steels and the Problem of Transverse Cracking [J]. ISIJ International, 1999, 39(9): 833-855.
- [9] 刘天佑. 钢材质量检验(第 2 版) [M]. 北京:冶金工业出版社, 2008: 208.
- [10] 贺道中. 连续铸钢 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2007: 87.

谢长川(1976-),男,博士,高级工程师,北京科技大学(本科)毕业,连铸机设计和新产品开发。

收稿日期:2013-10-23