

FTSR 薄板坯内部横裂纹形成机理的分析和预防措施

冯运莉 王庆双 谢启川

(河北理工大学金属材料工程系, 唐山 063009)

摘要 采用 Gleeble-3500 热模拟机模拟 FTSR 薄板坯生产工艺, 试验了 SS330 钢板坯(0.06% C)和 SS400 钢板坯(0.20% C)在 600 ~ 1 350 °C 的高温塑性。结果表明, SS400 钢在 700 ~ 900 °C 的高温塑性高于 SS330 钢, SS400 钢板坯内部产生的横向裂纹是由于柱状晶晶界处硫、氧化物的偏聚, 使钢晶界的高温塑性下降所致。通过钢中硫含量由 0.015% 降低至 0.010%, 全氧含量由 45×10^{-6} 降至 30×10^{-6} , 钢中 Mn/S ≥ 60 , 钢水过热度由 30 ~ 50 °C 降至 20 ~ 35 °C, 铸坯拉速由 2.5 ~ 6.0 m/min 改为 3.0 ~ 4.5 m/min, 控制二冷水量, 有效地避免了薄板坯内部横裂纹的产生。

关键词 FTSR 工艺 SS400 钢 薄板坯 内部横裂纹 形成机理

Analysis on Forming Mechanism of Inner Cross Crack in Concasting Thin Slab Produced by FTSR Process

Feng Yunli, Wang Qingshuang and Xie Qichuan

(Metal Material Engineering Department, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009)

Abstract The process of thin slab produced by FTSR (Flexible Thin Slab Rolling) process has been simulated by Gleeble-3500 thermal simulation machine, and the high temperature plasticities of slab of steel SS330 (0.06% C) and steel SS400 (0.20% C) 600 ~ 1 350 °C were tested. Results showed that the high temperature plasticity of steel SS400 at 700 ~ 900 °C was high than that of steel SS330; the high temperature plasticity decreasing of steel SS400 due to segregation and accumulation of sulphide and oxide at boundary of columnar crystal caused inner cross crack formation in slab. With controlling sulphur content in steel decreasing to 0.010% from 0.015%, total oxygen content to 30×10^{-6} from 45×10^{-6} , superheating degree of molten steel to 20 ~ 35 °C from 30 ~ 50 °C, Mn/S in steel ≥ 60 and modifying slab casting speed to 3.0 ~ 4.5 m/min from original 2.5 ~ 6.0 m/min with reasonably controlling secondary cooling water amount, the thin slab inner cross crack was avoided effectively.

Material Index FTSR Process, Steel SS400, Thin Slab, Inner Cross Crack, Forming Mechanism

CSP 薄板坯连铸连轧是 20 世纪 80 年代末、90 年代初开发成功的生产热轧板卷的一项短流程工艺, 而 FTSR 薄板坯连铸连轧生产线采用了薄板坯连铸连轧第 3 代技术, 是继 CSP 连铸连轧后又一种新的生产工艺。该技术具有较大的灵活性, 能浇铸范围较宽的钢种, 并且可以提供表面和内部质量优良、力学性能良好且化学成分较为均匀的钢板^[1]。唐山钢铁公司 FTSR (Flexible Thin Slab Rolling) 薄板坯连铸连轧生产线^[2]于 2003 年 1 月 29 日一次试车成功并投入生产, 年生产规划一期为 150 万 t, 二期为 250 万 t^[3]。连铸采用意大利达涅利公司 FTSR 技术, 轧制采用 FTSR 灵活的薄板坯轧制技术, 均热炉为美国布里克蒙辊底炉技术。

FTSR 连铸板坯低倍检验得出 SS330 铸坯内部质量比较好, 而 SS400 的铸坯内部存在横裂纹、中心偏析和疏松等缺陷(图 1)。为了消除 SS400 薄板坯的内部缺陷, 通过热模拟试验机研究了 SS330、SS400 钢的高温性能。

1 试验材料及方法

试验工艺流程: 150 t 转炉冶炼 → LF 精炼 → 钢包回转台 → 长水口氩气保护 → 中间包 → 4 孔圆柱型水口 → H² 结晶器 → 动态液芯压下 → 多点弯曲矫直 → 旋转除鳞 → 板坯。试验用钢取自 SS330、SS400 铸坯, 在铸坯边部细晶区取样, 加工成 $\Phi 10 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 的试样, 试验钢的化学成分见表 1。

试验用采 Gleeble-3500 热模拟机模拟连铸实际工艺, 将试样以 10 °C/s 的速度加热至 1 200 °C, 再以 2 °C/s 的速度加热至接近熔点 1 430 °C, 在 1 430 °C 保温 30 s 后, 快速冷却到试验温度, 冷却时间均为 80 s。试样的变形速率为 0.049 s⁻¹。

2 试验结果

2.1 SS330、SS400 钢的高温塑性

由图 2 可见, SS330、SS400 钢的高温塑性都在脆性 III 区出现塑性下降的趋势。SS400 在脆性 I 区, 1 300 °C 以上出现塑性下降; SS330 未进行高温

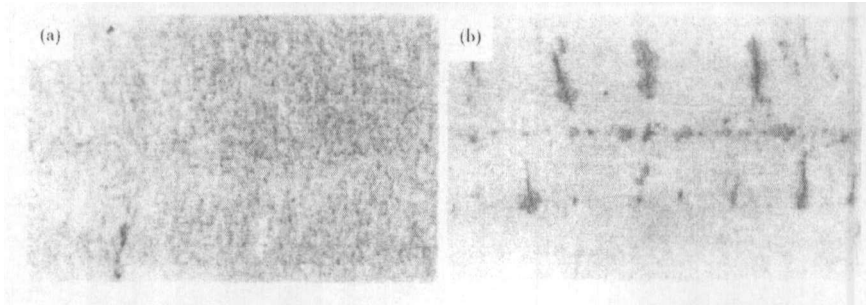


图1 板坯低倍组织:(a) SS330 钢,无内部横裂纹;(b) SS400 钢,出现内部横裂纹
Fig.1 Microstructure of slab; (a) steel SS330, free inner cross crack; (b) steel SS400, occurred inner cross crack

表1 试验钢的化学成分/%
Table 1 Chemical compositions of test steels / %

钢种	C	Mn	S	P	Si	Als
SS330	0.06	0.36	0.005	0.013	0.05	0.021
SS400	0.20	0.38	0.005	0.015	0.08	0.020

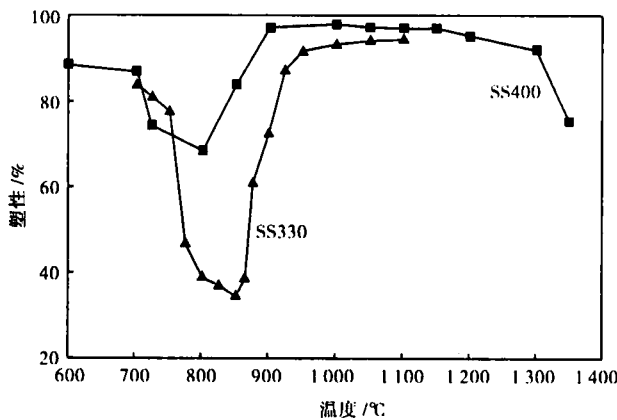


图2 SS330、SS400 钢板坯的高温塑性
Fig.2 High temperature plasticity of slab of steel SS330 and SS400

800 °C 以下,高温塑性的差别不太典型,对连铸生产影响不大。1 050 ~ 1 150 °C 有 3 个铸坯枝晶区试样出现塑性下降,下降幅度在 10.3% ~ 18.8% 之间,如果在 1/4 部位取样塑性下降幅度会更大。塑性下降的原因为铸坯枝晶区柱状晶比较发达,晶间存在偏析,硫、氧化物聚集、沉淀,造成塑性下降。而铸坯边部组织细密,晶间偏析和硫、氧化物聚集量较少,塑性没有下降。

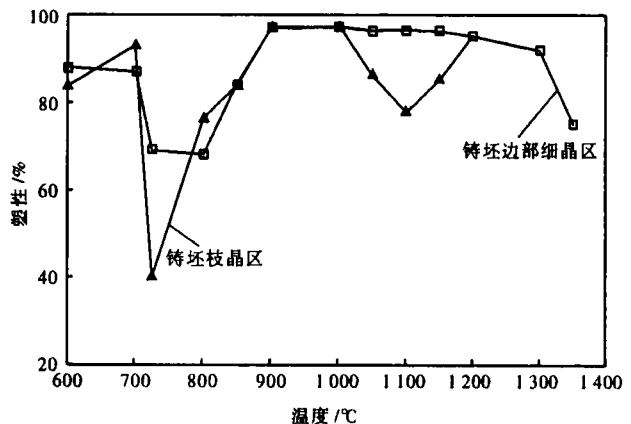


图3 铸坯枝晶区与边部细晶区 SS400 钢板坯高温塑性
Fig.3 High temperature plasticity of steel SS400 at dendrite zone and edge fine crystal zone in slab

试验,但应与 SS400 一样在高温出现塑性下降的趋势。总的来看,SS400 的高温塑性好于 SS330。尤其在 700 ~ 900 °C 之间,SS400 的塑性降低得较小,从 97% 降低到 66%;而 SS330 的塑性降低得较大,从 90% 降低到 36%;在 875 °C 以上,SS330 的塑性 ≥ 60%。

2.2 SS330、SS400 钢的高温强度

SS330 和 SS400 钢的高温强度比较吻合,在 700 ~ 1 350 °C 之间,高温强度与温度的关系可以认为是直线关系,也就是随着温度的升高,高温强度均匀下降,强度从 700 °C 的 13.7 MPa 下降到 1 350 °C 的 2.3 MPa。

2.3 SS400 钢细晶区与枝晶区高温塑性的比较

试验过程中,发现从铸坯枝晶区和边部细晶区取的试样,高温塑性有较大的差别,如图 3 所示。在

3 分析与讨论

3.1 SS330、SS400 连铸薄板坯中柱状晶的形成机理

铸坯凝固过程中,当铸坯中心至凝固前沿的温度梯度较小时,由于钢液凝固放出热量,使固液界面处的温度高于中心温度,此时,温度梯度为负值,固液界面呈柱状晶生长。

当温度梯度较大,凝固放热不足以使固液界面处的温度高于中心温度,温度梯度为正值;但钢在结晶过程中,溶质组元重新分布,在固液界面前沿的液相中形成溶质的浓度梯度,当温度梯度不大时,一般铸坯内部钢液的温度梯度为 3 ~ 5 °C/cm,从而产生

成分过冷。

对钢来说,除受温度梯度的影响外,更主要的是要受成分过冷的影响。成分过冷越大,柱状晶越发达^[4]。

SS330 钢中碳含量约为 0.06%,SS400 钢中碳含量约为 0.20%。铸坯凝固时,在固液界面前沿出现碳的富集,凝固前沿的碳含量高于中心,从而出现碳的浓度梯度。由于 SS400 钢比 SS330 钢的碳含量高,所以 SS400 固液界面前沿碳富集量比 SS330 大,即 SS400 钢固液界面前沿液相中碳的浓度梯度大,且 SS400 与 SS330 铸坯中的温度梯度基本相同,因此 SS400 钢凝固过程中液固界面前沿的液相中容易出现成分过冷,即 SS400 铸坯中的柱状晶比 SS330 铸坯容易生长,这与实际研究结果完全相符。

3.2 SS400 连铸薄板坯中横裂纹的形成

SS400 板坯中的柱状晶比较发达,柱状晶间有碳、硫、氧等元素的偏析,在柱状晶晶界处有硫、氧化物的沉淀,如 (Fe, Mn)S、(Fe, Mn)O。两者的存在增加了晶界断裂的敏感性^[5]。图 3 表明,有发达柱状晶的铸坯,钢的高温塑性下降。连铸生产时,铸坯内部总会存在热应力或其它外力的作用,如果超过钢的塑性变形极限,铸坯内部就会出现裂纹。尤其在铸坯枝晶间最容易产生裂纹,裂纹在外力的作用下,又不断扩展,这样就形成了铸坯内部晶间裂纹。

研究发现,钢的高温强度一般都比较低。铸坯二冷段的温度在 950~1200℃ 之间,铸坯的抗拉强度 ≤ 10 MPa,枝晶间又有促进晶界脆性的硫、氧化物的存在,所以铸坯在外力的作用下也很容易出现裂纹。

铸坯内部的外力一般来自液芯压下、扇形段对弧精度不高、扇形段辊缝控制精度不高、铸坯鼓肚、铸坯弯曲和矫直等,这些外力在铸坯纵向是拉应力,所以容易使铸坯产生横向裂纹。

3.3 控制 SS400 连铸薄板坯内部横裂纹的措施

(1) 控制中间包钢水过热度。原工艺钢水过热度为 30~50℃,改进后过热度控制在 20~35℃ 的下限。由于钢水温度低,可增加钢水凝固时的形核率,减缓柱状晶的生长。

(2) 铸坯拉速由原来的 2.5~6.0 m/min 改为 3.0~4.5 m/min;合理分配二冷水在各扇形段的水量,同时冷却要均匀,防止铸坯表面回温,减少铸坯热应力;控制二冷水量,减少铸坯内部柱状晶的比率。并合理控制液芯压下量和最终压下位置。

(3) 硫是强烈的裂纹敏感性元素,特别是在薄板坯连铸高的拉速、小的结晶器钢液面条件下,硫一方面会增加铸坯裂纹缺陷的可能性;另一方面,钢水中酸溶铝和硫含量应有一定的匹配关系,否则会导致钢水钙处理后堵塞水口。氧在钢中的溶解度非常小,基本以氧化物夹杂的形式存在于钢中,这些夹杂物破坏了钢的基体连续性,往往成为裂纹的起点。因此提高钢水纯净度,减少钢中硫、氧等杂质含量,使硫由原来的 $\leq 0.015\%$ 调整为 $\leq 0.010\%$;全氧由原来的 $\leq 45 \times 10^{-6}$ 调整为 $\leq 30 \times 10^{-6}$;提高钢中 Mn/S 比, $Mn/S \geq 60$,可降低晶界脆性物质的析出。

(4) 提高扇形段的对弧精度和辊缝的控制精度,控制板坯拉速在合理的范围内,减少铸坯出现鼓肚,减少外力对铸坯的影响。剪切机前的铸坯温度控制在 ≥ 900 ℃。

按上述方案在生产厂进行试验,结果表明,SS400 板坯质量达到较高的水平。

4 结论

(1) SS400 钢的高温塑性优于 SS330 的高温塑性;SS400 与 SS330 的高温强度基本相同。

(2) SS400 板坯内部出现横裂纹不是由于钢种本身高温塑性和高温强度低造成的,形成板坯内部横向裂纹的原因是柱状晶发达,柱状晶间有碳、硫、氧等元素的偏析,在柱状晶晶界处有硫化物、氧化物的沉淀,使钢的晶间高温塑性下降。

(3) 减少 SS400 板坯内部横裂纹的措施是控制柱状晶的生长,提高钢水内部质量,减小铸坯所受的外力。

唐山市科学技术研究与发展计划资助项目(编号 04204501C-22)

参考文献

- 1 刘宇,吴国海.薄板坯连铸连轧技术及发展趋势.山东冶金,2001,23(4):1
- 2 冯运莉,王岭娥,陈华辉.唐钢 FTSR 连铸薄板坯热轧低碳钢的组织性能.特殊钢,2005,26(5):54
- 3 冯运莉.唐钢超薄热轧带钢生产线的质量控制技术.钢铁钒钛,2005,26(2):17
- 4 崔忠圻.金属学与热处理.北京:机械工业出版社,1989
- 5 蔡开科,程士富.连续铸钢原理与工艺.北京:冶金工业出版社,1999

冯运莉(1965-),女,博士,教授,从事超细晶钢研究。

收稿日期:2006-12-06