

0Cr13C 不锈钢线材表面混晶缺陷及工艺改进

陆恒昌 刘剑辉 田超 徐德祥 范建文 董瀚
(钢铁研究总院,北京 100081)

摘要 0Cr13C 不锈钢 $\Phi 5.5 \sim 15$ mm 线材的生产工艺为 60 t 中频感应炉-90 t AOD-LF-180 mm \times 180 mm 坯连铸-连轧。通过光学和扫描电子显微镜对表面“裸晶”缺陷 0Cr13C 钢线材(成分:0.021C,0.32Si,0.35Mn,0.030P,0.004S,12.10Cr)的分析,得出该缺陷源于混晶:(a)连铸钢水过热度大,二冷水量小,造成连铸坯中铁素体枝晶间距较大,(b)加热炉温度过高,使钢中铁素体晶粒异常长大。通过将中间包钢水过热度从 50 $^{\circ}\text{C}$ 降至 30 $^{\circ}\text{C}$,拉速由 1.2 m/min 降至 1.0 m/min,电磁搅拌由 150 A-3 Hz 提高至 280 A-6 Hz,二冷水量由 0.19 L/kg 增加至 0.33 L/kg,以及将铸坯加热温度由 1080 ~ 1130 $^{\circ}\text{C}$ 降至 1020 $^{\circ}\text{C}$ 等工艺措施,避免了线材表面“裸晶”缺陷。

关键词 0Cr13C 不锈钢 线材 混晶 表面缺陷 工艺改进

Mixed Crystal Surface Defect of Wire Rod of Stainless Steel 0Cr13C and Process Improvement

Lu Hengchang, Liu Jianhui, Tian Chao, Xu Dexiang, Fan Jianwen and Dong Han
(Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The production process of $\Phi 5.5 \sim 15$ mm wire rod of stainless steel 0Cr13C is 60 t medium frequency induction furnace-90 t AOD-LF-180 mm \times 180 mm billet casting-continuous rolling. The surface “exposed crystal” defect of wire rod of steel 0Cr13C (composition: 0.021C, 0.32Si, 0.35Mn, 0.030P, 0.004S, 12.10Cr) is analyzed by optical and scanning electron microscope to get the defects take its source at mixed crystal due to (a) large overheating extent of casting liquid and small secondary cooling water rate led to larger dendritic inter-planar spacing of ferrite in casting billet and (b) higher temperature in heating furnace led to abnormal growth of ferrite grains in steel. With the process measures including decreasing overheating extent of liquid in tundish to 30 $^{\circ}\text{C}$ from 50 $^{\circ}\text{C}$, decreasing casting speed of billet to 1.0 m/min from original 1.2 m/min, improving electromagnetic stirring to 280 A-6 Hz from original 150 A-3 Hz, increasing secondary water cooling rate to 0.33 L/kg from 0.19 L/kg and reducing casting billet heating temperature to 1020 $^{\circ}\text{C}$ from original 1080 ~ 1130 $^{\circ}\text{C}$, the surface “exposed crystal” defects of wire rod are avoided.

Material Index Stainless Steel 0Cr13C, Wire Rod, Mixed Crystal, Surface Defects, Process Improvement

400 系不锈钢除了具有优异的耐应力腐蚀性能外,还因为节镍,被称为经济型不锈钢^[1,2];2016 年我国 400 系不锈钢产量为 484.56 万吨,同比增长 22.08%,在不锈钢产品中所占份额为 19.43%^[3];本文针对高线厂 0Cr13C 钢产品中的表面“裸晶”缺陷进行分析,并采取相应的措施予以解决。

1 0Cr13C 钢生产流程和“裸晶”缺陷分析

0Cr13C 钢生产工艺流程为:60 t 中频炉 \rightarrow 90 t AOD \rightarrow LF \rightarrow 连铸 \rightarrow 高线轧制 \rightarrow 退火 \rightarrow 酸洗;连铸坯(180 mm \times 180 mm)在步进式加热炉中加热(最大装炉量为 100 支 180 mm \times 180 mm \times 1700 mm 的钢坯),出加热炉后经过高压水除鳞,接着进入 6 架粗轧机组及 14 架中轧机组,进入 PSM 预精轧机组、精轧机组、吐丝机及风机冷却输送辊道,盘卷成材规格范围为 $\Phi 5.5 \sim 15$ mm。

如图 1(a)所示为 $\Phi 5.5$ mm 规格的 0Cr13C 钢线材,经过退火酸洗后发现其表面沿轧制方向出现

连续的白亮带,白亮带由许多长宽比较大的亮斑组成,产品质检人员称之为“裸晶”缺陷,某段时间内该类缺陷在该品种中约占 30%;分别采用扫描电镜(FEI, Quanta-650FEG)及光学显微镜对其形貌进行观察,如图 1(b,c)和图 2 所示,对比可见,由图 1(c)白亮带的亮斑为粗大的晶粒,比图 1(b)正常表面的晶粒尺寸明显较大,图 2(a)为对应的横截面图,如虚线至边缘轮廓所示,可见表面白亮带的晶粒异常粗大,同时内部也出现了混晶现象,如图 2(b)。

根据钢厂的内控成分(表 1),使用 Thermo-Calc^[4,5]软件计算得到平衡相图,如图 3;另外测得 0Cr13C 钢缺陷试样的成分如表 1 所示。

由图 3 可知,当碳含量小于 0.022% 时不存在奥氏体单相区,当碳含量为 0.03% 时,0Cr13C 钢有 2 个铁素体和奥氏体两相区,即 820 ~ 928 $^{\circ}\text{C}$ 和 1022 ~ 1225 $^{\circ}\text{C}$,在 928 ~ 1022 $^{\circ}\text{C}$ 为单相奥氏体区,碳化物 Cr_{23}C_6 析出温度为 820 $^{\circ}\text{C}$ 。钢厂加热炉现行的均热

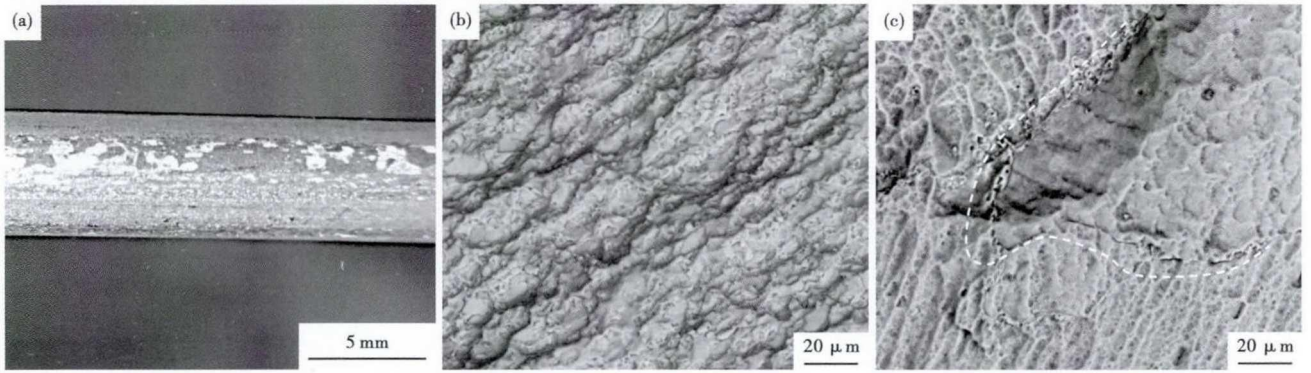


图 1 0Cr13C 钢 Φ5.5 mm 线材表面裸晶缺陷宏观形貌(a);正常表面(b)和白亮粗晶表面(c)SEM 形貌

Fig. 1 Macro-morphology of surface exposed crystal defects (a), SEM morphology of normal surface (b) and white-bright surface coarse grains (c), Φ5.5 mm wire rod of steel 0Cr13C

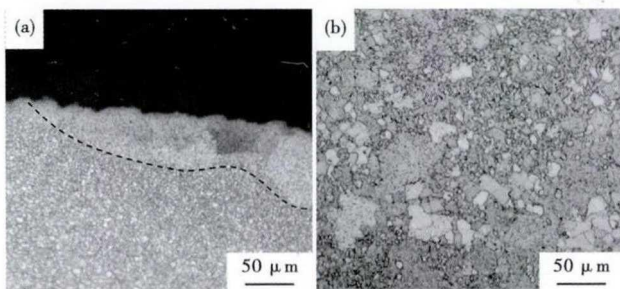


图 2 0Cr13C 钢 Φ5.5 mm 线材横截面组织形貌:(a)表层混晶;(b)内部混晶

Fig. 2 Morphology of surface mixed crystal (a) and interior mixed crystal (b), section of Φ5.5 mm wire rod of steel 0Cr13C

表 1 0Cr13C 钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of steel 0Cr13C / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr
内控	≤0.03	0.25 ~ 0.45	≤0.40	≤0.030	≤0.005	12.0 ~ 12.2
缺陷样	0.021	0.32	0.35	0.030	0.004	12.10

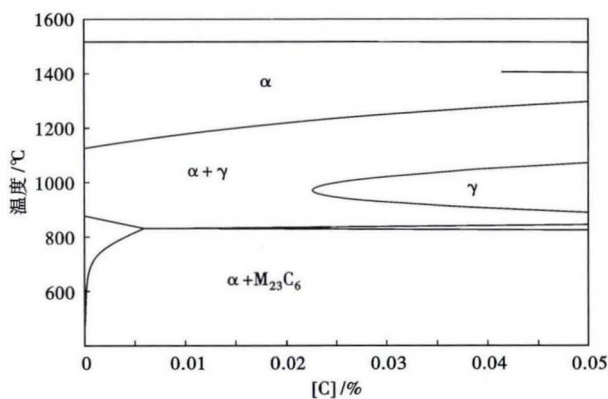


图 3 0Cr13C 钢平衡相图

Fig. 3 Calculated equilibrium phase diagram of steel 0Cr13C

温度为 1 080 ~ 1 130 °C,处在两相区内,因而将会得

到高温铁素体,高温铁素体对钢的力学性能及耐蚀性均有不利的影响,而且很难消除;对于该缺陷试样,其成分正好避开了奥氏体单相区,因此在整个加热过程中,高温铁素体一直存在。

为了上溯混晶原因,对 0Cr13C 钢连铸坯及精轧前阶段取样分析,如图 4 所示。图 4(a)为连铸坯的低倍照片,可见柱状晶间距较大;图 4(b)为精轧前试样的横截面组织,可见铁素体晶粒较为粗大,且呈带状分布,与图 4(a)中连铸坯的柱状晶生长分布一致,说明在经过 24 道轧制后,连铸坯中的粗大铁素体枝晶还未得到细化。

陈伟庆等^[6-7]认为,较大的过热度、较快的拉速及较小的二冷强度,均会使小方坯枝晶粗大、枝晶间距增加,但是二冷强度过大会带来柱状晶比例扩大等问题,较强的电磁搅拌可以显著减小枝晶间距,并能增加等轴晶率;一般而言,柱状晶越粗大,溶质偏析越严重,因而加热工艺不当时,容易导致局部晶粒异常长大^[8];有关研究结果显示^[9],在 1 070 °C 以上加热大于 1 h,0.1C% ~ 12Cr% 耐热钢晶粒即明显

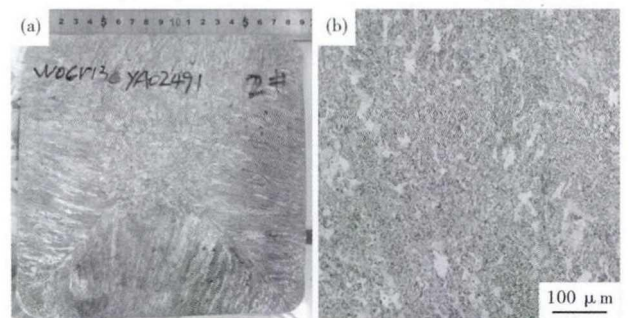


图 4 0Cr13C 钢 (a) 180 mm x 180 mm 连铸坯低倍组织和 (b) Φ12 mm 精轧前组织形貌

Fig. 4 Morphology of macrostructure of 180 mm x 180 mm casting billet (a) and microstructure of Φ12 mm piece before finishing rolling (b)

长大,甚至异常长大。

综合分析,0Cr13C 钢混晶产生的主要原因为:(1)由于连铸工艺不良,导致连铸坯柱状晶粗大,铁素体枝晶较宽,在轧制过程难以细化,同时枝晶间会存在一定的偏析,从而导致碳化物分布不均,粗大铁素体缺乏钉扎作用而异常长大,产生混晶;(2)加热炉温度控制不当,温度过高使晶粒异常长大,粗大的铁素体晶粒难以通过相变及再结晶以细化。

2 工艺改进措施及结果

0Cr13C 钢连铸坯质量的连铸工艺改进要点是:控制中间包钢水的过热度,在稳定浇铸时过热度为 30 ℃;同时相应适当提高二冷强度、减小拉速、提高电磁搅拌强度。表 2 为改进前后的工艺对比,连铸坯断面尺寸为 180 mm × 180 mm。

表 2 工艺改进前后 0Cr13C 钢 180 mm × 180 mm 坯的连铸工艺参数

Table 2 Casting parameters of steel 0Cr13C 180 mm × 180 mm billet before and after process improvement

工艺	中间包钢水过热度/℃	二冷水量/ (L · kg ⁻¹)	拉速/ (m · min ⁻¹)	结晶器电缆参数	
				电流/A	频率/Hz
改进前	50	0.19	1.2	150	3
改进后	30	0.33	1.0	280	6

表 3 工艺改进前后 0Cr13C 钢 180 mm × 180 mm 连铸坯的加热工艺

Table 3 Heating process of 180 mm × 180 mm casting billet of steel 0Cr13C before and after process improvement

工艺	预热段/ ℃	加热		均热段/ ℃	停车制度
		I 段/℃	II 段/℃		
改进前	≤750	950 ~ 1 020	1 050 ~ 1 130	1 080 ~ 1 130	-
改进后	≤900	980	1 000	1 020	正常轧制
	≤900	950	980	1000	停轧 30 ~ 60 min
	≤900	920	920	950	停轧 60 min 以上



图 5 工艺改进后的 0Cr13C 钢线材的退火组织形貌

Fig. 5 Morphology of annealed structure of steel 0Cr13C wire rod after process improvement

加热炉调整后的制度如表 3 所示,0Cr13C 钢均热段的最高温度降低了 110 ℃;目前加热炉主要为人工控制,不利于温度的精准控制,容易产生温度波动,因此改进为自动化控制;除了精确控炉温外,还需控制好停车降温制度。

通过工艺调整,消除了 0Cr13C 钢的混晶,线材表面“裸晶”缺陷得到解决,图 5 可见 0Cr13C 钢退火后晶粒组织较为均匀。

3 结论

(1)0Cr13C 不锈钢线材表面“裸晶”缺陷为混晶的表象,主要为连铸工艺不良导致连铸坯柱状晶粗大,铁素体枝晶较宽,同时加热炉温度过高使晶粒异常长大;在轧制过程中,粗大的铁素体晶粒难以通过相变及再结晶以细化。

(2)通过控制钢水过热度 30 ℃,结晶器电磁搅拌的电流及频率提高到 280 A、6 Hz,降低拉速至 1.0 m/min,二冷配水提高至 0.33 L/kg;加热炉均匀段温度为 1 020 ℃,严格控制停车降温制度,加强对加热炉中不同钢种排位的管理等措施,解决了 0Cr13C 钢混晶导致的表面“裸晶”缺陷。

国家自然科学基金(51474076);国家重点研发计划(2016YFB0101605)

参考文献

- [1] 考肖琴. 12% Cr 铁素体不锈钢板材显微组织特征对腐蚀性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(20): 68-70.
- [2] 杨瑞成, 舒俊, 孟威, 等. 0.02C-12Cr 不锈钢板材热轧态的组织特征及其影响[J]. 热加工工艺, 2009, 38(06): 35-39.
- [3] 中国特钢企业协会不锈钢分会. 不锈钢分会公布 2016 年中国不锈钢产量数据 [DB/OL]. <http://www.cssc.org.cn/shuju/cuganganlianhangtongji/2017-03-15/2104.html>, 2017-03-15/2017-04-09.
- [4] 张明达, 胡春东, 曹文全, 等. 基于 Thermo-Calc 的中锰中铝 Fe-Mn-Al-C 低密度钢类 Schaeffler 相图绘制与评估[J]. 工程科学学报, 2016, 38(05): 682-690.
- [5] 向嵩, 刘国权. 低碳微合金钢碳氮析出物的 Thermo-calc 热力学分析[J]. 热加工工艺, 2010, 39(08): 1-4.
- [6] 冯军, 陈伟庆. 高碳钢小方坯的一次枝晶臂间距的影响因素[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(01): 25-29.
- [7] 冯军, 陈伟庆. 高强度二冷对高碳钢小方坯凝固组织和中心碳偏析的影响[J]. 特殊钢, 2006, 27(4): 42-44.
- [8] 齐珂, 隋大山, 陈飞, 等. 316LN 钢奥氏体晶粒长大模型[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(3): 98-103.
- [9] 刘志祥. 12% Cr 超超临界转子钢热处理基础研究及工艺模拟[D]. 太原: 太原科技大学, 2012.

陆恒昌(1986-), 男, 博士生, 助理工程师, 2008 年中北大学(本科)毕业, 新一代钢铁材料研究。

E-mail: lu_hc@yahoo.com

收稿日期: 2017-06-19