

钛对铌微合金化钢夹杂物析出行为的影响

赵保华^{1,2}, 柯昌明¹, 钟贤岱¹, 谢军², 朱诚意¹, 郑建新¹

(1. 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081; 2. 武汉钢铁集团公司, 湖北 武汉 430083)

摘要:采用高频真空感应炉在 1 550 ℃ 的 Ar 气氛中冶炼不同钛含量的钛、铌微合金化钢并对其进行热处理。分析了钛加入量对钢的成分、组织结构、钢中典型夹杂物及宏观力学性能的影响。研究表明:采用 Al 脱氧后的钛、铌微合金化钢氧含量降低到 0.002 0% 左右,合金元素的利用率超过 80%。钢中的夹杂物主要有球形或近似球形的 Al_2O_3 、 SiO_2 、 TiO_x 及其复合夹杂。(Ti, Nb)(C, N)、NbC、TiC 夹杂以氧化物夹杂为核心析出。随着钛合金加入量的增加,钢样中的部分夹杂物形貌由球形发展成方形。经共聚焦激光扫描高温显微镜热处理过的钢样中析出较多细小的(Ti, Nb)(C, N)夹杂物。随着钛含量的增加,热处理后的钢中小于 1 μm 夹杂物数量急剧增加,尺寸大于 1 μm 的夹杂物的数量呈现减少的趋势。高温在线金相组织分析表明:钢中钛加入量增加,高温奥氏体晶粒变小,钢的组织细化,从而钢的宏观硬度增高。

关键词:钛铌复合微合金化;组织结构;夹杂物;宏观硬度

中图分类号:TF823, TG142. 1 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-7638(2012)04-0073-08

Effect of Titanium on the Precipitation Behavior of Inclusions in Niobium Microalloyed Steel

Zhao Baohua^{1,2}, Ke Changming¹, Zhong Xiandai¹, Xie Jun², Zhu Chengyi¹, Zheng Jianxin¹

(1. School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. Wuhan Iron and Steel Group Company, Wuhan 430083, Hubei, China)

Abstract: Experiments were conducted in a high frequency vacuum induction furnace to smelt titanium and niobium microalloyed steel with different titanium addition at 1 550 ℃ under Ar atmosphere, and then the samples underwent heat treatment. The effect of titanium additive amount on composition, microstructure, typical inclusions and macro mechanical property of the titanium and niobium microalloyed steel were analyzed. The results show oxygen content in the steel microalloyed with titanium and niobium decreases to about 20×10^{-6} after Al is employed to deoxidize and the utilization rate of titanium exceeds 80%. Inclusions in the steel were mainly sphere shaped or approximate to sphere shaped Al_2O_3 , SiO_2 , and TiO_x based complex inclusions. Cube shaped (Ti, Nb)(C, N) complex inclusions and NbC, TiC inclusions in the steel precipitate around the spherical oxide inclusions. A lot of fine (Ti, Nb)(C, N) precipitations after heat treatment can be seen with confocal laser scanning microscope. After heat treatment, with the increase of titanium content in the steel, inclusions with the size less than 1 μm increase significantly, while the inclusions with the size larger than 1 μm tend to decrease. Heated and held at 1 200 ℃, the austenite grain of the samples became smaller with the increase of titanium addition in the steel. Thus the microstructure was obviously refined in steel, which led to improvement of macro hardness of the steel.

Key words: titanium and niobium complex microalloying; microstructure; inclusions; macro hardness

0 引言

众所周知,在低合金钢中加入的微量的 Ti、Nb、V,通过化学成分和加工工艺(控轧控冷)的严格控制,可以充分发挥微合金化元素加入带来的晶粒细化和沉淀强化作用以显著改善钢的组织与性能。Nb 是目前使用最广泛和成功的微合金化元素,经过 30 多年的发展,含 Nb 微合金化钢广泛用于高级船板、采油平台、油气管线、桥梁、汽车、压力容器、工程机械、高层建筑、不锈钢等领域^[1-8],钢的力学性能、加工性能等得到极大提高,耐蚀、耐热性能等也得到较大改善。Ti 加入到低合金钢中的作用的独特之处在于:①钢中的 Ti 易与碳、氮结合形成 Ti(C, N),在高温时析出的细小、弥散的 Ti(C, N)可以抑制高温奥氏体晶粒的长大,起细化钢的凝固组织的作用^[9]。②Ti 在钢中通过固定 N 从而减少了 Nb(C, N)、AlN 沿奥氏体晶界的析出,提高了钢的热塑性,从而减少由于 Nb 的加入引起的钢坯表面产生横裂,同时 TiN 还可以成为其他碳氮化物的形核核心使之粗化,避免低温应变时析出弥散相从而提高热塑性^[10-11]。③TiN 熔点很高,在焊接热影响区都能抑制奥氏体晶粒长大,加微量 Ti(0.03%)就能显著改善热影响区韧性。TiC 及复合物的析出也有利于抑制奥氏体晶粒的长大,从而提高钢的热焊接韧性^[13-14]。④细小的 TiN 和钛氧化物可以成为晶内铁素体形核的核心,从而细化钢的组织,以提高钢的强度和韧性^[15]。采用 Ti、Nb 复合微合金

化生产高强度微合金化钢引起了国内外学者的广泛关注^[16-23]。目前在高强度焊接结构用钢中,微合金化元素高于常规微合金化工程结构用钢,根据高强度焊接结构用钢板 HG785 的供货技术条件(WJX159-2006),微合金化元素钛、铌及钒总含量由 0.02% 变化到 0.16% 不等^[24],变化范围较大,这将导致生产该钢种时从冶炼、连铸及后续热加工处理条件的适当调整。本研究高钛含量对铌微合金化焊接结构用钢铸态组织和夹杂物析出行为的影响,以期高钛含量的微合金化钢的生产提供参考。

1 钛、铌微合金化焊接结构钢的熔炼及热处理

1.1 钛、铌微合金化焊接结构钢的熔炼

本试验采用由某钢厂高炉渣制得的 Ti-Si-Fe 合金粉末(成分见表 1)和市售含铌 70% 的铌铁作为钢中的微合金化元素。钢液的深脱氧采用工业电解生产的纯铝(99.9%)颗粒。参照企业生产的某焊接结构用钢的供货成分指标,制定实验室熔炼钢样的目标成分及钛、铌的加入量(如表 2 所示)。结构钢采用工业纯铁和各合金粉末按目标钢成分(表 2)进行配制。本试验共制备钛在钢中的名义加入量分别为 0、0.04%、0.08%、0.10%、0.14% 的 5 种钢样,编号分别为 1、2、3、4、5 号。其中 1 号代表普通结构钢,2、3、4、5 号分别表示含钛量不同的钛、铌微合金化结构钢。

表 1 Ti-Si-Fe 合金和 Si-Fe 合金的化学成分
Table 1 The chemical compositions of Ti-Si-Fe alloy and Si-Fe alloy %

合金	C	Si	Mn	P	S	Als	Mg	V	Ti	Fe
Ti-Si-Fe	0.480	36.400	1.980	0.015	0.016	1.650	0.040	0.620	47.54	11.259
Fe-Si	0.260	70.740		0.035	0.008	3.080				

表 2 实验室熔炼的铌、钛微合金化结构用钢的目标化学成分
Table 2 The targeting chemical composition of Nb and Ti microalloyed structural steel for laboratory smelting %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Nb _{名义}	Ti _{名义}
≤0.10	≤0.40	1.80	≤0.020	≤0.008	0.28	0.033	0.065	0~0.14

为了考察 Ti-Si-Fe 合金的脱氧效果,从现场取得转炉冶炼终点的钢样。将盛有 7 kg 钢样的坩锅放入感应炉内熔化,钢样熔化后立即在钢液面上覆盖 200 g 无碳保护渣,待保护渣完全熔化后的试样

为初始样,取初始样并开始后续脱氧试验。往预熔好的钢样中加入 7 g Ti-Si-Fe 铁合金,合金加入 1 min 后,利用石英玻璃管取钢样供分析使用,前 15 min 每隔 2 min 取一个钢样,后 15 min 每隔 5 min 取一个钢样。观察脱氧时间对脱氧效果的影响并评价 Ti-Si-Fe 铁合金用于脱氧的效果。

本研究采用高频真空感应炉在 1 550 ℃ 的 Ar 气氛中冶炼不同钛含量的钛、铌微合金化钢。熔炼后的试样经降温到 1 400 ℃ 左右后采用水淬。采用 TC500 型氧氮分析仪分析钢中的氧和氮含量。采用

碳硫分析仪分析其中的碳硫。采用 ICP 分析微合金化钢样中的 Ti、Nb 及其他合金元素的含量。采用金属试样预磨机、抛光机处理熔炼好的钢样后,采用扫描电镜结合能谱仪分析样品中夹杂物组成、成分及形貌,并统计夹杂物的尺寸。

1.2 钛、钕微合金化焊接结构钢固态相变的高温在线分析

将钛含量不同的试样制成 $\varnothing 5 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的金相试样,经过预磨和机械抛光后,置入丙酮中超声波清洗 1 min,烘干后置于高温共焦激光扫描显微镜的加热炉中,通氩气流保护。利用高温 CSLM 在线观察不同温度下钛含量对钛微合金化高强钢固态相变过程的影响。试样以 $200 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的加热速度加热至 $1\ 200 \text{ }^\circ\text{C}$,保温 5 min。由热蚀沟来显示出奥氏体晶粒,利用显微成像系统在线观察加热过程中试样自由面上显微组织的变化,可以观察相变的起始和结束点,由连续拍摄的显微照片即可测得该试样在不同加热温度下的奥氏体晶粒的晶粒大小,同时导入微机视频文件中。

1.3 铸态及热处理钢样中夹杂的组成、形貌、尺寸及金相组织分析

对试样进行重新抛光,用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀,采用扫描电镜对不同钛含量的试样进行金相组织分析。

2 试验结果与分析

2.1 Ti-Si-Fe 合金用于钢液脱氧的分析

加入 Ti-Si-Fe 合金后,钢样的总氧含量随时间变化的结果如图 1 所示。从图 1 明显可以发现,加入 Ti-Si-Fe 合金复合脱氧剂后,在熔炼的前 10 min,钢样的总氧含量大幅度降低,且在第 5 min 后慢慢地趋于稳定。在转炉终点结束时,钢水定氧约为 0.08%,在取样过程中,钢水沸腾,部分氧被消耗,加合金时初始氧含量为 0.06%。采用 Ti-Si-Fe 合金脱

氧后,氧含量维持在 0.02% ~ 0.03% 的水平,相对较高。因此,在微合金化处理前应该脱氧,否则不能保证合金的回收率。Ti-Si-Fe 合金具有一定的脱氧能力,随着脱氧时间的延长,脱氧能力和脱氧效率逐渐趋于稳定状态。根据脱氧的效果来看,钢样熔化后保温 5 ~ 10 min,钢中的氧含量就已达到最低水平,所以脱氧处理 5 ~ 10 min 即可。

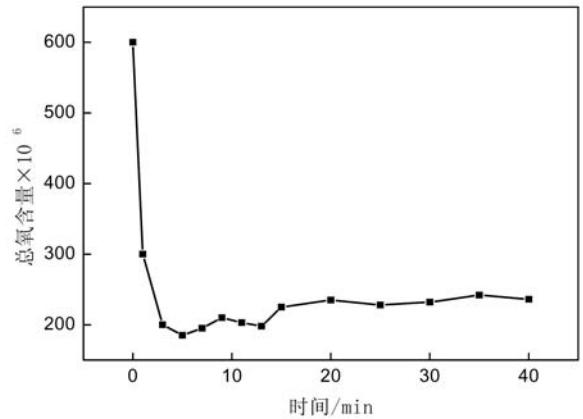


图 1 加入合金后,钢样总氧含量随时间的变化
Fig. 1 Total oxygen content in steel samples varying with time after adding alloy

2.2 Ti-Si-Fe 合金加入量对钢中氧氮含量的影响

为了保证合金的利用率,先采用 Al 脱氧。工业纯铁的起始氧含量为 0.028%。加入铝脱氧后和合金加入后,钢样中氧、氮分析结果见表 3。由表 3 可见,试验钢样的氧含量都比较低,而且随着 Ti 含量的增加,氧含量的变化并不明显。由于在钢样的熔炼过程中加入了强脱氧性元素 Al 脱氧后,氧含量已经达到很低的水平,尽管调整成分的合金粉末和所有加入的 Ti-Si-Fe 合金有一定程度的脱氧作用,但在这里并不明显。因此,生产中在熔炼钛微合金化钢时,为了保证钛元素的利用率,在钛微合金化前,有必要用铝进行预脱氧,使钢水中的氧脱到一定程度,以提高钛的利用率,节约生产成本。

表 3 铝脱氧后及合金加入后钢样中 T[O] 和 T[N] 含量

Table 3 The contents of T[O] and T[N] in the samples after aluminium deoxidization and alloy adding %

试样编号	T[O]		T[N]	
	Al 脱氧后	加入合金后	Al 脱氧后	加入合金后
1	32	31	18	19
2	31	28	20	22
3	29	26	19	23
4	28	20	20	24
5	30	21	20	18

2.3 钛合金加入量对钢样成分的影响

采用 ICP 分析熔炼后的钢中各合金元素的含量, 得到钢中钛的收得率 η_{Ti} 和钢样中钛含量 (如表 4 所示)。比较各钢样中 Ti 合金化的利用率, 可

以看出, 经过铝脱氧后, 在其他条件相同的情况下, 随 Ti-Si-Fe 合金加入量的增加钢中合金元素含量增加, 钛的回收率都较高, 铌的含量基本没变化。

表 4 钛铌微合金化焊接结构钢熔炼后的化学成分和钛收得率
Table 4 The chemical composition and titanium yield of titanium and niobium microalloyed welded structural steel after smelting

试样编号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb	Ti	η_{Ti}
1	0.067	0.062	1.81	0.011	0.003 5	0.25	0.060		
2	0.066	0.061	1.79	0.011	0.003 6	0.24	0.059	0.032	80.0
3	0.067	0.060	1.84	0.010	0.004 0	0.26	0.060	0.068	85.0
4	0.069	0.061	1.87	0.012	0.004 0	0.25	0.061	0.086	86.0
5	0.069	0.060	1.87	0.012	0.006 0	0.26	0.061	0.130	92.9

2.4 铸态试验钢样的典型夹杂物分析

采用扫描电镜结合能谱仪观察到选取的 2、4、5 三组试样的典型夹杂物的形貌、尺寸和组成如图 2 所示。从图 2 可以看出: 铸态试样的典型的氧化物夹杂物为 Al_2O_3 、 SiO_2 及 TiO_x 夹杂。 TiO_x 夹杂主要为球形夹杂, 容易与聚集一起生长, 这也是在冶炼钛微合金化钢过程中易发生水口堵塞的主要原因。由于试样中 Ti 的添加量较高, 在球形夹杂物外面生长出了不规则长方体形状的夹杂物。结合能谱成分分析结果可以看出长方形夹杂的外围主要是

Ti 和 N 这两种元素, 该处夹杂物主要是 TiN, 还有少量的 TiC。中心黑点位置的主要成分 TiO_x 和 Al_2O_3 。根据扫描电镜分析结果, 钢中存在典型的铌、钛复合夹杂 (Ti, Nb) N, NbC、TiC 夹杂 (图 2 中第 1 个夹杂物外围白亮点处) 以氧化物夹杂为核心进行析出, 另外还检测到了 MnS、FeS 与 SeS 的复合夹杂, 该复合夹杂近似球形, 改变了 MnS 的形态, 提高了钢中 MnS 的稳定性。Katsunari O 等人^[25] 对钢中 MnS 的形态的研究也证实了这一点。

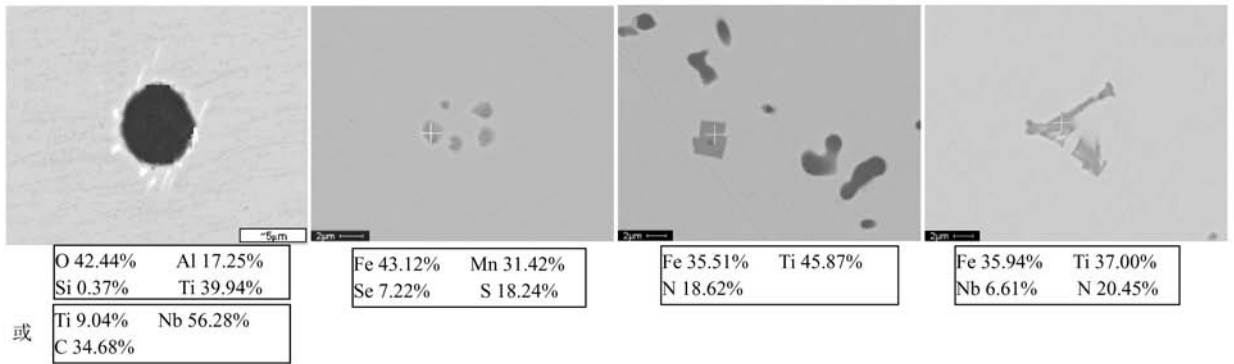


图 2 各类夹杂物的形貌及能谱分析结果

Fig. 2 The micrograph and EDS spectra analysis results of inclusions

用扫描电镜 (SEM) 放大 10 000 倍, 在 $10^4 \mu m^2$ 视场范围内, 随机选择视场拍 20 张相片, 再利用 Qwin 图像分析软件统计出不同钛加入量的铸态钢样中夹杂物的数量分布如表 5 所示。将表 5 的试验结果与钢样成分对照分析可知: 随着钢中钛含量的增加, 夹杂物数量先增加然后降低, 这是由于其他条件不变时, 随着钛含量的增加, 形成钛的氧、氮、碳化物增多。钛含量进一步增加时, 夹杂

物聚集长大的机会越多, 大尺寸的夹杂物增加, 夹杂物排出也就越多, 导致总体数量先增加然后降低。当钛含量超过 0.10% 的添加量时, 钢中大夹杂物的比例增加较多, 这些大夹杂将导致铸坯质量变差, 并使铸坯后续加工困难, 最终影响产品质量。因此, 当钢中钛含量较高时, 合理控制钢中的氧、氮、硫含量, 并采取必要的措施促使夹杂物充分上浮非常关键。

表5 各试样内夹杂物的个数及尺寸分布比例
Table 5 The quantities and size distribution of inclusions in each sample

试样 编号	夹杂物尺寸分布比例/%				夹杂物数/ (个·mm ⁻²)
	<1.0 μm	1.0~5.0 μm	5.0~10.0 μm	>10.0 μm	
1	68.2	15.0	5.6	11.2	1 028
2	49.3	33.2	7.6	9.9	1 556
3	64.8	33.4	13.5	1.8	1 847
4	70.7	14.8	11.4	3.1	1 735
5	40.6	24.9	20.7	13.8	1 626

2.5 钛合金加入量对热处理钢样金相组织的影响

对钛含量不同的钢样,采用共聚焦激光扫描高温显微镜按如图3所示的热处理工艺进行处理,采用在线分析热处理过程中试样的组织及奥氏体晶粒尺寸的变化情况。试样在1 200 °C下保温4 min后奥氏体晶粒尺寸如图4所示。由图4可见,随着钢中钛加入量的增加,奥氏体的晶界明显程度有差异,

奥氏体晶粒逐渐变细,但是析出物不是很明显。增加钢中Ti含量,可增加晶粒细化的作用。

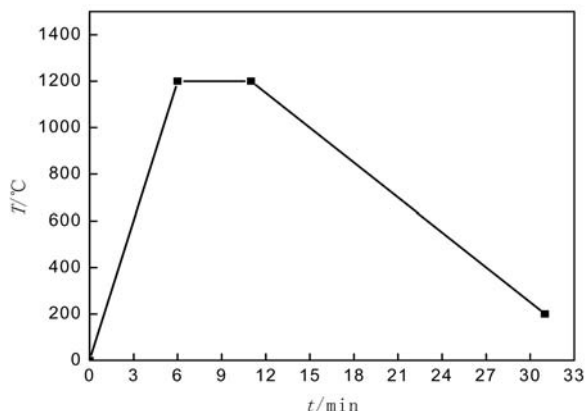


图3 试验钢样高温显微镜在线分析时的温度-时间曲线
Fig. 3 The temperature and time curve when steel samples was under online analysis by high temperature microscope

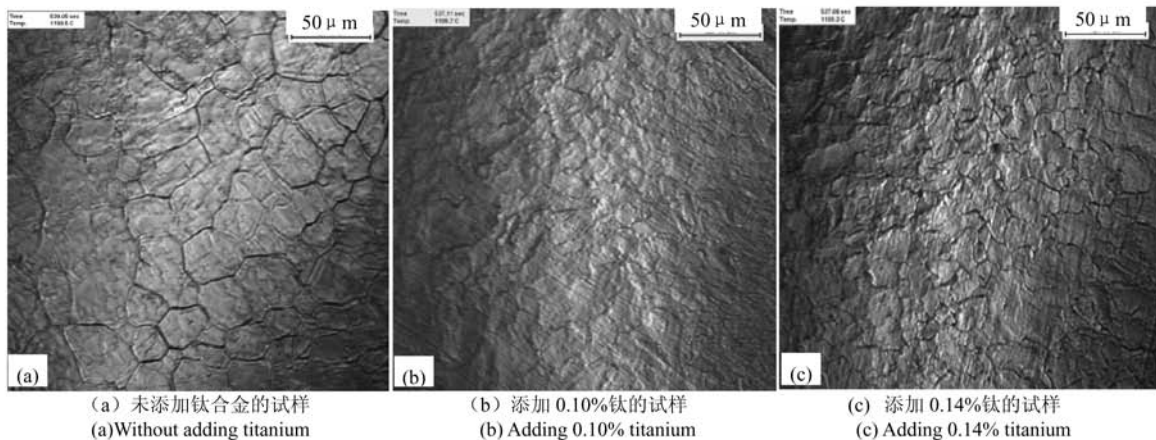


图4 不同钛添加量的试样在1 200 °C时保温过程中的金相组织

Fig. 4 The metallographic structure of samples with different amount of titanium added during the process of heat preservation at 1 200 °C

2.6 钛含量对热处理钢样夹杂物析出的影响

经高温显微镜热处理后的试样急冷后加工成金相样,通过扫描电镜对钢中夹杂物及析出物进行观察。钢中典型的大夹杂物为表层包裹部分TiN,心部为Ti_xO、Al₂O₃及一定量SiO₂的复合夹杂物、(Ti, Nb)(C, N)复合夹杂及MnS夹杂。经热处理后析出相数量较多,主要为20~80 nm的方形颗粒,有极少量尺寸为80~180 nm的球形相。经能谱分析,方形析出相为Ti(C, N),如图5中点1处;椭圆形相为MnS与Ti_xO的复合相,如图5中点6所示。由于试样中加入的钛较多,固定了钢中的N,减少了N与钕结合的机会,钕在加热过程中固溶在钢中量增

加,在能谱图上未体现出细小的(Ti, Nb)(C, N)。(Ti, Nb)(C, N)复合夹杂不仅能在热加工过程中抑制奥氏体晶粒的长大,而且TiN在焊接热影响区很难溶解,细化相变后的组织,从而显著提高焊接热影响区的韧性,TiC及NbC则有较明显的沉淀强化效果。

用扫描电镜(SEM)放大10 000倍,在10⁴ μm²视场范围内,随机选择视场拍20张相片,再利用Qwin图像分析软件统计出夹杂物的粒度分布。经热处理后钢样的夹杂物的粒度分布如图6所示。由图6可知,随着钛含量的增加,热处理后钢样中尺寸小于1 μm的夹杂物数目逐渐增加,而尺寸大于

1 μm 的夹杂物数目减少;尺寸小于 1 μm 的夹杂物的数量超过钢样中夹杂物总数量的一半。此外,从图中还可以看出,随着钛含量的增加,钢中夹杂物的总数目是逐渐增多的,且增多的部分主要集中在体现

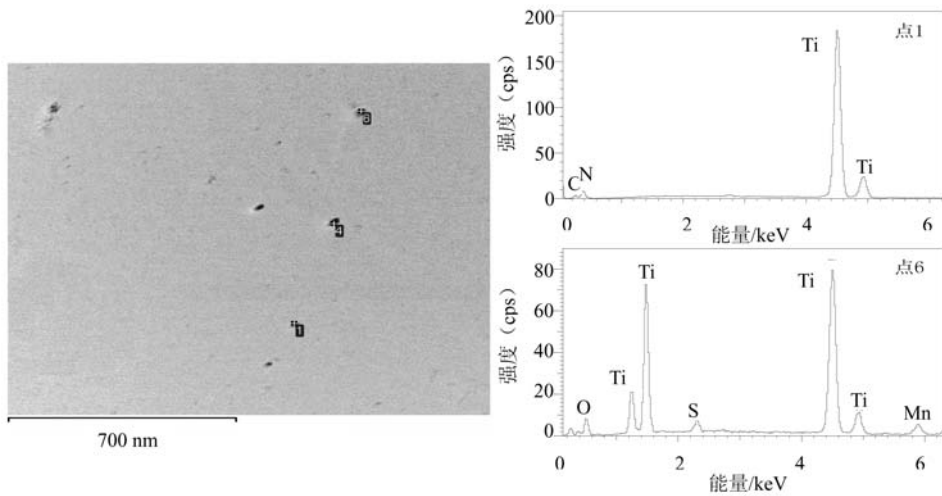


图 5 热处理后析出物的形貌及能谱

Fig. 5 The micrograph and energy spectrum of the precipitate in the steel after heat treatment

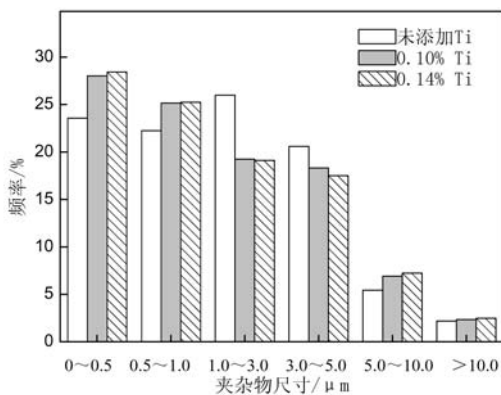


图 6 热处理后钢样的夹杂物粒度分布

Fig. 6 The size distribution of inclusions in steel after heat treatment

2.7 钛含量对热处理钢样宏观硬度的影响

采用洛氏硬度计对热处理后的钢样硬度进行测定。钛含量对钢样宏观硬度的影响如表 6 所示。由表 6 所知,钢样的硬度值较大,这与钢中加入了微合金化元素钛、铌有关。同时由表 6 还可以知道,无钛钢和含钛钢的硬度值变化比较明显,不同钛含量的钢样的硬度值也有变化。和没有添加钛的铌微合金化钢相比,加入钛后,钢样的组织得到明显的细化,钢的硬度值提高。

在尺寸小于 1 μm 的夹杂物上。这是由于钢样经奥氏体化处理后,试样中大的夹杂物颗粒可能溶解,冷却过程中重新析出。奥氏体晶粒的细化与析出物的数量、尺寸有关。

表 6 不同钛添加量的钢样热处理后的宏观硬度值

Table 6 The macro hardness value of the steel with different amount of titanium added after heat treatment

钢样中钛添加量/%	硬度(HRC)
0	40.4
0.10	42.0
0.14	43.5

3 结论

1) 根据氧氮分析结果,采用 Al 脱氧后,钢中的氧含量由 0.028% 降到 0.003 0% 以下,钛、铌微合金化后,氧含量降低到约 0.002 0%。钢中合金元素 Ti 的含量随着 Ti-Si-Fe 合金的加入量的增加而增加,合金元素的利用率超过 80%。

2) 铸态试样典型的氧化物夹杂物为 Al_2O_3 、 SiO_2 及 TiO_x 的复合夹杂,存在典型的铌、钛复合夹杂 $(\text{Ti}, \text{Nb})\text{N}$ 、 NbC 、 TiC 夹杂则以氧化物夹杂为核心进行析出,另外还检测到了 MnS 、 FeS 与 SeS 的复合夹杂。随着钛合金加入量的增加,钢样中的夹杂物部分由球形发展呈长方形,出现典型的外包 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ 夹杂的复合夹杂物。当钛含量超过 0.10% 的添加量时,钢中大夹杂物的比例增加较多。

3) 经热处理后钢样析出较多细小的 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$

及其与 Nb 的复合夹杂物。随着钛含量的增加,热处理后的钢中小于 $1\ \mu\text{m}$ 夹杂物数量急剧增加,钢中的夹杂物总数目也有一定程度的增加,尺寸大于

$1\ \mu\text{m}$ 的夹杂物的数量呈现减少的趋势。

4) 随着钛含量的增加,热处理钢样的晶粒得到细化,钢样宏观硬度随钢中钛含量的增加而增大。

参考文献

- [1] Mao Xinpin, Chen Qilin, Zhu Dayan. Recent development of microalloying technology in thin slab casting and rolling process [J]. *Iron and Steel*, 2008, 43(4): 1-9.
(毛新平, 陈麒麟, 朱达炎. 薄板坯连铸连轧微合金化技术发展现状[J]. *钢铁*, 2008, 43(4): 1-9.)
- [2] Zhu Hongyi. Development of Nb microalloying high strength ship plate at Anyang steel [J]. *Special Steel*, 2009, 30(3): 50-51.
(朱红一. 安钢 Nb 微合金化高强度船体结构钢板的开发[J]. *特殊钢*, 2009, 30(3): 50-51.)
- [3] Lei Lijun, Zhu Xiaokun, Li Dehui, et al. Effect of Nb-RE microalloying on structure and properties of high speed steel TGM2 for complicated tool [J]. *Special Steel*, 2009, 30(6): 45-46.
(雷利军, 朱小坤, 李德辉, 等. Nb-RE 微合金化对复杂刀具用 TGM2 高速钢组织和性能的影响[J]. *特殊钢*, 2009, 30(6): 45-46.)
- [4] Picon C A, Fernandes F A P, Rodrigues C A D, et al. Study of pitting corrosion mechanisms in sea water of supermartensitic stainless steels microalloyed with Nb and Ti [J]. *Heat Treatment*, 2010, 25(1): 25-29.
- [5] Li Hongmei, Cao Jianchun, Sun Lijun, et al. Current situation and development of Nb microalloyed steel carbonitride precipitation behavior [J]. *Materials Review*, 2010, 24(9): 84-87.
(李鸿美, 曹建春, 孙力军, 等. 含钕微合金钢碳氮化物析出行为研究的现状及发展[J]. *材料导报*, 2010, 24(9): 84-87.)
- [6] Chen Qilin, Zhuang Hanzhou. Nb microalloyed technology in CSP process [J]. *World Iron and Steel*, 2010(5): 58-62.
(陈麒麟, 庄汉洲. CSP 工艺 Nb 微合金化技术[J]. *世界钢铁*, 2010(5): 58-62.)
- [7] Zhao Xianmeng, Han Qihang, Kang Yonglin, et al. Trial production of Nb microalloyed cold rolled dual phase steel DP980 [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2009, 32, (6): 592-595.
(赵显蒙, 韩启航, 康永林, 等. Nb 微合金化冷轧双相钢 DP980 的试制研究[J]. *武汉科技大学学报*, 2009, 32(6): 592-595.)
- [8] Wang Fuchen, Guo Aimin. Research and development of low alloy steels containing Nb in WISCO [J]. *Research on Iron & Steel*. 2010, 38(1): 58-62.
(汪福成, 郭爱民. 含钕低合金钢在武钢的研制与发展[J]. *钢铁研究*, 2010, 38(1): 58-62.)
- [9] Mintz B, Yue S, Jonas J J. Hot ductility of steels and its relationship to the problem of transverse cracking during continuous casting [J]. *International Materials Reviews*, 1991, 36(5): 187-217.
- [10] Ouchi C, Matsumoto K. Hot ductility in Nb-bearing high strength low-alloy steels [J]. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 1982, 22(3): 181-189.
- [11] Wang Guiling, Cai Kesen. Mechanism analysis of microcrack in Nb-bearing microalloyed steel [J]. *Modern Metallurgy*, 2010, 38(4): 11-15.
(王桂玲, 蔡可森. 含钕微合金钢表面微裂纹产生机理分析[J]. *现代冶金*, 2010, 38(4): 11-15.)
- [12] Chen Maoai, Wang Jianguo. Effect of second phase particles in Nb-bearing microalloyed on microstructure and toughness in HAZ [J]. *Transaction of the China Welding Institution*, 2002, 23(3): 37-40.
(陈茂爱, 王建国. 含 Ti 微合金钢中的第二相粒子对焊接粗晶热影响区组织及韧性的影响[J]. *焊接学报*, 2002, 23(3): 37-40.)
- [13] Liu Gang, Yao Rungang, Kong Hongyu, et al. Effect of Nb and Ti on the microstructure and toughness of sub-merged melt welding joint of continuous casting 10MnNiCr steel [J]. *Development and Application of Materials*, 2005, 20(1): 9-13.
(刘刚, 姚润钢, 孔红宇, 等. Nb、Ti 微合金元素对连铸 10MnNiCr 钢埋弧焊接头组织与韧性的影响[J]. *材料开发与应用*, 2005, 20(1): 9-13.)
- [14] Sarma D S, Karasev A V, Jonsson P G. On the role of non-metallic inclusions in the nucleation of acicular ferrite in steels [J]. *ISIJ International*, 2009, 49(7): 1063-1074.

- [15] Nie Wenjin, Yang Shanwu, Yuan Shaoqiang, *et al.* Dissolving of Nb and Ti carbonitride precipitates in microalloyed steels [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2003, 10(5): 78-81.
- [16] Shao Zhengwei. Development of niobium and titanium microalloyed steel plate for camion spoke [J]. *Shandong Metallurgy*, 2004, 26(6): 40-42.
(郑正伟. 钒钛复合微合金化载重汽车轮辐钢板的研制[J]. *山东冶金*, 2004, 26(6): 40-42.)
- [17] Wan Lanfeng, Leng Xianggui. Development of hot strip BM 510L micro-alloyed with Nb and Ti for automobile frame [J]. *Automobile Technology & Material*, 2005(4): 12-15.
(万兰凤, 冷祥贵. 钒钛微合金化汽车大梁用热轧板带 BM510L 的开发[J]. *汽车工艺与材料*, 2005(4): 12-15.)
- [18] Yuan Xiangqian, Liu Zhenyu, Jiao Sihai, *et al.* Effects of nano precipitates in austenite on ferrite transformation start temperature during continuous cooling in Nb-Ti micro-alloyed steels [J]. *ISI International*, 2007, 47(11): 1658-1665.
- [19] Yuan Xiangqian, Jiao Sihai. Effect of Ti content on the yield strength of Nb-Ti microalloyed steels [J]. *Baosteel Technical Research*, 2009, 3(4): 53-55.
- [20] Chen Jiping, Kang Yonglin, Hao Yingmin, *et al.* Experimental study on Ti+Nb bearing ultra-low carbon bake hardening sheet steel hot-rolled in the ferrite region [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2009, 16(5): 540-548.
- [21] Cao Huiquan, Yan Huicheng, Xia Zhenghai, *et al.* Effect of microalloying elements Ti-Nb on structure and mechanical properties of low carbon bainitic steel [J]. *Special Steel*, 2010, 31(1): 52-54.
(曹慧泉, 颜慧成, 夏政海, 等. 微合金元素 Ti-Nb 对低碳贝氏体钢组织和力学性能的影响[J]. *特殊钢*, 2010, 31(1): 52-54.)
- [22] Zheng Hongguang, Shen Jicheng, Wu Difeng, *et al.* Effect of Ti and Nb on recrystallization of the ultra low carbon and nitrogen Cr18 stainless steel [J]. *Technology of Bao Steel*, 2010(2): 21-25.
(郑宏光, 沈继程, 吴狄峰, 等. Ti 和 Nb 对超低碳氮 Cr18 不锈钢回复再结晶的影响[J]. *宝钢技术*, 2010, (2): 21-25.)
- [23] Picon C A, Fernandes F A P, Rodrigues C A D, *et al.* Study of pitting corrosion mechanisms in sea water of supermartensitic stainless steels microalloyed with Nb and Ti [J]. *Heat Treatment*, 2010, 25(1): 25-29.
- [24] Wuhan Science and Technology Bureau. The development and application of HG785 high strength welding structural medium plate [wk201005012] [R]. http://www.whst.gov.cn/Default_533_11345,1.html, 2010-08-09.
(武汉市科技局. HG785 高强度焊接结构用中厚钢板的开发与应用 [wk201005012] [R]. http://www.whst.gov.cn/Default_533_11345,1.html, 2010-08-09.)
- [25] Oikawa K, Ohtani H, Ishida K, *et al.* The control of the morphology of MnS inclusions in steel during solidification [J]. *ISI International*, 1995, 35(4): 402-408.

编辑 余文华

澳 Atlas 向 Forge 资源公司出售旗下钒钛磁铁矿

澳大利亚 Atlas 铁矿公司宣称, 已与 Forge 资源公司就出售旗下 Balla Balla 钒钛磁铁矿项目达成协议, 价值 4000 万澳元, 这笔资金将分两期支付。协议还规定, 矿区土地使用费亦可根据铁矿石销售收入来支付。Balla Balla 项目是一个大型钒钛磁铁矿项目, Atlas 于 2010 年 8 月收购 Aurox Resources 时将其收归名下。该项目位于西澳, 靠近皮尔巴拉海岸。

根据协议, 2012 年 2 月 Forge 已向 Atlas 支付 1 750 万澳元资金, 12 个月后将再支付 2 250 万澳元。除政府税费以外, Forge 还需向 Atlas 支付最初 550 万 t 磁铁矿及 20 万 t 钒钛矿销售收入的 4% 作为矿区土地使用费, 此后矿区土地使用费降至余下开采的 3 600 万 t 磁铁矿及 120 万 t 钒钛矿销售收入的 1%。

(沈小小 供稿)