

氮对含钒 Q345 钢组织和力学性能的影响

杨吉春¹, 田时雨¹, 余海存², 张泽宁¹, 王 军¹, 闫瑞军¹

(1. 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 试验钢为含钒 0.080% 的 Q345 钢, 氮含量按 0%、0.022%、0.034%、0.042% 逐渐升高。利用 Thermo-Calc 软件进行了热力学分析计算, 结果表明: 钢中不含氮时, V(C, N) 在奥氏体中析出温度较低, 为 933 ℃, 当钢中氮含量为 0.042% 时, 在奥氏体中析出温度 1 340 ℃。通过透射电镜, 可以发现含钒 Q345 钢随着氮含量增高, 钢中析出了大量的 V(C, N) 弥散在钢中, 起到析出强化作用和细化晶粒作用。金相组织得到明显细化。增氮后钢的力学性能得到明显增强, 不含氮时试验钢的屈服强度 486 MPa, 抗拉强度 686 MPa, 当氮含量为 0.034% 时, 试验钢的屈服强度为 610 MPa, 抗拉强度 732 MPa, 钢的屈服强度提高了 124 MPa。抗拉强度提高了 46 MPa。并且通过拉伸断口判断, 随着氮含量的增加, Q345 钢的塑韧性得到增强。

关键词: Q345 钢; Thermo-Calc 软件; V(C, N) 析出; 力学性能

中图分类号: TF76, TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2019)01-0129-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.01.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effect of N on Microstructures and Mechanical Properties of Vanadium Containing Q345 Steel

Yang Jichun¹, Tian Shiyu¹, Yu Haicun², Zhang Zening¹, Wang Jun¹, Yan Ruijun¹

(1. School of Material and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 2. School of Metallurgy, Northeast University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: The test steels in this study had base chemistry of Q345 steel with 0.08% V and various nitrogen contents of 0%, 0.022%, 0.034% and 0.042%. Thermo-Calc software was used for the thermodynamic calculation. When steel is free of nitrogen, the calculated V(C, N) precipitation temperature in austenite is 933 ℃. When the nitrogen content in the steel is 420×10^{-6} , the precipitation temperature of V(C, N) is 1 340 ℃. TEM observation indicates that increasing nitrogen content can result in a large number of V(C, N) which plays the role of precipitation strengthening and refining grain. The mechanical properties of the steel increase significantly with increasing nitrogen content. The steel free of nitrogen has yield strength of 486 MPa, and tensile strength of 686 MPa. When the nitrogen content is 340×10^{-6} , the yield strength of the test steel is 610 MPa, and the tensile strength is 732 MPa. Fracture observation show that toughness and ductility of Q345 steel has been enhanced with increase of nitrogen content.

Key words: Q345 steel, Thermo-Calc software, V(C, N) precipitation, mechanical property

0 引言

我国是钢铁工业大国, 大量粗钢产量的背后, 也

消耗了大量的自然资源和能源。增加了环境负担, 因此提高钢的性能、减少用钢量、降低钢产量、减少排放是当前钢铁工业的重要任务。钢中添加微合金

收稿日期: 2018-08-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51364031)。

作者简介: 杨吉春(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢铁冶金相关技术工作, E-mail: yangjichun1963@163.com。

元素,能够大幅度提高钢的强度和综合性能,充分挖掘钢材的性能潜力,减少用钢量,减轻环境负担^[1]。

大量研究结果表明,V-N 微合金化技术是一种有效提高材料强度的方法,并且钢中增氮,能够促进钒的沉淀强化作用,明显提高钢的强度^[2]。我国的低合金钢和微合金钢的生产和质量还远落后于各工业发达国家,例如,在北美,每吨钢约消耗 0.08 kg 的钒;在日本和欧洲,每吨钢约消耗 0.06 kg 钒,而在中国,每吨钢约消耗 0.035 kg 钒。我国是钒资源的大国,储量丰富,目前钒制品产量居世界首位,在我国发展钒微合金化钢具有资源上的优势^[3]。

Q345 是目前我国用量最多、产量最大的一种低合金高强度钢。但普通热轧 Q345 钢板存在组织粗大,强度较低等问题。笔者在 Q345 钢的基础上加入钒,通过改变氮的加入量,进而影响钢基体中 V(C,N) 的析出变化。利用 Thermo-Calc 软件对试验钢进行相关计算,预测氮对 V(C,N) 的析出变化影响的规律。并通过析出物形貌、金相组织、力学试验、断口分析,系统分析氮对含钒 Q345 钢组织和力学性能的影响。其意义在于 Q345 加入微合金的钒,利用氮能更好促进钒的析出,来大幅度提高钢的力学性能,减少钢材的使用量。

1 试验材料及方法

1.1 试样材料

设计氮含量从 0% 升到 0.05%,进行配料计算。试验钢采用 10 kg 真空感应熔炼炉冶炼,在冶炼过程中,首先在真空感应炉中装入纯铁和增碳剂等基料,然后启动真空泵进行抽真空操作,并调节功率对基料开始加热。当基料熔化后,保持真空 8 min,对钢液进行精炼操作。为使钢液更好地吸收氮气,精炼期后采取充氮气操作,使炉内保持 0.1 MPa 的氮气。充氮气后,进行二次加料操作,向炉中加入各种合金,包括增氮的氮化合金。当合金元素充分熔化,钢液成分、温度均匀后,在氮气保护下进行出钢浇铸。铸锭为直径 163 mm 的圆锭,其重量为 6 kg。铸锭加热到 1 150 ℃,保温 3 h,终轧温度为 920 ℃,利用轧机轧制成 16 mm 厚的板材,然后空冷到室温。再将热轧板材加热到(920±10) ℃,保温 1 h 进行正火,空冷至室温。采用美国 ARL3460 电火花直读光谱仪,测定试验钢中 C、Si、Mn、P、S 等元素含量。采用北京纳克分析仪器有限公司生产的 ON-3000 氧氮氢分析仪对钢中 N 进行测量。试验钢化学成分见表 1。

表 1 试验钢化学成分
Table 1 Chemical compositions of tested steels

编号	wt%						
	C	Mn	Si	S	P	V	N
1# 钢	0.18	1.464	0.395	≤0.011	≤0.025	0.118	0.000
2# 钢	0.17	1.481	0.386	≤0.011	≤0.025	0.084	0.022
3# 钢	0.19	1.458	0.445	≤0.011	≤0.025	0.083	0.034
4# 钢	0.20	1.528	0.453	≤0.011	≤0.025	0.082	0.042

1.2 试样制备及试验方法

1) 采用 Thermo-Calc 软件对试验钢进行相关计算,预测奥氏体中析出的 V(C,N) 析出相、析出温度以及析出组成等。

2) 利用透射电子显微镜(TEM) 观察钒的碳氮化合物析出大小、形状的同时,利用能谱仪对夹杂物的化学成分进行定性分析(EDS)。

3) 试验钢正火处理后,按照国标 GB/T228.1—2002 制作拉伸试样。在 CSS-88500 型电子万能试验机上进行拉伸试验,利用扫描电镜(SEM) 观察拉伸断口。

2 试验结果及讨论

2.1 Q345 钢中的 V(C,N) 析出

2.1.1 V(C,N) 在奥氏体中析出模拟计算

在奥氏体中析出的 V(C,N) 能够为铁素体形核提供有效的核心位置,诱导铁素体形核,能够细化组织晶粒,并且 V(C,N) 可以在奥氏体晶界上析出,其析出沿着奥氏体的原有晶界,钉扎在晶界处,阻碍晶粒长大,同样起到细化晶粒的作用。因此,研究 V(C,N) 在奥氏体析出过程,对细化组织晶粒和增强力学性能都有积极意义。

Q345 钢以 Fe-0.18C%-1.48Mn%-0.45Si%-0.08V%-0.011S%-0.025P% 为基础,N 的百分含量按 0、0.022%、0.034%、0.042% 变化,图 1 为利用 Thermo-Calc 软件对析出物进行模拟计算。

钢中的 V 与 N、C 很容易结合形成钒的 V(C,N),

钢中氮的含量直接影响钒合金化物的组成,在无氮含量的情况下,钒主要和碳结合成稳定的碳化物,在奥氏体 FCC_A1#2 稳定相中以 VC 为主,并且在奥氏体中析出物的析出温度较低,其中 1# 钢 VC 析出温度为 933 ℃。

当提高钢中氮含量,可以看到奥氏体 FCC_A1#2 稳定相中的氮含量的增高,并且稳定相的析出温度也在提高,其中 4# 钢 V(C,N) 析出温度为 1 310 ℃。这说明氮能够促进奥氏体中钒的析出。

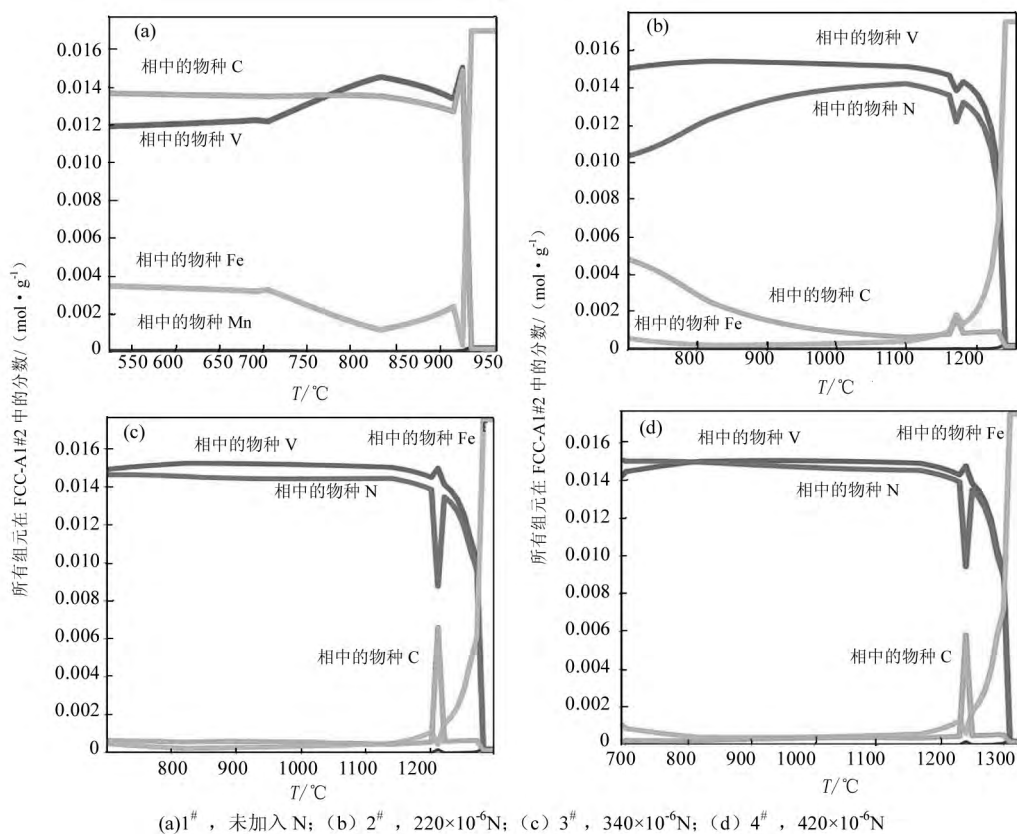


图 1 不同氮含量对 FCC_A1#2 析出的影响

Fig.1 Influence of different N content on precipitation of FCC_A1#2 phase

Q345 钢以 Fe-0.18C%-1.48Mn%-0.45Si%-0.08V%-0.011S%-0.025P%为基础,摩尔分数为 1,氮的含量按 220×10^{-6} ,温度 1273 ℃ 为例,利用 Thermo-Calc 软件计算出从奥氏体 FCC_A1#2 稳定相,其成分见表 2。

表 2 FCC_A1#2 稳定相的成分
Table 2 Composition of FCC_A1#2 Phase %

组元	V	N	C	Fe
摩尔分数	0.493 08	0.481 37	0.011 81	0.013 74
质量分数	0.766 50	0.205 76	0.004 33	0.023 41

奥氏体 FCC_A1#2 稳定相中 N、C 与 V 成分含量配比是在不断的变化,随着氮含量的提高,奥氏体

FCC_A1#2 稳定相中氮含量不断提高,碳含量不断降低。钢中氮达到 220×10^{-6} 时就可以大量促进钒的析出,当钢中氮达到 340×10^{-6} 以后,继续增加氮含量时,可以提高稳定相中氮的含量,但效果不明显。

2.1.2 V(C,N) 在铁素体中析出

通过透射电镜对试验钢 V(C,N) 的组织形态进行观察,并利用能谱对析出物组成进行分析。试验结果表明 V(C,N) 颗粒多以立方体和球形为主,如图 2 所示。

图 3 为 V(C,N) 在铁素体中随机析出,析出的细小 V(C,N) 颗粒主要呈现薄片状^[4]。从透射图片上可以看出,在铁素体中随机析出大量弥散的 V(C,N),析出物的密度、大小以及 V(C,N) 中的

碳氮比例都与加入的氮量有关。氮含量越高,其析出物的量越大,弥散程度越强。细小、弥散的

$V(C,N)$ 起到析出强化作用,能够大幅度提高钢的力学性能。

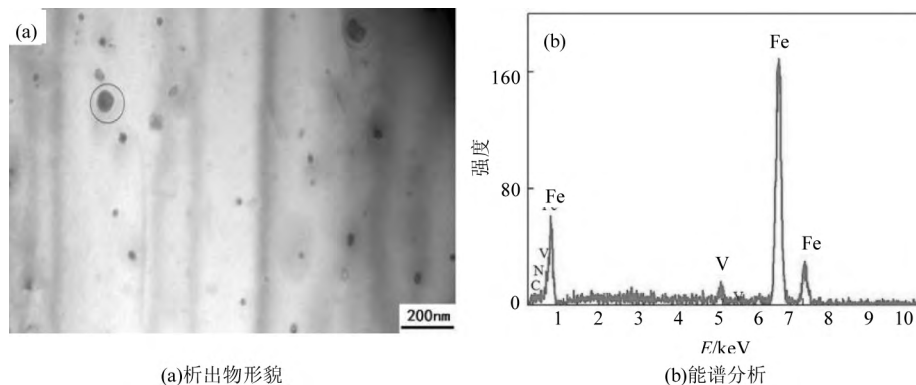
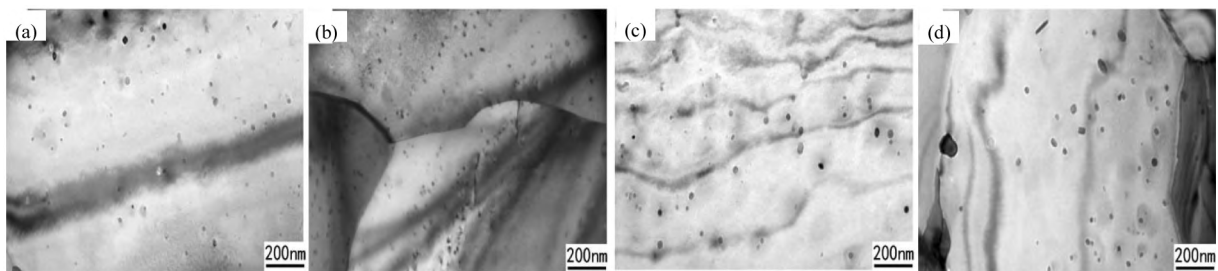


图 2 析出物形貌及能谱分析

Fig.2 TEM image showing precipitate morphology and energy spectrum analysis indicating V precipitates



(a) (b) 氮含量为 420×10^{-6} 时铁素体中析出物; (c) (d) 氮含量为 180×10^{-6} 时铁素体中析出物

图 3 $V(C,N)$ 颗粒在铁素体中随机形式析出

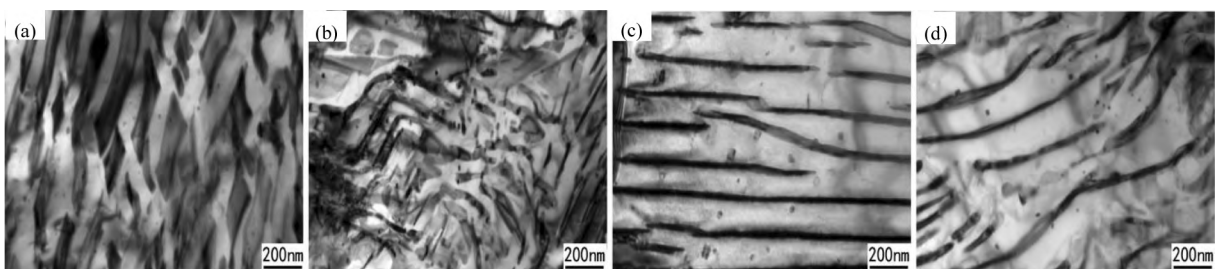
Fig.3 random $V(C,N)$ precipitate in ferrite

2.1.3 $V(C,N)$ 析出对珠光体的影响

图 4 为 $V(C,N)$ 对珠光体片层的影响,氮含量为 420×10^{-6} 时珠光体中析出物更加弥散。在珠光体基体上析出大量细小的 $V(C,N)$,渗碳体会向着这些细小的 $V(C,N)$ 析出处聚集和生长。促进了渗碳体的形核,为珠光体片层走向提供了方向。改变

了珠光体片层的形态,这些析出相占据着渗碳体形核位置,导致了渗碳体的层片变的不平直,甚至出现交叉^[9]。并且出现了二次渗碳体。

氮含量为 180×10^{-6} 时析出碳氮化物较少,弥散程度较低,对珠光体片层影响较小。并且珠光体片层细小、平直,片层间距较大。



(a) (b) 氮含量为 420×10^{-6} 时珠光体中析出物; (c) (d) 氮含量为 180×10^{-6} 时珠光体中析出物

图 4 $V(C,N)$ 析出对珠光体的影响

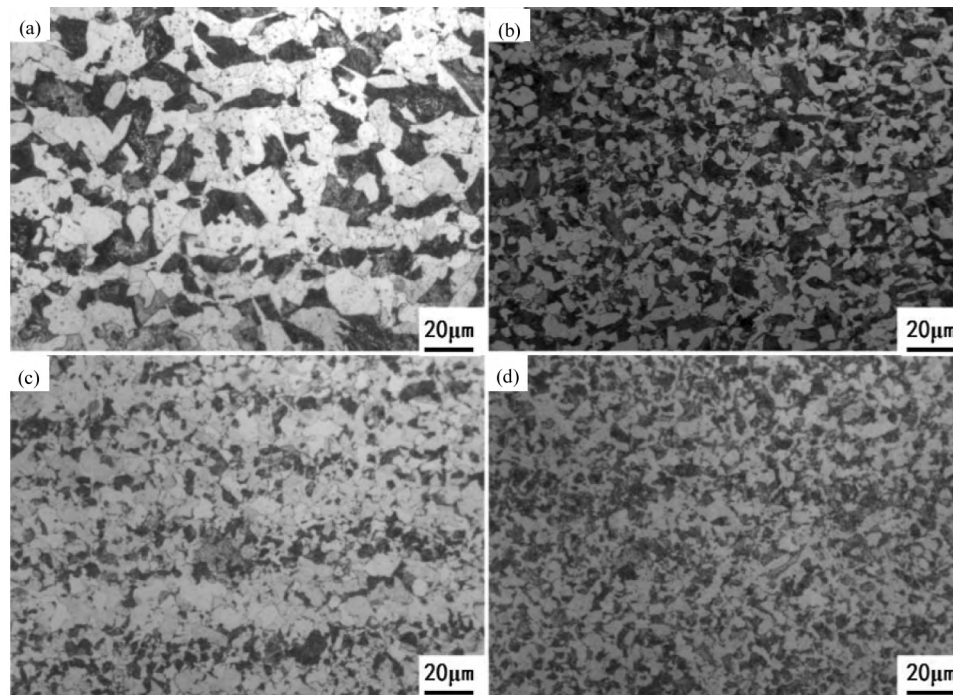
Fig.4 $V(C,N)$ precipitate in pearlite

2.2 氮对试验钢组织的影响

图 5 为 1[#]~4[#] 试验钢的实际晶粒对比。通过对比发现,随着氮含量的增加,晶粒组织得到明显细化。

对热轧后的试验 Q345 钢进行正火处理,将钢坯加热(920±10) °C,保温 1 h 进行正火,然后空冷至室温。通过金相显微镜观察,Q345 钢正火处理

后,其金相组成为铁素体+加珠光体组织。随着氮含量的增加,在奥氏体中析出的 V(C,N) 增加,由于 V(C,N) 能够钉扎在奥氏体晶界处阻碍晶粒长大^[8]。以及 V(C,N) 为铁素体形核创造形核核心,促进铁素体形核。氮含量的增加促进了钒的析出,析出 V(C,N) 越多,奥氏体晶粒越细小,相变后得到铁素体和珠光体晶粒就越细小均匀。



(a) 1[#] 未加入 N; (b) 2[#] 220×10⁻⁶N; (c) 3[#] 340×10⁻⁶N; (d) 4[#] 420×10⁻⁶N

(920 °C 保温 1 h 进行正火, 然后空冷至室温)

图 5 试验钢正火态显微组织 (铁素体+珠光体 F+P)

Fig.5 Microstructure of test steels after same normalized condition

2.3 氮对 Q345 钢室温力学性能的影响

表 3 为不同氮含量 Q345 试验钢的拉伸力学性能。图 6 为应力—应变曲线。为 1[#]~4[#] 试验钢强度变化趋势。通过对比发现,加入氮能够提高钢的抗拉强度和屈服强度,并且氮含量为 420×10⁻⁶ 时,试验钢的抗拉强度和屈服强度达到最大,分别为 785 MPa 和 624 MPa,断后伸长率为 22%。1[#] 试验钢在拉伸过程中未出现明显的屈服平台,几乎没有明显的塑性变形即发生断裂,属于脆性断裂。1[#] 试验钢的屈服强度为 486 MPa,屈服强度相对较低。由于钢中不含氮,钢中的钒得不到充分利用,V(C,N) 对细晶强化和析出强化作用不明显,导致试验钢的力

学性能不好;2[#]、3[#] 试验钢屈服平台非常明显,表现为塑性断裂。

表 3 N 对含钒 Q345 钢力学性能的影响(920 °C 保温 1 h 进行正火,然后空冷至室温)

Table 3 Effect of N content on mechanical properties of vanadium containing Q345 steel (normalizing at 920 °C for 1 h, and then air cooled to room temperature)

编号	$w_N / \%$	抗拉强度 / MPa	屈服强度 / MPa	断后延伸率 / %
1 [#]	0	686	486	18.5
2 [#]	0.022	651	510	23.5
3 [#]	0.034	732	610	24.5
4 [#]	0.042	785	624	22.0

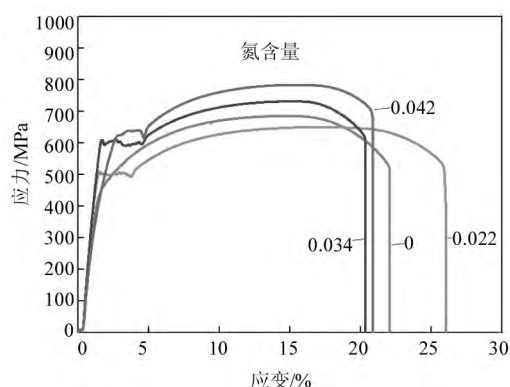
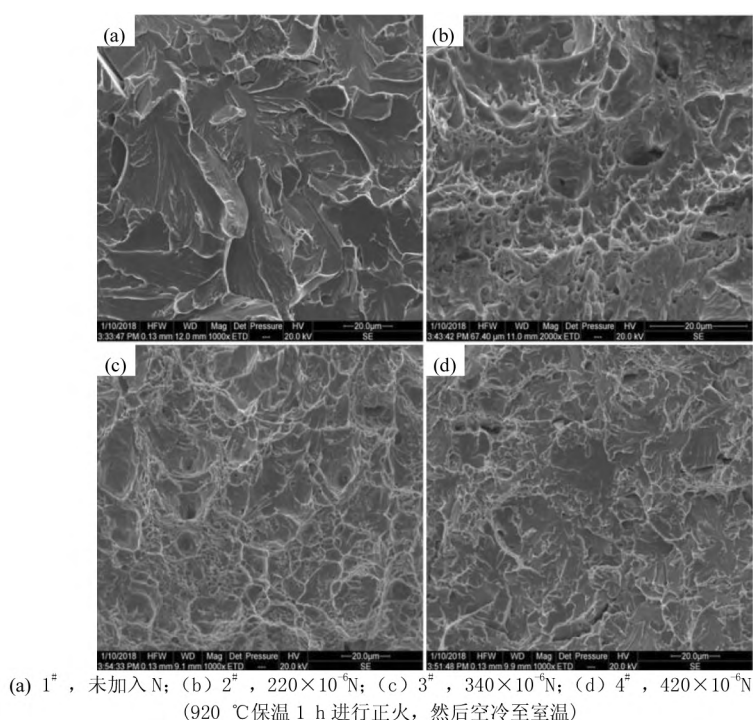


图6 应变—应力曲线

Fig.6 Stress-strain curve of testes steels

其原因是随着氮含量的增加, $V(C, N)$ 大量析出, 细化晶粒作用明显, 并且析出的 $V(C, N)$ 能够钉扎在位错线上, 阻止位错移动, 增加了钢的抗拉强度和屈服强度。4[#] 试验钢随着氮含量的增加, 钢的抗拉强度和屈服强度继续增加。

图7为试样钢 SEM 拉伸断口形貌, 1[#] 钢断口中出现大量的河流状、舌状花样的脆性断裂区。其断口明显为脆性断裂; 2[#]、3[#] 钢韧窝数量增加, 出现了大量的较大的空洞和较深的韧窝。拉伸断口呈现韧性断裂; 4[#] 钢韧窝较少, 并且出现了大量的河流状、舌状花样的脆性断裂区, 拉伸断口呈现明显的脆性断裂。



(a) 1[#], 未加入N; (b) 2[#], $220 \times 10^{-6} N$; (c) 3[#], $340 \times 10^{-6} N$; (d) 4[#], $420 \times 10^{-6} N$
(920 °C 保温 1 h 进行正火, 然后空冷至室温)

图7 试验钢拉伸断口形貌

Fig.7 Morphology of tensile fracture of test steel

1[#] 钢不含氮, 钒对钢的析出强化和细晶强化不明显。导致钒大量固溶于钢中, 晶粒组织没有得到细化, 出现了粗大的铁素体和珠光体晶粒, 钢拉伸断口表现明显的脆性断裂; 2[#]、3[#] 钢随着氮的增加, 钒从固溶态逐渐向析出 $V(C, N)$ 稳定化物转变, 钒得到充分利用。细晶强化和析出强化作用明显。4[#] 钢由于氮含量过高, 许多未结合的氮、碳以游离态存在于钢中, 游离的氮使钢中 Fe_4N 大量存在。增加钢的脆性。游离态碳, 使得偏析严重, 韧性降低。并且珠光体为脆性相, 珠光体含量也增高, 导致钢的脆性增加。

3 结论

1) 含钒 0.080% 的 Q345 钢, 增加氮含量时能够促进钒在奥氏体中析出, 使 $V(C, N)$ 析出温度提高, 并且析出的 $V(C, N)$ 中氮的摩尔分数提高, 当氮达到 0.034% 后, 继续增加氮含量, 对促进钒的析出影响不大。

2) 氮含量越高, 铁素体和珠光体中 $V(C, N)$ 颗粒析出越多, 弥散程度越大。氮含量越高, 珠光体片层就越不平直, 交叉程度越大。

3) 含钒 Q345 钢,氮含量越高,铁素体和珠光体晶粒就越细小、均匀。

4) 含钒 Q345 钢的抗拉强度和屈服强度随着氮含量的增大而升高,含钒 0.080% 的 Q345 钢,当氮达到 0.034% 后,钢的屈服强度为 610 MPa,并且趋于

稳定,继续增加氮含量,屈服强度增加不明显。

5) 含钒 0.080% 的 Q345 钢不含氮时,钢的拉伸断口呈现脆性断裂;当增加氮含量时,拉伸断口逐渐变为塑韧性断裂;当氮为 0.042% 时,拉伸断口又转变为脆性断裂。

参考文献

- [1] Yang Caifu, Zhang Yongquan, Wang Ruizhen. Metallurgical principles and applications of vanadium steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
(杨才福, 张永权, 王瑞珍. 钒钢冶金原理与应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.)
- [2] Su Hang, Chai Xiyang, Yang Caifu. Effect of N microstructure and strengthening effect in normalized V-N microalloyed steel [J]. Iron and Steel, 2014, 49(6): 85-90.
(苏航, 柴希阳, 杨才福. 氮含量对正火钒微合金钢强化效果和显微组织的影响 [J]. 钢铁, 2014, 49(6): 85-90.)
- [3] Rune Lagneborg, Bevis Hutchinson, Tadeusz Siwecki, et al. Effect of vanadium on microalloyed steel [M]. Yang Caifu, Wang Ruizhen, Chen Xuehui. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015.
(Rune Lagneborg, Bevis Hutchinson, Tadeusz Siwecki, 等. 钒在微合金钢中的作用 [M]. 杨才福, 王瑞珍, 陈雪慧译. 北京: 冶金工业出版社, 2015.)
- [4] Balliger N K, Honeycombe R W K. The effect of nitrogen on precipitation and transformation kinetics in vanadium steels [J]. Metall. Trans. A, 1980, 11A: 421-429.
- [5] Zhang Jian. The study of V on the microstructures and mechanical property of nitrogenous 20MnSi thread steel [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2015.
(张剑. V 对含氮 20MnSi 螺纹钢组织和力学性能影响的研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2015.)
- [6] Shi Li, Hu Zhenhua, Cui Kun. Alloying of silicon and nitrogen in high speed steel [J]. Mechanical Engineering Materials, 1993, 17(4): 4-6.
(施黎, 胡镇华, 崔昆. 高速钢中硅、氮的合金化作用 [J]. 机械工程材料, 1993, 17(4): 4-6.)

编辑 杨冬梅

攀钢高纯净钢冶炼技术助力企业增强核心竞争力

(2月16日消息) 由研究院、攀钢钒、西昌钢钒共同完成的高纯净钢冶炼技术,在推广应用后,累计生产高纯净钢 70 万 t 以上,创造了较好的经济效益。经四川省科技厅组织的专家评审,认为该项目研究形成的高纯净钢冶炼控制技术达到国内先进水平。

据了解,随着钢铁工业技术的不断发展,用户对钢材性能的要求越来越高,提高钢的纯净度成为研发热点。攀钢 2014 年立项,分别开展了各个有害元素去除及多元素综合去除技术研究,提出了新型冶炼工艺;开展了硫控制系统研究,采用了铁水预处理脱硫及深脱硫工艺流程。经过 4 年多研究,项目形成了生产极低磷钢、五元素综合去除等高纯净钢生产成套技术,申请了 7 项发明专利,其中 4 项已获国家授权。

相关专家认为,该研究成果对提升我国钢铁企业的核心竞争力具有重要作用,对推动我国高纯净度钢材进一步开发和发展具有重要意义,经济效益和社会效益显著。

<http://www.pzhsteel.com.cn/NewsCenter/readnews.aspx?NewsID=020607609>