

N对V-微合金化钢15MnVq的组织性能的影响

高彩茹¹ 刘海泉² 韩菲¹ 杜林秀¹

(1 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室,沈阳 110004; 2 湖南省宏元稀有金属材料有限公司,醴陵 412200)

摘要 通过100 kg真空感应炉,分别添加V-N合金和V-Fe合金熔炼成15MnVNq钢(%:0.15C、1.71Mn、0.11V、0.0190N)和15MnVq钢(%:0.15C、1.72Mn、0.11V、0.0033N),并轧制成14 mm钢板。试验结果表明,15MnVq钢中加入0.019%的N促进V(C,N)析出和明显细化钢的组织,钢的屈服和抗拉强度分别由393 MPa和578 MPa提高至510 MPa和660 MPa,-20℃冲击功 A_{KV} 由21.9 J提高到101.8 J;同时加N后明显降低了15MnVq钢的时效敏感性。

关键词 V-微合金化钢 N V(C,N) 组织 力学性能

Influence of N on Structure and Properties of V-Microalloying Steel 15MnVq

Gao Cairu¹, Liu Haiquan², Han Fei¹ and Du Linxiu¹

(1 State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004; 2 Hunan Hongyuan Rare Metals Materials Co Ltd, Liling 412200)

Abstract Test steel 15MnVNq (%: 0.15C, 1.71Mn, 0.11V, 0.0190N) and steel 15MnVq (%: 0.15C, 1.72Mn, 0.11V, 0.0033N) were melted by 100 kg vacuum-induction furnace with respective adding V-N and V-Fe alloy, and rolled to 14 mm plate. Examination results showed that Added 0.0190% N in steel 15MnVq obviously promoted V(C, N) precipitating and fined structure of steel, the yield and ultimate strength of steel increased respectively from 393 MPa and 578 MPa to 510 MPa and 660 MPa, and the impact energy A_{KV} of steel at -20℃ increased from 21.9 J to 101.8 J; at same time the ageing sensitivity of steel 15MnVq obviously decreased by added N.

Material Index V-Microalloying Steel, N, V(C,N), Structure, Mechanical Properties

钒是钢中强碳氮化物形成元素^[1-3],在钢中形成V(C,N)产生析出强化作用也已经取得共识。目前,钒氮钢在棒线材中应用得到了普遍认可^[4-6]。但在中厚板上的应用极少,主要原因是人们对析出强化产生脆化心存顾虑,另外,N的添加方法也制约了钒氮钢的发展,采用传统的吹N₂法,N的收得率低且不稳定,在钢中的分布不均,无法获得理想成分的钒氮钢。本试验采用V-N合金炼制15MnVNq钢,与采用V-Fe合金炼制的15MnVq钢进行组织及性能对比研究,探索N元素对组织性能的影响。

1 试验过程与方法

试验用钢采用100 kg真空感应炉冶炼,每炉浇铸35 kg钢锭1支。试验钢(表1)分为两组,1[#]试验钢采用V-N合金化为15MnVNq。2[#]采用80% Fe-V合金化为15MnVq。

将90 mm × 90 mm × L mm钢坯加热至1 200℃,在Φ450 mm热轧实验轧机上轧制成14 mm板。粗轧开轧温度1 000 ~

1 050℃,精轧开轧温度940℃,终轧温度850℃。

采用DMIRM型金相显微镜观察试样的显微组织;QUATA600型扫描电镜对试样的冲击断口进行分析;采用JEM-100CX II型透射电子显微镜进行观察与分析;在9250HV型落锤冲击试验机上进行-20℃与室温两个温度的冲击试验。

2 结果与讨论

2.1 组织观察

试验钢的显微组织如图1所示。轧制状态下试验钢组织为铁素体+珠光体。图1(a)为15MnVNq铁素体-珠光体组织,图1(b)为15MnVq的组织,也为等轴的铁素体-珠光体组织。由图1可见,15MnVNq的晶粒比15MnVq细小,根据测算,15MnVNq晶粒度为10级,15MnVq晶粒度为8级。

表1 试验钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test steels /%

试验钢	C	Si	Mn	P	S	V	N	Alt	Ni
15MnVNq	0.15	0.460	1.71	0.008	0.007	0.11	0.019 0	0.037	0.016
15MnVq	0.15	0.466	1.72	0.006	0.007	0.11	0.003 3	0.035	0.014

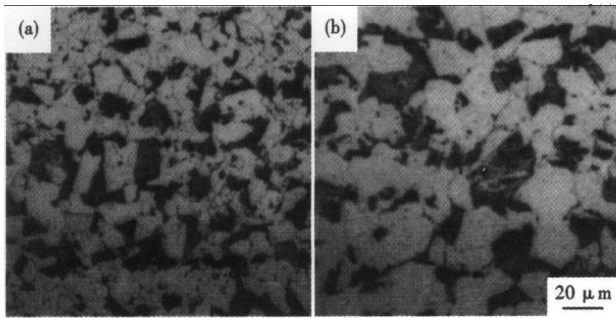


图1 15MnVNq钢(a)和15MnVq钢(b)的组织形貌
Fig. 1 Morphology of structure of steel 15MnVNq (a) and steel 15MnVq (b)

可见,N对15MnVNq钢的铁素体晶粒有显著的细化效果。

2.2 硬度和强度

在钒含量相同的条件下,15MnVNq钢的硬度比15MnVq钢有显著提高。15MnVNq钢的硬度约为HV211,而15MnVq的硬度为HV170。从正常炼钢残留N量0.0033%N提高到0.0190%N,使15MnVq钢的硬度提高了大约HV40。相当于N每提高 10×10^{-6} ,硬度就增加HV2.5。

对两种试验钢的强度对比结果见表2。15MnVq的屈服强度(R_{el})为393MPa,抗拉强度(R_m)为578MPa。而15MnVNq的 R_{el} 为510MPa, R_m 为660MPa。显然,加入0.0190%N使得钢的强度在原先基础上有了大幅度的提高,屈服强度提高了大约117MPa,平均每增加 10×10^{-6} ,屈服强度提高7.3MPa;抗拉强度提高了大约80MPa,平均每增加 10×10^{-6} ,强度提高5MPa。

2.3 韧性

由表2可知,在室温下,两种试验钢的韧性没有明显差别。从室温变化到-20℃,15MnVq韧性降低明显,平均降低150J,而15MnVNq的韧性变化不明显。并且从断口的宏观形貌(图2)也可以看出,在-20℃时,15MnVq已发生脆性断裂,而15MnVNq断面为纤维状,具

有明显的韧窝,仍为韧性断裂。

2.4 TEM 试验及分析

从图3复型TEM照片形貌中,看到的是两种试验钢中均有析出的方形TiN或Ti(C,N)粒子。在15MnVNq薄膜的TEM视场中看见许多弥散分布的圆形小粒子,由于太小,无法进行能谱鉴定,推测是V(C,N)析出粒子。

在15MnVNq试验钢中的析出物有两种,一种是高温状态下析出的TiN,能够在奥氏体状态下细化奥氏体晶粒,阻碍奥氏体晶粒长大。另外一种就是V(C,N)。部分V(C,N)是在 $Ar_3 \sim 900^\circ C$ 奥氏体区析出的,在低温奥氏体区轧制时,在奥氏体的晶界上

表2 15MnVNq钢和15MnVq钢的强度与冲击性能
Table 2 Strength and Impact toughness of steel 15MnVNq and steel 15MnVq

钢种	编号	强度/MPa		A_{KV}/J			
		屈服	抗拉	室温		-20℃	
15MnVNq	11*	520	670	152.0	152.8	107.0	101.8
	12*	510	660	149.6		96.9	
	13*	(平均值)	650 (平均值)	156.9 (平均值)		101.5 (平均值)	
15MnVq	21*	385	575	176.8	175.1	29.8	21.9
	22*	410	585	173.9		14.6	
	23*	(平均值)	575 (平均值)	174.7 (平均值)		21.4 (平均值)	

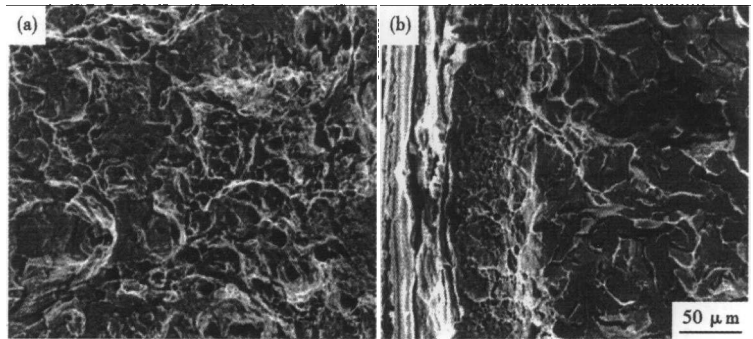


图2 15MnVNq钢(a)和15MnVq钢(b)-20℃冲击断口形貌,缺口附近区域

Fig. 2 Morphology of impact fracture of steel 15MnVNq (a) and steel 15MnVq (b) at -20℃, near V-notch area

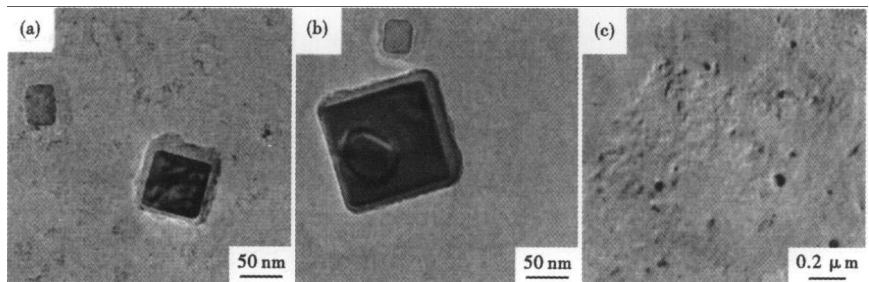


图3 试验钢的析出物,TEM:(a)15MnVNq钢复型;(b)15MnVq钢复型;(c)15MnVNq钢薄膜
Fig.3 Precipitates in test steels, TEM: (a) steel 15MnVNq, replica; (b) steel 15MnVq, replica; (c) steel 15MnVNq, thin film

析出或晶内的变形带处析出,提高了奥氏体-铁素体的转换比 $D\gamma/D\alpha$ ($D\gamma$ 、 $D\alpha$ 分别为奥氏体和铁素体晶粒尺寸),从而细化了铁素体晶粒;还有部分 $V(C,N)$ 在铁素体中析出,阻碍铁素体晶粒在转变后高温阶段的长大。在 15MnVNq 钢中,N 量高于理想化学配比,充足的 N 量增加 $V(C,N)$ 析出驱动力,加快了 $V(C,N)$ 析出的动力学过程。这些在各个不同阶段析出的 $V(C,N)$ 即细化了铁素体晶粒,又起到析出强化的作用,从而使强度和韧性都得到大幅度提高^[7,8]。

2.5 时效性能的影响对比

经过 5% 的塑性变形后在 $(250 \pm 10)^\circ\text{C}$ 均热,保温 1 h,空冷至室温条件下进行了时效处理。时效处理后的冲击性能见表 3。

表 3 15MnVNq 钢与 15MnVq 钢时效前后冲击性能
Table 3 Impact toughness of steel 15MnVNq and steel 15MnVq before and after ageing

钢种	编号	冲击功/J			
		20 °C	时效 20 °C	-20 °C	时效 -20 °C
15MnVNq	1*	152.0	123.00	107.0	87.16
	2*	149.6	135.45	96.9	104.38
	3*	156.9	143.70	101.5	59.43
15MnVq	1*	176.8	42.83	29.8	10.02
	2*	173.9	48.30	14.6	12.23
	3*	174.7	51.74	21.4	6.40

应变时效敏感性系数:

$$C_V = \frac{\bar{A}_K - \bar{A}_{KS}}{\bar{A}_K} \times 100\% \quad (1)$$

15MnVNq 钢的应变时效敏感性系数 (C_V) 在室温下为 12%,在 -20°C 时为 17.7%;15MnVq 的 C_V 在室温下为 72.8%,在 -20°C 时为 56.6%。可见,当 15MnVNq 含 0.019 0% N 时,其应变时效敏感性系数远远小于 15MnVq。

从表 3 可见,15MnVNq 时效后的冲击性能与时效前的相差较小,而 15MnVq 的则相差悬殊:室温时,时效后的冲击功只有时效前的 1/4; -20°C 时,时效后的冲击功为时效前的 1/2。综上所述,无论是时效前还是时效后,是室温还是在 -20°C ,15MnVNq 所表现出的冲击性能都高于 15MnVq。

从 15MnVNq 的时效前后的韧性说明在材料中并没有存在过多的游离 N。证明在钢中加 N 量 0.019 0%,N 几乎都与微合金元素形成化合物,而不是以原子态存在。

一般认为,钢中 N 含量高,钢韧性就会降低,因

而在炼钢过程中都尽量控制残余 N 量。但是含 V 钢的概念则完全不同,在含 V 钢加入足量 N,不但不会降低韧性,还会大幅度地提高韧性。

所以如果要提高含 V 钢的强度,更好地发挥 V 在钢中的强化作用,应该在钢中加入足够量的 N,既可以大幅度提高强度和韧性,还可以节省 V 的使用量,降低冶炼成本。

3 结论

(1) 在 15MnVq 钢中加入 0.018% ~ 0.020% N 元素,明显细化了组织,铁素体晶粒度由 8 级提高到 10 级。

(2) 加入 N 元素提高 15MnVq 钢的强度和韧性,加入 0.018% ~ 0.020% N 元素可使屈服强度提高约 116 MPa,抗拉强度也提高约 80 MPa;15MnVNq 钢的应变时效敏感性系数 (C_V) 在室温下为 12%,在 -20°C 时为 17.7%;15MnVq 的 C_V 在室温下为 72.8%,在 -20°C 时为 56.6%。

(3) N 元素提高 15MnVq 钢强度和韧性的机理为:N 的加入促进了 $V(C,N)$ 析出,细化了铁素体和珠光体组织,起到了析出强化和细化强化的双重效果。

国家科技支撑计划项目资助(项目编号:2006BAE03A08)

参考文献

- 1 王德水,王素梅,尹桂珍. 15MnVN 钢强韧化的研究. 鞍钢技术, 1986(12):63
- 2 雍歧龙,马鸣图,吴宝榕. 微合金钢-物理和力学冶金. 北京:机械工业出版社,1989
- 3 Osuzu H. Application of Microalloyed Steels to Achieve High Toughness in Hot Forged Components Without Further Heat Treatments. SAE Technical Paper Series, 860131, SAE Int. Congress and Exposition, 1986
- 4 Zajac S, Siwecki T, Hutchinson W B, et al. The Role of Carbon in Enhancing Precipitation Strengthening of V-Microalloyed Steels. Conf. Proc of Int. Symposium on Microalloying in Steels; New Trends for the 21st Century, Sept. 7 ~ 9, 1998, San-Sebastian, 295
- 5 Ochi T, Takahashi T, Takada H. Improvement of the Toughness of Hot Forged Products Through Intragranular Ferrite Formation. I&SM, 1989 (2):21
- 6 Koyasu Y. HSLA Steel Bar Used for Hot Forging Without Subsequent Hardening and Tempering. Seitetsu-Kenkyu, (in Japanese), 1986, 320:20
- 7 Bodnar R L. Applications of Titanium Nitride Technology to Steel Products; Symposium Summary. Iron and Steelmaker, 1994:19
- 8 Sundman B. The Thermo-calc Databank System. Calphad, 1985(2): 153

高彩茹(1965-),女,博士,副教授,1986年东北大学毕业,材料成型过程中组织及性能控制。

收稿日期:2009-02-18