

细化NV颗粒尺寸对提高SAE6140钢强韧性的研究

黄海玲¹, 崇鹏², 韦泽洪¹, 吴晖¹

¹宝武集团鄂城钢铁有限公司制造管理部, 湖北 鄂州

²湖北鄂钢扬子重型机械制造有限公司, 湖北 鄂州

收稿日期: 2022年1月11日; 录用日期: 2022年2月11日; 发布日期: 2022年2月18日

摘要

采用转炉冶炼SAE6140合结钢, 根据钢中V含量添加微量的N元素, 使N含量达到设计目标, 可有效提高钢材强韧性、降低生产成本、还减少后续热处理工序。结果表明: 钢中[V]设计为0.10%~0.15%, 添加氮[N]含量在0.0070%~0.0100%, 再利用控轧控冷工艺控制VN颗粒尺寸: 20~100 nm占80%, 可将屈服强度 R_{el} 提高80~170 MPa、延伸率A提高3%~5%、冲击功AKu2提高10~20 J。

关键词

SAE6140, VN颗粒尺寸及数量, 强韧性

Study on Improving the Strength and Toughness of SAE6140 Steel by Refining the Particle Size of NV

Hailing Huang¹, Peng Chong², Zehong Wei¹, Hui Wu¹

¹Manufacturing Management Department of Echeng Iron & Steel Co., Ltd. of Baowu Group, Ezhou Hubei

²Hubei Egang Yangzi Heavy Machinery Manufacturing Co., Ltd., Ezhou Hubei

Received: Jan. 11th, 2022; accepted: Feb. 11th, 2022; published: Feb. 18th, 2022

Abstract

The converter was used to smelting SAE6140 composite steel. According to the V content in the steel, trace N elements were added to make the N content reach the design goal, effectively im-

proving the strength and toughness of steel, reducing the production cost and reducing the subsequent heat-treatment process. The results show that the content of vanadium [V] is 0.10%~0.15%, the content of nitrogen [N] is 0.0070%~0.0100%; then the controlled rolling and controlled cooling process is used to control the VN particle size: 20~100 nm accounts for 80%. The yield strength Rel can be increased by 80~170 MPa, the elongation A after fracture can be increased by 3%~5%, and the impact energy AKu2 can be increased by 10~20 J.

Keywords

SAE6140, VN Particle Size and Quantity, Strength and Toughness

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

SAE6140 (ASTM A355 标准)主要用于制造汽车零件、机械构件、弹簧、工具等,应用领域非常广泛,钢材应用前均需淬、回火调质处理,因而对钢材强韧性要求很严。提高强韧性主要是靠合金元素固溶强化、时效沉淀强化、组织强化等,手段为:加入一定数量的合金元素增加强度、加V进行细晶强韧化[1]、对材料进行热处理工艺等,这些措施确实提高了钢材的强韧性能,但各有优缺点,在实用钢中,往往要将这些强化方法相互结合起来才能达到所需的钢的性能,不可避免地要增加钢材生产过程中成本、工序、交货时间。

本文对该钢种进行了工艺优化,利用现有的资源,根据钢中V含量0.10%~0.15%,添加微量的氮合金,获得对应的N含量值。再利用控轧控冷工艺,使钢材中析出VN颗粒,并将尺寸控制在一定范围内,从而提高钢材强韧性。

2. 工艺现状分析

2.1. 工艺流程

鄂钢炼钢厂采用转炉生产五金工具钢SAE6140,冶炼工艺流程为:

铁水 + 废钢 → 130tBOF → 氩站 → LF → 连铸机 → 铸坯表面精整检查 → 送轧材厂 → 加热炉 → 轧制 → 缓冷 → 精整 → 检验入库。

2.2. V、N合金的作用

钒V是强化铁素体和 γ 相圈形成元素之一,它和碳、氮、氧都有极强亲和力,与之形成相应的极为稳定化合物(如 V_4C_3 、VN、 V_2O_3 等),在钢中主要细化钢的组织 and 晶粒,降低钢的过热敏感性,提高钢的强度和韧性。钢中C含量在0.38%~0.43%,V元素与C形成 V_4C_3 化合物,该化合物极为稳定,只有在高温下才能缓慢地溶入奥氏体中,故 V_4C_3 虽能细化晶粒,但由于其颗粒尺寸大,反而降低了钢的韧性[2]。

氮N在钢中与Al、Ti、V、Fe等形成稳定化合物起固溶强化、时效强化等作用,但由于 Fe_4N 的析出,导致时效和蓝脆等现象,含量超多时易形成气泡、疏松、裂纹等缺陷。氮一般随炉料进入和冶炼过程中钢液从外界吸收,非人为有目的加入,转炉钢[N]: 30~50 ppm [3] [4]。

2.3. VN 化合物提高强韧性的机理

氮 N 元素原子量 14, 原子半径 $0.8 \times 10^{-10} \text{ M}$ (氧 O 原子半径 $0.66 \times 10^{-10} \text{ M}$, N 比 O 原子稍大), 在钢种与 Al、Ti、V 等元素形成稳定化合物, 增加钢的强度(固溶强化、时效强化) [5]。但钢中 N 含量不能太高, 否则易出现各种缺陷及大块坚硬带棱角氮化物夹杂。

钒 V 元素原子量 51, 大部分均以固溶体存在钢中, 其余与钢中 O、N、C 等元素形成化合物, 其中约有 10%~20%的 V 与 N 形成 VN 化合物。如钢中[V]:0.10%, 将与 0.0027%~0.0055%的 N 原子(27~55 ppm)形成 VN 化合物。

在钢坯中结晶生产的 VN 化合物颗粒尺寸很大, 随着钢坯加热升温到 $1100^{\circ}\text{C} \sim 1200^{\circ}\text{C}$, VN 回溶到奥氏体中。在轧制过程及随后冷却时, VN 从 1100°C 开始在奥氏体中析出, 此时析出的 VN 相颗粒数量少、直径大, 一直到 650°C 在铁素体中仍有析出。整个析出过程随着圆钢温度降低, 析出相尺寸越来越小; 随温度降低, 析出颗粒数量: 先少→再增多→达到最大数量→逐渐减少→停止。因 VN 析出速率、颗粒尺寸与温度有关, 在工艺上采取措施, 控制 80% VN 析出相颗粒尺寸在 20~100 nm 范围, 就可提高钢材强韧性。这是因为: 如此细小析出相本身带来沉淀强化大; 其次, 弥散分布的小颗粒钉扎晶界, 阻止位错滑移, 提高钢材韧性; 另外细小析出相使晶粒细化, 再次提高钢的强韧性[6] [7]。

2.4. SAE6140 钢的主要参数

SAE6140 属于合金结构钢类型, 一般在调质状态下使用, 对钢的化学成分及力学性能有严格的要求, 化学成分见表 1, 力学性能要求见表 2。经过调质后具有高强度和高屈服点, 综合性能比 40Cr 要好, 冷变形塑性和切倒性均属中等, 过热敏感性小, 但有回火脆性倾向及白点敏感性; 淬透性较高, 加入钒使钢的晶粒细化, 降低过热敏感性, 提高了强度和韧性, 具有高的疲劳强度。

Table 1. Basic requirements for chemical composition of SAE6140 (wt%)

表 1. SAE6140 化学成分基本要求(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Cu	Ni
0.38~0.43	0.15~0.35	0.65~0.90	≤0.030	≤0.030	0.55~0.70	0.10~0.15	≤0.30	≤0.25

Table 2. Basic requirements for mechanical properties of SAE6140

表 2. SAE6140 力学性能基本要求

Rel/MPa	Rm/MPa	A/%	Z/%	冲击/J	硬度/HRB
≥735	≥885	≥10	≥50	≥71	95~103

3. 工艺优化要点

采用表 1 化学成分标准, 设计合理冶炼工艺、轧制工艺生产 SAE6140, 获得符合表 2 要求的力学性能。从表 2 中可以看出, 力学性能值只设定了下限值, 也是最基本的, 要想获得高品质的材料, 就需要优化工艺, 让钢中的合金发挥作用, 起到降本增效的功能。因此, 对工艺进行优化, 尤其是生产工序中关键点的设定, 基本参数的设定以及轧制工序控轧控冷工艺的优化等等。

3.1. 转炉及氩站操作关键点

转炉出钢过程加入铝锭, 采用脱氧前置的方法, 减少精炼工序脱氧时间; 并且将合金化过程也提前至转炉出钢过程加入, 利用钢水较高的出钢温度迅速溶解合金, 减少精炼炉合金化时间, 加快工序生产;

同时减轻钢水过氧化程度，降低钢水杂质质量。

3.2. 精炼阶段添加微量的 N 元素

精炼阶段，根据工艺特点及成分要求将 SAE6140 各个元素成分调整到位后，添加含钒氮合金，使 V、N 含量分别达到设计值；因为本钢种中使钢中 [V] 0.10%~0.15%，所以 N 元素含量设计范围为 0.0070%~0.0100%。这个 V、N 含量比例比较适合控轧控冷工艺下控制钢中 VN 析出相尺寸、数量比例，来提高钢的强韧性。

3.3. 控轧控冷工艺控制 NV 颗粒析出量和尺寸

首先，加热钢坯并在 1100℃~1200℃ 范围保温 30~75 min，使结晶状态的 VN 化合物回溶到奥氏体中，随后轧制成不同规格圆钢；

其次利用 VN 析出曲线，在 849℃ 最大析出高峰附近使 VN 颗粒大量析出；控制圆钢随后冷却速度 0.7℃/s~0.95℃/s，使钢中 80% VN 析出相颗粒尺寸在 20~100 nm 范围。

最后圆钢全部进行缓冷，缓冷速度为 1.0℃/s~1.5℃/s。

4. 工艺实施方案

4.1. 实施钢种的成分及缓冷工艺方案

取采用优化工艺后的 SAE6140 样品，规格为 24 mm，对其轧制后红钢采取空冷和缓冷两种措施进行对比试验。其中空冷速度为 4℃/s，缓冷速度为 1.0℃/s 和 1.5℃/s，其主要成分及冷却工艺见表 3。

Table 3. SAE6140 components (wt%) and heat treatment process

表 3. SAE6140 成分(wt%)及热处理工艺

	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	N
	0.42	0.22	0.68	0.018	0.017	0.563	0.108	0.0093
1#样品	950℃取样后，空冷，冷却速度 4℃/s							
2#样品	950℃取样后，缓冷，冷却速度 1.0℃/s							
3#样品	950℃取样后，缓冷，冷却速度 1.5℃/s							

4.2. 实施后 VN 检测结果

将上述实验制备成透射电镜萃取碳复型样品，在 JEM-2100F 型透射电镜中对试样中的析出相进行观察，用 INCA 能谱仪对析出相进行成分分析，结果如下：

1#样析出相数量很多，分布均匀，主要为细小絮状 C(CN)，有少量 20~45 nm 的类球形颗粒相合极少量 45~135 nm 的不规则颗粒相，具类型主要为 Ti(CN) + V(CN)，个别为 V(CN)，见图 1；

2#样、3#样析出相数量相差不多，但是比 1#样多很多，分布均匀，主要为细小絮状 C(CN)，有少量 20~60 nm 的类球形颗粒相合极少量 60~135 nm 的不规则颗粒相，具类型主要为 Ti(CN) + V(CN)，个别为 V(CN)，此外，局部区域存在少量长度为 20~200 nm 的纤维状 V(CN)，见图 2、图 3。

透射电镜实验结果表明，有少量尺寸较大的颗粒为 Ti(CN) + V(CN) 的复合相，Ti(CN) 的析出温度较高，主要在 1200℃ 以上，在实验中，钢材在轧制后，Ti(CN) 先析出，过饱和度 V 会以 Ti(CN) 为核心析出形成复合相 Ti(CN) + V(CN)。

4.3. 优化效果

通过以上工艺优化，提取对应的力学性能值进行对比，优化前后力学性能值控制情况见表 4。从表 4

中可以看出, 优化效果非常明显, 强韧性值分别提高了: ReL 104.07 MPa、Rm 187.05 MPa、A 16.27%、Z 7.31%, 冲击功 52.7 J 以及 HRB 3.9。

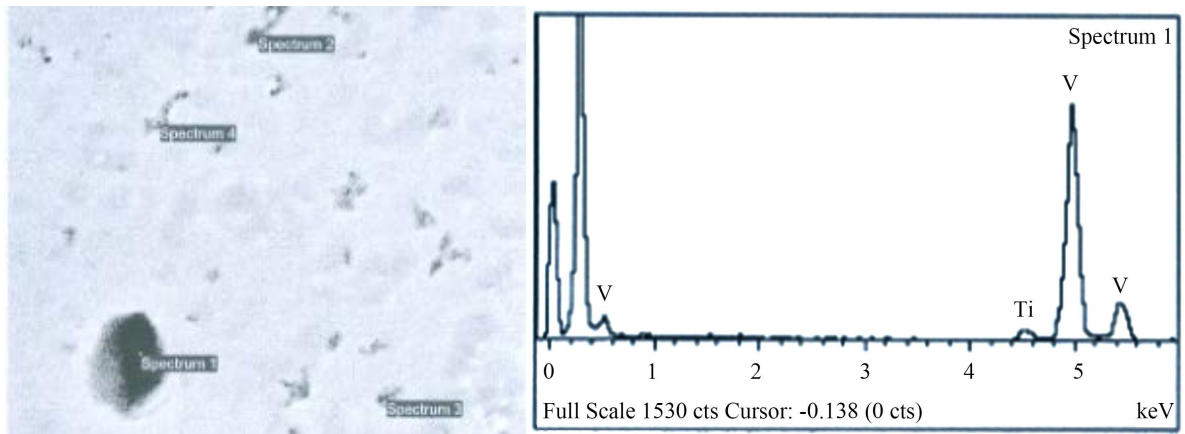


Figure 1. Air cooling precipitates of sample 1#
图 1. 1#样品空冷析出物

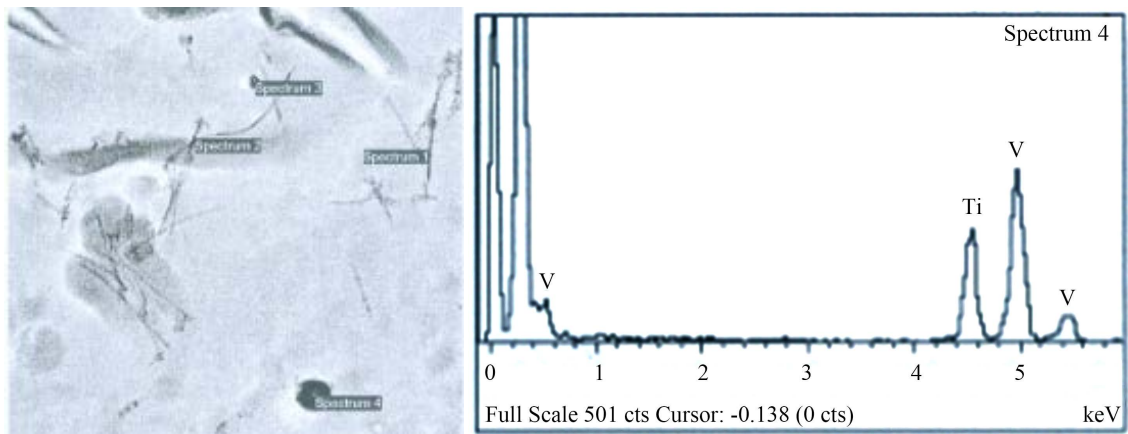


Figure 2. Slow cooling precipitates of sample 2#
图 2. 2#样品缓冷析出物

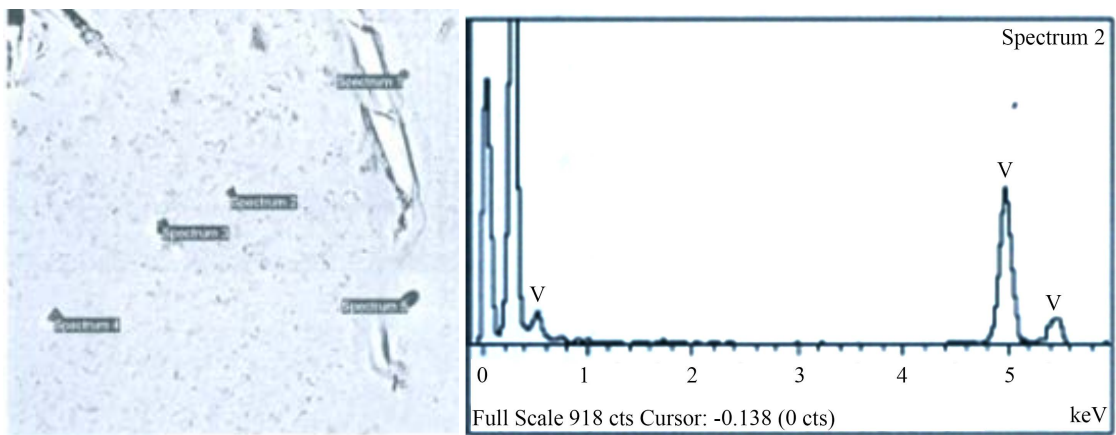


Figure 3. Slow cooling precipitates of sample 3#
图 3. 3#样品缓冷析出物

Table 4. Comparison effect of mechanical property values before and after optimization
表 4. 优化前后力学性能值对比效果

	Rel/MPa	Rm/MPa	A/%	Z/%	冲击/J	硬度/HRB
优化前(平均值)	805.93	962.95	16.73	59.19	115.3	96
优化后(平均值)	910	1150	23	66.5	168	99.9
增值	+104.07	+187.05	+16.27	+7.31	+52.7	+3.9
标准	≥735	≥885	≥10	≥50	≥71	95~103

5. 分析与讨论

通过控制钢中 V 和 N 的含量及 VN 颗粒尺寸来提高中碳 V 钢强韧性,降低生产成本、减少后续热处理工序。五金工具钢 SAE6140 根据中碳 Cr-V 钢中[V]: 0.10%~0.30% 含量变化,添加氮[N]: 0.0070%~0.0120% (即 70~120 ppm), 并控制 VN 颗粒尺寸: 20~100 nm 占 80%, 即可将屈服强度 Rel 提高 80~170 MPa、断后伸长率(延伸率) A 提高 3%~5%、冲击功 Aku2 提高 10~20 J。

在钢坯中结晶生产的 VN 化合物颗粒尺寸很大,随着钢坯加热升温到 1100℃~1200℃, VN 回溶到奥氏体中。在轧制过程及随后冷却时, VN 从 1100℃开始在奥氏体中析出,此时析出的 VN 相颗粒数量少、直径大,一直到 650℃在铁素体中仍有析出。整个析出过程随着圆钢温度降低,析出相尺寸越来越小;随温度降低,析出颗粒数量:先少→再增多→达到最大数量→逐渐减少→停止。因 VN 析出速率、颗粒尺寸与温度有关,在工艺上采取措施控轧控冷工艺,将 80% VN 析出相颗粒尺寸控制在 20~100 nm 范围,就可提高钢材强韧性。这是因为如此细小析出相本身带来沉淀强化大;其次,弥散分布的小颗粒定扎晶界,阻止位错滑移,提高钢材韧性;另外细小析出相使晶粒细化,再次提高钢的强韧性。

6. 结论

1) 通过控制钢中 V 含量,添加微量的 N 元素含量及 VN 颗粒尺寸和数量来提高 SAE6140 钢的强韧性,降低生产成本、还减少后续热处理工序。

2) 根据钢中[V]: 0.10%~0.15% 含量变化,添加氮[N]: 0.0070%~0.0100% (即 70~100 ppm), 并利用控轧控冷工艺控制 VN 颗粒尺寸: 20~100 nm 占 80%, 即可提高钢的力学性能各项指标。

综上所述,仅增加了 N 元素含量、控制钢中 VN 析出相尺寸数量,改善了钢的强韧性,减少热处理工序,为下游本材料使用降低成本,即节约能源、保护环境、又提高了产品的性价比和市场竞争力。

参考文献

- [1] 刘健, 张开坚, 陆建生, 等. 微合金元素钒在钢板中的强化机理及应用[J]. 四川冶金, 2009, 31(2): 15-18.
- [2] R·兰纳伯格, 等, 著. 钒在微合金钢中的作用[M]. 杨才福, 柳书平, 张永权, 编译. 北京: 钢铁研究总院, 2000: 18-30.
- [3] 高吉祥, 李春艳, 朱达炎, 等. VN 微合金化超细晶高强钢的组织性能研究[J]. 冶金丛刊, 2011(2): 22-24.
- [4] 丛晓艳. VN 元素在微合金化钢中的作用和开发前景[J]. 湖南冶金, 2004, 32(3): 3-5.
- [5] 杨作宏, 陈伯春. 谈微合金元素 Nb、V、Ti 在钢中的作用[J]. 甘肃冶金, 2000(4): 20-22.
- [6] 项程云, 主编. 合金·结构钢(特殊钢丛书) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998, 2002(重印): 69, 75-77.
- [7] 冯运莉, 刘国强. VN 微合金化 HRB400 热轧钢筋的研究[J]. 河北冶金, 2020(6): 14-17.