

一种高强度汽车胀断连杆用非调质钢的研发

邓向阳 林俊 李仕超 庞卓纯 李大明

(中天钢铁集团有限公司,常州 213011)

摘要: 研究认为,在钢中添加微量的V、Nb、Ti合金元素,与钢中的C、N结合后通过沉淀强化与细晶强化作用能够提高材料强度和韧性,基于热力学计算软件实现非调质钢46MnVS6的V、Nb、Ti复合微合金化设计,同时在轧制加热过程中对大颗粒液析相进行溶解,实现了材料的高强度设计。此外,通过精炼渣系模拟计算开发了中低碱度的非调质钢专用渣系,保证精炼过程中S元素的精确控制。结果表明:非调质钢非金属夹杂物的控制及硫化物形貌得到优化,改善了材料的切削性能。

关键词: 细晶强化 强韧性 渣系 切削性能

中图分类号:U466 文献标志码:B DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20230068

Research of A High Strength Non-Quenched and Tempered Steel for Fracture Splitting Connecting Rod of Automobile

Deng Xiangyang, Lin Jun, Li Shichao, Pang Zhuochun, Li Daming

(Zenith Steel Group Co., Ltd., Changzhou 213011)

Abstract: It is concluded in this research that strength and toughness of steel can be significantly improved by precipitation strengthening and fine-grained strengthening after adding trace alloying elements of V, Nb and Ti in steel and combining with C and N in steel. Based on the thermodynamic calculation software, the V, Nb and Ti composite microalloying design of non-quenched & tempered 46MnVS6 steel was realized. At the same time, the rolling heating process dissolved the liquid phase of the large particles and realized the high strength design of the material. In addition, the special slag system of non-quenched & tempered steel with low and medium basicity was developed through the simulation calculation of refining slag system, which ensured the precise control of S element in the refining process. The results show that non-metallic inclusions control in non-quenched & tempered steel and the sulfide morphology are optimized, and cutting performance of the material is improved.

Key words: Fine grain size strengthening, Strong toughness, Slag system, Cutting performance

1 前言

为降低碳排放,我国逐步采用非调质钢取代调质钢生产汽车发动机连杆与曲轴,非调质钢可以利用胀断技术代替传统调质连杆的平切技术,提高装配精度。目前,我国汽车行业国六排放标准已经实施,随着对汽车轻量化要求的不断提高,对发动机曲轴、连杆等的强度要求也更高,为此,

作者简介:邓向阳(1982—),男,高级工程师,硕士学位,主要研究方向为汽车用钢的研发。

参考文献引用格式:

邓向阳,林俊,李仕超,等.一种高强度汽车胀断连杆用非调质钢的研发[J].汽车工艺与材料,2024(3):40-46.

DENG X Y, LIN J, LI S C, et al. Research of A High Strength Non-Quenched and Tempered Steel for Fracture Splitting Connecting Rod of Automobile[J]. Automobile Technology & Material, 2024(3): 40-46.

不少零件重新启用了性能更优的42CrMoA调质钢,但是国外已经研发出屈服强度高于900 MPa、抗拉强度高于1100 MPa的非调质钢,因此,国内钢厂急需研发出强度等级更高的非调质钢以适应新形势要求。

2 钢中各元素的作用

在微合金非调质钢中,V、Nb、Ti等微合金元

素在控轧(锻)控冷中的作用主要包括:加热时抑制奥氏体晶粒的长大;固溶的微合金元素和析出的碳化物、氮化物或碳氮化物与形变奥氏体晶粒的晶界、亚晶界相互作用,抑制或延迟奥氏体再结晶,有助于相变后获得细小的铁素体晶粒;降低相变温度,细化铁素体晶粒;析出强化效果。图1为微合金元素V、Nb、Ti在非调质钢中对非再结晶温度和晶粒尺寸的影响。

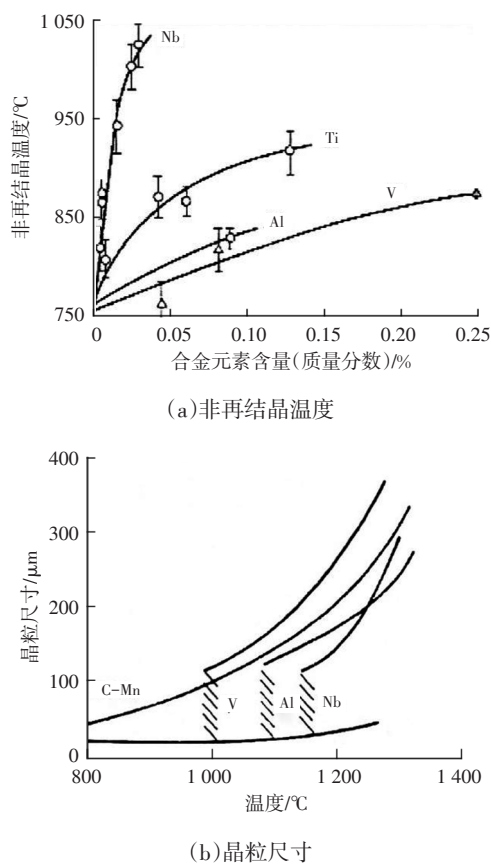


图1 Nb、V、Ti、Al对非调质钢非再结晶温度和晶粒尺寸影响

2.1 常规元素在非调质钢中的作用

a. 碳是最有效的强化元素,合理增加碳含量会增加珠光体含量、提高材料强度,但会降低韧性。因此,在保证强度的条件下,可以通过降低钢中的碳含量提高钢的韧性。非调质的碳含量多设计为中碳,即碳的体积占比约为0.40%。

b. 锰以固溶强化方式强化珠光体和铁素体,并扩大奥氏体相区,有利于珠光体体积占比的增加,同时可减小珠光体片层间距,使渗碳体变薄,提高韧性。因此,为提高强度,非调质钢的Mn含量设计多数为1.00%~1.50%。

c. 硅能促进铁素体的形成和均匀分布,提高

韧性。因此,可适当提高钢中的硅含量,部分非调质钢中硅的质量分数大于0.50%。

2.2 微量元素在非调质钢中的作用

a. 钒、铌、钛微合金化的强韧化机理主要是细晶强化和沉淀强化。一般采用再结晶控轧控冷,使钢在奥氏体中充分再结晶,从而获得细的奥氏体晶粒,最终获得细晶粒钢。V(C,N)、Nb(C,N)、Ti(C,N)等析出相对材料起到沉淀强化作用^[1],因此,非调质钢中均需要添加适量的钒、铌、钛元素。

b. 氮作为合金化元素是非调质钢合金设计的另一特点。氮是钢中常存元素之一,主要与微合金化元素所形成的碳氮化合物固溶、析出有关。当氮与钒共同作用时,氮能促进VC、VN的析出,使钢中原来处于固溶状态的钒转变成析出状态的钒,充分发挥钒的沉淀强化作用。氮除增强沉淀强化作用外,还具有明显的细化晶粒作用。增氮促进了碳(氮)化钒在奥氏体—铁素体界面的析出,有效阻止了铁素体晶粒长大,起到细化铁素体晶粒的作用。钒氮微合金化通过优化钒的析出和细化铁素体晶粒,充分发挥了晶粒细化强化和沉淀强化^[2],显著改善了钢的强度、韧性配合。

研究表明,在含V钢中(质量分数0.10%左右)添加N,其沉淀强化的作用明显提高。氮含量由 50×10^{-6} 提高到 250×10^{-6} 时,钢的屈服强度提高100~150 MPa,即氮含量每提高 10×10^{-6} ,钢的强度提高5 MPa以上。

提高钢中N的含量可以使碳氮化物的析出范围扩大,进而增强微合金元素的作用,采用较少的微合金化元素含量即可获得较强的力学性能。如N的含量由 30×10^{-6} 提高至 120×10^{-6} 时,V质量分数可从0.12%降至0.07%。为使非调质钢的强度有效提高,N含量可控制在 60×10^{-6} ~ 250×10^{-6} 。

3 非调质钢V、Nb、Ti复合微合金化设计

钒是非调质钢微合金化必不可少的元素,本文以38MnVS为研究对象,基于热力学计算软件,在加入Mn、Si等常规元素的基础上开发了V-Nb-Ti复合微合金化的46MnVS6钢种,设计成分如表1所示。

牌号	C	Si	Mn	S	V	Nb	Ti	N
46MnVS6-Nb-Ti	0.46	0.60	1.27	0.045	0.15	0.025 0	0.020 0	0.018 0
46MnVS6-Nb	0.47	0.58	1.28	0.046	0.14	0.024 0	0.002 8	0.017 5
46MnVS6-Ti	0.46	0.61	1.25	0.043	0.15	0.000 1	0.022 0	0.018 3
46MnVS6	0.46	0.59	1.27	0.047	0.14	0.000 1	0.001 9	0.017 2

本文采用 Thermo-Calc 软件,分别计算了46MnVS6、46MnVS6-Nb、46MnVS6-Ti、46MnVS6-Nb-Ti的性质图,如图2所示,V(C,N)、Nb(C,N)、Ti(N,C)在平衡状态下的析出温度如表2所示,由图2可知,Nb会促进V(C,N)的析出,Ti会降低V(C,N)和Nb(C,N)的析出温度^[3]。平衡态下的析出结果虽不能代表实际析出温度,但平衡析出温度的降低减小了析出相的析出动力,降低了实际析出

温度,因此,添加Ti会使V(C,N)和Nb(C,N)的实际析出温度降低,析出相尺寸减小。钢中的V(C,N)和Nb(C,N)的析出相尺寸均大于Ashby-Orowan的第二相强化模型的临界尺寸,因此,析出相尺寸减小有利于提高V(C,N)和Nb(C,N)的析出强化作用^[4]。然而,由于非调质钢氮含量较高,在钢中添加少量的Ti,在凝固过程中会出现大颗粒的Ti(N,C)^[5]。

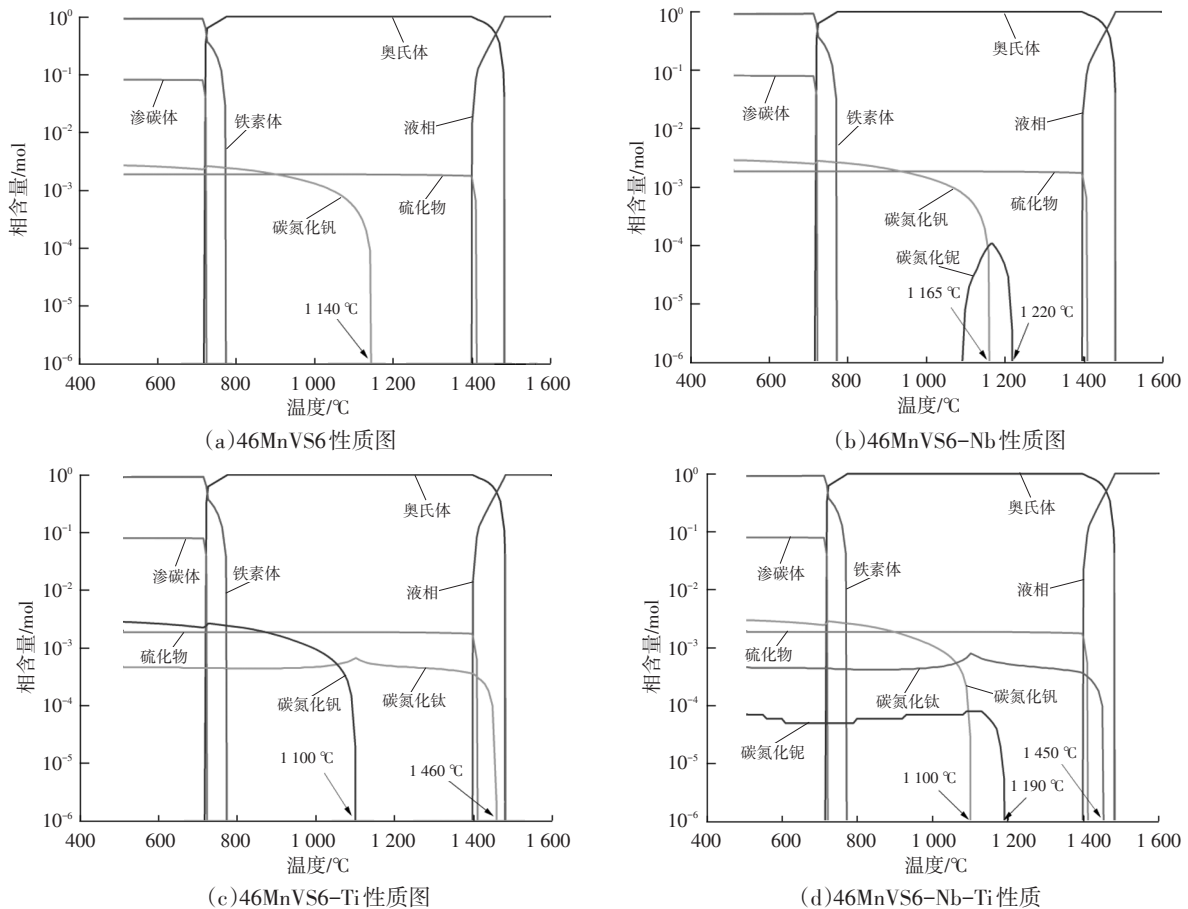


图2 碳氮化物析出温度

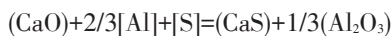
类别	46MnVS6	46MnVS6-Nb	46MnVS6-Ti	46MnVS6-Nb-Ti
V(C,N)	1 140	1 165	1 100	1 100
Nb(C,N)		1 220		1 190
Ti(N,C)			1 460	1 450

4 生产过程控制技术研究

4.1 含硫钢中低碱度渣系设计

4.1.1 渣系模拟计算

依据含硫特殊钢低碱度的成分特点,采用经典热力学理论及 FactSage 软件计算炼钢温度下非调质钢、齿轮钢中 MnS、CaS、MgS、MgO-Al₂O₃ 等形成的热力学条件,根据钢种成分计算不同条件下 MnS、CaS、MgS 和 MgO-Al₂O₃ 等夹杂物相互转换的热力学条件,分析钢中氧、硫、铝、锰、钙对复合夹杂物的影响,然后在试验室冶炼研究成果的基础上,开展钢包精炼炉(Ladle Furnace, LF)渣系的计算分析,探索钢中氧、硫、锰、铝的控制水平,确定有利于复合硫化物形核夹杂物体系的渣系成分及控制要点。基于 Einstein-Roscoe 方程,采用 FactSage 热力学软件的 Equilib 和 Viscosity 模块确定研究温度范围为 1 450~1 550 °C^[6],模拟结果显示,LF 精炼过程中精炼渣脱氧还原的主要成分依靠 CaO 作为精炼渣系中的主要脱硫组元,与钢中 S 元素反应生成 CaS 上浮至渣中,其反应公式为:



CaO-Al₂O₃-SiO₂ 三元渣系相图如图 3 所示。

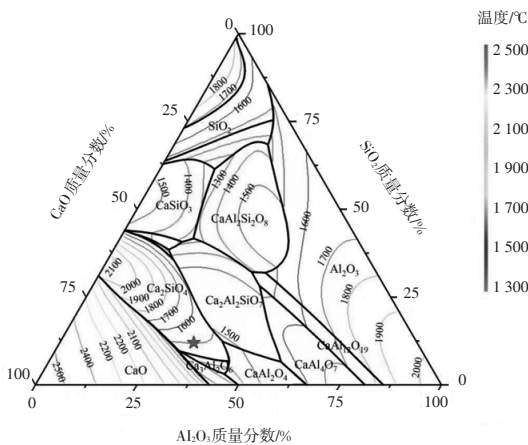


图3 CaO-Al₂O₃-SiO₂三元渣系低熔点区及其质量分数控制目标

通过优化 CaO 的质量分数调整三元渣系组成,降低碱度至 4.0~6.0,使脱硫率降低,Al₂O₃ 质量分数增加,炉渣粘度降低,进而改善脱氧、除夹杂物的动力学条件,精炼渣的用量也有一定的降低。根据渣样成分分析,生产精炼渣系中 Al₂O₃ 质量分数达 30% 以上最佳,当精炼渣系中的 CaO 质量

分数一定时,渣流动性良好的情况下可适当减少精炼渣用量,从而降低成本。

汽车用非调质钢在 LF 精炼生产过程中,精炼渣成分对脱硫、吸收夹杂物有重要影响。因不同精炼渣系的熔点范围差异较大,流动性、吸附夹杂物的能力及脱氧能力也存在差异。当选择不当时,钢水脱氧及去夹杂物能力较差,难以得到较好的钢水洁净度。在普通渣系基础上,设计汽车用非调质钢专用 CaO-Al₂O₃-SiO₂ 三元低熔点渣系,熔点降低至 1 450~1 550 °C,使其在熔化温度以上时处于完全熔化状态,黏度值较低,具有一定的流动性,从而增强顶渣流动性,有利于钢渣充分接触,获得较好脱氧、除夹杂物效果。

4.1.2 精炼渣设计方案

经热力学计算,根据汽车用非调质钢的成分特点,开发了新型中低碱度专用控制渣系,明确渣系中 CaO-Al₂O₃-SiO₂ 三元组分的控制范围,有效确保了非调质钢的精炼效果,普通精炼渣系及非调质钢渣系成分范围如表 3 所示。

表3 普通精炼渣系与汽车用非调质钢控制渣系

精炼渣系	CaO /%	Al ₂ O ₃ /%	SiO ₂ /%	R/%	Mi/%	熔点 /°C
普通渣系	58~64	24~29	7~9	6~9	0.25~0.35	1 600
新型渣系	52~58	31~35	10~13	4~6	0.20~0.30	1 500

中低碱度渣系可以有效吸附 SiO₂、Al₂O₃ 等夹杂物,从而提高材料的纯净度。

4.2 LF 精炼硫的控制

非调质钢硫质量分数一般控制为 ≤0.1%,而 Mn 质量分数为 >1.0%,通过控制 Mn/S 质量分数为 5.0%~10.0% 可以确保生成大量细小均匀的 MnS,能够有效避免生成大量热脆的 FeS 夹杂^[7]。

硫质量分数调整方式如下:

a. C70S6 非调质钢,120 t 钢包 Ruhrstahl-Heraeus (RH) 工序破空操作后喂入 300~350 m 硫磺包芯线,喂线速度为 2.5~3.5 m/s,目标硫质量分数为 0.05%~0.07%;

b. C70S6 非调质钢,120 t 钢包 LF 精炼后期加入一定量硅石调整碱度后加入 350~450 m 硫磺包

芯线,喂线速度为2.5~3.5 m/s,目标硫质量分数为0.07%~0.08%。

硫含量控制由“RH工序破空操作后加入硫磺包芯线”改为“LF精炼后期先加入一定量硅石,降低碱度,一段时间后再喂入硫磺包芯线”。

随着碱度降低,脱硫率由82.4%降低至63.3%,通过喂入一定量硫磺包芯线,统计RH到站S质量分数一般控制在0.040%~0.055%,计算得到硫吸收率为65%~80%。在SiO₂含量较低、Al₂O₃含量较高时,部分硫以CaS形式进入钢渣,降低了难以熔化或氧化的11(CaO)-7(Al₂O₃)-CaS的含量,有利于后续精炼渣循环利用。

虽然S以CaS的形式进入钢渣中,有部分损失,但通过精炼喂入硫磺包芯线,使钢包中硫存在时间延长,并通过氩气软吹系统使钢中硫的均匀化效果改善,减少了硫化物聚集长大,降低了夹杂物尺寸。

4.3 氮含量稳定性控制方法

在非调质钢的冶炼过程中,需要稳定控制冶炼过程中的增氮。目前,常见的增氮手段主要有:合金增氮,LF精炼后期或真空处理工序喂含氮合金线;冶炼底吹增氮,包含转炉底吹氮气、真空增氮和真空脱碳(Vacuum Decarburization, VD),使用氮气作为底吹气体增氮或RH提升气体采用氮气循环增氮,后者成本较低。

经过试验,对非调质钢的转炉底吹气体由氩气切换成氮气,同时将RH提升气体由氩气切换为氮气,在提升气体流量的条件下,增氮处理时间为20~30 min,氮含量可达到 90×10^{-6} ~ 110×10^{-6} ,如图4所示。多数非调质钢仅依靠冶炼底吹增氮是不够的,需要添加合金来补充增氮。

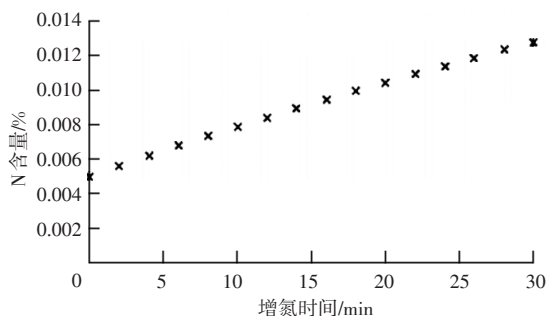


图4 不同底吹增氮时间增氮量情况

由于受精炼工艺和操作方法的影响,精炼工序添加氮合金或喂入含氮合金线方式的氮收得率

稳定性需要进一步研究。在钢水进入RH炉真空处理前加氮化锰线进行增氮,氮化锰的收得率仅为50%,而且真空处理过程还伴随脱氮,脱氮率为20%~25%,因此,增氮收得率较低。采用RH+LF精炼组合法生产38MnVS非调钢,转炉冶炼过程中底吹气体由传统的氩气改为氮气,同时RH提升气体使用氮气,RH破空后喂入适量氮锰线,钢中氮含量可稳定控制在 130×10^{-6} ~ 190×10^{-6} 。

4.4 液析相控制技术

4.4.1 形貌观察分析

为提高中碳非调质钢的强度,通常添加质量分数约为0.10%的钒元素,起到析出强化与细晶强化的双重作用,一般情况下不会产生大颗粒液析相,但当心部偏析较重时,偶尔会出现富钒相,如图5所示,成分特征如表4所示,根据微合金特征,除V、N等元素外,也含有少量Nb等元素。

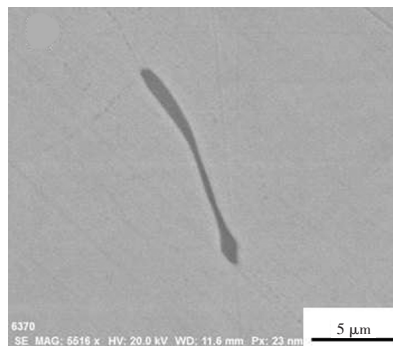


图5 电镜下枝晶间富钒相典型形貌

表4 液析富钒相化学成分能谱检测结果(质量分数) %

元素	V	Nb	C	N	Fe
质量分数	30.9	6.7	4.3	47.0	11.1

富钒相的热稳定差,1 150℃保温即可分解,如图6所示。

4.4.2 控制手段及效果

根据富钒相的形成机理,考虑其分解速率,需要优化加热工艺,使用高温扩散加热工艺可达到溶解富钒相的目的^[8]。

某公司的大容量、高均质化加热炉集成炉内气氛和温度的智能燃烧控制技术,加热炉总长为53.4 m,并配备有“柔性加热系统”和5段式结构——“预热段、加热1段、加热2段、均热1段、均热2段”,加热1段的加热能力覆盖950~1 250℃,生产轴承钢等需高温扩散的钢种时“柔性段”可提升

至 1 220 ~ 1 250 ℃, 高温段占比可达 64.4%, 在保证扩散时间的基础上, 产量高达 140 t/h (较常规加热炉效率提高 42%), 1 台加热炉即可实现高效节能

柔性化的高温扩散工艺。

为扩散富钒相, 减轻铸坯带来的偏析, 对非调质钢的加热工艺进行调整, 如表 5 所示。

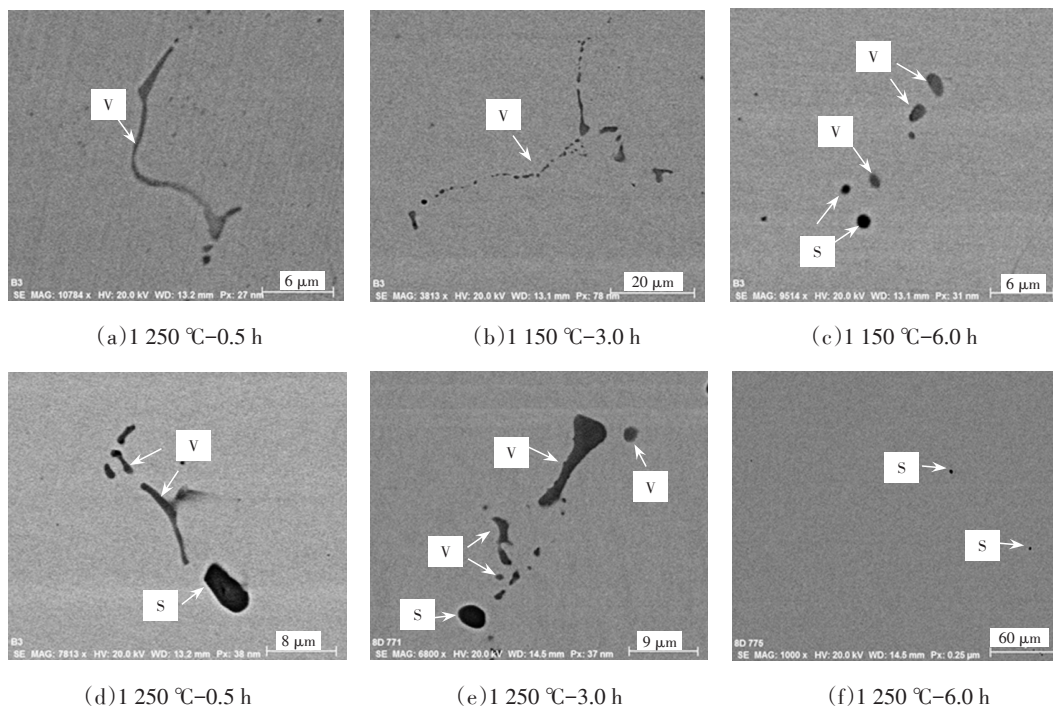


图 6 富 V 相热稳定性

表 5 连铸坯加热工艺优化

状态	均热段温度/℃	均热段时间/min
改善前	1 120 ~ 1 170	100 ~ 150
改善后	1 180 ~ 1 250	130 ~ 180

5 生产实践

通过成分的优化设计及生产过程的稳定控制, 批量生产的非调质钢 46MnVS6 主要理化性能

检测指标情况如表 6、表 7、表 8 所示。

正火工艺为试样加工为将 $\Phi 25$ mm 的圆柱后, 用试验室加热炉加热至 1 150 ℃, 保温 45 min, 再吹风冷却至室温。

表 6 46MnVS6 化学成分 (质量分数)

炉号	C	Si	Mn	P	S	Ti	N	V	Nb
8-661	0.46	0.58	1.27	0.015	0.048	0.019	0.0178	0.15	0.028
8-662	0.46	0.60	1.26	0.013	0.047	0.018	0.0182	0.14	0.025
8-663	0.47	0.55	1.25	0.016	0.045	0.017	0.0180	0.15	0.027

表 7 46MnVS6 正火态力学性能

炉号	下屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%	常温吸收能量/J
8-661	952/957	1 139/1 144	20/21	54/54.5	46/48
8-662	953/955	1 135/1 140	20.5/21	55/54.5	49/45
8-663	956/954	1 139/1 134	20/20	53/54.0	44/47

表8 46MnVS6非金属夹杂物评级

炉号	A(细)	A(粗)	B(细)	B(粗)	C(细)	C(粗)	D(细)	D(粗)	DS
8-661	2.5	0.5	0	0	0	0	0.5	0.5	0.0
8-662	2.5	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5
8-663	2.0	0.5	0	0	0	0	0.5	0	0.5

6 结束语

传统不添加 Nb 和 Ti 的 46MnVS6 产品,由于其析出强化作用较弱,屈服强度仅为 700~800 MPa,抗拉强度为 950~1 050 MPa,且稳定性差、波动范围大,采用 V-Nb-Ti 复合微合金化设计开发的 46MnVS6 钢,通过对过程 N 含量、硫化物的控制,材料正火态性能屈服强度可达 950 MPa,抗拉强度可达到 1 100 MPa 以上,力学性能指标达到国际领先水平。此外,非金属夹杂物控制水平,尤其是硫化物形貌控制达到了同行领先水平,有利于材料切削性能的改善。

参考文献:

- [1] 冯毅,路洪洲,黄光杰,等. 铌微合金化对汽车用典型双相钢加工性能的影响研究[J]. 汽车工艺与材料, 2022(9): 1-8.
- [2] 林文干,方劲松,龚枚琳,等. 胀断连杆开发的强度有限

元对比分析[J]. 专用汽车, 2022(4): 14-19.

- [3] 李业才. 高强韧 38MnSiV5 非调质钢的研制[J]. 四川冶金, 2016, 38(1): 38-41.
- [4] 刘鹏,陈继雄. 一种海上风电用 S355ML 钢的研制方法及其力学性能[J]. 理化检验-物理分册, 2022, 58(12): 31-34+42.
- [5] 刘洁,徐乐何,肖飞,等. Ti 微合金化非调质钢中碳化物析出行为及其对再结晶的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(4): 9-16.
- [6] 刘赞丰,张传友,王冠. 汽车发动机胀断连杆用中碳非调质钢 46MnVS5 的应用现状与发展[J]. 汽车工艺与材料, 2022(1): 38-42.
- [7] 王喆,吴华杰,姚登元. 成分变化对非调质钢硫化物析出的热力学分析[J]. 炼钢, 2018, 34(6): 23-29.
- [8] 王赛玉,周悠. 微量元素及控轧控冷工艺对非调质钢 40MnV 冲击性能的影响[J]. 热加工工艺, 2002(4): 40-41.