

重载车用特种低合金钢的铌钛微合金化 技术研究与应用现状

范泽熙, 杨弋涛

(上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444)

摘要: 基于铌、钛元素的微合金化技术被广泛应用于低合金钢中, 可望为重载车用钢零件性能提升提供助益。本文综述了铌、钛添加后在车用低合金钢中的存在形式、强化机理、析出规律及铸件的热处理工艺。铌钛元素在钢中主要以析出态的形式存在, 沉淀强化是其主要强化方式。常用最终热处理以淬火加高温回火为主。最后, 作者对重载车用铌钛微合金钢发展方向进行了展望, 对存在问题提出了一些解决思路。

关键词: 铌; 钛; 微合金化; 低合金钢; 重载车

目前, 随着经济增长, 汽车行业迅速发展, 对节能减排和轻量化的需求逐渐提高, 汽车用钢应具有高强度、良好的塑性和优异的抗应力腐蚀性能并且在轻量化后不影响使用安全。目前在汽车用热轧、冷轧钢板等生产中大量使用微合金钢, 它具有成本低、性能优异等特点, 常见微合金钢屈服强度为400~600 MPa, 少数钢种强度可达1 000 MPa。作为微合金化主要元素, 铌起到优异的细晶强化效果, 钛的强化效果稍弱于铌, 但在价格上具有明显优势并且资源丰富^[1], 钢中应用的微合金化元素添加量一般小于0.2%。近年企业普遍重视车用微合金钢的研发, 柳钢开发了600 MPa级铌钛微合金高强度车厢用钢^[2], 鞍钢开发出500 MPa级高速列车转向架构架用Nb-Ti微合金化钢板^[3]。

重载卡车载重量大, 零部件尺寸也较大, 对材料使用寿命和性能有着更高的要求, 其车架纵梁、横梁和受力结构件等主要使用微合金钢。目前国内微合金元素添加量尚高于国外同类材料, 导致钢材焊接性能、压力加工性能等热加工性能下降并且在成本上稍逊一筹。为解决重载车用低合金钢一些重要零件局部开裂、力学性能不足和添加合金元素含量较高等问题, 国内外学者的研究主要集中在以下几个方面: 微合金化元素对微合金钢组织和性能的影响、析出强化机理、析出动力学和热处理等。本文将重点介绍铌钛微合金化技术提升重载车用钢性能的相关机理, 旨在为提高重载车用钢力学性能, 通过实现轻量化降低成本且保持安全性提供有效可行、值得参考的技术途径。

1 铌、钛在钢中的存在形式

微合金元素在重载车用低合金钢中的存在形式受钢铁基体成分、钢铁生产工艺等因素的影响。铌、钛元素在钢中主要以固溶态、沉淀析出金属化合物和未溶金属化合物的形式存在, 钛在固溶状态下能溶入 α 和 γ 相中, 形成固溶体造成点阵畸变使基体强硬度提高。固溶铌会降低晶界的迁移率, 阻碍奥氏体中位错移动, 阻止奥氏体晶粒发生再结晶, 钛的固溶强化效果弱于铌。未溶形式的铌和钛会阻止均热态奥氏体晶粒粗化, 起到细晶强化的作用。

以沉淀析出态存在时, 沉淀析出形成的碳、氮或碳氮化物的铌分布均匀, 尺寸细小, 在900 °C以下析出时与固溶态存在的铌一起抑制再结晶和阻止晶粒长大,

作者简介:

范泽熙(1998-), 男, 硕士生, 研究方向为微合金化技术提升低合金钢性能, 热处理优化低合金钢组织。电话: 13061737772, E-mail: 1278604584@qq.com

通讯作者:

杨弋涛, 男, 教授, 博士。电话: 021-66136550, E-mail: yangyitao@shu.edu.cn

中图分类号: TG142.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)01-0062-06

收稿日期:

2020-07-27 收到初稿,
2020-09-06 收到修订稿。

在低温析出时起到沉淀强化作用。钛化学性质活泼，易与N、C等元素反应生成化合物，钛易在钢液中或在凝固过程中形成氮碳化物，从而在热机械加工的早期和后期有效阻止晶粒长大。在钢铁熔炼过程中，钛随钢中含氧量及钛浓度的变化生成不同的脱氧产物，当基体中含氧量较低时，钛易于N反应形成TiN，钢中Ti与N的理想化学配比为3:42^[4]，当钛含量超过形成TiN的理想配比后，固溶在基体中的Ti会与C反应形成TiC，在这一过程中，会生成Ti(C, N)^[5]。R. D. K. Misra^[6]对新型770 MPa热轧Nb-Ti微合金钢的组织演变进行了研究，发现铌、钛在钢中观察到的析出物主要是尺寸为120~500 nm含少量Nb的TiN、10~200 nm (Nb, Ti)C和为球形或针状(Nb, Ti)C(3~5 nm)。尺寸为120~400 nm和10~120 nm析出物的形貌如图1所示。

铌、钛在钢中固溶度较小，主要以沉淀析出态存在，析出物的形貌和尺寸影响基体的性能。复合添加时铌、钛元素含量会影响析出物的数量，微合金元素的理想配比关系需要完善。

2 铌、钛元素的强化机理

微合金元素主要通过细晶强化和沉淀强化两种方式强化基体，钢中加入微量的Nb、Ti元素，通过成分控制和改善加工工艺，可以充分发挥加入微合金元素起到的强化作用来改善钢的组织性能。

2.1 细晶强化

奥氏体晶粒尺寸是再结晶和晶粒长大的驱动力与溶质原子钉扎晶界和微合金元素在钢中的析出物钉扎晶界之间的竞争的结果，添加Nb可显著延缓奥氏体再结晶^[7]。Nb的钉扎效应取决于Nb原子是否聚集在奥氏体固溶体中，或者这些溶质是否以离散的碳氮化物析出物的形式形核。

Nb生成的碳氮化物会钉扎奥氏体晶界，阻止再结晶晶粒长大，并且在热变形过程中对软化过程起到了延缓作用，从而产生了细化的室温组织，增强了细晶强化。此外Nb具有一定提升淬透性的作用，这有利于马氏体相出现^[8]。根据Hal-Petch公式，可以对强化机制带来的强度增量进行准确定量的计算，钢的强化机制随铌含量的变化而改变，铌含量较低时细晶强化为主要的强化机制，随铌含量升高，析出物变多，沉淀强化作用明显增强。王晓军^[9]研究发现，随Nb含量增加，主要强化机制从细晶强化转变为析出强化，塑性逐渐下降。Ji Dong^[10]对两种不同MX碳氮化物对Nb-V-Ti微合金化超高强度钢奥氏体长大行为的影响进行了研究，发现富Nb的(Nb, Ti, V)(C, N)析出物的钉扎效应远大于富Ti的(Nb, Ti, V)(C, N)析出物，说明细小的富Nb碳氮化物在控制奥氏体晶粒长大行为中起主导作用，富Nb析出物的形貌和成分如图2所示。

钛会生成两种类型的TiC，一种是在 γ/α 相变过程中或铁素体当中析出的，另一种是在奥氏体中应变诱导析出，应变诱导析出的TiC能够阻止再结晶晶粒长大，提高再结晶温度，对奥氏体晶界的迁移起到钉扎作用，得到尺寸细小的奥氏体，起到细化晶粒的作用^[11]。另外，TiN尺寸小时也会起到细晶强化的作用，但尺寸较大时，反而会对基体性能造成较大损害。

2.2 沉淀强化

沉淀强化是指第二相以微米或纳米级别粒子在固溶体中均匀分布时，增强合金强度的方式。铌和钛会与钢中的碳、氮结合生成MC、MN、M(C, N)等析出物，第二相在钢中形成应力场，阻碍位错运动使材料强度提升^[12]。纳米析出物不仅能够提高屈服强度，而且可以有效钉扎位错滑移从而提高抗拉强度。

随铌含量提高，钢的强度增加，析出物增多，此时沉淀强化起着主要作用。Zhaoli Zeng^[13]通过研究添

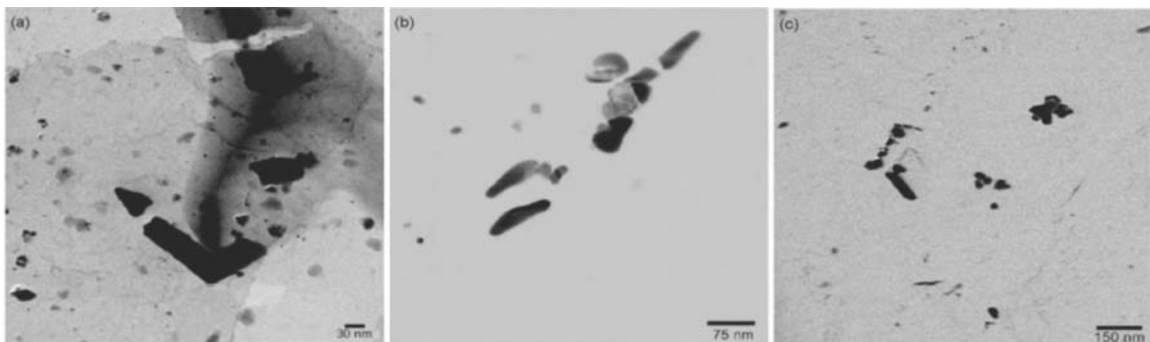


图1 770 MPa Nb-Ti微合金化热轧钢中II型(120~400 nm)和III型(10~120 nm)析出物的亮场透射电镜图

Fig. 1 Bright field transmission electron microscopy of type II (120~400 nm) and type III (10~120 nm) precipitates in 770 MPa Nb-Ti microalloyed hot rolled steel

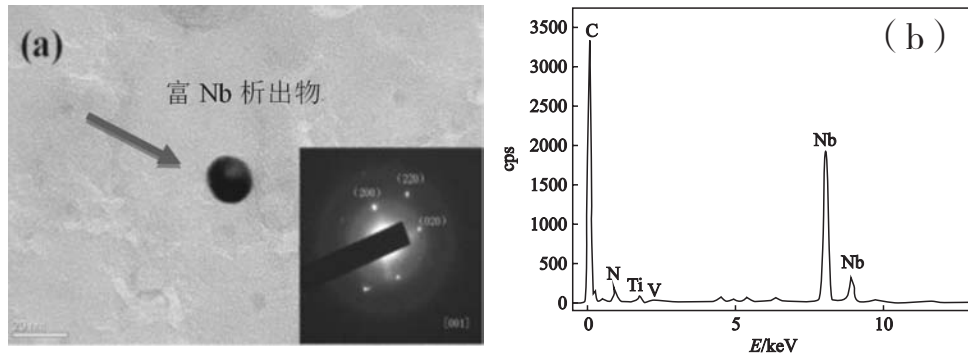


图2 基体中富Nb析出物的TEM图和EDS图

Fig. 2 TEM and EDS diagrams of Nb-rich precipitates in matrix

加0.03wt.%Nb和0.05wt.%Ti的 δ -TRIP钢的组织 and 性能,发现加入Nb、Ti后屈服强度和伸长率明显优于未加Nb、Ti的 δ -TRIP钢,高密度的纳米(Nb, Ti)C析出物对位错的钉扎作用显著提高了钢的强度。基体中Ti含量较高时,细小的TiC会弥散分布,起到沉淀强化的作用,随Ti含量增加,强化作用增强,Ti含量过高时,伸长率和冲击韧性反而降低,并且由于Ti性质活泼,如果钢中含氧量较高,Ti的利用率降低。Jun Hu^[14]通过研究钛含量变化对低碳中锰厚板钢组织演变和力学性能的影响发现,当Ti含量从0.014%增加到0.032%时,由于TiC的沉淀硬化和铁素体的晶粒细化作用增强,屈服强度提高了140 MPa,但随Ti含量进一步提升,强度反而下降。李秀兰^[15]对Ti、V、Nb、Mo对高铬铸铁碳化物形态与性能的影响进行研究,随强碳氮化物形成元素的加入,碳化物尺寸变小,合金元素添加量升高,碳化物逐渐粗化,硬度和冲击韧性下降。甘晓龙^[16]对Ti-Nb微合金化对低碳高强度钢组织和性能的影响进行研究,发现用Ti来取代部分Nb可以对钢有同等强度的提升,有效降低成本。通过控制基体成分和改善加工工艺,Ti可以通过固溶态和形变诱导析出的TiN来提升奥氏体再结晶温度和阻止晶粒长大,还可以在保温或者卷取时通过沉淀析出和晶界间析出的TiC来强化基体^[17]。通过改善加工工艺,把铌、钛加入钢中,析出尺寸细小的第二相可以显著提高基体力学性能。在同样工艺下,钛含量增加会导致铁素体体积分数减小,Hall-Petch关系斜率也减小^[18],如图3所示。吴刚研发了QStE550TM钢板,通过高钛含量成分设计,通过TiC析出细化奥氏体晶粒,大幅提高强度,其主要应用于重载汽车的纵横梁^[19],如图4所示。

铌、钛元素含量较少时细晶强化起主要作用,随铌、钛元素含量升高,析出强化成为主要强化方式,强化增量也随铌、钛含量升高具有先升高再下降的趋势,含量过高时,析出物尺寸较大,对性能造成不利影响。析出强化也会使基体韧性下降,应把细晶强化控制为主要强化方式。

3 铌、钛析出行为研究

微合金化技术主要通过析出强化和细晶强化来强化基体,控制微合金钢中析出物的析出行为,从而准确地控制析出物数量、析出温度,得到细小弥散的碳氮化物,由此有效地改善钢的组织 and 性能是微合金化技术的研究重点。

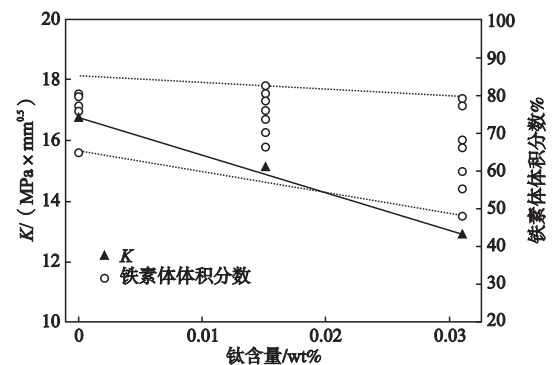


图3 Hall-Petch关系的斜率与钛含量的关系和铁素体体积分数相关

Fig. 3 The relationships between the slope of Hall-Petch relation and titanium content and ferrite volume fraction



图4 QStE550TM制造的成品汽车纵梁实物照片

Fig. 4 Physical photos of finished automobile longitudinal beams made from QStE550TM

Nb是一种很强的碳氮化物形成元素,在钢中Nb和C含量对Nb在奥氏体化过程中的溶解行为和Nb在轧制和冷却过程中的析出行为影响巨大。Nb的析出动力学(时间、温度和粒度)强烈依赖于钢的成分,特别是Nb、Ti、C和N含量,以及应变水平,Nb和N含量的增加促进了Nb(C,N)的析出^[20]。析出相成分为 NbC_xN_{1-x} 的碳氮化物, x 随析出温度和基体成分变化,随着钢中Nb、C含量的增加,铌碳氮化物的析出速率和析出量增加,铌含量对析出行为起重要作用。Yu Gu^[21]等对碳氮化铌在奥氏体和针状铁素体中的析出动力学及其对高碳钢硬度的影响进行研究,发现在600℃时,碳氮化铌的尺寸细小,主要在亚晶界析出,如图5所示,其在针状铁素体中的析出速率低于在奥氏体中的析出速率,且碳氮化铌的量低于最大析出量,随Nb含量和回火时间增加,硬度升高。

钛性质活泼,容易生成多种析出相,生成的氧化物和硫化物一般是有害的,在实际生产过程中,控制氧和硫的含量至关重要。在与钛反应析出的化合物中,稳定顺序为:TiC < Ti(C,N) < $Ti_4C_2S_2$ < TiN < Ti_2O_3 ^[22],TiN和TiC可以抑制再结晶,限制奥氏体晶粒长大。TiN为最先析出的元素,具有高温热稳定性。高温下析出的TiN一般尺寸较大,很容易成为裂纹源对钢材起到不利作用,低温下析出的小尺寸TiN才能强化基体,冷却速度越快,溶质元素偏析比例越大,含钛夹杂物的析出时间越早,晶粒尺寸随冷却速度的增加而逐渐减小,提高N和Ti的初始浓度会使TiN夹杂物的析出时间提前,颗粒尺寸变大^[23]。TiN的热力学稳定性图如图6所示,当温度低于1450℃时,TiN停止析出,控制TiN的析出温度和尺寸是目前研究的重点。析出温度越低,析出粒子尺寸越小,最后析出的TiC起着最好的析出强化效果,TiC颗粒一般为球形,位错或者位错亚结构是成核的主要位置^[24-25],虽然TiC强化效果较好,但由于温度敏感性高导致钢材力学性能不稳定,需要严格控制轧制工艺。

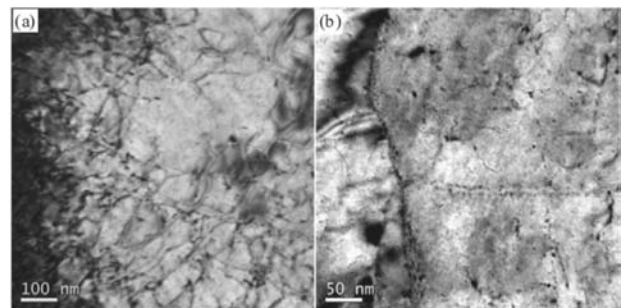
铌、钛复合添加时,Nb-Ti微合金钢中主要为两种类型的析出物。第一种类型的沉淀物的尺寸大于50 nm,其中一半的尺寸超过100 nm,而第二种类型的颗粒小于10 nm,并且大多数尺寸小于5 nm,它们都是(Nb,Ti)(C,N)析出物,较大的矩形析出物是富Ti的(Nb,Ti)(C,N),极细的球形颗粒是富Nb的碳氮化物,第一类析出相是在凝固过程中形成的,而第二类析出相是应变诱导析出相。铌元素主要以(Nb,Ti)C相的形式析出,铌的相对析出量随(Nb,Ti)C相析出后急剧增加,当(Nb,Ti)C没有析出时,铌含量升高,铌在TiN中的固溶量也升高,而当(Nb,Ti)C析出后,随铌含量增加,固溶量反而降低。在奥氏体中,铌、钛碳氮化物析出顺序为TiN>Nb(CN)>

NbC>TiC^[26]。Jae-Gil Jung^[27]对Nb-Ti-V微合金钢奥氏体中碳化物析出动力学进行研究,发现在析出温度为850~1000℃时,无V原子的(Nb,Ti)C碳化物都在无应变的(Ti,Nb)(C,N)碳氮化物界面优先析出。

铌、钛含量升高导致析出物增多,强度升高,但Ti的初始浓度较高也会导致TiN过早析出,对性能造成损伤,Nb添加过多时,碳化物也会以链状形式沿晶析出导致力学性能下降。目前国内合金元素的添加量较高,对比国外还存在差距,应在降低合金元素添加量的同时,借助工艺条件的控制设法减小TiN等析出物尺寸,促进尺寸细小、强化效果好的NbC、TiC的稳定析出。此外钢中杂质越多也会导致钛与杂质元素生成氧化物、硫化物,损伤基体性能。

4 热处理工艺的影响

重载卡车用钢对性能有着更高的要求,铌、钛复合添加后需辅以合适的热处理工艺来进一步提升性能。通常选用淬火进行热处理,淬火后硬度升高但韧性变差,大型零部件容易出现淬不透问题,少数使用正火进行热处理,强度较淬火低但韧性较好。卫



(a) 300 s

(b) 1000 s

图5 基体在600℃再加热300 s,1000 s时析出碳氮化铌的TEM图

Fig. 5 TEM of niobium carbonitride precipitates by reheating 300 s and 1000 s at 600 °C

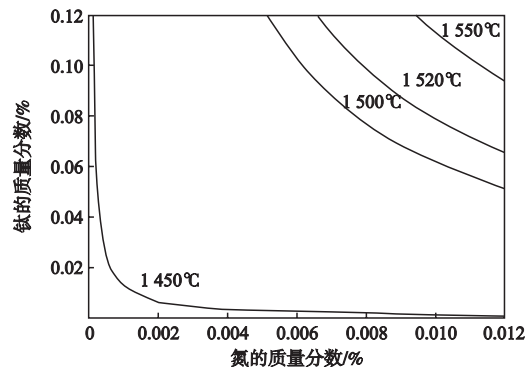


图6 不同温度下TiN的热力学稳定性图

Fig. 6 Thermodynamic stability diagram of TiN at different temperatures

心宏^[28]对大型铸钢件钛微合金化进行了研究,通过Ti的加入,可以降低基体的过热敏感性,细化厚大热节处晶粒组织,在900℃正火后达到最佳力学性能。胡志军^[29]对淬火和正火热处理对低合金耐热铸钢组织和性能的影响进行了研究,发现950℃下淬火硬度增加最多,随回火温度增加硬度下降,580℃回火达到最优力学性能,在950℃正火和550℃回火得到最优强塑性配比。

近年来有学者提出淬火-配分-回火(Q-P-T)工艺,经此工艺处理的钢表现出高强度与良好塑性的结合,逐渐被应用于铌、钛微合金钢。Ji Dong^[30]研究了Q-P-T对Nb-V-Ti微合金化超高强度钢组织和性能的影响,经过Q-P-T处理后的试样中,冲击韧性呈现先升后降的趋势,强度、断面收缩率和伸长率随配分时间的增加而增加。淬火-配分处理后析出物主要为 M_3C 、富Nb的MC和富Ti的MC型析出物,在回火过程中,出现了 M_2C 、 M_7C_3 、 $M_{23}C_6$ 型析出物,析出物的XRD图如图7所示^[30]。

在重载车用微合金钢热处理工艺中,提升强度的同时保证韧性良好是一关键点,组织细化及残留奥氏体是其获得良好韧性的主要因素之一,除上述的热处理工艺,直接淬火、直接淬火+回火等工艺也被广泛应用。壁厚差异较大的重载车用微合金钢铸造零件在淬火处理时容易开裂是一痛点,在确定铌、钛含量的基础上,需要通过研究确定合理的热处理工艺及相关参数来解决零件开裂难题。

5 思考与展望

(1) 铌钛复合添加时,通过减少铌含量而使用价格较低的钛来降低成本是发展目标,但钛质量分数过高会导致析出物粗大,变形时导致应力集中,铌、钛元素在重载车零件中的合理配比是需要研究的一个重

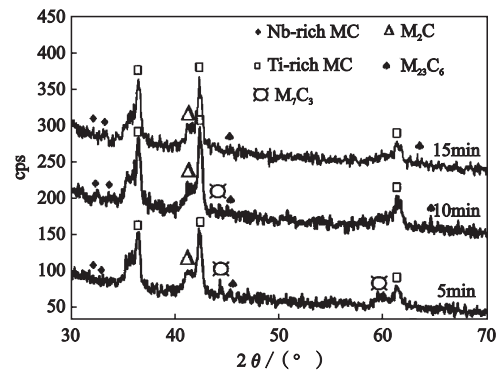


图7 Q-P-T试样提取沉淀物的X射线衍射图谱
Fig.7 X-ray diffraction patterns of precipitate extracted from Q-P-T sample

要技术问题。

(2) 铌、钛为强碳氮化物形成元素,其析出物尺寸和分布会影响低合金钢性能稳定,通过控制铌、钛元素的质量分数使析出物分布均匀、尺寸细小,避免以链状或棒状析出也是一个研究重点。

(3) 重载车用微合金钢零件主要使用淬火处理,由于零件尺寸较大,容易出现淬不透、析出物粗大,引起开裂、损害韧性等问题,通过优化调整热处理工艺方式或选用合适的淬火介质、调整淬火温度是解决相关零部件开裂的重要措施。

(4) 目前国内应用铌钛微合金化技术开发的车用微合金钢添加合金元素含量较高,对比国外先进水平还存在差距,添加量较低时细晶强化起主要作用,可以在提升强度同时不损害韧性,通过减少铌、钛含量或复合添加其他元素实现超细晶粒也是重要研究方向之一。

参考文献:

- [1] 韩孝永. 铌、钒、钛在微合金钢中的作用[J]. 宽厚板, 2006(1): 39-41.
- [2] 罗兴壮, 杨跃标, 廖桓萱, 等. 600 MPa级铌钛微合金高强度车船用钢试制开发[J]. 柳钢科技, 2018(2): 21-24.
- [3] 张瑞琦, 刘志伟, 孙傲, 等. 高速列车转向架构架用Nb-Ti微合金化钢板的研制[J]. 特殊钢, 2020, 41(1): 32-35.
- [4] 惠亚军, 潘辉, 李文远, 等. 960 MPa级铌钛微合金化超高强钢第二相粒子的溶解行为[J]. 机械工程材料, 2018, 42(2): 35-39.
- [5] TAKECHI H. Metallurgical aspects on interstitial free sheet steel from industrial viewpoints[J]. ISIJ international, 1994, 34(1): 1-8.
- [6] MISRA R D K, NATHANI H, HARTMANN J E, et al. Microstructural evolution in a new 770 MPa hot rolled Nb-Ti microalloyed steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 394(1-2): 339-352.
- [7] DUTTA B, SELLARS C M. Effect of composition and process variables on Nb (C, N) precipitation in niobium microalloyed austenite[J]. Materials Science and Technology, 1987, 3(3): 197-206.
- [8] GARCÍA-SESMA L, LÓPEZ B, PEREDA B. Effect of coiling conditions on the strengthening mechanisms of Nb microalloyed steels with high Ti addition levels[J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 748: 386-395.
- [9] 王晓军, 徐博, 南宏强, 等. Nb含量对Cr20Ni80合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(6): 586-589.
- [10] DONG J, ZHOU X, LIU Y, et al. Effects of quenching-partitioning-tempering treatment on microstructure and mechanical performance of Nb-V-Ti microalloyed ultra-high strength steel[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 690: 283-293.
- [11] 王东. 钛微合金化钢中钛与非金属元素相互作用基础研究[D]. 昆明理工大学, 2013.
- [12] FUJITA N, HKD H B. Modelling simultaneous alloy carbide sequence in power plant steels[J]. ISIJ international, 2002, 42(7): 760-769.

- [13] ZENG Z, REDDY K M, SONG S, et al. Microstructure and mechanical properties of Nb and Ti microalloyed lightweight δ -TRIP steel [J]. *Materials Characterization*, 2020: 110324.
- [14] HU J, DU L X, DONG Y, et al. Effect of Ti variation on microstructure evolution and mechanical properties of low carbon medium Mn heavy plate steel [J]. *Materials Characterization*, 2019, 152: 21–35.
- [15] 李秀兰, 谢文玲, 周新军, 等. Ti、V、Nb、Mo对高铬铸铁碳化物形态与性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2014, 34(8): 804–807.
- [16] 甘晓龙, 岳江波, 陈子宏, 等. Ti-Nb微合金化对低碳高强度钢组织和性能的影响 [J]. *特殊钢*, 2012, 33(6): 32–35.
- [17] 霍向东, 夏继年, 李烈军, 等. 钛微合金化高强钢的研究与发展 [J]. *钢铁钒钛*, 2017, 38(4): 105–112.
- [18] 袁向前, 马立强, 刘振宇, 等. 钛含量对铌钛微合金化钢强度的影响 [J]. *轧钢*, 2006(6): 12–14.
- [19] 吴刚. 汽车结构用550MPa级热连轧钢板的研制开发 [J]. *鞍钢技术*, 2020(1): 26–30.
- [20] KOSTRYZHEV A G, AL SHAHRANI A, ZHU C, et al. Effect of deformation temperature on niobium clustering, precipitation and austenite recrystallisation in a Nb-Ti microalloyed steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2013, 581: 16–25.
- [21] GU Y, QIAO G, WU D, et al. Precipitation kinetics of Nb carbonitride in austenite and acicular ferrite and its effect on hardness of high-Nb steel [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2016, 183: 506–515.
- [22] MEYER L, 徐新华. 钛在低碳钢中作为一种强化元素和控制硫化物元素 [J]. *宝钢情报*, 1989: 149–158.
- [23] LI N, WANG L, XUE Z L, et al. Study of precipitation and growth processes of Ti-bearing inclusions in tire cord steel [J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 102929.
- [24] WANG Z, MAO X, YANG Z, et al. Strain-induced precipitation in a Ti micro-alloyed HSLA steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 529: 459–467.
- [25] 蔡珍, 韩斌, 谭文, 等. 钛微合金化技术发展现状 [J]. *中国冶金*, 2015, 25(2): 1–5.
- [26] 杨颖, 侯华兴, 史乃安, 等. 高钛含铌钢中碳、氮化物析出的热力学分析和实验研究 [C] // 第七届(2009)中国钢铁年会大会论文集(中). 2009.
- [27] JUNG J G, PARK J S, KIM J, et al. Carbide precipitation kinetics in austenite of a Nb-Ti-V microalloyed steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(16-17): 5529–5535.
- [28] 卫心宏, 姚国平. 大型铸钢件钛微合金化的研究及应用 [J]. *铸造设备与工艺*, 2017(5): 41–43.
- [29] 胡志军, 杨弋涛. 热处理对低碳低合金耐磨铸钢组织性能的影响 [C] // 中国机械工程学会. 2012中国铸造活动周论文集. 中国机械工程学会铸造分会, 2012: 107–115.
- [30] DONG J, ZHOU X, LIU Y, et al. Effects of quenching-partitioning-tempering treatment on microstructure and mechanical performance of Nb-V-Ti microalloyed ultra-high strength steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 690: 283–293.

Research and Application Status of Niobium-Titanium Microalloying Technology of Special Low Alloy Steel for Heavy Truck

FAN Ze-xi, YANG Yi-tao

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract:

Microalloying technology based on niobium and titanium is widely used in low alloy steel, which is expected to help to improve the performance of heavy-duty vehicle steel parts. The existing form, strengthening mechanism and precipitation law of niobium and titanium in automotive low alloy steel and the heat treatment process of castings are reviewed in this paper. Niobium and titanium mainly exist in the form of precipitated state in steel, and the precipitation strengthening is the main strengthening mode. Quenching and high temperature tempering are commonly used in the final heat treatment. Finally, the development direction of niobium-titanium microalloying steel for heavy-duty vehicles and some solutions to the existing problems are put forward.

Key words:

niobium; titanium; microalloying; low alloy steel; heavy truck