

综述与专论

Ti-Mo 铁素体钢纳米粒子析出行为研究现状

黄 耀

(中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘 要: 通过文献调研的方法,对纳米相铁素体钢的成分、工艺和力学性能研究动态进行了归纳,分析了不同 Ti 系、Ti-Mo 系和 Ti-Nb 系的成分含量、终轧温度、冷却速率、卷取温度和等温时间等变量对钢中组织、纳米粒子行为和力学性能的影响;对铁素体钢中纳米相相间析出行为观察研究动态进行了分析;对纳米粒子相间析出行为的台阶机制、溶质拖曳消耗理论和超级台阶机制进行了对比分析,分析了 3 个模型机理的优点与缺点。最终提出在纳米尺度设计高度有序的复合析出纳米颗粒析出是开发超高性能稳定的纳米结构工程钢材的新途径。

关键词: 铁素体钢; 纳米粒子; 相间析出; 台阶机制; 溶质拖曳消耗理论; 超级台阶机制

中图分类号: TF76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7638(2020)04-0070-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.04.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Research Progress on Precipitation Behavior of Nanoparticles in Ti-Mo Bearing Ferritic Steel

Huang Yao

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The research trends of steel composition, process and mechanical properties of nano phase ferrite were introduced. The influence of composition, finishing rolling temperature, cooling rate, coiling temperature and isothermal time of different Ti systems, Ti-Mo systems and Ti-Nb systems on the behaviors and mechanical properties of structure and nano particles in steel were analyzed. The observation and research trends of interphase precipitation behaviors of nano particles in ferritic steel were analyzed. Ledge mechanism, solute drag-depletion mechanism, and super-ledge mechanism of interphase precipitation behavior of nano particles were compared and analyzed, and the advantages and disadvantages of the three models were analyzed. Finally, it is proposed that the design of highly ordered composite precipitated nanoparticles at nanoscale is a new way to develop ultra-high performance and stable nanostructured engineering steel.

Key words: ferritic steel, nanoparticles, interphase precipitation, ledge mechanism, solute drag-depletion mechanism, super-ledge mechanism

0 引言

近年来,随着纳米科技的发展,纳米材料在力学

性能方面展现出高强度、高硬度和高韧性等独特优势,引起了研究者广泛关注。纳米科技的发展也为新型高强铁素体钢的设计开拓了新途径,将纳米材

收稿日期: 2019-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助(Ti-Mo 铁素体钢中纳米粒子相间析出行为与强韧化机理, No.51601174)。

作者简介: 黄 耀(1985—),男,湖北孝感人,博士,高工,长期从事于电网金属材料研发、应用及腐蚀与防护, E-mail: tao-hua-daozhu@163.com。

料和纳米技术应用到钢铁材料设计中,利用纳米级析出相沉淀强化和阻止晶粒长大技术,有望大幅度提高结构钢的强度和韧性^[1-3]。新型纳米粒子强化高强铁素体钢(C为0.05%~0.1%)除了要求极高的抗拉强度外(780~1 000 MPa),还要求具有一定塑性和韧性(总延伸率 $\geq 20\%$)、尽可能小的缺口敏感性、高的疲劳强度、一定的抗蚀性、良好的工艺性、价格低廉及环境友好性^[4]。纳米粒子铁素体钢运用纳米粒子沉淀析出强化作用,在提高材料抗拉强度的同时,尽量减少韧性的损失,从而具有高的扩孔率,已广泛应用于桥梁、建筑耐热钢、汽车座椅、悬挂系统、防撞臂和紧固件上^[5-9]。

纳米粒子高强钢的制备方面,2003年,Funakawa等^[1,10]成功开发出了780 MPa级的Ti-Mo系热轧铁素体高扩孔高强钢板,其扩孔性能可达120%;2016年,黄耀等人^[9-12]成功研发出了抗拉强度达825 MPa和990 MPa的单一纯铁素体组织热轧板,断后总伸长率20%以上,扩孔率在43%以上,同时研究了不同终轧温度对铁素体中位错密度、铁素体晶粒尺寸和析出强度的影响变化。纳米粒子强化钢在工艺制备方面较为成熟,但在纳米粒子相间析出形成机理方面,一直是国内外研究的热点和难点,奥氏体向铁素体转变过程中,相界面的形成无法动态观察,纳米粒子随着相界面的迁移不断析出形成相间析出的现象较为偶然,且透射电镜(TEM)观察需要时需要与观察的铁素体晶粒取向成固定角度才可能观察到相间析出现象,因此,笔者对比分析了纳米粒子相间析出行为不同机理,分析了3个模型机理的优缺点。

综上所述,纳米粒子高强铁素体钢不仅是钢铁材料研究的重要方向,具有广阔应用和发展前景^[12],而且对于提高我国纳米相强化钢研究水平,开发新型高强高韧钢种具有重要意义。

1 国内外研究现状

1.1 纳米相铁素体钢成分、工艺和力学性能研究动态

2003年,Funakawa^[1,13]等成功开发出了780 MPa级的Ti-Mo系热轧铁素体高扩孔高强钢板,其扩孔性能可达120%,并将这种优异的力学性能归结于单相的铁素体组织和具有相间沉淀析出的纳米粒子碳化物,经计算表明相间析出强化增量达300 MPa,是传统高强低合金钢(HSLA)析出强化增量的2~3倍。因此,纳米粒子高强铁素体钢是取代为传统HSLA钢的重要途径。

图1概述了新型高强铁素体钢设计理念。目前,纳米粒子高强钢轧制工艺研究,主要集中在化学成分比、卷取温度、冷却方式和等温时间对Ti-Mo系低碳高强铁素体钢(C~0.05%)组织、力学性能和纳米粒子析出行为的影响^[1,6,14-19]。Funakawa等^[1,13]研究了各种合金元素原子比和热轧工艺对析出强化的作用,同时也研究了力学性能和卷取温度的关系。研究表明,当Ti/Mo原子浓度比为1时,Ti-Mo系铁素体钢具有最优的力学性能。C. Y. Chen等^[14]对比研究了Ti系、Ti-Mo系和Ti-Nb系铁素体钢中纳米粒子析出强化作用,与TiC和(Ti, Nb)C相比,(Ti, Mo)C具有更强维持纳米相尺寸能力,对钢强度贡献最大,究其原因,Funakawa等^[1,13]认为在高温卷取作用下,与Ti系和Ti-Nb系相比,(Ti, Mo)C不易发生熟化,从而使Ti-Mo微合金钢在高温卷取下仍具有高的强度,同时还指出,(Ti, Mo)C延迟熟化的耐热稳定性是由Ti-Mo微合金钢中剩余固溶Ti含量决定的,剩余固溶Ti含量越少,耐热稳定性越好,熟化越缓慢,并且纳米粒子碳化物的熟化过程由Ti扩散控制。

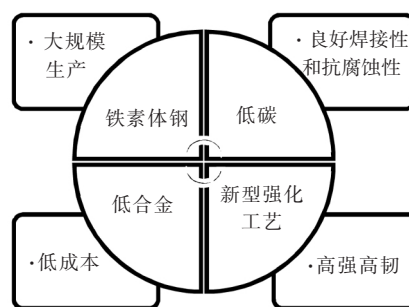


图1 新型纳米强化高强铁素体钢设计理念

Fig. 1 Design concept of new nano strengthening high strength ferritic steel

在Ti和Mo的化学成分作用机理上,Ti含量对纳米粒子高强铁素体钢的组织 and 力学性能研究较为完善,但Mo含量对组织、力学性能和析出行为影响及对热稳定的贡献机理目前尚不清楚。先前文献^[20]认为处于固溶态的Mo能减少纳米粒子碳化物形成元素如Ti的活度,而最近文献^[21]通过热模拟计算的方法表明,Ti原子被Mo原子部分取代所形成的(Ti, Mo)C,其与铁素体基体晶格错配度的减小,有利于在形核的初始阶段,增加析出形核点,随后,纳米粒子的粗化行为主要是受基体固溶态Ti含量影响。Seto Kazuhiro等^[22]研究了(Ti, Mo)C熟化

过程中纳米粒子大小随 Ti/Mo 原子比变化规律,研究认为 Ti 为粒子粗化的控制性元素,钢中固溶的 Ti 含量减少,析出粒子熟化长大过程受到明显的抑制。Mukherjee S^[23] 则认为是钢中固溶 Mo 元素降低了应变能,从而纳米粒子熟化过程受到抑制。黄耀等人^[24] 分析了不同 Mo 含量对纳米粒子铁素体钢中组织、纳米粒子析出形核长大过程的影响。

目前为止,终轧温度、原奥氏体晶粒大小和再结晶分数对 Ti-Mo 系铁素体钢中纳米粒子分布、数量密度及析出强化增量(位错强化、弥散析出强化和相间析出强化)的影响研究在国内外报道较少,因此,非常有必要设置不同轧制参数,在不同相变区进行热轧,研究形变诱导析出(主要在奥氏体中析出, >10 nm)和 λ/α 相转变析出(主要包含相间析出和等温弥散析出)纳米粒子对钢细晶强化、析出强化的强度贡献,研究纳米粒子相间析出行为与位错的交互作用(位错绕过强化、化学强化、模量强化及共格应变强化等),从工艺—组织—性能—纳米尺度计算—位错机理方面全面分析铁素体钢中纳米粒子的强韧化机理。黄耀等人^[9-13] 成功研发出了抗拉强度达 825 MPa 和 990 MPa 的纯铁素体组织热轧板,同时对于纳米粒子强化钢中碳化物相间析出的行为也进行了报道。研究了不同终轧温度对铁素体中位错密度、晶粒尺寸和析出强度的影响变化;分析了水冷、空冷和炉冷对铁素体钢组织、纳米粒子析出及强韧化机理的影响规律;同时采用 3DAP 定量分析了卷取温度与析出效率的关系^[25]。

1.2 铁素体钢中纳米相相间析出行为观察研究动态

对于铁素体钢中纳米粒子析出行为的研究,目前国外的研究热点和难点都集中在纳米粒子的相间析出行为方面,国内对于纳米粒子相间析出行为的研究和报道偏少^[26-28]。纳米粒子相间析出指在铁基合金中,奥氏体向铁素体转变时,铁素体和奥氏体相界面会析出一些细小的碳化物颗粒,这些碳化物颗粒成带、排状排列,平行于或呈一定角度于 γ/α 相界面,均匀分布在铁素体基体上,这种析出沉淀形式称为相间沉淀(interphase precipitation)^[29],见图 2。

Mukherjee S^[23] 对 Ti-Mo 系铁素体钢中的纳米粒子做了三维电子探针研究,图 3 为纳米粒子相间析出三维原子图,其中 a、b 图中虚线所示为相间析出的纳米粒子,在相间析出排间距之间,存在固溶纳米团簇粒子,这种固溶纳米团簇以平行于 α/γ 界面或成规则存在于铁素体基体中。纳米团簇和析出物形貌主要是以碟片状形式存在。

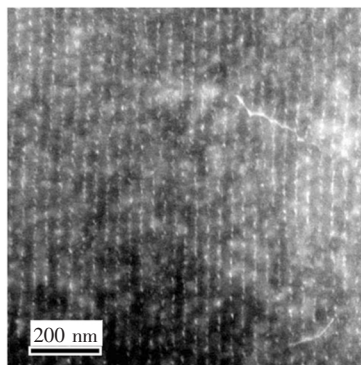
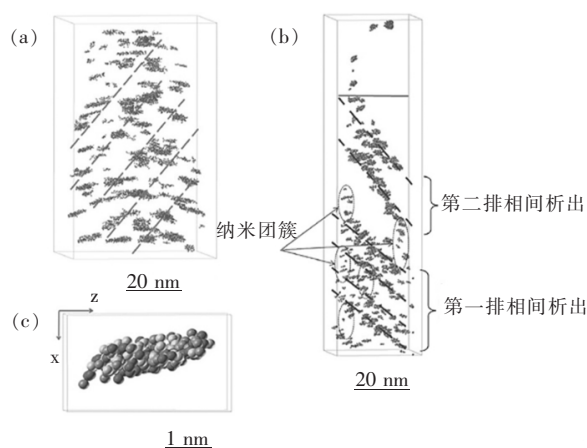


图 2 纳米碳化物的析出形貌

Fig. 2 Precipitation morphology of nano carbide



(a)沿虚线相间析出的分布;(b)相间析出间的团簇和不同的相间析出;(c)碟片状析出物的原子图

图 3 相间析出的三维原子图

Fig. 3 Three dimensional atom diagram of interphase precipitation, (a) distribution of precipitation along a long dotted line, (b) cluster and different interphase precipitation between interphase precipitation, (c) atom diagram of disc precipitation

Okamoto 等^[30] 通过对在 γ/α 相转变区等温不同时间的纳米粒子形貌观察分析,同时建立了相间析出的理论计算模型,研究指出相间析出过程在 5 ~ 10 s 内完成,相间析出主要为平面型和非平面型,其中非平面型容易在晶界附近观察到;相间析出的行间距随着温度降低而减小;在与行垂直方向,行距大体上相同,但波动比较大;在与行平行方向,行距基本不变。然而最近有研究^[31-32] 表明在含 V 钢中,相间析出排间距随着距铁素体形核点距离增大有减小趋势,但在低碳含 Nb 钢中^[30],相间析出排间距并不随着铁素体中析出形核位置产生变化,相反其排

间距表现出一定固定值。至于相间析出中纳米粒子的排间距是否与析出形核位置有关,以及受哪些参数变量的影响,有待进一步理论研究。

最近 J B Seol 等人^[3]认为在原子尺度上操纵材料的结构、缺陷和成分以提高其物理或机械性能称为纳米化技术,结合三维原子探针技术,揭示了在长时间热处理后,高度规则的相间析出的纳米粒子阵列如何使掺有 Ti、Mo 和 V 的铁基合金的强度加倍,即从 500 MPa 增加至 1 000 MPa。在高温面心立方奥氏体向体心立方铁素体相冷却过程中,纳米颗粒在移动的异相界面处形成。同时观察了沉淀初期形成的 MoC 和 TiC 纳米颗粒与沉淀后期形成的富 Ti-C 核和富 Mo-V 复合析出的纳米颗粒,研究结果表明复合的纳米颗粒可有效阻碍颗粒的粗化,提高了材料的强度。设计这种高度有序的复合析出纳米颗粒阵列为开发性能显著提高的稳定纳米结构工程金属合金提供了一条新途径。

1.3 铁素体钢中纳米相相间析出形成机理研究动态

与纳米粒子相间析出试验观察相比,机理研究具有滞后性,这主要由奥氏体向铁素体转变过程中相界面复杂性决定的,虽然对于相间沉淀析出机制的理论研究进展较为缓慢,但主要可以归于三类:台阶机制^[34](Ledge mechanism)、溶质拖曳消耗理论^[35](Solute drag-depletion mechanism)和超级台阶机制(Super-ledge mechanism)^[36]。溶质拖曳消耗理论认为:相间析出的纳米粒子碳化物形核与长大主要是依靠合金元素在铁素体中的溶质扩散,其溶质元素在新形成的铁素体中存在浓度梯度,这种溶质元素在距已形成的排状碳化物一定距离后,其浓度会回复为初始浓度。当溶质元素沿浓度梯度扩散累积至临界形核浓度时,纳米粒子碳化物在相界面上开始临界形核并长大,随着界面的不断移动,临界析出形核长大的过程依此往复,从而形成相间析出沉淀;而台阶机制则认为: γ/α 界面一般为共格或半共格,界面能量比较低,界面可动性差,而可移动的台阶面为非共格,高能量,可动性也大,形核较困难,因此碳氮化物只能在 γ/α 界面上形核。另外,对于曲线状的相间析出则认为是由不均匀台阶出现,从而导致某两个相邻析出带之间的间距与其他相邻析出带的排间距具有不同的排间距。

对于纳米粒子不同形貌的相间析出形成机理, Honeycombe^[37]对直线状相间析出进行了解释: γ/α 相界面移动主要是由高能量的台阶面移动来实现,其相界面具有低能量,非移动性和半共格的特性,易

成为析出形核点,而台阶面的移动则过于迅速,析出的粒子在半共格的界面上不断反复形核,从而具有相同的排间距,大致和台阶高度相等或者几倍于台阶高度;对于曲线状的相间析出^[38]:部分具有稍高能量的、无序的 γ/α 相界面的移动主要靠台阶面“弓出”来移动,这种无序的界面易于被已在界面析出的大量的纳米粒子钉扎,从而形成曲线状的相间析出。另外, Liu 等人^[39]认为界面相间析出的纳米粒子会对界面迁移行为产生反复“钉扎”作用,而随后的“解钉”行为主要是因为纳米粒子形成过程中对 C 元素的消耗,导致铁素体转变动力学增加。试验观察到相间析出排间距的不断减少是因为 γ 、 α 相转变过程中动力学(由 γ 、 α 中的 C 含量决定)差异引起铁素体生长速率降低。Yen H 等^[40]则认为纳米粒子相间析出的形貌主要和界面类型有关,对 α/γ 界面进行了分类,一种半共格界面(A)和三种非共格界面(B、C1、C2),认为直线型相间析出主要由 A 型界面形成,纳米粒子碳化物易在三种非共格界面(B、C1、C2)上以连续半跳跃机制和台阶机制形成曲线状的相间析出。目前对于相间析出形成的机理和具体参数(如成分、温度、应变量、相转变和界面类型等)对相间析出的影响,也没有统一的理论支撑及模型的建立。因此,有待进一步研究。

其排间距的大小主要是受台阶面的移动速度和合金元素 Ti 的晶界扩散系数的影响。相间析出的排间距并不随着铁素体中的析出形核位置产生变化,而是表现出一定的固定值,可能主要是和 α/γ 界面均匀台阶的形成有关。在等温过程中, α/γ 界面能和转变动力学不会随着铁素体的生长而产生变化,从而相间析出严格按照一定的固定距离反复在 α/γ 界面上形核长大^[28,41]。

超级台阶理论则认为^[36]:通过二维台阶形核模型,计算台阶的形核速率 J;同时计算纳米粒子析出的形核速率 JP,推导出相间析出的排间距 λ 、界面移动速度 VZ 和粒间距 bP 表达式。超级台阶理论从化学成分、应变量和温度准确表征了纳米粒子相间析出行为过程中的排间距变化关系,模型更为完善合理,但该模型计算复杂,涉及变量较多,同时目前仅应用在 V-N 微合金钢中。

2 展望

纳米粒子强化钢中,材料制备的强度主要影响因素为化学分配比、轧制工艺和卷取温度,而不同

Mo 含量对其热稳定性有一定影响。纳米尺度设计高度有序的复合析出纳米颗粒析出是开发超高性能稳定的纳米结构工程钢材的新途径,采用相间析出

的纳米粒子对钢铁材料进行设计,是开发高强钢的发展趋势。

参考文献

- [1] Funakawa Y. Mechanical properties of ultra fine particle dispersion strengthened ferritic steel [J]. Materials Science Forum, 2012, 706-709: 2096-2100.
- [2] Shen Y F, Wang C M, Sun X. A micro-alloyed ferritic steel strengthened by nanoscale precipitates [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(28): 8150-8156.
- [3] Jia Z, Misra R D K, O Malley R, *et al.* Fine-scale precipitation and mechanical properties of thin slab processed titanium-niobium bearing high strength steels [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(22-23): 7077-7083.
- [4] Wang Changjun, Yong Qilong, Sun Xinjun, *et al.* Effect of Ti and Mn content on precipitation characteristics and strengthening mechanism of Ti micro-alloyed steel in CSP process [J]. Acta Metallica Sinica, 2011 (12): 1541-1549.
(王长军, 雍岐龙, 孙新军, 等. Ti 和 Mn 含量对 CSP 工艺 Ti 微合金钢析出特征与强化机理的影响 [J]. 金属学报, 2011 (12): 1541-1549.)
- [5] Woo Kim Y, Hong S, Huh Y, *et al.* Role of rolling temperature in the precipitation hardening characteristics of Ti-Mo microalloyed hot-rolled high strength steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 615: 255-261.
- [6] Chen J, Lv M, Tang S, *et al.* Influence of cooling paths on microstructural characteristics and precipitation behaviors in a low carbon V-Ti microalloyed steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 594: 389-393.
- [7] Fang Yupei, Xie Zhenjia, Shang Chengjia. Effect of induction tempering on carbide precipitation behavior and toughness of 1 000 MPa high strength low alloy steel [J]. Acta Metallica Sinica, 2014 (12): 1413-1420.
(房玉佩, 谢振家, 尚成嘉. 感应回火对 1 000 MPa 级高强度低合金钢碳化物析出行为及韧性的影响 [J]. 金属学报, 2014 (12): 1413-1420.)
- [8] Sha Qingyun, Li Guiyan, Yan Pingyuan, *et al.* The effect of cooling rate and coiling temperature on the precipitation of ferrite in Nb-V-Ti composite microalloy strip [J]. Material Progress in China, 2012, 30 (12): 23-26.
(沙庆云, 李桂艳, 严平沅, 等. 冷却速度和卷取温度对 Nb-V-Ti 复合微合金带钢铁素体中析出的影响 [J]. 中国材料进展, 2012, 30(12): 23-26.)
- [9] Huang Yao, Zhao Aimin, Wang Xiaopei, *et al.* A high-strength high-ductility Ti- and Mo-bearing ferritic steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47(1): 1-11.
- [10] Wang Xiaopei, Zhao Aimin, Zhao Zhengzhi, *et al.* Mechanical properties and characteristics of nanometer-sized precipitates in hot-rolled low-carbon ferritic steel [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2014(3): 266-272.
- [11] Wang Xiaopei, Zhao Aimin, Zhao Zhengzhi, *et al.* Precipitation strengthening by nanometer-sized carbides in hot-rolled ferritic steels [J]. Journal of Iron and Steel Research(International), 2014(12): 1140-1146.
- [12] Jiao Zengbao, Liu Jinchuan. Research and development of new nano strengthening ultra high strength steel [J]. Material Progress in China, 2011, 30 (12): 6-11.
(焦增宝, 刘锦川. 新型纳米强化超高强度钢的研究与进展 [J]. 中国材料进展, 2011, 30(12): 6-11.)
- [13] Funakawa Y, Seto K, Nakamichi H. Strengthening of ferritic steel by interface precipitated carbides in rows [J]. Materials Science Forum, 2010, 638-642: 3218-3223.
- [14] Yen H, Chen P, Huang C, *et al.* Interphase precipitation of nanometer-sized carbides in a titanium-molybdenum-bearing low-carbon steel [J]. Acta Materialia, 2011, 59(16): 6264-6274.
- [15] Mao X, Huo X, Sun X, *et al.* Strengthening mechanisms of a new 700 MPa hot rolled Ti-microalloyed steel produced by compact strip production [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(12): 1660-1666.
- [16] Funakawa Y U T. Tensile properties of chromium-bearing extra low carbon steel sheets [J]. ISIJ International, 2010, 50(10): 1488-1495.
- [17] Bu F Z, Wang X M, Yang S W, *et al.* Contribution of interphase precipitation on yield strength in thermomechanically simulated Ti-Nb and Ti-Nb-Mo microalloyed steels [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 620(10): 22-29.
- [18] Chen M Y, Gouné M, Verdier M, *et al.* Interphase precipitation in vanadium-alloyed steels: Strengthening contribution and morphological variability with austenite to ferrite transformation [J]. Acta Materialia, 2014, 64: 78-92.

- [9] Huang Y, Han J, Liu W, *et al.* Effect of the final rolling temperature on the precipitation behavior and toughening mechanism of nanoparticles in ferritic steel [J]. *J. Mater. Eng. Perform.*, 2020, 29(3): 1724.
- [20] Akben M G, Bacroix B, Jonas J J. Effect of vanadium and molybdenum addition on high temperature recovery, recrystallization and precipitation behavior of niobium-based microalloyed steels [J]. *Acta Metallurgica*, 1983, 31(1): 161–174.
- [21] Jang J H, Lee C, Heo Y, *et al.* Stability of (Ti, M)C (M = Nb, V, Mo and W) carbide in steels using first-principles calculations [J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(1): 208–217.
- [22] Seto Kazuhiro F Y K S. Hot rolled high strength steels for suspension and chassis parts ‘NANO HITEN’ and ‘BHT’ steel [J]. *JFE Technical Report*, 2007, 10: 19–25.
- [23] Mukherjee S, Timokhina I B, Zhu C, *et al.* Three-dimensional atom probe microscopy study of interphase precipitation and nano-clusters in thermomechanically treated titanium-molybdenum steels [J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(7): 2521–2530.
- [24] Huang Y, Han J, Liu W, *et al.* Effect of Mo content on the thermal stability of Ti-Mo bearing ferritic steel [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, in press.
- [25] Huang Yao, Zhao Zhengzhi, Zhao Aimin, *et al.* Precipitation behavior of second phase particles in automobile crossbeam steel [J]. *Journal of Beijing University of Science and Technology*, 2013(7): 882–889.
(黄耀, 赵征志, 赵爱民, 等. 汽车大梁钢中第二相粒子析出行为 [J]. *北京科技大学学报*, 2013(7): 882–889.)
- [26] Chen Jun, LV Mengyang, Tang Shuai, *et al.* Microstructure, properties and interphase precipitation behavior of V-Ti microalloyed steel [J]. *Acta Metallurgica Sinica*. 2014(5): 524–530.
(陈俊, 吕梦阳, 唐帅, 等. V-Ti 微合金钢的组织性能及相间析出行为 [J]. *金属学报*. 2014(5): 524–530.)
- [27] Jia Tao, Wei Jiao, Feng Jie, *et al.* Interphase precipitation in low carbon titanium and vanadium microalloyed steel [J]. *China Engineering Science*, 2014, 16(1): 88–92.
(贾涛, 魏娇, 冯洁, 等. 低碳钛, 钒微合金钢中的相间析出 [J]. *中国工程科学*, 2014, 16(1): 88–92.)
- [28] Wang Xiaopei, Zhao Aimin, Zhao Zhengzhi, *et al.* Interphase precipitation characteristics of nano sized carbide in low carbon ferritic steel [J]. *Journal of Material Heat Treatment*, 2014(8): 69–73.
(汪小培, 赵爱民, 赵征志, 等. 低碳铁素体钢中纳米尺寸碳化物的相间析出特征 [J]. *材料热处理学报*, 2014(8): 69–73.)
- [29] Yen H, Huang C, Yang J. Characterization of interphase-precipitated nanometer-sized carbides in a Ti-Mo-bearing steel [J]. *Scripta Materialia*, 2009, 61(6): 616–619.
- [30] Okamoto R, Borgenstam A, Aa Gren J. Interphase precipitation in niobium-microalloyed steels [J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(14): 4783–4790.
- [31] Murakami T, Hatano H, Miyamoto G, *et al.* Effects of ferrite growth rate on interphase boundary precipitation in V microalloyed steels [J]. *ISIJ International*, 2012, 52(4): 616–625.
- [32] Zhang Y J, Miyamoto G, Shinbo K, *et al.* Effects of transformation temperature on VC interphase precipitation and resultant hardness in low-carbon steels [J]. *Acta Materialia*, 2015, 84: 375–384.
- [33] Seol J B, Na S H, Gault B, *et al.* Core-shell nanoparticle arrays double the strength of steel [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 42547.
- [34] Lagneborg R Z S. A model for interphase precipitation in V-microalloyed structural steels [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, 32(1): 39–50.
- [35] Purdy G, Hutchinson C, Militzer M, *et al.* ALEMI: A ten-year history of discussions of alloying-element interactions with migrating interfaces [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2011, 42(12): 3703–3718.
- [36] Chen M Y, Mohamed G M M. Superledge model for interphase precipitation during austenite-to-ferrite transformation [J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2014, 45(12): 5351–5361.
- [37] Davenport A T, Honeycombe R. Precipitation of carbides at austenite/ferrite boundaries in alloy steels [J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 1971, 322: 191–205.
- [38] Ricks R A, Howell P R. The formation of discrete precipitate dispersions on mobile interphase boundaries in iron-base alloys [J]. *Acta Metallurgica*, 1983, 31(6): 853–861.
- [39] Liu W J. Computer simulation of VC [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1993, 24(10): 2195–2207.
- [40] Huang Yao, Zhao Aimin, Cheng Yongfeng, *et al.* Interphase precipitation behavior of nano sized carbides in low carbon steel [J]. *Journal of Engineering Science*, 2015(7): 896–904.
(黄耀, 赵爱民, 程永峰, 等. 低碳钢中纳米尺寸碳化物的相间析出行为 [J]. *工程科学学报*, 2015(7): 896–904.)