

Ti 含量对重载车用含 Nb 铸钢组织与力学性能的影响

范泽熙, 丁 旺, 杨弋涛

(上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444)

摘要: 研究了不同Ti含量的重载车用含Nb试验铸钢的显微组织、力学性能的变化规律。结果表明: 少量添加Ti元素后会显著改善Nb元素在晶界的偏聚现象, 生成复合析出物在基体中弥散分布, 起到析出强化作用; 随Ti含量进一步增加, 析出物在晶界以链状析出且TiN颗粒呈块状集结, 从而使钢的力学性能下降。Ti添加量在0.1%时, 试验铸钢试样具有良好的显微组织和力学性能。

关键词: Nb; Ti; 重载车; 力学性能; 显微组织

近年来, 为了减少能源浪费和二氧化碳排放, 汽车轻量化是一个重要研究课题, 企业需在保障安全性能的前提下尽可能减重减排, 这就对汽车用钢提出了更高的要求^[1-4]。重载汽车因为载重量大, 其零部件需要有更加优异的性能, 低碳微合金钢广泛应用于重载卡车零部件中, 由于低碳和低合金含量, 在成本上有着明显优势且具有良好的焊接性和成形性, 但在强度上略有不足, 微合金化技术被广泛使用在重载车用钢中, 微合金元素主要借助细晶强化和析出强化两种机制来达到强化效果, 通过生成单独析出物或复合析出物来实现强度增高。

Nb、Ti元素作为广泛使用的微合金元素, 有着优异的强化效果^[5], 并且形成析出相可以起到二次硬化的效果。目前, 单一添加微合金元素已经不能满足性能上的要求, 且由于Nb价格昂贵, Ti元素资源丰富且在工厂应用中主要使用海绵钛作为Ti元素来源, 在价格上具有明显优势, Nb、Ti复合添加大量应用到汽车用钢中, Nb、Ti复合添加其间的交互作用导致许多细小、稳定的析出物生成。甘晓龙^[6]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, 得出用Ti来取代部分Nb可以对钢有着相同强度的提升, 有效降低成本。Kang等^[7]对UNS S44100铁素体不锈钢进行研究, Ti、Nb复合添加可以细化晶粒, 提高晶粒均匀性, 改善力学性能。微合金元素含量对基体力学性能会产生较大影响, Ti元素具有资源优势且价格低廉, 具有重要研究意义, 但目前关于Ti元素添加量对含Nb重载车用铸钢的力学性能研究较少, 本文拟通过研究不同Ti含量对该试验铸钢显微组织、力学性能影响的变化规律, 希望为铸钢企业生产中的成分控制和材质改良提供合理可靠的依据。

1 试验材料与方法

试验铸钢为真空电弧炉熔炼的钮扣型铸锭, 质量约为80 g, 设计在加入固定0.2% Nb后添加不同含Ti量(质量分数, 下同): 0(1[#])、0.1%(2[#])、0.2%(3[#])、0.3%(4[#])、0.4%(5[#])。采用移动式直读光谱仪PMI-MASTER PRO分析试验铸钢试样的化学成分, 结果如表1所示。试验钢的热处理工艺为: ①均匀化退火: 在1 100 ℃保温2 h, 随炉冷到室温; ②淬火: 在950 ℃加热保温1 h, 油淬, 随后200 ℃回火2 h。在YFA12/15G-Y型箱式电阻炉中完成热处理。

作者简介:

范泽熙(1998-), 男, 硕士生, 研究方向为含Nb、Ti微合金铸钢组织和性能的变化规律。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: TG142.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)

09-1067-08

收稿日期:

2021-02-07 收到初稿,

2021-04-08 收到修订稿。

表1 试验铸钢化学成分
Table 1 Chemical composition of test cast steel

材料	C	Cr	Mn	Si	Nb	Ti	Mo	N	Ni	$w_B/\%$
1 [#]	0.193	0.549	0.813	0.231	0.212	0	0.205	0.07	0.498	
2 [#]	0.184	0.598	0.807	0.241	0.212	0.108	0.171	0.06	0.461	
3 [#]	0.193	0.590	0.823	0.247	0.214	0.198	0.181	0.08	0.471	
4 [#]	0.205	0.580	0.856	0.249	0.217	0.285	0.181	0.07	0.488	
5 [#]	0.208	0.579	0.825	0.250	0.219	0.389	0.179	0.06	0.492	

试样经线切割加工成形状为10 mm × 10 mm × 3 mm的试样，除去氧化皮后在布洛维光学硬度计（HBRVU-187.5）上测量硬度，每个试样打5个点取平均值作为最终的硬度值。将试样进行镶嵌、打磨、抛光后，使用饱和苦味酸+海鸥洗发膏溶液对试样进行腐蚀，60 ℃水浴加热5 min后采用尼康LV150正立式光学金相显微镜（OM）观察不同化学成分试样的金相组织，任意视场下拍摄20张照片以保证统计晶粒度的准确性，使用ImageJ软件利用线性截距法测量晶粒度。将使用饱和苦味酸溶液腐蚀过后的试样重新抛光后，使用4%硝酸酒精溶液进行腐蚀，利用场发射扫描电子显微镜（SEM，ZEISS-Sigma 300）对试样表面进行组织观察和X射线能谱（EDS）分析。为了研究不同Ti含量对试验钢中碳化物类型及数量的影响，采用电解分离萃取方法获得试样基体中碳化物。电解液为375 mL水、120 mL浓盐酸及16 g柠檬酸颗粒混合溶液。利用X射线衍射仪（XRD，18kWD/MAX2500V）对萃取出来的碳化物进行物相分析，其中X射线衍射仪采用铜靶，测试角度范围为10°~90°，扫描速率为4°/min。热处理后的纽扣锭经线切割出厚度为1 mm，标距为10 mm的非标拉伸样，拉伸样尺寸如图1所示^[8]，在CMT5105型电子万能试验机上进行室温拉伸试验。

2 试验结果与分析

2.1 微观组织

图2a-c显示了在不同含Ti量试样中观察到的析出物SEM图像，可以辨别出三种类型的析出物（用箭头标记），能谱分析结果依次如图2d-f所示。Ⅰ型析出物在不含Ti试样中观察到，以小尺寸球状析出，经EDS分

析为NbC，Ⅱ型析出物在含Ti试样中均有存在，图2b显示了0.1%Ti试样中观察到的Ⅱ型析出物，呈椭圆状，尺寸稍大于Ⅰ型析出物，EDS分析显示Nb元素峰高于Ti元素峰，为Nb-Ti-C系复合析出物，由于Nb元素与C元素的结合力更强，在基体中N元素较少时部分Ti原子依附于NbC形成（Nb、Ti）C复合析出物，所以此时析出物中Nb元素含量较高。Ⅲ型析出物为较大尺寸呈方形的TiN，在含Ti试样中均观察到，有少量NbC沿外延生长，析出物表面凹陷是由于TiN颗粒尺寸较大，制备试样时部分TiN脱落所致。析出物主要以弥散的形式分布在马氏体板条内，起到弥散强化的效果，Nb、Ti为强碳、氮化物形成元素，在Nb单独存在时，与基体中C元素结合在较低温度析出，随Ti元素的加入及升高，Nb、Ti元素与C结合形成较小的球形碳化物起到析出强化的作用。另外，因为Ti化学性质活泼^[9]，在高温下易与N结合形成非常稳定的TiN，析出温度的不同导致了析出物粒度的不同，TiN在较宽的温度范围内长大呈方形，在随后冷却过程中保持稳定。

利用苦味酸溶液腐蚀后的试样光学显微镜图如图3所示，可以清晰地看出晶界，使用线性截距法测定了各试样的平均晶粒尺寸，如表2所示。随Ti含量升高，晶粒尺寸出现先减小再升高的趋势，在0.1%~0.2%Ti含量时，晶粒细化明显，添加0.4%Ti后，晶粒粗化至11.29 μm，少量添加Ti元素时，奥氏体晶粒得到有效细化。试验铸钢组织主要以回火马氏体为主，由于马氏体一般不能穿晶生长，所以其板条长度受到原奥氏体晶界制约，随Ti含量升高，马氏体板条长度先变短后变长。

表2 不同Ti含量试验铸钢晶粒尺寸
Table 2 Grain size of test cast steel with different Ti content

Ti含量/%	晶粒直径/μm
0	13.546
0.1	6.112
0.2	6.789
0.3	9.092
0.4	11.29

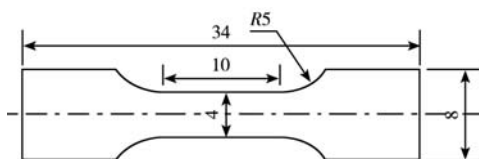
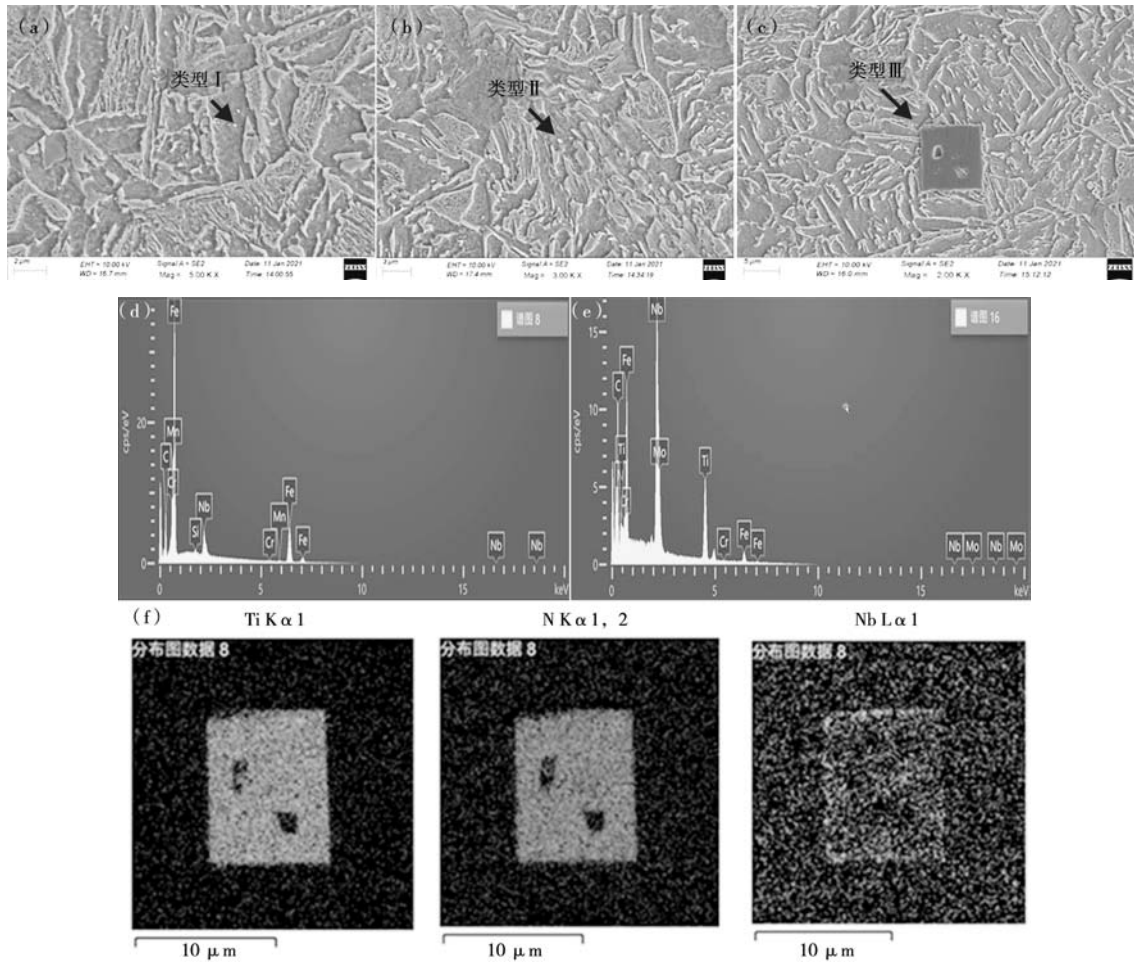


图1 拉伸样尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tensile sample size



(a) 0Ti, I 型析出物; (b) 0.1%Ti, II 型析出物; (c) 0.4%Ti, III 型析出物;
 (d) I 型析出物点扫描能谱分析; (e) II 型析出物点扫描能谱分析; (f) III 型析出物面扫描能谱分析
 图2 不同含Ti量试样中不同类型析出物形态及其能谱分析

Fig. 2 Morphology and energy spectrum analysis of different types of precipitates in samples with different Ti content

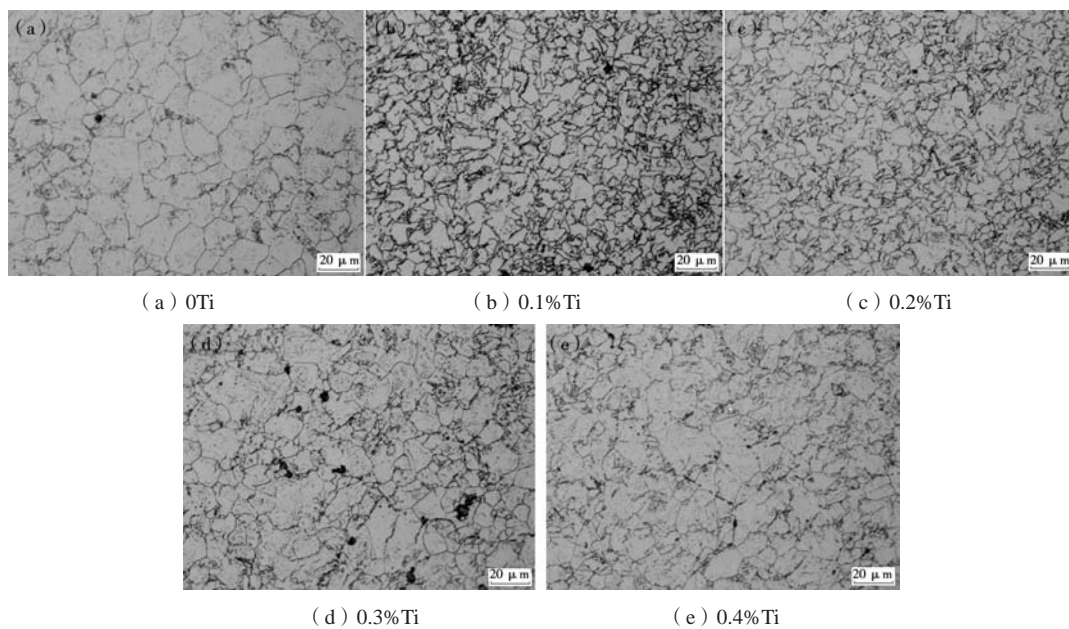


图3 不同Ti含量试样原奥氏体晶界光学显微镜图

Fig. 3 Optical microscope diagram of original austenite grain boundary of samples with different Ti content

为分析析出物对试验铸钢组织的影响,观察了不同含Ti量试样的微观组织形貌与析出物分布形态,在图4a中,观察到析出物明显粗化,聚集成链状在晶界处析出的现象,经面扫描结果得知存在Nb的富集,确定为NbC析出物。因为析出物的长大主要依靠于扩散速率较慢的合金元素,由于管道效应,晶界提供了更快的扩散轨迹,提高了合金元素的扩散速率,故易在晶界处形成长链状析出物^[10]。链状析出物的生成会提高Nb、C元素在基体中的不均匀性,对部分晶界的钉扎力减弱,晶粒尺寸增大。

图4b中可以发现,Ti元素加入后,Nb元素在晶界的偏聚现象明显减弱,Ti在晶界处的聚集不明显,由于Ti在晶界区引起环境敏感镶嵌能高于Nb,相比于Nb难以在晶界析出^[11],所以Ti在晶界的偏聚不明显。Ti的加入延缓了NbC的析出,因为TiN在高温析出,可以作为NbC外延生长的衬底,存在NbC析出的势能,降低了NbC析出的热力学驱动力,令NbC在TiN外延处析出比在晶界处析出更容易,从而使晶界处Nb元素含量减少,降低了Nb原子在晶界偏聚和析出,使得复合析出物易弥散分布于马氏体板条间,同时降低了NbC在晶界

断裂的可能性^[12-13],因为Nb元素偏聚现象减弱,晶粒不均匀性降低,晶粒变细小。弥散的析出物在钢中形成应力场,阻碍位错运动的同时钉扎奥氏体晶界,为马氏体相变增加形核位置,使马氏体组织细化。随Ti含量的进一步升高,Nb、Ti元素在晶界处形成的析出物开始逐渐粗化,以长链状析出(图4c),一方面,钢中微合金元素含量的升高导致析出温度升高,析出物尺寸增大。另一方面,随着TiN颗粒逐渐粗大,TiN颗粒边缘的形核位置增长速率低于TiN颗粒粗化速度,贫化晶界处Nb原子的能力减弱,所以生成部分链状析出物,但相比于图4a,链状析出物相对细小。

对不同钛含量试验铸钢组织进行低倍观察,在基体中可明显发现方形析出物,经能谱确认为TiN,如图5所示。添加0.1%Ti时,TiN颗粒较少,单个随机分布在基体中,随Ti含量增加,TiN颗粒逐渐结合形成块状且尺寸增大,在Ti含量达到0.4%时粗化明显,由于形成块状集结,TiN颗粒边缘面积增长较慢,附着在边缘的NbC颗粒数量增速减慢。析出物的粗化和溶解在奥氏体化过程中同时发生,当析出物溶解温度低于奥氏体化温度时,颗粒会逐渐溶解^[14],如果奥氏体化温度

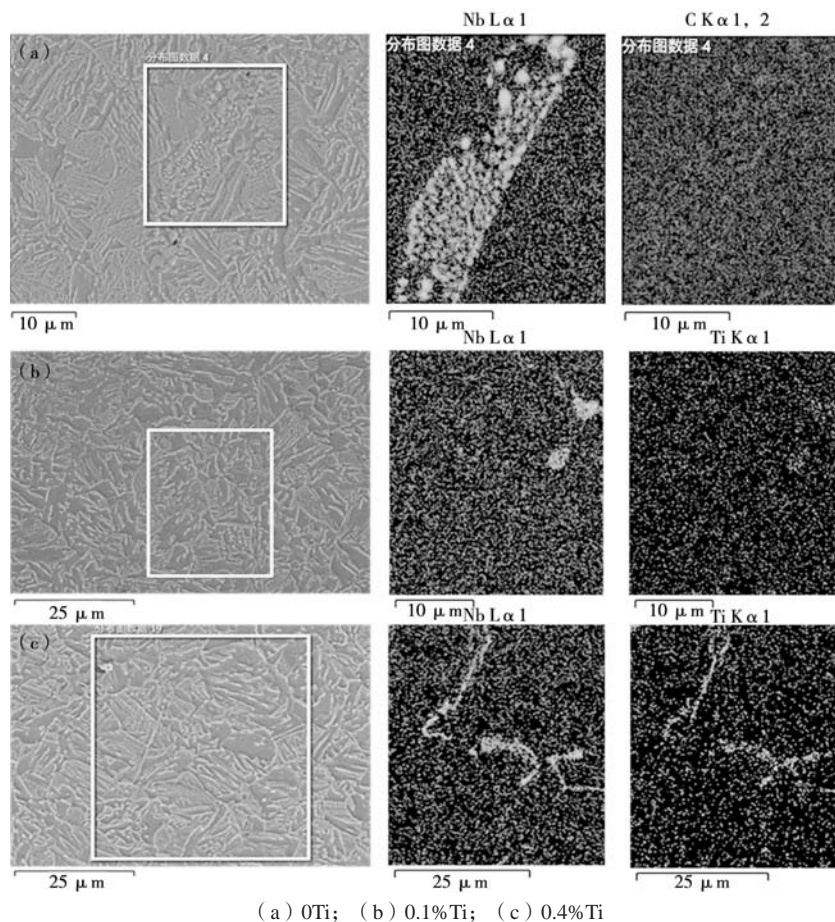


图4 不同Ti含量试样析出物分布形态图

Fig. 4 Distribution pattern of precipitates in samples with different Ti content

低于溶解所需温度，根据Ostwald熟化机制，小尺寸粒子周围的母相组元浓度高于大粒子周围的母相组元浓度，由于存在浓度梯度，组元向低浓度区扩散从而使大粒子继续吸收过饱和组元使之继续生长，较小颗粒溶解，较大颗粒粗化，TiN一般在高温下析出且具有高温热稳定性，所以成为图5c显示的块状集结。高温析出的大尺寸TiN易成为裂纹源引发开裂，随着Ti的初始浓度升高会使TiN的析出时间提前，尺寸逐渐增大。

2.2 析出物萃取与 XRD 分析

使用自制电解萃取装置得到不同Ti含量试样的析出物含量，结果如图6所示，随Ti含量的升高，析出物含量也随之升高。

根据析出物平衡浓度积公式，当Nb、Ti浓度高于平衡浓度时会生成析出物，如式(1)、(2)所示^[15-16]。

$$\log [\%Nb] [\%X] = 4.988 - \frac{9506}{T} \quad (1)$$

$$\log [\%Ti] [\%N] = 6.4 - \frac{17040}{T} \quad (2)$$

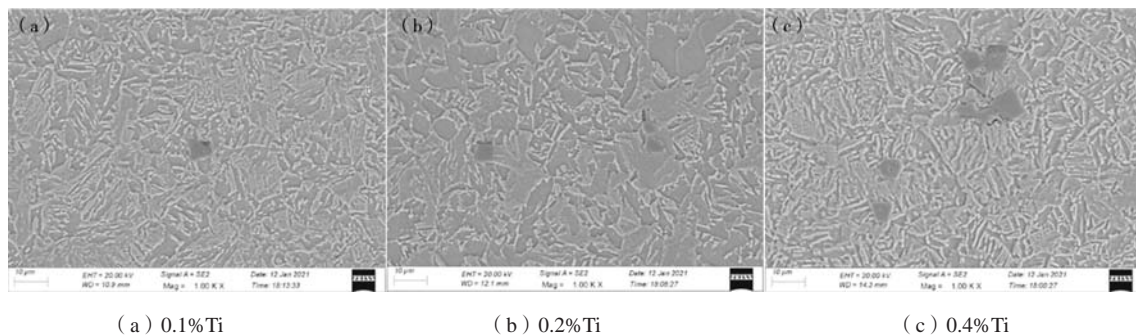
式中：[%Nb]、[%X]、[%Ti]、[%N]为析出物在钢中的平衡浓度积，T为绝对温度。从式中可以看出，微合金元素含量升高平衡固溶温度也升高，富Nb析出物中Ti的存在提高了它们的固溶温度，提高Ti的初始浓度

也使TiN析出时间增加，颗粒尺寸变大，与观察到显微组织一致。图7为不同含Ti量试验钢中萃取物的XRD分析曲线，不添加Ti元素时，析出物为单一的NbC，添加Ti元素后，NbC峰消失，生成(Nb、Ti)C峰，随Ti含量进一步升高，生成TiN峰且(Nb、Ti)C、TiN峰升高，X射线衍射的结果与扫描电镜下观察到的TiN聚集相一致。

2.3 力学性能

试验铸钢宏观硬度测量结果如图8所示，在添加0.1%Ti时达到峰值HBW 265.7，由于Nb元素在晶界偏聚，吸引大量C原子在晶界与Nb元素结合导致基体中C元素含量下降，降低了试验铸钢硬度，由于添加Ti元素后改善了Nb元素偏聚现象，此时硬度升高。Ti含量为0.1%、0.2%、0.3%时，试样硬度差异不大，在较高值HBW 260上下波动，由于基体硬度主要取决于固溶在马氏体中的C原子含量^[17]，故此时Ti含量对硬度影响不大，但随着Ti含量的进一步增加，在晶界会形成如图4c所示的链状析出物，降低了基体C当量，导致硬度下降。

对不同Ti含量试样进行拉伸试验，抗拉强度与伸长率变化如图9所示，由此可见，抗拉强度随Ti含量的



(a) 0.1% Ti (b) 0.2% Ti (c) 0.4% Ti

图5 试验铸钢扫描电镜图

Fig. 5 SEM diagram of test cast steel

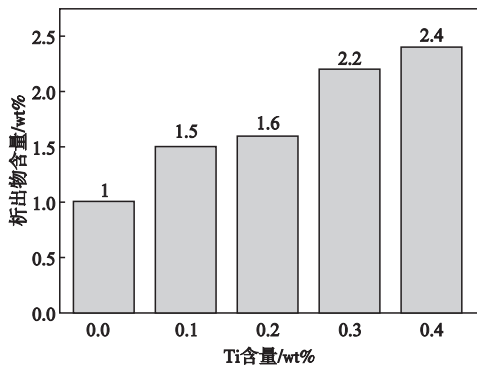


图6 不同Ti含量试样中的析出物含量

Fig. 6 Content of precipitates from samples with different Ti content

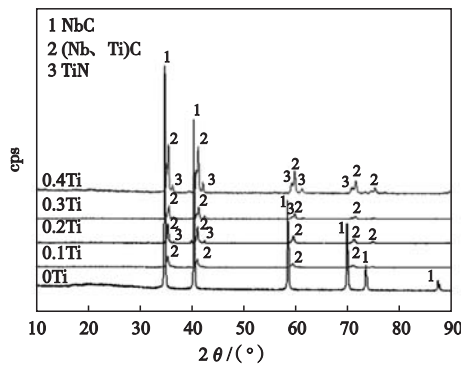


图7 不同Ti含量试样中析出物XRD分析

Fig. 7 XRD analysis of precipitates in samples with different Ti content

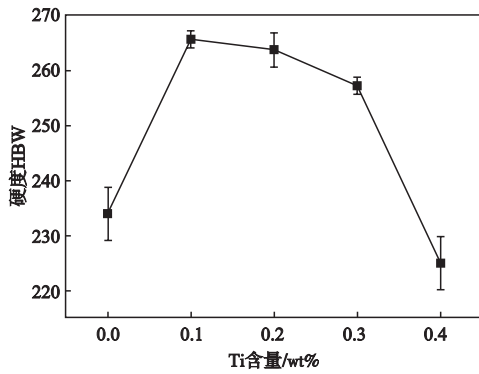


图8 不同Ti含量试验铸钢硬度曲线图

Fig. 8 Hardness curve of experimental cast steel with different Ti content

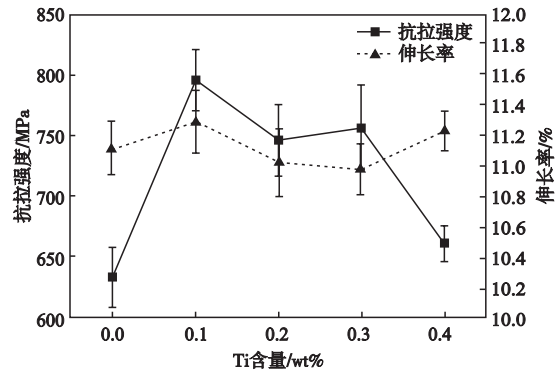


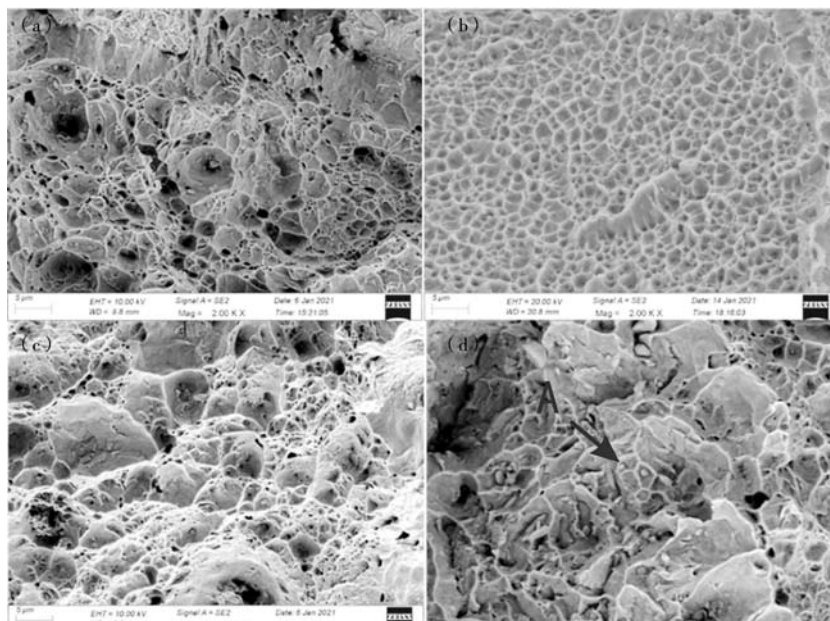
图9 不同Ti含量试验铸钢拉伸强度与伸长率变化图

Fig. 9 Change diagram of tensile strength and elongation of experimental cast steel with different Ti content

上升出现先上升后下降的趋势，在0.1%Ti时达到峰值796.3 MPa，相比0Ti试样提升25.9%。少量添加Ti元素后一定程度上减少了Nb元素在晶界的偏聚现象，Nb、Ti元素相互作用使析出物活度降低，增大了其在奥氏体中的稳定性，析出温度降低，析出物更细小^[18]，弥散分布的(Nb、Ti)C强化基体，随着Ti含量的进一步升高，抗拉强度逐渐下降，在0.4%Ti时达到最低值660.1 MPa，根据显微组织分析，0.4%Ti试样内碳化物在晶界粗化，形成链状的分布形态，碳化物在晶界大量析出减少了基体中C含量，降低了试样的抗拉强度。钢中第二相析出的强化效果与颗粒平均直径成反比，随着析出物的粗化，位错和晶界的运动阻力减小，大尺寸TiN的块状聚集也降低了基体强度。与拉伸强度不同，伸

长率变化不明显，添加少量Ti元素后改善了晶界处析出物的链状形态，在提升材料强度的同时对韧性没有损害，伸长率在0.1%Ti含量时达到峰值，随Ti含量进一步升高，伸长率变化较小，这与TiN的块状聚集有关。综上所述，本研究在0.1%Ti含量时，在不降低伸长率的前提下获得最高抗拉强度，达到最佳力学性能的组合。

随后对不同Ti含量试验铸钢的拉伸断口进行SEM观察，结果如图10所示，根据断口形貌，均为准解理断裂，在未添加Ti元素(图10a)时，韧窝尺寸较大，有部分解理平台存在，在添加0.1%Ti(图10b)时，韧窝数量明显变多且细小，其塑性变形的程度更高，随Ti含量进一步增加，如图10c所示，出现大片解理平台



(a) 0Ti; (b) 0.1%Ti; (c) 0.4%Ti; (d) (Nb、Ti)C

图10 不同Ti含量拉伸试样断口SEM图

Fig. 10 Fracture SEM diagram of tensile specimens with different Ti content

和撕裂棱,此时偏向于脆性断裂,出现明显河流花样和大小不均的韧窝。在韧窝底部发现一些析出物,如图10d中A点所示,经EDS分析为(Nb、Ti)C复合析出物,试样受到拉伸或剪切时,大量位错聚集在析出物和基体之间形成微裂纹,随变形量增加,微裂纹成长为韧窝,最后断裂。

3 结论

(1) 向一种含Nb的低合金试验铸钢中加入Ti元素使析出物发生NbC向(Nb、Ti)C、TiN转变,小尺寸(Nb、Ti)C在基体中弥散分布,起到析出强化效果。

Nb元素沿TiN颗粒外沿析出,在晶界处偏聚现象减弱,使晶粒尺寸更加均匀,Ti的加入使细晶强化和析出强化效果增强。

(2) 随该试验铸钢中Ti含量升高,析出物含量上升,含Ti量超过0.1%时晶界处析出物聚集以链状析出,产生应力集中易于断裂,同时也使基体中C含量下降,使力学性能恶化,抗拉强度与硬度同时下降。

(3) 该试验铸钢中Ti元素的最优添加量为0.1%,此时抗拉强度达到796.3 MPa,与不含Ti试验铸钢相比,抗拉强度提升了25.9%,且伸长率略有上升,实现最佳力学性能的组合效果。

参考文献:

- [1] 范泽熙, 杨弋涛. 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 [J]. 铸造, 2021, 70 (1): 62-68.
- [2] 张家成, 金洋帆, 赵天天, 等. Nb对重载车用低合金铸钢组织及力学性能影响 [J]. 铸造, 2020, 69 (1): 16-22.
- [3] HUTCHINSON B, RIDLEY N. On dislocation accumulation and work hardening in hadfield steel [J]. Scripta Materialia, 2006, 55 (4): 299-302.
- [4] ABBASI E, RAINFORTH W M. Microstructural evolution during bainite transformation in a vanadium microalloyed TRIP-assisted steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 651: 822-830.
- [5] CHEN J, TANG S, LIU Z, et al. Influence of molybdenum content on transformation behavior of high performance bridge steel during continuous cooling [J]. Materials & Design, 2013, 49: 465-470.
- [6] 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.
- [7] KANG Y, MAO W M, CHEN Y J, et al. Effect of Ti content on grain size and mechanical properties of UNS S44100 ferritic stainless steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 677: 211-221.
- [8] 刘腾轼, 杨弋涛. 铌对低合金铸钢组织及性能的影响 [J]. 铸造, 2014, 63 (10): 1051-1055.
- [9] 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.
- [10] JIANG S, WANG H, WU Y, et al. Ultrastrong steel via minimal lattice misfit and high-density nanoprecipitation [J]. Nature, 2017, 544: 460-464.
- [11] 张国英, 张辉, 刘春明, 等. 微合金化元素晶界偏聚与钢的超细化理论研究 [J]. 物理学报, 2006, 55 (3): 1369-1373.
- [12] 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.
- [13] MA X, MIAO C, LANGELIER B, et al. Suppression of strain-induced precipitation of NbC by epitaxial growth of NbC on pre-existing TiN in Nb-Ti microalloyed steel [J]. Materials & Design, 2017, 132: 244-249.
- [14] 姚卫薰, 夏殿佩, 敖列哥, 等. 低碳锰钢中铌钛复合加入作用的研究 [J]. 鞍钢技术, 1990 (4): 28-35.
- [15] ZHANG Y, LI X, LIU Y, et al. Study of the kinetics of austenite grain growth by dynamic Ti-rich and Nb-rich carbonitride dissolution in HSLA steel: In-situ observation and modeling [J]. Materials Characterization, 2020, 169: 110612.
- [16] GRANGE R A, HRIBAL C R, PORTER L F. Hardness of tempered martensite in carbon and low-alloy steels [J]. Metallurgical Transactions A, 1977, 8 (11): 1775-1785.
- [17] 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, 164: 110324.
- [18] KANG Y, MAO W M, CHEN Y J, et al. Influence of Nb content on grain size and mechanical properties of 18 wt% Cr ferritic stainless steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 677: 453-464.

Effect of Ti Content on Microstructure and Mechanical Properties of Cast Steel Containing Nb for Heavy Truck

FAN Ze-xi, DING Wang, YANG Yi-tao

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

Abstract:

The microstructure and mechanical properties of heavy duty vehicle cast steel containing Nb with different Ti content were studied in this paper. The results show that with the addition of a small amount of Ti element, the segregation of Nb element at the grain boundary is significantly improved, and the composite precipitates are dispersed in the matrix, which plays the role of precipitation strengthening. With the further increase of Ti content, the precipitates precipitate in chain at the grain boundary and TiN particles agglomerate in bulk, thus reducing the mechanical properties of the steel. When the content of Ti is 0.1%, the cast steel sample has good microstructure and mechanical properties.

Key words:

niobium; titanium; heavy truck; mechanical properties; microstructure
