

钒、氮含量对高强度热轧钢板微观组织和强韧性的影响

刘建^{1,2,3}, 李月丽^{1,2,3}

1. 铜陵学院机械工程学院, 铜陵 244000
2. 铜陵学院工程液压机器人安徽普通高校重点实验室, 铜陵 244000
3. 铜陵学院铜陵市增材制造重点实验室, 铜陵 244000

摘要 采用VN16和FeV80两种钒微合金化方式冶炼了4种不同钒、氮含量的试验钢,研究了钒、氮含量对高强度热轧钢板微观组织和强韧性的影响。结果表明,试验钢的微观组织均为铁素体+珠光体,在氮含量很低的情况下,钒微合金化钢的铁素体晶粒较粗大,增钒虽能细化铁素体晶粒,但细化程度并不大;钒氮微合金化钢的铁素体晶粒较细小,增氮能明显细化铁素体晶粒,氮含量越高,细化程度就越大,氮含量是影响铁素体晶粒细化的主要因素。在钒微合金化钢中,第二相颗粒主要在铁素体中析出,起到强烈的析出强化作用,细晶强化作用相对较弱,造成增钒时钢的强度明显提高,而韧塑性有所降低;在钒氮微合金化钢中,增氮能有效促进第二相颗粒在奥氏体中的析出,明显增强钒的细晶强化作用,减弱析出强化作用,使钢的强度得到提高的同时,韧塑性也有所提高,氮含量越高,这种强化效果就越显著。

关键词 微合金化;热轧钢板;微观组织;屈服强度;抗拉强度;韧塑性

汽车车身是高强度钢板的一个重要应用领域,提高钢板的强度、减小钢板的厚度是降低车重的重要途径,采用高强度钢板代替普通低碳钢板已成为汽车钢铁材料的主要发展方向^[1-2],这也正呼应了当今世界汽车“节能、环保、安全”的发展主题。

在高强度钢板的开发和研究中,微合金化钢板因其技术和经济上的优势取得了广泛的认同和重

视^[3-5]。微合金化钢,即是在普通C-Mn钢或低合金钢中添加少量的微合金化元素,采用高纯洁度的冶炼工艺进行炼钢,在热加工过程中配合控轧控冷工艺,通过控制钢的晶粒细化和微合金的碳、氮化物(称为第二相)析出强化的物理冶金过程,在热轧状态下获得良好综合力学性能的工程结构材料^[6-7]。钒作为一种重要的微合金化元素,因其在钢中能产

收稿日期:2022-04-11;修回日期:2022-08-04

基金项目:安徽省高校自然科学基金重点研究项目(KJ2019A0710);安徽省高校自然科学基金研究项目(KJ2013B301)

作者简介:刘建,讲师,研究方向为微合金化钢,电子信箱:lj99_km@163.com

引用格式:刘建,李月丽. 钒、氮含量对高强度热轧钢板微观组织和强韧性的影响[J]. 科技导报, 2023, 41(22): 91-97; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.22.012

生强烈的析出强化作用且易于控制而被广泛应用。在含钒微合金化钢中,氮是一种廉价而十分有效的微合金化元素,它与钒有较强的结合力,钢中增氮不仅能促进钒的析出,还能明显细化铁素体晶粒,充分发挥钒在钢中的细晶强化和析出强化作用,提高钢强度的同时也大大改善钢的韧塑性^[8-10]。另外,钢中增氮也能在获得相同强度的条件下节约钒的用量,达到降低生产成本的目的。

本文以普通低C-Mn钢的化学成分为设计基础,分别向钢中添加VN16和FeV80两种不同的合金,通过实验室炼钢和热轧试验,对比分析了各试验钢的微观组织和力学性能,研究了钒、氮含量对

高强度热轧钢板微观组织和强韧性的影响。

1 试验材料与方法

试验钢采用实验室50 kg真空感应炉进行冶炼,共冶炼了4种成分钢,其中2种成分钢添加不同计算量的VN16合金进行钒氮微合金化,另外2种成分钢添加不同计算量的FeV80合金进行钒微合金化。将冶炼后的各炉钢液浇铸成钢锭,并对钢锭取样进行光谱化学成分分析,同时加工成规格为 $\Phi 4\text{ mm}\times 9\text{ mm}$ 的[N]标准试样进行氮含量的测定,各试验钢的编号及化学成分如表1所示。

表1 试验钢的化学成分(质量分数/%)

编号	C	Si	Mn	P	S	V	N	添加合金
V1	0.11	0.22	1.10	0.022	0.015	0.072	0.0082	FeV80
V2	0.12	0.21	1.10	0.022	0.014	0.130	0.0088	
VN1	0.12	0.20	1.12	0.023	0.013	0.075	0.0130	VN16
VN2	0.11	0.24	1.18	0.022	0.014	0.140	0.0270	

将冶炼后的钢锭经加热炉加热至1200℃保温2 h后,锻造成厚度为35 mm的板坯,终锻温度高于1000℃,锻后空冷至室温。实验室轧制采用控轧控冷工艺,先将板坯加热至1150℃左右,保温1 h,在实验室轧机上经5道次轧成7 mm,压下规程为35 mm→24 mm→17 mm→12 mm→9 mm→7 mm,控制开轧温度为950℃、终轧温度为850℃,轧后的钢板放入冷却液中冷却至600℃左右,之后快速放入温控箱式加热炉中保温1 h,再随炉温冷却至室温。

对轧后的钢板进行取样,分别制取扫描电镜金相试样、拉伸试样和冲击试样。扫描电镜金相试样经过热镶、粗磨、细磨和抛光后,用4%的硝酸酒精溶液进行腐蚀,再经过清水冲洗、无水酒精冲洗和吹干,最后在JSM-560LV扫描电镜下观察各试验钢的微观组织,选择典型组织形貌进行拍照分析,并利用INCA能谱仪测定组织的成分和体积分数,以及铁素体的晶粒尺寸和晶粒度。拉伸试样采用标准GB/T 228.1—2010^[11]进行制取,各试验钢分别取3件在INSTRON5569电子拉伸试验机上进行拉

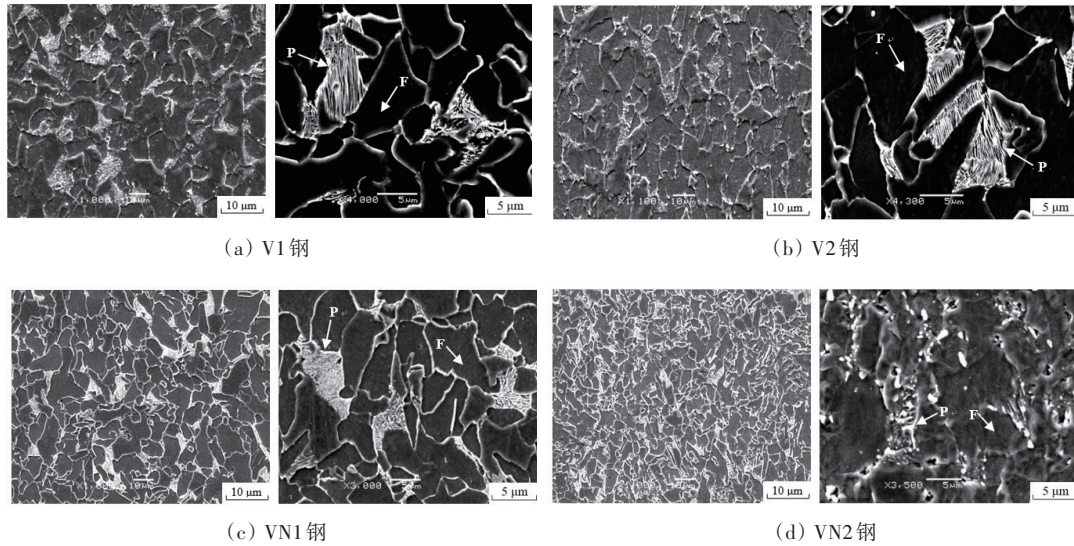
伸试验,测试项目为屈服强度、抗拉强度、伸长率和断面收缩率,其中伸长率和断面收缩率用于分析试验钢的塑性,各测试结果均取平均值。冲击试样采用GB/T 229—2020^[12]制取成尺寸为5 mm×10 mm×55 mm的夏比V型缺口形状,在JB-30B冲击试验机上进行横向冲击试验,测试冲击吸收功用于分析试验钢的韧性,测试温度分别取25℃(室温)、0℃、-20℃和-40℃,各试验钢在每个测试温度下分别取3件试样进行测试,结果取平均值。

2 试验结果

2.1 微观组织

各试验钢在扫描电镜下观察到的典型微观组织形貌如图1所示,利用能谱仪测定的组织结果如表2所示。

从图1和表2中可以看出,各试验钢均由铁素体和珠光体2种组织成分构成,且二者在各试验钢中的体积分数大致相当,铁素体含量整体偏高,珠



箭头标注为铁素体(F)和珠光体(P)相

图1 试验钢的典型微观组织形貌

表2 试验钢的组织测定结果

编号	体积分数/%		铁素体晶粒尺寸/ μm	晶粒度/级
	铁素体F	珠光体P		
V1	84	16	9.2	10.5
V2	87	13	8.4	10.5
VN1	88	12	7.1	11.0
VN2	86	14	4.5	12.5

光体含量整体偏低;铁素体多以等轴多边形均匀分布,珠光体则多以片层形态均匀分布于铁素体晶界处。对于钒微合金化钢,V1钢的铁素体晶粒最为粗大,尺寸约为 $9.2\ \mu\text{m}$;增钒后,V2钢的铁素体晶粒略有细化,尺寸减小至约 $8.4\ \mu\text{m}$ 。对于钒氮微合金化钢,增氮后,VN1钢、VN2钢分别与相同钒含量的V1钢、V2钢相比,铁素体晶粒均得到了明显细化,尤以高钒、氮含量的VN2钢晶粒细化最为明显,尺寸约为 $4.5\ \mu\text{m}$ 。

2.2 强韧性

各试验钢的拉伸试验结果如表3所示。从试验钢的屈服强度和抗拉强度方面看:对于钒微合金化钢,在增钒的情况下,V2钢比V1钢分别提高了42和47 MPa;对于钒氮微合金化钢,在增氮的情况下,VN1钢比V1钢分别提高了30和22 MPa,VN2

钢比V2钢分别提高了75和60 MPa;而高钒、氮含量的VN2钢比VN1钢分别提高了87和85 MPa,比V1钢分别提高117和107 MPa。从试验钢的伸长率和断面收缩率方面看:V2钢比V1钢均有所降低;而VN1钢比相同钒含量的V1钢均有所提高,且随着钒、氮含量的增加,VN2钢比VN1钢也均有所提高。

表3 试验钢的拉伸试验结果

编号	屈服强度	抗拉强度	强屈比	伸长率	断面收缩率
	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	R_m/R_{eL}	$A/\%$	$Z/\%$
V1	468	578	1.23	23.5	65.8
V2	510	625	1.23	21.8	64.5
VN1	498	600	1.20	25.5	66.3
VN2	585	685	1.18	26.4	67.0

各试验钢的冲击试验结果如图2所示。可以看出,对于钒微合金化钢,增钒后,V2钢的冲击韧性比V1钢有所降低;而对于钒氮微合金化钢,增氮后,VN2钢和VN1钢的冲击韧性相比V1钢,均有不同程度的提高,其中高钒、氮含量的VN2钢提高幅度较大。另外,还可以看出各试验钢均未出现明显的韧-脆转变温度,且在低温状态下仍能保持较高的冲击韧性。

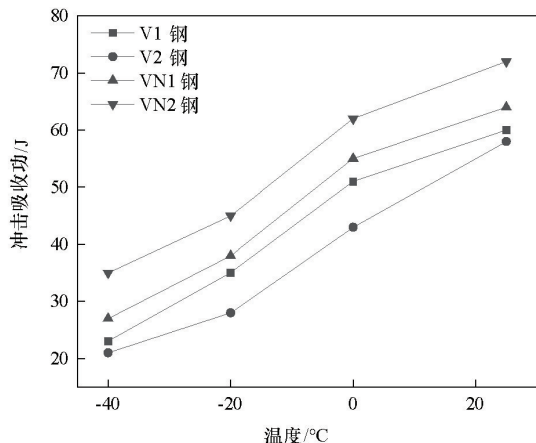


图2 试验钢的冲击韧性

3 分析

从微观组织试验结果看,在其他化学成分和控轧控冷工艺条件基本相同的情况下,4种试验钢微观组织上的差异主要体现在铁素体晶粒的细化程度上。对于钒微合金化钢,在氮含量很低的情况下,铁素体晶粒整体较为粗大,增钒虽能使铁素体晶粒有所细化,但细化程度并不大;而对于钒氮微合金化钢,与相同钒含量的钒微合金化钢相比,增氮则能明显细化铁素体晶粒,尤其是在高钒、氮含量的情况下,铁素体晶粒细化程度最大。可见,氮含量对铁素体晶粒细化程度的影响要比钒含量的影响大得多,钢中氮含量越高,铁素体晶粒的细化程度就越大,究其原因,主要与钒、氮2种微合金化元素在钢中所起到的不同作用和钒在钢中析出第二相颗粒的类型、数量、分布及大小有关。

钒在钢中的作用主要体现在以下方面:一是在加热过程中,钢中细小、弥散分布的第二相颗粒可以钉扎奥氏体晶界,阻碍晶界的移动,从而阻碍奥氏体晶粒的长大,提高奥氏体晶粒的粗化温度,这对相变过程中铁素体晶粒的细化起到关键作用;二是在热轧过程中,通过形变诱导析出的第二相颗粒能在晶界和位错上起到钉扎作用,有效地阻止奥氏体再结晶晶界和位错的运动,抑制再结晶,从而减少奥氏体再结晶晶粒的数量,减小其尺寸,为铁素体晶粒的细化提供了有利条件;三是在奥氏体向铁

素体的相变过程中,在相界析出的第二相颗粒能钉扎相界阻止铁素体晶粒长大,起到细化铁素体晶粒的作用,这也是铁素体晶粒细化的主要方式,另外在氮含量较高时,第二相颗粒也会在奥氏体晶内析出成为铁素体形核的质点,促进晶内铁素体的形成^[13-15],从而提高铁素体的形核率,进一步细化铁素体晶粒;四是在相变后的铁素体中析出,起到强化铁素体基体的作用,第二相颗粒析出数量越多,越弥散、细小,对钢的强化作用就越大^[16]。可以看出,铁素体晶粒的细化程度主要取决于钒的第二相颗粒在奥氏体中的析出数量和分布形式,第二相颗粒在奥氏体中的析出数量越多,分布越弥散,就越有利于铁素体晶粒的细化。而第二相颗粒在奥氏体中能否有效地析出,又主要取决于钢中氮的含量,因为氮的含量决定了钒在钢中析出第二相颗粒的类型,类型不同,则钒在奥氏体中的析出程度就不同,从而造成铁素体晶粒的细化程度也不同。钒在钢中析出的第二相颗粒主要有VC和VN两种类型,因为它们的晶体结构具有相似性,所以在高氮含量的情况下,也可以互溶成V(C,N)。有研究表明^[17-18],当钢中氮的质量分数加至0.02%时,在整个析出温度范围内,析出颗粒均为VN或V(C,N)。根据热力学计算结果^[3,19]可知,VN或V(C,N)在奥氏体中的溶解度要比VC低得多,因此,钢中增氮能明显促进VN或V(C,N)在奥氏体中的析出,增加钒的析出驱动力,使更多的钒从固溶状态转变为析出状态。

因此,在钒微合金化的V1钢和V2钢中,由于氮含量很低,钒在钢中析出的第二相颗粒以VC为主,而VC在奥氏体中的溶解度又较高,不易析出,导致钒在奥氏体中的析出程度较小,大部分VC将会在铁素体中析出,对铁素体晶粒的细化作用相对较弱,从而造成铁素体晶粒较为粗大。从试验结果中也可以看出,即使是在高钒含量的V2钢中,铁素体晶粒也未能得到明显的细化,这说明钒含量不是决定铁素体晶粒细化程度的主要因素。而在钒氮微合金化的VN1钢和VN2钢中,增氮后,因钒与氮产生了较强的结合力,钒在钢中析出的第二相颗粒逐渐变成以VN为主,由于它在奥氏体中的溶解度

低,更易于析出,从而提高了钒的析出温度,增大了钒在奥氏体中的析出程度,这为铁素体晶粒的细化提供了十分有利的条件,尤其是在高钒、氮含量的VN2钢中,奥氏体晶内大量弥散析出的VN及富氮的V(C,N)为形成晶内铁素体创造了条件,进一步提高了铁素体的形核率,从而大大提高了铁素体晶粒的细化程度。可见,在其他条件相同的情况下,氮含量是决定铁素体晶粒细化程度的主要因素,氮在钢中所有有利的影响就是它与钒之间的相互作用,增氮能显著提高钒的析出温度,有效促进钒在奥氏体中的析出,充分发挥钒在钢中的细晶作用,使铁素体晶粒得到明显的细化,这对提高钢的强韧性非常有利。

细晶强化和析出强化是含钒微合金化钢的2种主要强化方式^[20]。细晶强化主要是利用铁素体晶粒的细化来达到钢强化的目的,它也是钢中唯一具有脆化矢量为负值的有效强化方式^[21],即在提高钢强度的同时,也能降低韧-脆转变温度,提高钢的韧塑性。在一定体积内,铁素体晶粒越细小,则晶粒数就越多,这必然导致晶界增多,晶界能增大,运动位错越过晶界也就需要更多的能量,从而造成强化,提高钢的强度;另外,晶粒细化能使塑性变形分散在更多的晶粒内进行,提高变形的均匀性,从而减少由应力集中所产生裂纹的机会,提高钢的韧塑性。而析出强化则主要是利用第二相析出颗粒与位错之间的交互作用来实现钢的强化,第二相颗粒能有效地阻碍位错的运动,当位错遇到第二相颗粒时,只能切过或绕过才能继续进行运动^[22],这就需要通过提高外加应力来提供更多的能量,从而造成强化,提高钢的强度,但同时也会降低钢的韧塑性。可见,细晶强化和析出强化对钢强度的影响是一致的,即均可提高钢的强度,但对钢韧塑性的影响却是完全不同的,细晶强化可提高钢的韧塑性,而析出强化则会降低钢的韧塑性,因此钢韧塑性的高低主要取决于二者在钢中综合作用的结果。

从试验钢的强韧性结果看,对于钒微合金化钢,V2钢与V1钢相比,增钒虽明显提高了钢的强度,但同时也降低了钢的韧塑性;而对于钒氮微合

合金化钢,VN1钢、VN2钢分别与相同钒含量的V1钢、V2钢相比,增氮则在提高钢强度的同时,也明显提高了钢的韧塑性,尤其是在高钒、氮含量的VN2钢中,这种强化效果更为显著。可见,钒、氮含量对钢的强韧性有着重要的影响,钒、氮含量不同,则细晶强化和析出强化在钢中所起作用的强弱也就不同,从而导致钢的强韧性不同。结合微观组织分析可以看出,在氮含量很低的钒微合金化钢中,钒析出的第二相颗粒主要为VC,由于VC在奥氏体中溶解度较高,不易析出,大部分会在铁素体中析出,能有效地阻碍铁素体中位错的运动,从而对铁素体基体产生明显的析出强化作用;在增钒的情况下,因钒在钢中析出的驱动力有所增大,则VC在铁素体中的析出数量会明显增加,析出分布也变得更弥散,以致钒的析出强化作用更加强烈,大大提高了钢的强度;另外,增钒虽能在一定程度上细化铁素体晶粒,但效果并不明显,说明增钒并未能有效地促进VC在奥氏体中的析出,由于VC在奥氏体中析出数量较少,不能为铁素体形核提供充分的条件,从而造成钒在钢中的细晶强化作用相对较弱。可见,钒微合金化钢的强化方式主要为析出强化,随着钒含量的增加,强烈的析出强化作用使V2钢的强度比V1钢有明显的提高,但同时由于细晶强化作用较弱,不足以弥补由强度增加造成的韧塑性上的损失,导致V2钢的韧塑性比V1钢有所降低。在钒氮微合金化钢中,由于氮含量的增加,钒析出的第二相颗粒变为以VN为主,降低了钒在奥氏体中的溶解度,从而有效地促进了钒在奥氏体中的析出,尤其是在高钒、氮含量的VN2钢中,析出的第二相颗粒全部为VN及富氮的V(C,N);钢中增氮不仅可以增加VN和V(C,N)的析出数量,还可以减小析出颗粒的平均尺寸,增加细小析出颗粒的体积分数^[23],奥氏体中大量、细小、弥散分布的VN和V(C,N)为铁素体形核提供了十分有利的条件,能有效促进细小铁素体晶粒的形成,充分发挥钒的细晶强化作用,非常有利于提高钢的强度和韧塑性;另外,在钒含量一定的情况下,VN和V(C,N)在奥氏体中析出数量的增加,必然会降低基体中固溶状

态的钒含量,减少钒在铁素体中析出颗粒的数量,进而减弱了钒的析出强化作用。可见,钒氮微合金化钢的强化方式以细晶强化为主,且氮含量越高,细晶强化的作用就越大,大大弥补了由析出强化所造成的钢韧塑性上的损失;因此,增氮使得VN1钢的强度和韧塑性均比相同钒含量的V1钢有所提高,尤其是在钒、氮含量均较高的VN2钢中,细晶强化和析出强化达到了良好的配合效果,获得了最佳的综合力学性能。

4 结论

1) 试验钢的微观组织均为铁素体+珠光体,铁素体含量偏高,珠光体含量偏低。钒微合金化钢的铁素体晶粒较为粗大,增钒虽能使铁素体晶粒有所细化,但细化程度并不大;钒氮微合金化钢的铁素体晶粒较为细小,增氮能明显细化铁素体晶粒,且氮含量越高,铁素体晶粒的细化程度就越大。

2) 氮含量是影响铁素体晶粒细化程度的主要因素。钒微合金化钢中的第二相颗粒VC主要在铁素体中析出,导致钒的细晶作用较弱,造成铁素体晶粒细化程度较小;钒氮微合金化钢中的第二相颗粒VN或V(C,N)在奥氏体中析出的数量明显增加,增氮有效促进了钒的析出,提高了铁素体的形核率,增强了钒的细晶作用,造成铁素体晶粒细化程度较大。

3) 钒微合金化钢的强化方式以析出强化为主,细晶强化相对较弱,以致增钒时钢的强度得到明显提高,韧塑性却有所降低;钒氮微合金化钢的强化方式以细晶强化为主,析出强化相对减弱,细晶强化弥补了由析出强化造成钢韧塑性的损失,以致增氮时钢的强度得到提高的同时,韧塑性也得到了一定程度上的提高,尤以高氮含量时,这种强化效果更为显著。

4) 含钒微合金化钢通过增氮,再配合控轧控冷技术,可以充分发挥钒在钢中的细晶强化和析出强化作用,最大限度地提高钢的强度和改善钢的韧塑性。

参考文献 (References)

- [1] 刘清梅,封娇洁. 汽车轻量化条件下先进高强钢的发展及现状[J]. 轧钢, 2020, 37(4): 65-70.
- [2] 魏振洋. 汽车轻量化技术的研究现状[J]. 汽车工程师, 2020(11): 11-12.
- [3] Rune L, Bevis H, Tadeusz S, 等. 钒在微合金化钢中的作用[M]. 杨才福, 王瑞珍, 陈雪慧, 译. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
- [4] 杨才福, 罗小兵. 钒氮微合金钢的研发与应用[J]. 世界金属导报, 2016, B12: 1-9.
- [5] 柴峰, 师仲然, 杨才福, 等. 氮对钒微合金钢粗晶热影响区(CGHAZ)的组织性能的影响[J]. 材料研究学报, 2019, 33(11): 848-855.
- [6] 齐俊杰, 黄运华, 张跃. 微合金化钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [7] 王有铭, 李曼云, 韦光. 钢材的控制轧制和控制冷却技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [8] 杨吉春, 田时雨, 余海存, 等. 氮对含钒Q345钢组织和力学性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(1): 125-139.
- [9] 马江南, 杨才福, 王瑞珍. 增氮对钒微合金钢组织和性能的影响[J]. 钢铁, 2015, 50(4): 63-69.
- [10] 杜杰杰, 孙志林, 张昕, 等. 氮对高强度钢筋用钒微合金化钢冲击韧度的影响[J]. 热处理, 2018, 33(4): 18-23.
- [11] 国家标准化管理委员会. GB/T 228.1—2010 金属材料拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [12] 国家标准化管理委员会. GB/T 229—2020 金属材料夏比摆锤冲击试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [13] 崔英和, 张文才, 张冬梅, 等. 热轧工艺参数对含钒微合金钢的组织性能的影响[J]. 钢铁研究, 2005(4): 45-49.
- [14] Glisic D, Radovic N, Koprivica A, et al. Influence of re-heating temperature and Vanadium content on transformation behavior and mechanical properties of medium carbon forging steels[J]. ISIJ International, 2010, 50(4): 601-606.
- [15] Ishikawa F, Takahashi T. The formation of intragranular ferrite plates in medium-carbon steels for hot-forging and its effect on the toughness[J]. ISIJ International, 1995, 35(9): 1128-1133.
- [16] 雍岐龙. 钢铁材料中的第二相[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.

- [17] 柳书平, 杨才福, 张永权. 氮对钒钢性能及析出相的影响[J]. 金属热处理, 2001, 26(10): 7-9.
- [18] 杨才福, 张永权, 柳书平. 钒氮微合金化钢筋的强化机制[J]. 钢铁, 2001(5): 55-57.
- [19] Zajac S. Precipitation and grain refinement in vanadium-containing steels[C]//International Symposium 2001 on Vanadium Application Technology. Beijing, 2001: 62-68.
- [20] Baker T N. Processes, microstructure and properties of vanadium microalloyed steels[J]. Metal Science Journal, 2014, 25(9): 1083-1107.
- [21] 雍岐龙, 马明图, 吴宝榕. 微合金钢-物理和力学冶金[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [22] 戚正风. 金属热处理原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [23] 孙邦明, 季怀忠, 杨才福, 等. V-N 微合金化钢筋中钒的析出行为[J]. 钢铁, 2001, 36(2): 44-47.

Effect of vanadium and nitrogen content on microstructure, strength and toughness of high strength hot-rolled steel plate

LIU Jian^{1,2,3}, LI Yueli^{1,2,3}

1. College of Mechanical Engineering, Tongling University, Tongling 244000, China
2. Key Laboratory of Construction Hydraulic Robots of Anhui Higher Education Institutes, Tongling University, Tongling 244000, China
3. Key Laboratory of Additive Manufacturing of Tongling City, Tongling University, Tongling 244000, China

Abstract Four kinds of test steels with different vanadium and nitrogen contents were smelted and cast by VN16 and FeV80 vanadium microalloying method. The effects of vanadium and nitrogen contents on the microstructure, strength and toughness of high strength hot-rolled steel plate were studied. The results show that the microstructure of test steels is ferrite and pearlite. When the nitrogen content is very low, the ferrite grain of vanadium microalloyed steel is coarse. Although increasing vanadium can refine the ferrite grain, the degree of refinement is not large. The ferrite grain of vanadium-nitrogen microalloyed steel is fine, and the increase of nitrogen can obviously refine the ferrite grain. The higher the nitrogen content, the greater the refinement degree. The nitrogen content is the main factor affecting the ferrite grain refinement. In vanadium microalloyed steel, the second phase particles are mainly precipitated in ferrite, which plays a strong role in precipitation strengthening, and the fine grain strengthening is relatively weak, resulting in the obvious increase of steel strength and decrease of toughness and plasticity when vanadium is added. In vanadium-nitrogen microalloyed steel, increasing nitrogen can effectively promote the precipitation of second phase particles in austenite, significantly enhance the fine grain strengthening effect of vanadium and weaken the precipitation strengthening effect, resulting in the improvement of steel strength, toughness and plasticity. The higher the nitrogen content, the more significant the strengthening effect.

Keywords microalloying; hot-rolled steel plate; microstructure; yield strength; tensile strength; toughness and plasticity ●



(责任编辑 傅雪)