

V 微合金化对高强高耐候乙字钢性能的影响

郭跃华, 刘 明, 李红光, 邓通武

(攀钢集团研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘 要: 以中频感应炉冶炼不同钒、氮含量试验钢为材料, 通过力学性能检验和析出相分析, 研究了钒微合金化对高强高耐候乙字钢性能的影响。结果表明: 钒在高强高耐候乙字钢中能起到细晶强化或沉淀强化的作用, 而氮的加入可促使钒从固溶态向析出态转化, 增大钒的析出强化作用。终轧温度对钒氮的析出强化作用敏感, 终轧温度越低, $V(C, N)$ 的析出量越大, 屈服强度越高, 但强塑性匹配最好的终轧温度在 850 °C 左右。

关键词: 乙字钢; 微合金化; 钒; 氮; $V(C, N)$; 强度

中图分类号: TF841.3, TF76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7638(2016)04-0057-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2016.04.012

Effects of Vanadium Micro-alloying on the Properties of Z-Beam with High Strength and Weather-resistance

Guo Yuehua, Liu Ming, Li Hongguang, Deng Tongwu

(Pangang Group Research Institute Co., Ltd., State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: The effects of vanadium (V) micro-alloying on the properties of Z-beam with high strength and weather-resistance were researched according to the mechanical properties tests and precipitated phase analysis for the Z-beam samples prepared under different contents of vanadium and nitrogen by medium-frequency induction furnace. The results show that V has the effects of refinement and precipitation strengthening in the Z-beam, and addition of nitrogen can enhance the transformation of V from solid solution to precipitation phase increasing the precipitation strengthening of V. It is also evidenced that the finish-rolling temperature is sensitive to the precipitation strengthening of vanadium and nitrogen. A higher precipitated $V(C, N)$ content and yield strength of the Z-beam can be obtained at a lower finish-rolling temperature with the best matching between strength and plasticity of the Z-beam at about 850 °C.

Key words: Z-beam, micro-alloying, vanadium, nitrogen, $V(C, N)$, strength

0 引言

近年来, 钢中添加微合金化元素的重要性备受关注, 微合金化是指钢中添加低于 0.2% 的合金元素, 但对钢性能产生较大影响, 微合金化目的是使钢的一种或几种性能得到明显改善。钒是强碳化物和

氮化物形成元素, 在钢中添加适量的钒以固溶或析出形式存在可改善钢材的物理特性, 提高钢材的强度、韧性、塑性和耐腐蚀性能。乙字钢应用于铁道货车车辆大梁结构, 随着我国铁道行业高速、重载技术的发展, 选用更高强度和更高耐候性乙字钢做火车大梁以降低车身自重和提高整车性能迫在眉睫^[1]。

攀钢钒钛资源丰富,钒作为首选析出强化元素提高钢材性能优势明显^[2],而且采用钒微合金化来提高乙字钢性能也符合攀钢钢铁产品开发的特点。另外,氮元素一般会与钒微合金化配合使用,钢中增氮后会使钒析出的第二相粒子密度大幅增加^[3],对于提高耐候钢的力学性能有益,这样不但可以显著提高钒的强化效果,而且还可在一定程度上节约钒用量,降低成本^[4]。

笔者结合国内外钒微合金化技术方面的研究成果,采用钒微合金化并配合一定量的氮对高强高耐候乙字钢进行强化,研究钒微合金化对高强高耐候乙字钢性能的影响。

1 试验材料和方法

试验用钢主要化学成分见表1,采用250 kg中频真空感应炉炼制,铸锭尺寸为150 mm×150 mm。

将1[#]、2[#]、3[#]钢铸锭加热至1 200 ℃保温1 h,采用Ø750 mm×550 mm高刚度二辊轧机分9道次轧制成8 mm厚板材,终轧温度为850 ℃,轧后空冷。为研究终轧温度对钒微合金化钢组织性能的影响,对4[#]钢铸锭断面进行锯切,均分3份,编号依次为4-1、4-2、4-3,再加热至1 200 ℃保温1 h后分别以750、850、950 ℃终轧温度分9道次轧成8 mm厚板材,轧后空冷。对轧材进行各项力学性能检验和显微组织观察,并在力学性能样上采用萃取分离析出相技术和X射线光谱仪进行了V(C,N)的定量分析,用小角测角仪测定了V(C,N)析出相的粒度分布。

2 试验结果及分析

试验钢力学性能和析出相分析检验结果见表2,各试样显微组织形貌见图1。

表1 试验钢编号和主要化学成分
Table 1 The main chemical compositions of the tested samples

编号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	V	N
1 [#]	0.06~0.10	0.40	0.71	3.00~4.00	0.10~0.40	0.37	0.06	0.008 0
2 [#]	0.06~0.10	0.41	0.70	3.00~4.00	0.10~0.40	0.38	0.10	0.008 0
3 [#]	0.06~0.10	0.35	0.68	3.00~4.00	0.10~0.40	0.38	0.10	0.017 1
4 [#]	0.06~0.10	0.37	0.68	3.00~4.00	0.10~0.40	0.39	0.10	0.024 5

表2 试验钢检验分析结果
Table 2 Results of the tested steels

编号	w/%			R_{eL}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	晶粒度/级	终轧温度/℃
	V	N	V(C,N)					
1 [#]	0.06	0.008 0	0.025 8	340	600	26.0	9.5	850
2 [#]	0.10	0.008 0	0.027 7	364	638	25.0	10	850
3 [#]	0.10	0.017 1	0.076 6	458	713	21.5	10	850
4-1	0.10	0.024 5	0.089 3	593	855	12.5	11	750
4-2	0.10	0.024 5	0.084 6	578	779	18.5	10	850
4-3	0.10	0.024 5	0.081 1	512	805	18.0	9.5	950

由图1可以看出,1[#]和2[#]样为典型F+P组织,晶粒度分别为9.5级和10级;3[#]样为F+P+B(少量)组织,晶粒度为10级;4-1、4-2和4-3试样为F+B组织,晶粒度分别为11级、10级和9.5级。

2.1 显微组织分析

2[#]样对比1[#]样氮含量相当但钒含量较高,而2[#]样晶粒尺寸较小,说明0.008 0%氮含量条件下钒的添加确实能起到细化晶粒作用。对比试样4-1、4-2和4-3组织形貌可知,终轧温度较低时铁素体晶粒更细小更分散,说明低的终轧温度更有利于细化晶粒和均匀化组织。在850 ℃终轧温度

下空冷,试验钢显微组织随钒氮含量增加的组织演变规律为:钒氮含量较小时获得F+P组织,增加钒氮含量到一定程度发生贝氏体转变,获得F+P+B组织;进一步增加钒氮含量促进贝氏体转变,获得F+B组织。当钒单独加入时,钒并不能抑制铁素体的形核,相反会加速珠光体的形成;当钒和氮同时存在时易于形成贝氏体组织,特别是增加氮含量能在奥氏体中形成弥散V(C,N)析出物,除了作为铁素体形核核心外,可以钉扎未转变的奥氏体,提高奥氏体稳定性,从而达到促进贝氏体形成的作用。

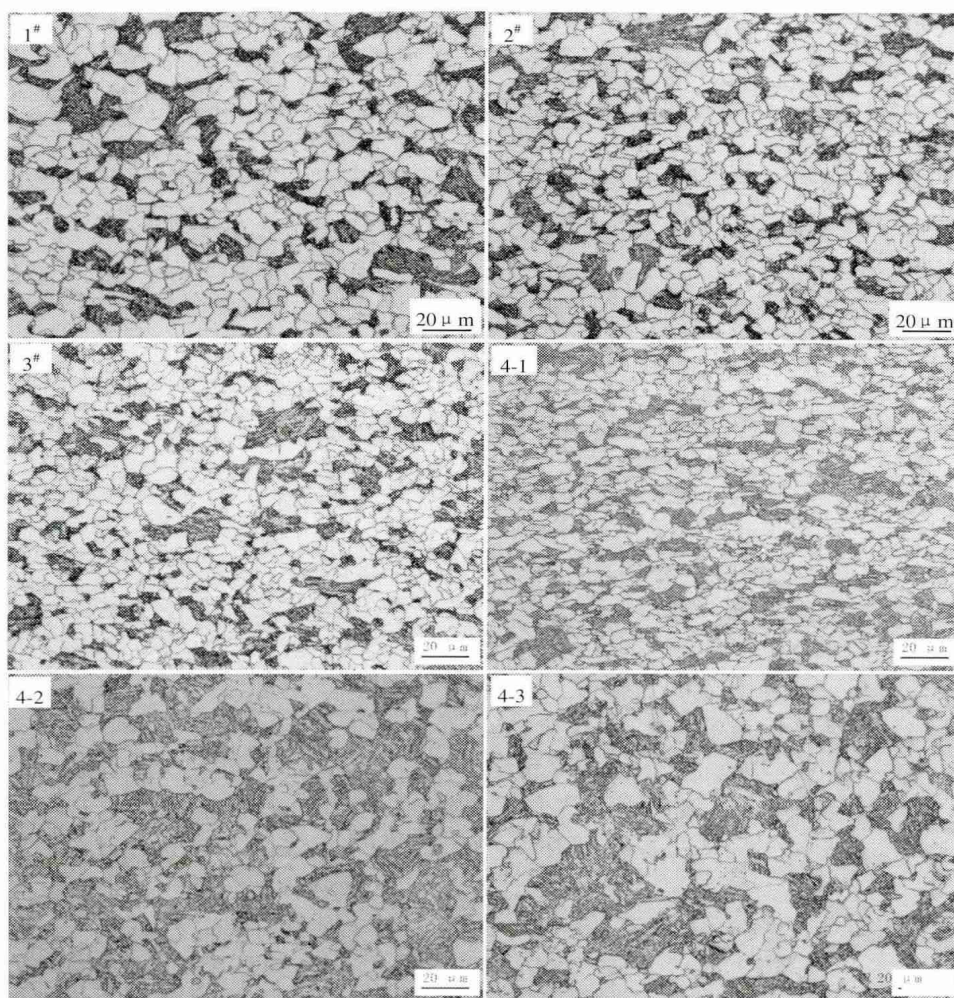


图1 各试样显微组织形貌

Fig.1 Microstructure morphologies of tested samples

2.2 钒的强化作用

对比表2中1[#]和2[#]试样,乙字钢随V含量从0.06%增加到0.10%,屈服强度从340 MPa增加到364 MPa,晶粒度从9.5级增加到10级,说明V在乙字钢中起到强化作用,而此时V(C,N)析出相并没有明显增加,强化作用主要是由细晶强化贡献。对比1[#]和3[#]试样,乙字钢随V含量从0.06%增加到0.10%,屈服强度从340 MPa大幅增加到458 MPa,而此时晶粒度也从9.5级增加到10级,但V(C,N)析出相从0.025 8%大幅增到0.076 6%,说明强化作用由细晶强化和沉淀强化共同贡献,且以沉淀强化为主。钒可以在奥氏体中析出,尤其是增氮后可强烈加快钒的析出过程,析出大量的VN或富氮的V(C,N)粒子,这些粒子对奥氏体晶界起强烈钉扎作用,并且这些粒子也为铁素体相变提供更多的形核核

心,不但起到析出强化的作用,而且还能起到细化晶粒的作用。以上结果表明,V在乙字钢中能起到细晶强化和沉淀强化的作用。

2.3 氮对钒的强化作用

表2中,2[#]、3[#]和4-2试样V含量均为0.10%,氮含量分别为0.008 0%、0.017 1%和0.024 5%,屈服强度分别为364、458、578 MPa,说明在钒含量相同情况下屈服强度随氮的增加大幅提升,氮对钒的强化作用产生巨大影响,氮在含钒微合金化乙字钢中起到十分有效的强化效果。究其原因,2[#]、3[#]和4-2试样V(C,N)析出相含量分别为0.027 7%、0.076 6%和0.084 6%,可见V(C,N)析出相随氮含量增加而增加,氮的加入改变了钒在钢中的存在形式,促使钒从固溶态向沉淀析出态转化,增大了钒的析出强化作用,V(C,N)粒子大

量析出是强度显著增加的重要原因之一。强度显著增加的另一重要原因是相变强化作用,2[#]、3[#]和4-2试样分别为F+P、F+P+B(少量)和F+B组织,如图1所示,贝氏体较珠光体具有更高的强度和硬度,且综合力学性能较好,而2[#]、3[#]和4-2试样贝氏体含量依次增多,因此对强度的贡献也依次增大。4-2试样中的钒主要以析出态存在,对强度贡献较大,起到很好的沉淀强化作用;2[#]试样中的钒主要以固溶态存在,对强度贡献较小,可以说是钒的一种浪费。

2.4 终轧温度对钒氮的强化作用影响

表2中,4-1、4-2和4-3试样分别是同一成分钢在750、850、950℃终轧温度下的性能检验结果,晶粒度分别为11级、10级和9.5级,屈服强度分别为593、578、512 MPa,表明晶粒度和屈服强度均随终轧温度的降低而增加。屈服强度和延伸率随终轧温度变化曲线见图2,由图2可知,750℃对应强度最高,但塑性最差,延伸率仅为12.5%,850℃对应强度较高,但塑性最好,延伸率达18.5%,950℃对应强度最低,塑性较好,延伸率为18.0%,因此850℃左右终轧温度下强塑性匹配最好。

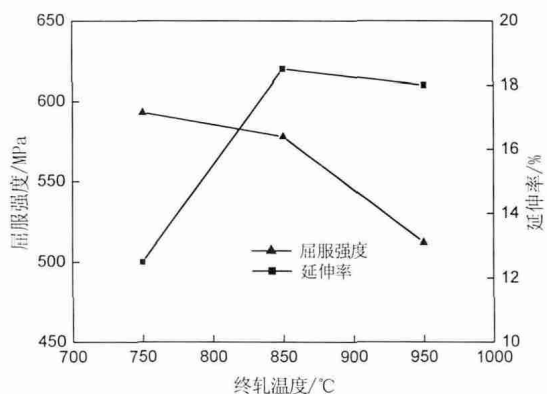


图2 强度和塑性与终轧温度的关系(0.10%V,0.024 5%N)
Fig.2 Relationship between finish-rolling temperature and strength-plasticity of Z-beam (0.10%V,0.024 5%N)

图3为不同终轧温度下强塑性匹配最好的4-2试样SEM组织形貌,可见组织中含有大量粒状贝氏体,这也是相对于较低钒氮含量钢强度获得大幅提升的主要原因。

V(C,N)析出量与终轧温度关系见图4,不同终轧温度对V(C,N)析出相粒度分布见表3。钒、氮含量一定时V(C,N)析出总量随终轧温度的降低有所增加,说明降低终轧温度有利于V(C,N)的

析出,因此终轧温度越低强度越高。研究表明小于20 nm的V(C,N)析出相才能起到有效钉扎位错作用而对强度贡献较大^[9]。850℃终轧温度下小于20 nm的V(C,N)析出相占39%,较950℃下34%比例大幅提高,因此屈服强度增加明显,虽然750℃下V(C,N)析出量较多,但小于20 nm尺寸析出相较850℃增幅不明显,因此屈服强度提升较小。

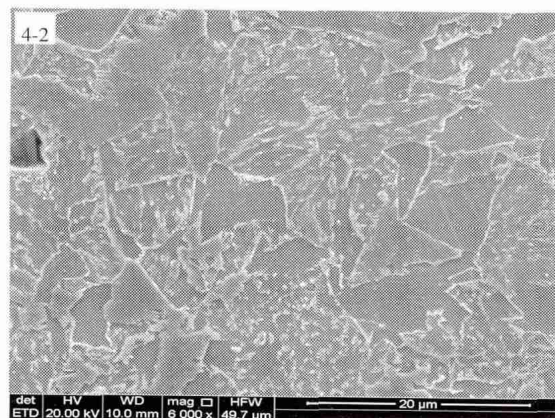


图3 SEM组织形貌
Fig.3 SEM of the tested sample

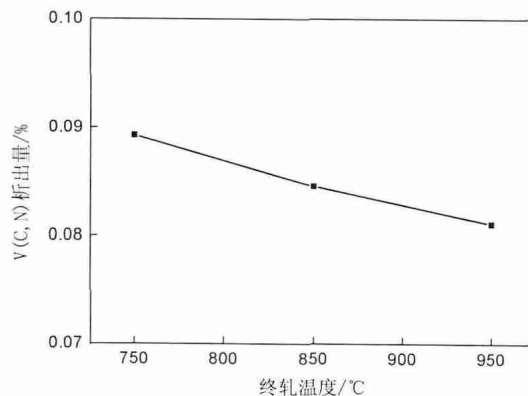


图4 V(C,N)析出量与终轧温度的关系
(0.10%V,0.024 5%N)

Fig.4 Relationship between finish-rolling temperature and the content of precipitated V(C,N) (0.10%V,0.024 5%N)

表3 V(C,N)析出相粒度分布
Table 3 Size distribution of precipitated V(C,N)

编号	比例/%				终轧温度/℃
	<20 nm	20~50 nm	50~150 nm	>150 nm	
4-1	40	17	28	15	750
4-2	39	17	24	20	850
4-3	34	13	26	27	950

3 结论

1) 钒在**高强高耐候乙字钢**中能起到细晶强化或沉淀强化的作用,主要由钒在钢中以固溶态或析出态的存在形式决定。

2) 氮的加入可改变钒在钢中的存在形式,促使

钒从固溶态向沉淀析出态转化,氮可增大钒的析出强化作用,强度可获大幅提升。

3) 高强高耐候乙字钢终轧温度越低对钒氮的析出强化作用越好,屈服强度越高,但强塑性匹配最好的终轧温度是 850 ℃ 左右。

参考文献

- [1] Liu Qingchun, Zhong Hua, Zheng Zhiwang. Effect of vanadium on the microstructure and properties of YQ450NQR1 higher strength weathering steels [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2008, 29(4) : 32-36.
(刘庆春, 钟华, 郑之旺. 钒对 YQ450NQR1 高强度耐候钢组织与性能的影响 [J]. 钢铁钒钛, 2008, 29(4) : 32-36.)
- [2] Li Wenyuan, Zhao Zhengzhi, Zhao Aimin, et al. Research on V-N microalloyed high-strength weathering steel [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(24) : 101-104.
(李文远, 赵征志, 赵爱民, 等. 钒氮微合金化高强耐候钢开发研究 [J]. 热加工工艺, 2012, 41(24) : 101-104.)
- [3] Weng Yuqing. Ultra-fine grain steel-structure refinement theory and control technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003.
(翁宇庆. 超细晶钢-钢的组织细化理论与控制技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.)
- [4] Yang Caifu, Zhang Yongquan. Applications of V-N microalloying technology in HSLA steels [J]. Iron and Steel, 2002, 37(11) : 42-47.
(杨才福, 张永权. 钒氮微合金化技术在 HSLA 钢中的应用 [J]. 钢铁, 2002, 37(11) : 42-47.)
- [5] Cao Yi, Wang Shaodong, Wu Di, et al. Microstructure and mechanical properties of HSLA wear-resistant steel NM400 [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science) 2011, 32(2) : 241-244.
(曹艺, 王昭东, 吴迪, 等. NM400 高强度低合金耐磨钢的组织与性能 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(2) : 241-244.)

编辑 杨冬梅

九三学社中央第八次科学座谈会暨钒钛产业创新发展与资源型城市转型研讨会圆满落幕

7月12日,九三学社中央第八次科学座谈会、钒钛产业创新发展与资源型城市转型研讨会在攀枝花闭幕。

全国政协副主席、九三学社中央主席、中国科学院院士韩启德出席闭幕式并讲话。全国政协常委、全国政协副秘书长、九三学社中央常务副主席邵鸿,四川省政协主席柯尊平,全国政协常委、全国政协提案委员会副主任、九三学社中央副主席赖明,全国人大常委会、全国人大法律委员会副主任委员、九三学社中央副主席、中国工程院院士丛斌,中共攀枝花市委书记张剡,市人大常委会主任谢道全,市政协主席单荣出席闭幕式。闭幕式由四川省政协副主席高峰主持。

会议期间,与会嘉宾通过九三学社中央第八次科学座谈会、钒钛产业创新发展与资源型城市转型研讨会两个平台,围绕“材料科学发展趋势和方向”“钒钛产业创新发展与资源型城市转型”两大主题,踊跃发表研究成果,大胆交锋学术观点,取得丰硕成果,对我国材料科学技术进步和材料产业发展将起到积极的推动作用,为正处于产业升级和城市转型关键时期的攀枝花市提供了智力支撑,勾勒出了发展框架,必将对攀枝花市乃至全省、全国资源型城市未来发展产生深远而积极的影响。

韩启德在讲话中说,进入新时期以来,我国材料科学和工程技术突飞猛进,取得许多具有突破意义的重大成果,但我国材料工业总体大而不强,发展方式粗放,新材料技术的产业化和应用等仍然存在不少短板。韩启德说,材料科学的发展不能走粗放的老路,必须将科技创新作为发展的根本驱动力,进一步完善以科技创新为发展根本驱动力的政策导向,通过具有颠覆性意义的技术革命,走出具有中国特色的技术发展之路。广大科技工作者是科技创新的主力军,应切实践行科学精神,克服心浮气躁,摒弃功利主义,发扬“工匠精神”,心无旁骛地潜心科研,为我国材料科学发展贡献毕生精力。

针对攀枝花市产业升级和城市转型,韩启德提出四点建议:一是要实现一项钒钛技术工程的突破,集中力量攻克关键共性技术瓶颈,将技术创新领域的“新苗”培育成具备产业化条件的“参天大树”;二是要建好一支科研团队,充分调动科技人员的创新积极性,发挥好领军型、战略型科技人才的关键作用;三是打造一批宜居康养美丽乡村,依托得天独厚的自然优势,瞄准中高端市场,大力发展康养产业,塑造城市发展新亮点;四是要创作一部影响巨大的城市宣传作品,提升城市美誉度,扩大城市品牌影响力。

韩启德说,九三学社中央将充分发挥自身优势,继续关注支持攀枝花发展,为攀枝花下一步发展,特别是科学技术领域的突破作出应有贡献。

九三学社中央、国家有关部委、四川省直有关部门、九三学社四川省委有关专家学者、企业家和攀枝花、雅安、凉山等市州的负责同志出席闭幕式。

(杨冬梅 摘自 <http://pzh.newssc.org/system/20160713/001969139.html>)