不同微合金元素在H型钢生产中的对比研究*

冯岩青[1],王厚昕[2],赵一臣[3],卜向东[4]

(1. 包头职业技术学院,内蒙古 包头 014030;
2. 中信金属有限公司,北京 100004;
3. 河北省建筑钢结构产业技术研究院,河北 唐山 064001;
4. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章在满足产品技术指标前提下,对比了工业生产的铌钒钛微合金化低合金高强度热轧H型钢中的性能、组织、成本及成材率,并结合理论进行了详尽的分析与讨论。铌钒钛3种成分体系热轧H型钢分别有其优缺点,可针对企业的实际生产情况及市场合金价格择优选择微合金体系进行生产。

关键词: 低合金高强度钢; 微合金化; H型钢
中图分类号: TG142.33 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009-5438(2021)04-0067-05
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.04.017

Comparative Study on Different Microalloy Elements in Production of H-beam

Feng Yan-qing[1], *Wang Hou-xin*[2], *Zhao Yi-chen*[3], *Bu Xiang-dong*[4]

(1. *Baotou Vocational Technical College*, *Baotou* 014030, *Inner Mongolia Autonomous Region*, *China*;
2. *CITIC Metal Co., Ltd.*, *Beijing* 100004, *China*;
3. *Hebei Steel Building Structure Industry Technology Institute*, *Tangshan* 064001, *Hebei*, *China*;
4. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd.*, *Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region*, *China*)

Abstract: In the paper, the properties, microstructure, cost and yield of low-alloy high-strength hot-rolled H-beam with niobium vanadium and titanium microalloying by industrial production are compared on the premise of satisfying the technical indexes of product as well as they are analyzed and discussed in detail combining with the theories. The hot rolled H-beam with such three components as niobium, vanadium and titanium has advantages and disadvantages so that the microalloy system can be selected for production according to the actual situation of enterprise and market price of alloys.

Key words: low-alloy high-strength steel; microalloying; H-beam

国产热轧H型钢自1998年马钢投产至今20 多年的发展,经历了“井喷式”的发展。国内热轧H

* **收稿日期**: 2021-03-30
作者简介: 冯岩青(1977-),女,内蒙古包头市人,博士,高级工程师,主要从事新产品研发工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

型钢主要用于钢结构，少量H型钢用于铁路造车材料及其它特殊用途。我国是世界上粗钢产量第一的国家，国内产量占据全球总量一半以上。钢铁行业持续推进供给侧结构性改革，产业结构不断优化，市场秩序明显改善。国内已突破3 000万t/年热轧H型钢产能，遍布华北、东北、华东、华南、西南，每年投放市场近2 000万t。产品规格已覆盖日、韩、俄、德、澳、英、美标系，为热轧H型钢向装配式钢结构住宅领域提供材料奠定了基础。

国内某企业H型钢生产线投产以来，为满足国内各行业对低合金高强度热轧H型钢产品的需求，在低合金高强度热轧H型钢方面做了大量的工作，该企业2019年生产了Q355B(V)低合金高强度钢热轧H型钢17万t，规格全覆盖；2019年生产了低成本Q355B(Nb)低合金高强度热轧H型钢2万t，规格全覆盖；2020年工业试制了1 000 t Q355B(Ti)，主要为中小规格。在不同时期根据合金价格及市场需求，切换采用铌、钛、钒进行添加来达到H型钢产品性能，以满足用户需求及技术要求。

1 工业试验材料与方案

工业生产的Q355B(Nb)、Q355B(V)、Q355B(Ti)热轧H型钢为试验原料，并进行大数据统计。在保证产品符合技术要求的前提下，对比分析了钒氮、铌铁及钛铁3种合金，对热轧H型钢产品生产工艺顺行性、产品性能差异性及产品成本进行了讨论研究。冶炼过程保证了含Nb、含V及含Ti异形坯同浇次进行，工业试制一个浇次的前1/2炉次部分采用钒氮合金在精炼处加入，后1/2炉次采用铌铁在精炼处加入；工业试制一个浇次的前1/2部分采用钒氮合金在精炼处加入，后1/2采用钛铁在精炼处加入。

为保证产品最终性能合格并形成销售，3种方式微合金化的铸坯化学成分见表1，3种成分设计中的硅、锰及合金元素加入量不同，碳、硫、磷相同。其中Q355B(Nb)硅锰加入量最少，铌铁加入量较少，合金成本最低；Q355B(V)锰含量最高，成本最高；Q355B(Ti)由于冶炼过程钛含量控制困难，其加入量范围较宽，但钛铁吨钢成本低，其合金成本低。

轧制过程采用相同的加热温度、开轧温度及终轧温度。加热温度的关键是促进微合金化元素在钢中的充分溶解，开坯温度控制在1 180 ℃左右。万能轧机开轧温度控制在920～980 ℃，终轧温度根据规格控制在890～930 ℃之间，保证低合金H型钢产品性能。

表1 铸坯化学成分及碳当量(质量分数) %

钢种	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	V	CEV
GB/T 10561—2018标准	≤0.24	≤0.55	≤1.60	≤0.035	≤0.035				≤0.45
Q355B(Nb)	≤0.20	0.20～0.55	1.10～1.55	≤0.025	≤0.025	0.01～0.03			≤0.44
Q355B(V)	≤0.20	0.30～0.55	1.30～1.65	≤0.025	≤0.025			0.01～0.04	≤0.45
Q355B(Ti)	≤0.20	0.30～0.55	1.15～1.60	≤0.025	≤0.025		0.02～0.06		≤0.45

2 不同微合金化产品性能对比

选取3种成分体系下相同规格工业试制的试样进行力学性能分析，见图1及图2。其中图1为不同规格的3种Nb、V、Ti成分体系下的屈服强度对比；图2为不同规格的3种Nb、V、Ti成分体系下冲击韧性的对比。

2.1 成分设计思路

Q355B(V)成分设计中通过加入较多量的锰及钒氮合金达到产品性能。

Q355B(Nb)成分设计通过降低钢中Mn含量，及少量加入Nb合金来保证产品的最终性能。

Q355B(Ti)成分设计通过加入较多量的钛合金来保证产品的最终性能。

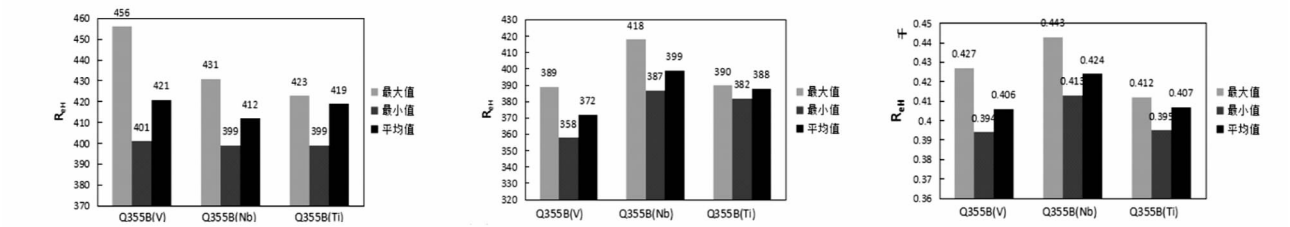
2.2 性能对比

统计了工业试制的含V热轧H型钢共计1 310炉，含Nb热轧H型钢共计221炉，含Ti热轧H型钢共计11炉，从统计数据可以看出3种微合金化方式的小中规格产品性能都满足技术要求。从图1平均值可以看出，含V、含Nb和含Ti的H型钢屈服强度基本相当，这是因为低合金高强度热轧H型钢产品在设计之初为达到该钢级强度而进行的不同体系

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

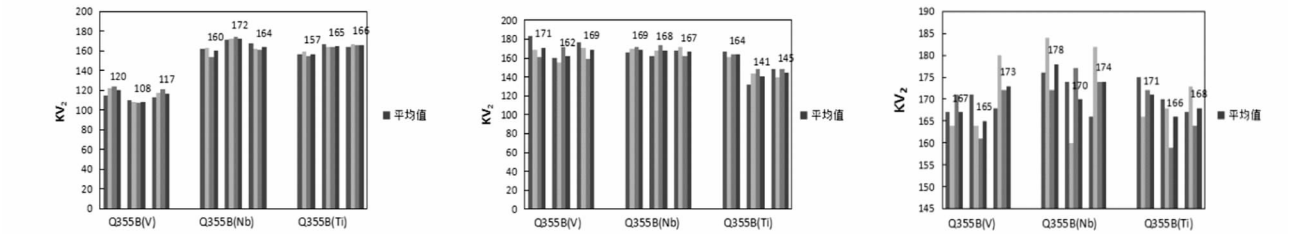
的成分优化。从图 2 可以看出，H150 mm × 150 mm × 7 mm × 10 mm规格的 Q355B(V) 的成品冲击韧性值低于 Q355B(Nb) 及 Q355B(Ti) 的成品冲击韧性值，这是因为该规格的 Q355B(V) 强度均值在 421 MPa，强度过高韧性偏低; H300 mm × 300 mm × 10 mm × 15 mm规格的 3 种成分体系的室温冲击韧性基本相当，H400 mm × 200 mm × 8 mm × 13 mm 规格的 Q355B(Nb) 室温冲击韧性最高。

Q355B(V) 、Q355B(Nb) 及 Q355B(Ti) 产品当中 P、S 元素均值相对稳定，且标准差较小，说明设计成分中 P、S 两元素对屈服强度无影响。但 Mn、V、Nb、Ti 标准差较大，而最终产品性能又趋于一致，说明 Mn、V、Nb、Ti 对强度有较大影响。影响 H 型钢屈服强度的主要元素是 C、Si、Mn、V、Nb、Ti，且随着 C、Mn、Si 含量的增加强度增加。3 种成分体系的实际生产过程中，通过内控成分保证 C、Si 含量的一致性，Mn 标准差较大，钢中随着 Mn 含量的增加有较明显的回火脆性现象及条带组织，增加钢的过热敏感性(粗晶) 及低温冲击韧性。



(a) H150 mm×150 mm×7 mm×10 mm 规格　(b) H300 mm×300 mm×10 mm×15 mm 规格　(c) H400 mm×200 mm×8 mm×13 mm 规格

图 1　不同成分体系下的屈服强度



(a) H150 mm×150 mm×7 mm×10 mm 规格　(b) H300 mm×300 mm×10 mm×15 mm 规格　(c) H400 mm×200 mm×8 mm×13 mm 规格

图 2　不同成分体系下的室温冲击韧性

2.3　成本对比

含 V 及含 Nb 产品的成分设计上，主要体现在锰含量不同以及添加的微合金化合金元素含量不同，含 Nb 产品优化后成分中 Mn 含量均值降低约 0.25 个百分点，实际产品的屈服强度，抗拉强度、伸长率及室温冲击韧性没有明显变化趋势，且各项性能均符合标准要求，未有因性能不合降判的产品。成本核算，以当时(2019 年) 的市场合金价格计算该企业试制的 221 炉低成本含 Nb 热轧 H 型钢，共计降本增效 100 余万元。

含 V 及含 Ti 产品的成分设计上，主要体现在锰含量基本相同，但添加的微合金化合金元素含量不同，含 Ti 产品优化后实际产品的屈服强度，抗拉强度、伸长率及室温冲击韧性与含 V 和含 Nb 的热轧 H 型钢没有明显变化。钛铁的吨钢价格低于钒氮合金及铌铁的吨钢价格，可达到降本增效的目的。

3　微观组织分析

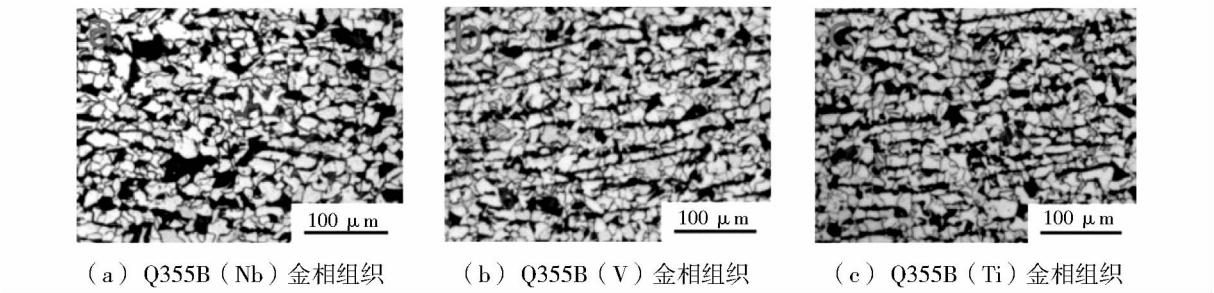
表 2 为 3 个规格 3 种成分体系下的高倍组织情况，钢的洁净度基本相同，随翼板厚度的增加晶粒尺寸增加，组织均为珠光体 + 铁素体。图 3 为 3 种规格不同成分体系的金相组织图。选取了 H400 mm × 200 mm × 8 mm × 13 mm规格产品的翼缘试样进行了金相组织分析，其中图 3(a) 为 Q355B(Nb) 金相组织，图 3(b) 为 Q355B(V) 金相组织，图 3(c) 为 Q355B(Ti) 金相组织，基体组织均为铁素体 + 珠光体组织，根据规格的不同，晶粒度均在 8.5 ~ 10.5 级，且伴有带状组织，Q355B(V) 产品中的带状组织更加明显，带状组织

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.0级,Q355B(Ti)产品中的带状组织为1.5级,而低锰 Q355B(Nb)产品纵向带状组织较轻,仅为1.0级。

表2 H型钢金相组织对比

钢种	规格	夹杂物/级				晶粒度/级	组织
		A	B	C	D		
Q355B(V)	H150 mm×150 mm×7 mm×10 mm	0.5	0.5	1.0	1.0	10.0~10.5	P+F
	H150 mm×150 mm×7 mm×10 mm	1.0	0.5	0.5	0.5	10.0~10.5	P+F
Q355B(Nb)	H300 mm×300 mm×10 mm×15 mm	1.0	0.5	0.5	1	8.5~9.0	P+F
	H300 mm×300 mm×10 mm×15 mm	0.5	1.0	1.0	0.5	9.0~9.5	P+F
Q355B(Ti)	H400 mm×200 mm×8 mm×13 mm	0.5	1.5	0.5	0.5	8.5~9.0	P+F
	H400 mm×200 mm×8 mm×13 mm	1.0	1.0	0.5	0.5	8.5~9.5	P+F



(a) Q355B(Nb)金相组织 (b) Q355B(V)金相组织 (c) Q355B(Ti)金相组织

图3 H400 mm×200 mm×8 mm×13 mm金相组织图

4 讨论与分析

(1)从上述可以看出在相同强度及冲击值的力学性能下,Q355B(Ti)中的Ti微合金化含量较其它2种成分Q355B(V)和Q355B(Nb)中的V、Nb微合金化加入量要高。这是因为钛性质活泼,低合金高强度钢未经真空处理,钛的化学活性很大,冶炼过程中钢中硫、碳及较高的气体(氧:0.000 5%左右;氮:0.000 4%左右)极易与钛形成化合物,降低了有效钛含量,降低了轧制过程钛的细化晶粒和沉淀强化作用,当钢中加入0.020%~0.035%的钛时,首先消耗0.017%Ti[1](钛首先结合钢中的氮,几乎全部形成TiN,Ti/N=3.4),由于该企业生产的低合金高强度钢中的硫含量几乎都在0.01%以下,形成少量的$Ti_4C_2S_2$后,多余的钛(大约0.01%~0.02%)与碳结合生产TiC,细小而弥散的TiC在低温时析出起沉淀强化作用,这部分钛为有效钛。

$$w(Ti_{有效}) = w(Ti_{全}) - 3.4w(N) - 3w(S) \quad (1)$$

(2)从上述可以看出在相同强度及相同冲击韧性的情况下,Q355B(Nb)中的Mn元素较其它2种成分Q355B(V)和Q355B(Ti)中的Mn元素加入量要低。各种微合金元素对形变奥氏体再结晶过程的阻止作用效果见图4[2]。而奥氏体无再结晶温度的经验表述式则为(2):

$$T_{nr} = 887 + 464w(C) + (6445w(Nb) - 644\sqrt{w(Nb)}) + (732w(V) - 230\sqrt{w(V)}) + 890w(Ti) + 363w(Al) - 357w(Si) \quad (2)$$

式中:$w(m)$为合金元素m的质量分数,且该式的适用范围为$w(C)$ 0.04%~0.17%、$w(Mn)$ 0.41%~1.90%、$w(Si)$ 0.15%~0.50%、$w(Al)$ 0.002%~0.65%、$w(Nb)$≤0.060%、$w(V)$≤0.120%、$w(Ti)$≤0.110%、$w(Cr)$≤0.67%、$w(Ni)$≤0.45%的低碳低合金高强度钢。

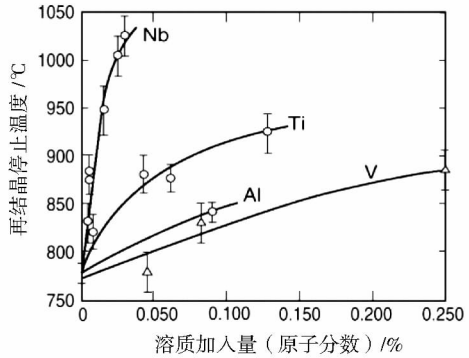


图4 各种微合金元素含量对0.07C-1.40Mn-0.25Si钢无再结晶温度的影响

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由图 4 和式(2) 可看出，铌同时具有溶质拖曳作用和第二相钉扎作用，而溶质拖曳作用在再结晶与沉淀析出的竞争中明显有利于应变诱导析出，由此将显著强化第二相钉扎阻止再结晶的作用，故铌微合金钢在精轧阶段可很容易地完全抑制再结晶而特别适合采用未再结晶控制轧制工艺乃至形变诱导铁素体相变工艺。Nb(C，N) 和 TiC 在奥氏体中的有效沉淀析出温度范围均在 900 ℃以上，均能通过应变诱导析出方式阻止形变奥氏体再结晶。

钒基本没有溶质拖曳作用且析出相钉扎作用也很小，其抑制奥氏体再结晶的作用低于钛和铝，故钒微合金钢特别适合采用高温奥氏体区动态再结晶控制轧制工艺，使奥氏体晶粒通过反复轧制得到细小的奥氏体晶粒，起到细化晶粒的作用; Q355B(V) 的开轧温度在 1 180 ℃左右，钢完全处于奥氏体的再结晶区域，通过高温奥氏体动态再结晶轧制，细化了奥氏体晶粒。

实际生产过程中，Q355B 热轧 H 型钢的终轧温度在 900 ~ 950 ℃，其中铌阻碍奥氏体再结晶的作用最明显，钛的作用次之，钒的作用最小，因此铌提高了再结晶终止温度、细化了 Q355B(Nb) 铁素体晶粒，这就解释了在同等强度下，Q355B(Nb) 的 Mn 含量最低，而 Q355B(V) Mn 含量最高的原因。

5　结论

(1) 在相同强度下，Q355B(Nb) 合金成本最低，产品的冲击韧性最好，但实际生产过程中腹板裂纹比率相对较高，产品成材率较低。

(2) 在相同强度及冲击性能下，铌系成本低，成材率低; 钒系成本高，成材率高，工艺窗口宽; 钛系成本较低，生产过程难以控制 Ti 的收得率，随轧制温度的升高，轧制力不会明显减小，产品质量波动较大。

(3) 国内合金市场波动较大，各企业可根据自身生产的实际情况及可操作性，结合合金市场价格，综合评估并选取制造方法，制定出不同合金体系的低合金高强度热轧 H 型钢生产技术。

参　考　文　献

[1] 齐俊杰，黄运华，张跃. 微合金化钢［M］. 北京: 冶金工业出版社，2006.

[2] 毛新平. 薄板坯连铸连轧微合金化技术［M］. 北京: 冶金工业出版社，2008.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net