文章编号:1673-9981(2015)02-0001-05

冷却速度和 Nb 含量对 X80 管线钢 MA 岛的影响

韩 晨,孙付涛

洛阳有色金属加工设计研究院,河南洛阳 471039

摘 要:以高 Nb X80 管线钢为研究对象,利用金相显微镜、扫描电镜和透射电镜等实验设备对钢中 MA 岛的尺寸、形貌及分布特征进行了研究和分析.研究结果表明,高 Nb X80 管线钢热轧后,适当提高冷却 速度可使钢中 MA 岛的形貌和分布更为细小和均匀,高的 Nb 含量促进了条状 MA 岛的生成.通过调整 高 Nb X80 管线钢的合金成分和热轧后的冷却速度,均可减少 MA 岛对钢性能产生的不利影响.

关键词:X80 管线钢;MA岛;高 Nb含量;冷却速度;热模拟试验

中图分类号:TG146.22 文献标识码:A

随着社会和经济的快速发展,以长距离、高压力 和大管径为特征的管道越来越多的出现在石油天然 气输送工程中,对管线用钢的综合力学性能,尤其是 强度和韧性提出了更高的要求^[1-3].

MA岛(martensite and austenite,马氏体和奥 氏体岛状物)是低 C 微合金钢连续冷却转变为贝氏 体时,在形成板条铁素体的过程中,C在剩余奥氏体 内逐渐富集而形成的一种成分. 对于高 Nb X80 管 线钢而言,MA岛主要是由于富C奥氏体难以保留 至室温,在冷却时转变为马氏体而形成的. MA 岛组 织与 F-P 钢中的珠光体不同,后者是高温共析转变 产物,尺寸较大,分布于铁素体晶粒的交会点,而贝 氏体钢中富C组成物的分布更为均匀,尺寸更为细 小,这可能也是贝氏体钢在保持高强度水平的同时 仍具有良好的韧性的原因之一. 由于 MA 岛是脆性 组成物,它对管线钢的韧性不利,因此,MA岛也是 低 C 贝氏体的一个组织特征, MA 岛的数量、大小、 形态及分布状态对管线钢的强韧性及 HIC 抗力有 一定的影响[4-6]. 目前,关于 MA 岛特征影响因素的 研究较少,主要是针对其成分和冷却速度进行研究.

本文利用 Gleeble-2000 热模拟试验机、金相显微镜、扫描电镜及透射电镜等仪器,对某企业生产的高 Nb X80 管线钢中 MA 岛的尺寸、形貌及分布特

征进行了观察分析,并与低 Nb X80 管线钢中的 MA 岛进行对比,得出了 Nb 含量与 MA 岛的关系, 并提出了减少 MA 岛对管线钢强韧性不利影响的 工艺措施.

1 试 验

1.1 试验材料

试验材料为某企业生产的高、低 Nb X80 管线 钢连铸坯,切割后锻打成 90 mm×120 mm×250 mm的试样,其主要化学成分及含量列于表 1.

1.2 试验方法

为了更好地反映生产实际,热模拟试验进行了 两阶段的变形和相应的冷却工艺,变形分别在奥氏 体再结晶区及未再结晶区进行.

控轧控冷工艺规程如下:分别将直径 10 mm, 长 15 mm 的高、低 Nb X80 管线钢热模拟试样以 50 ℃/s加热到 1100 ℃,然后再以 10 ℃/s 加热到 1220 ℃并保温 3 min,以 2 ℃/s 冷却到 1100 ℃,进 行第一道次压下,压下量为 5 mm(压下率 33.3%), 应变速率 3 s⁻¹.然后再以 2 ℃/s 冷却到 930 ℃进行 第二道次压下,压下量为 5 mm(压下率 50.0%),应 变速率 10 s⁻¹.其中:降温到 1100 ℃和 930 ℃时,在

作者简介:韩晨(1982-),男,河南正阳人,工程师,硕士.

Table 1 Chemical composition of the investigated steel

试样	元素含量 w/%							
	С	Si	Mn	Р	S	Nb	Ti	Mo
高 Nb 钢	0.03	0.27	1.70	0.009	0.003	0.095	0.021	0.08
低 Nb 钢	0.05	0.22	1.62	0.005	0.002	0.045	0.021	0.25

压下前各保温 10 s,以消除温度梯度.变形结束后以 2 ℃/s 冷却到 850 ℃,再以 15 ℃/s 和 25 ℃/s 冷却 到 530 ℃,然后空冷至室温.

将经热模拟试验后的试样沿两个热电偶所在的 平面进行分切,然后根据试验需要进行制样、研磨、 浸蚀或抛光,并将样品分别置于金相显微镜、扫描电 镜和透射电镜下进行微观组织的观察和分析.

2 高 Nb 钢的 MA 岛组织特征

以 15 ℃/s 从 850 ℃冷却到 530 ℃的高 Nb X80 管线钢的金相显微组织、扫描电镜组织(SEM) 如图 1 所示.



图 1 试验用高 Nb X80 管线钢的微观组织

 (a)金相显微组织;(b)扫描电镜组织

 Fig. 1 Microstructure of the high-Nb X80 pipeline tested steel

 (a) metallurgical microstructure;(b) SEM image

从图 1(a)可以看出,高 Nb X80 管线钢的晶粒 尺寸较小,组织中存在粒状贝氏体、针状铁素体和块 状铁素体,并以粒状贝氏体为主.从图 1(b)中可以 看出,钢中的 MA 岛组织多为点状或长条状,尺寸 较小,分布也很均匀,主要以弥散状态分布在贝氏体 和铁素体的晶界和晶内.

高 Nb X80 管线钢在冷却转变为贝氏体时,在 形成板条状铁素体的过程中,C 在剩余奥氏体内逐 渐富集.由于相变温度高,相变驱动力小,转变不能 进行到底,会有少量奥氏体残留下来,以岛的形式分 布于板条间,同时在大角度晶界上也常有小岛存在, 这主要是由于 C 沿晶界扩散较快.

3 MA 岛组织的影响因素及成因分析

轧后冷却速度对微合金钢的组织和性能的影响

较大. 在相同的变形条件及温度控制下,随轧后冷却 速度的提高,钢的晶粒明显变细. 当钢中含有一定量 的 Mn,Nb 和 Mo 等元素时,随冷却速度的提高,先 共析的铁素体和珠光体转变被抑制,组织中将出现 贝氏体和 MA 岛组织等低温转变产物,钢的力学性 能尤其是屈服强度显著提高^[7]. 本试验设定了 15 ℃/s 和 25 ℃/s 两个冷却速度,以分析冷却速度对 高 Nb X80 管线钢中 MA 岛的影响.采用相同的控 轧控冷工艺,分析了 Nb 含量对 X80 管线钢中 MA 岛的大小、形状及分布等特征的影响.

3.1 冷却速度对高 Nb 钢中 MA 岛的影响

图 2 为在 15 ℃/s 和 25 ℃/s 冷却速度下,高 Nb X80 管线钢的扫描电镜组织. 从图 2 可以看出, 当冷却速度从 15 ℃/s 提高到 25 ℃/s 时,高 Nb X80 管线钢组织中尺寸较大的粒状贝氏体和块状铁 素体变得细小和均匀, MA 岛组织变得更为细小和 均匀,接近球形或椭圆形,并以弥散状态分布,细小 均匀的 MA 岛组织可有效地提高管线钢的强韧性, 进而提高其综合力学性能.在控轧控冷其它工艺参 数相同的条件下,冷却速度越大,形核激活能越大, 形核速率也越大,其相变后的晶粒越细小、均匀.因 此,冷却速度越大,MA 岛越细小,形状越接近球形. 但冷却速度过大,温度降低太快的话,低温会使 C 扩散困难,不利于形成一定量的先共析铁素体,会影 响钢材的韧性.



图 2 试验用高 Nb X80 管线钢在不同冷速下的 SEM 组织 (a)冷速 15 ℃/s;(b)冷速 25 ℃/s Fig. 2 SEM images of the high-Nb X80 pipeline tested steel at different cooling rates (a) cooling rate of 15 ℃/s;(b) cooling rate of 25 ℃/s

3.2 含 Nb 量对 MA 岛的影响

图 3 为低 Nb X80 管线钢在 15 ℃/s 和 25 ℃/s 冷却速度下的扫描电镜组织. 由图 2 和图 3 可见,当 冷却速度为 15 ℃/s 时,高 Nb X80 管线钢中的 MA 岛以条状为主,多分布在板条状贝氏体和铁素体的 内部,且有一定的方向性(图 2(a)),而在此冷速下, 低 Nb X80 管线钢中的 MA 岛以点状和块状为主, 在铁素体晶内及晶界处均有分布,所含长条状 MA 岛的数量远低于高 Nb X80 管线钢(图 3(a)).当冷 却速度为 25 ℃/s 时,高 Nb 和低 Nb X80 管线钢中 的 MA 岛数量均有所增加,尺寸更为细小圆滑,分 布也更均匀.在 25 ℃/s 冷速下,两种钢中的 MA 岛 的形貌差异更为明显,但基本不存在异形的 MA 岛.高 Nb X80 管线钢中几乎全部为长条状 MA 岛,



图 3 试验用低 Nb X80 管线钢在不同冷速下的 SEM 组织

(a)冷速 15 ℃/s;(b)冷速 25 ℃/s

Fig. 3 SEM images of low-Nb X80 pipeline test steel at different cooling rates

(a) cooling rate of 15 ℃/s;(b) cooling rate of 25 ℃/s

分布在板条状贝氏体和铁素体的内部或之间,构成 小角度晶界(图 2(b)),而低 Nb X80 管线钢中的 MA 岛仍以点状和块状为主(图 3(b)).

由此可见,冷却速度对高 Nb X80 管线钢中的 MA 岛的影响更明显,适当提高冷却速度可使钢中 的 MA 岛尺寸减小,变得较为规则,且分布较为弥 散,这对高 Nb X80 管线钢性能的提高是有利的.

3.3 X80 管线钢中 MA 岛的成因及控制措施

MA 岛的形状、大小及分布等特征主要是受钢的成分和冷却速度的影响.成分对 MA 岛特征的影响主要体现在 C 含量以及所添加的微量元素在钢中所占的质量分数.

MA 岛是富 C 组织,一般而言,在相同的条件 下,C 含量越多,MA 岛的数量也越多,而 C 含量对 MA 岛形貌的影响不大.通过扫描电镜可观察到低 Nb X80 管线钢中的 MA 数量明显多于高 Nb X80 管线钢的,而实际上低 Nb X80 管线钢中的 C 含量 是高于高 Nb 钢的(表 1),也就是说 C 含量对 MA 岛数量的影响理论分析和试验结果是一致的.

由于两种 X80 管线钢中都没有添加元素 V,而 Ti 含量基本相同, 钛在高温下形成的 TiN 粒子具有 很高的热力学稳定性, 很难固溶于再加热态的连铸 坯中.因此, 元素 Nb 的含量是影响 MA 岛特征的主 要因素.由于两种钢的热模拟试验参数完全一致, 所 以钢中 MA 岛形貌等特征的差异主要是由元素 Nb 含量的不同造成的. Nb 含量的增加促进了条状 MA 岛的出现, 且主要分布在板条状贝氏体和铁素体束 的内部或板条束之间.这是因为微合金元素 Nb 和 Ti 在增加管线钢奥氏体稳定性的同时, 能够使铁素 体板条化倾向更为显著, 从而导致 MA 岛多分布于 板条间且呈长条状.

MA 岛作为一种硬质相,其尺寸大小、形态、分 布和数量对于钢的性能尤其是强韧性影响很大.对 于所研究的高 Nb X80 管线钢而言,一定数量的、长 宽比相对较小的 MA 岛对钢的性能尤其是强度的 提高非常有利.而在试验研究中,利用透射电镜在高 Nb X80 管线钢中也发现了一些尺寸较大,形状不规 则,存在尖角的 MA 岛.由于 MA 岛为富 C 组织,所 以其含 C 量高于基体,因此,颜色比基体深一些(图 4).研究结果表明,当 MA 岛的长宽比大于 4 时,会 给钢的性能带来不利的影响.

钢在变形时会集中大量的应变,应变的分配与钢





Fig. 4 Irregular morphology of MA island in the high-Nb X80 pipeline tested steel

中 MA 岛的数量密切相关, MA 岛的数量越多, 所承 受的应变量也越大,变形后组织的位错密度就越高. 因此,在一定体积范围内提高 MA 岛的数量可以有效 地提高钢材的强度和韧性, 当组织中 MA 岛的体积分 数一定时,MA岛的尺寸越大,对位错起有效阻碍的 粒子越少,在组织中能塞积的位错数量少,钢材的强 度就低. 而当 MA 岛的体积分数和大小一定时,其形 状对钢的强度和韧性也有较大的影响.有尖角的方形 或三角形的 MA 岛比点状或圆形的 MA 岛在变形时 更容易产生应力集中,从而诱发裂纹,降低了材料的 强度和 DWTT(落锤撕裂性能)值. 如果 MA 岛在晶 界呈链状或网状分布,对钢的强韧性非常有害.因为 在外力的作用下,裂纹可以沿着相界迅速扩展,引起 脆性断裂,而细小弥散分布的 MA 岛组织则不易出现 裂纹.理想的 MA 岛应该是数量少、尺寸小、分布均 匀,形状接近无尖角的圆形或球状.

在实际生产中,通过调整成分或工艺参数来减 少或抑制不规则、尖角、长宽比大于4的MA岛的 产生.根据高NbX80管线钢的成分和实际生产条 件,在Nb含量比较高(0.095%)的情况下,为避免 MA岛对钢的性能可能带来的不利影响,通过进一 步降低C含量(≪0.03%)来控制MA岛的数量,或 在控制N含量低于30ppm的前提下,按TiN的理 论化学配比值3.42,调整钢中的Ti含量^[8],较低的 Ti含量可降低高NbX80管线钢中MA岛的长宽 比.研究结果表明,Ti元素在X80管线钢中的含量 小于0.015%时,钢的性能较为理想^[9-10].

4 结 论

(1)当冷速从 15 ℃/s 提高到 25 ℃/s 时, MA 岛不仅尺寸变小, 而且分布更为弥散、均匀, 形状趋 于无尖角的圆形或球状, 对管线钢的力学性能有利.

(2) 在相同的冷却速度下,提高 Nb 含量,钢中 出现了更多的条状 MA 岛,多分布在板条状贝氏体 和铁素体内部或板条之间,表明高 Nb 含量促进了 MA 岛从点、块状向条状转变.

(3)通过成因分析并结合生产实践,对 C,N 和 Ti 的加入量进行合理调整,可减少高 Nb X80 管线 钢中带有尖角或长宽比较大的 MA 岛的数量,以提 高 X80 管线钢的性能.

参考文献:

- [1] 高惠临. 管道工程面临的挑战与管线钢的发展趋势[J]. 焊管,2010,33(11):5-18.
- [2] DEARDO A J. Fundamental metallurgy of niobium in

steel[C]//Niobium Science & Technology. Beijing: The Metallurgical Industry Press, 2003.

- [3] 许云波,肖宝亮,王国栋,等. 低成本高性能新型管线钢的研究与工业化[J]. 钢铁,2008,43(6):66-69.
- [4]李鹤林.高强度微合金管线钢显微组织分析与鉴别图谱
 [M].北京:石油工业出版社,2001.
- [5] 冯耀荣,高惠临,霍春勇,等. 管线钢显微组织的分析与 鉴别[M]. 西安:陕西科技出版社,2008.
- [6] 刘莉,赵亚娟,王秀芳.高强度微合金管线钢中的 MA 岛对性能的影响[J].南钢科技与管理,2008,3(1):1-5.
- [7] 王有铭,李曼云,韦光. 钢材的控制轧制和控制冷却 [M]. 北京:冶金工业出版社,2009.
- [8] 韩晨,孙付涛. 高 Nb X80 管线钢析出物及析出行为研 究[J]. 焊管,2014,37(9):37-43.
- [9] SHANMUGAM, MISRA R D K, HARTMANN J. Microstructure of high strength niobium-containing pipeline steel [J]. Materials Science and Engineering, 2006, A441:215-229.
- [10] 毛卫民. 金属的再结晶与晶粒长大[M]. 北京:冶金工 业出版社,1994.

Effect on the island of X80 pipeline steel by cooling rate and Nb content

HAN Chen, SUN Futao

Luoyang Engineering and Research Institute for Non-ferrous Metals Processing , Luoyang 471039, China

Abstract: The size and morphology and distribution feature of MA (marttensite and austenite) islands in the high-Nb X80 pipeline steel were investigated and analyzed by the OM (optical microscope), SEM (scanning electron microscope) and TEM(transmission electron microscope). MA islands of the high-Nb X80 pipeline steel became more fine and uniform when cooling rate was increased after hot rolled and high-Nb content could promoted formation of the strip morphology MA island. The adverse effects on the high-Nb X80 pipeline steel properties of the MA island could be reduced when the composition and cooling rate were adjusted.

Key words: X80 pipeline steel; MA island; high-Nb content; cooling rate; thermal simulation