

首钢矩形坯连铸生产40MnB钢浅析

于广石 崔京玉 陈京生

(首钢技术研究院)

摘 要: 借鉴国内钢厂生产40MnB钢的成功经验,介绍了首钢设计的连铸生产40MnB钢的内控成分和各工序关键工艺,利用BOF-LF-CC工艺批量生产汽车用优质钢40MnB。

关键词: 矩形坯;连铸;40MnB

7637 B

1 前言

硼钢是以锰、硼为基础代替Cr、Ni钢的一种低合金结构钢。钢中加入微量硼能显著提高淬透性,节约大量贵重元素,同时还可获得优良的机械性能。我国Cr、Ni资源紧缺,而硼资源丰富。因此,发展硼钢意义重大。通常产品设计采用中碳钢或中碳合金钢,通过调质处理后达到设计要求的力学性能指标。获得最终使用态的金相组织为回火索氏体组织。这种回火索氏体组织具有强度与塑性、韧性的良好配合。汽车的前轴、半轴、花键轴、转向节、发动机曲轴、连杆等零件,以及大部分紧固件常用此工艺制造。讨论的40MnB钢主要用于载重汽车的轴、联轴节等受力部件,要求材料要有足够淬透性和较高冲击韧性。

国外早在70年代就利用转炉大量生产汽车用优质钢,日本、美国利用转炉生产的优质钢产量占需求量的一半以上,其最大优点是单炉次批量大,残余元素含量少且稳定,淬透性带窄,生产成本低。

攀钢在1999年开展了转炉冶炼40MnB等汽车用优质钢的研发工作。其生产工艺流程为:全铁水120 t LD转炉冶炼→出钢预脱氧、合金化→钢包吹氩、喂铝线脱氧、合金化、喂复合包芯线净化钢质→模铸→初轧机开坯成325mm×280mm或200mm×200mm钢坯。

首钢于2001年在国内率先开展BOF-LF-CC工艺生产汽车用钢的研发工作。先后试制成功20CrMnTiA、28MnSiBE、SAE8620、40CrA、20CrA、

35CrMoA和42CrMoA等优质汽车用优质钢。研发调质钢40MnB就是在此基础上进行的。

2 40MnB钢中元素的作用及机理

2.1 硼

硼在钢中的淬透性效果与其他合金元素相比有其显著的特点,其提高淬透性的能力按单位含量计算比淬透效果最强的合金元素也要高100倍以上。

钢中B元素可溶于Fe,形成间隙式和置换式固溶体,同时与Fe、C、N、O等元素形成 $Fe_3(C, B)$ 、 $Fe_{23}(C, B)_6$ 等Fe-C-B化合物,还能形成 $Fe + 2(BO_2)_2 Fe + 2FeFe_{23} + BO_3$ 等Fe-O-B型化合物。Fe-C-B为脆性相复合化合物,上述化合物均称B相。^[1]

钢中硼按化学分析分类为总硼、酸溶硼和酸不溶硼。酸溶硼指固溶硼和碳化物中的硼,酸不溶硼指氧化硼和氮化硼中的硼。硼提高淬透性的效果主要是由阻止铁素体和上贝氏体相变引起的:它降低了形核速度,增加过冷奥氏体的稳定性,降低了临界淬火冷却速度,从而提高钢的淬透性。

B相随钢中硼含量、奥氏体化温度和热处理工艺变化形态各异,呈点、粒状、条状、网状、空心状和角状分布。B相数量随钢中硼含量的提高而增加且粗化。表1^[2]说明,40MnB钢在相同工艺条件下,B相随钢中硼含量的增加,明显粗化。表2^[2]为40MnB钢不同含硼量与奥氏体化温度及B相形貌的关系。

表1 40MnB钢中不同含硼量与B相关系

硼平均含量(%)	原材料(轧材)	退火态(炉冷)
0.00084	晶内、晶界B相呈细小点状分布	呈小条状分散分布
0.00149	晶内、晶界B相呈较细点状分布	呈稍长小条状分布
0.00186	晶内晶界B相呈较分散小点状分布	呈粗长条带状沿晶界分布
0.0062	晶内晶界B相呈条点断续状	呈较大粗长条带状沿晶界分布
0.0076	晶内晶界B相呈较大条状断续	呈较大粗长条带状沿晶界分布

联系人:于广石,男,31岁,研究生,工程师,北京(100041)首钢技术研究院钢研所

表2 40MnB钢不同含B量与奥氏体化温度及B相形貌关系

淬火温度 ($\pm 5^\circ\text{C}$)油冷	含B量(%)				
	0.00084	0.00149	0.00186	0.0062	0.0076
800	B化物呈细点状分散分布	呈小颗粒状分布	呈小颗粒状分布于晶界	呈条/小块半网状分布于晶界	呈条/小块半网状分布于晶界
850	B化物呈较细点状分散分布	呈小颗粒状分布,数量较少	呈小颗粒状分布于晶界	呈条小块半网状分布,数量稍少	呈条/小块半网状分布于晶界
900	B化物呈更细分散点状	呈小颗粒状分布,数量更少	呈小块粒状分布于晶界,数量稍少	呈条/小块半网状分布数量稍少	呈条块状半网状分布,数量稍少
950	B化物呈弥散细小点状	呈细小点状分散分布	呈细小点状和断续网状分布	呈细小点状/断续网状分布	呈细小点状和断续网状分布
1000	同上	同上	同上	同上	同上
1050	同上	同上	同上	同上	呈细小点/断续半网状分布
1100	同上	同上	同上	呈细小点状断续半网状分布	同上

可见,随淬火温度提高,硼化物逐渐固溶于奥氏体,由粗变细,由大变小,由密集堆积状变为分散分布。但当淬火温度超过 1000°C 时,晶粒明显粗化。在相同奥氏体化条件下,随着钢中硼含量的增加,B相变粗且较难固溶,为此,应将硼在钢中的含量限制在 $0.001\%\sim 0.002\%$ 为宜。

为了提高40MnB钢淬透性,应有适量的硼原子在奥氏体晶界上偏聚,以降低晶界能。金相观察发现,钢中硼超过一定量后,会形成大量粗大 $\text{Fe}_{23}(\text{B}, \text{C})_6$ 沉淀,降低钢的淬透性。硼对40MnB钢淬透性的影响不是单调增加的,而存在一个最佳硼含量。试验数据表明^[3],硼含量在 $10\sim 20\text{ppm}$ 范围的40MnB钢,经 850°C 加热可使绝大部分 $\text{Fe}_{23}(\text{B}, \text{C})_6$ 溶解,将这个范围硼含量的40MnB钢按正常温度淬火,可以达到消除 $\text{Fe}_{23}(\text{B}, \text{C})_6$ 的目的,但含硼量高于 20ppm ,特别是硼含量超过 30ppm 时,在 850°C 奥氏体化,仍存在大量的 $\text{Fe}_{23}(\text{B}, \text{C})_6$,固溶硼量减少,降低了硼对淬透性的有利作用。因此,应将40MnB的硼含量控制在 $10\sim 30\text{ppm}$,尤以 $10\sim 20\text{ppm}$ 最为理想。

在生产实际中利用控制酸溶硼来控制淬透性是一种可行的方法。首钢特钢实践表明^[4],满足J9值在 $42\sim 54\text{HRC}$ 范围内, B_{sol} 含量可确定在 $0.0005\%\sim 0.0025\%$ 。在 0.001% 左右为最佳,如 B_{sol} 超过 0.001% ,淬透性略有增加的趋势,而当 B_{sol} 大于 0.002% 时,淬透性有下降的趋势。

陕西钢厂专家^[5]认为:40MnB钢,C为 $0.38\%\sim 0.42\%$ 、Mn为 $0.95\%\sim 1.30\%$ 时最佳,C含量为 0.42% ,必须采用 880°C 正火。当Mn大于 1.3% 时,

J15 HRC超标。

攀钢转炉冶炼控制硼含量在 $0.001\%\sim 0.002\%$ 之间,从而达到了稳定控制淬透性的目的。^[6]

40MnB钢中硼含量对低温冲击值也有显著的影响。研究表明^[7],对一定含硼量的40MnB试验钢经一定腐蚀剂腐蚀在金相显微镜下观察,均发现有晶界析出物存在,随着钢中硼量增加,析出物增多。不加硼的锰钢无这种现象。经电子显微镜放大7000倍观察,证实40MnB钢的晶界析出物为硼化物。在正常淬火温度下,析出硼化物量随硼含量增加而增加。并导致 Δ_k 值下降。为保证 Δ_k 值应控制 $B<0.003\%$,通过 930°C 预正火及调质处理可以减轻或消除已析出的硼化物,改善冲击韧性。

2.2 钛

钛在硼钢中并不作为合金元素考虑,主要用于固定氮,以保证硼的淬透效果得以发挥。为了控制 B_{sol} ,通常加入与氧有较强亲和力的元素,如Al、Ti等。有关文献认为控制钢中 Al_{sol} 为 $0.06\%\sim 0.08\%$ 时能有效地控制 B_{sol} ,但是易引起水口结瘤而不具备可操作性,所以加钛固氮较可行。Al低,Ti不能充分与氮结合,不能起到保护 B_{sol} 的作用。

首钢特钢对1986年生产的97炉40MnB钢中钛含量进行了统计,以 $0.03\%\sim 0.05\%$ 为最佳,淬透性合格率大于 90% 以上。^[4]

2.3 碳

中低碳钢中,随碳量升高钢的CCT曲线右移,增大钢的淬透性。但和其他合金元素,如锰、铬、硼等元素相比,效果很小。碳主要决定着钢的淬硬性。就硼

钢而言,碳含量的上升会减弱硼的淬透性效果。具体到40MnB钢,由于碳的上下限波动很小,对淬透性几乎无影响。

2.4 锰

研究表明^[3],锰量增加,淬透性提高,超过9mm后硼的作用大大削弱,锰成为影响淬透性的主要因素。选用锰含量分别为0.95%、1.2%和1.39%的40MnB钢作淬透性试验,在9mm处,Mn含量为1.39%的40MnB钢硬度54HRC,超出J9:42~52HRC的范围,而0.95%和1.2%Mn的40MnB钢9mm处的硬度分别为49和52HRC,处于要求范围内。在15mm处,1.39%Mn的40MnB钢硬度48HRC,高于J15<45HRC的要求。

控制40MnB钢中含1.10%~1.20%Mn以保证淬透性要求是在钢中硼含量最佳的条件下得出的经

验结论。钢中固溶硼低于5ppm,会造成40MnB钢9mm处硬度低于42HRC,引起大批量40MnB钢淬透性不合。^[3]

2.5 残余元素

BOF—LF—CC工艺生产汽车用优质钢,一般采用全铁水炼钢,钢中残余元素含量很低,对40MnB钢性能的影响可忽略不计。

3 试制实践

3.1 40MnB钢内控成分设计

BOF—LF—CC工艺生产40MnB钢在国内属首创。钢的成分、结构和组织是决定钢性能的三个关键因素。综合考虑钢中元素对钢性能的影响,借鉴国内电炉(转炉)—模铸工艺生产该钢的成功经验,并结合转炉全铁水炼钢残余元素低的特点,设计40MnB钢内控成分。

表3 首钢40MnB钢内控成分及标准要求

标准	C,%	Si,%	Mn,%	P,%	S,%	B _i ,%
GB5216-85	0.37~0.44	0.17~0.37	0.95~1.40	≤0.035	≤0.035	0.0005~0.0035
内控目标	0.38~0.42	0.20~0.30	1.10~1.30	≤0.020	≤0.015	0.0010~0.0030

3.2 40MnB钢试制流程及关键工艺设计

40MnB试制工艺流程:80t LD转炉炼钢→LF钢水精炼→矩形坯铸机全保护浇注→钢坯加热→650半连轧→Φ110mm圆钢→轧材空冷→检验→入库

转炉采用全铁水炼钢,强化终点控制。挡渣出钢,严格控制下渣量小于60mm。出钢前加200 kg/炉钙系改质渣入钢包,保证精炼到站渣中(FeO+MnO)<3%;专用复合脱氧剂预脱氧,控制精炼到站氧活度小于20ppm,利于LF快速造白渣。

LF精炼采用加钛保硼工艺。硼在钢中的化学性质极活泼,与钢中氮、氧的亲合力很大。要使钢中硼既保持一定数量,又尽可能地均匀分布。国内外研究者作了大量试验对钢中硼进行研究,认为关键是硼的加入方法。试制中借鉴电炉(转炉)—模铸工艺冶炼的成功经验,采用在还原后的钢水中,加铝终脱氧、加钛固定氮、再加铝深脱氧、精炼炉中加硼铁合金化。试制实践表明,钢中Al_{sol}为0.015%~

0.035%,Ti为0.03%~0.05%时,B的收得率平均为50%,钢中B_{sol}为0.001%~0.003%。

连铸采用低过热度浇钢,矩形铸坯选择避风垛位堆垛缓冷。40MnB钢连铸液相线温度为1496℃,实际中包过热度控制范围25~30℃,铸坯低倍检验良好,缩孔和中心疏松皆小于2级。因采取堆垛缓冷措施,铸坯检验无高锰钢易出现的氢致白点和热应力裂纹等缺陷。

160mm×200mm矩形钢坯入加热炉加热、均温保温;开轧温度:1100~1200℃,终轧温度>850℃;冷却方式:空冷。

3.3 试制实践

采用上述关键工艺试制8炉计700吨160mm×200mm 40MnB矩形坯,经650轧机半连轧制Φ110mm圆钢。钢材性能检验(表4)表明,屈服、抗拉和低冲都有较大的余量。

表4 40MnB钢力学性能检验

检验项目	σ _s ,MPa	σ _b ,MPa	δ ₅ ,%	φ,%	A _k ,J
GB/T3077-99	≥785	≥980	≥10	≥45	≥47
Min	828	1003	16	52	82
Max	943	1075	19	56	97
Aver	902	1050	18	54	92

图1和图2示出了不同B_{sol}含量对40MnB钢力学性能的影响。

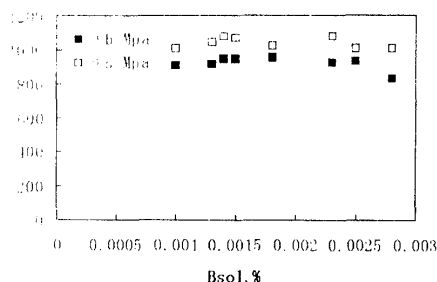


图1 钢中Bsol与 σ_b 和 σ_s 的关系

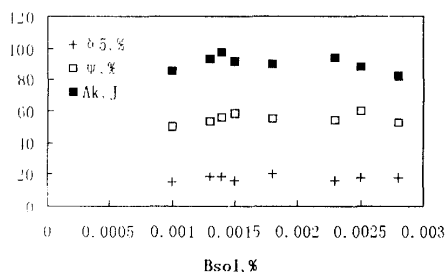


图2 钢中B_{sol}与 δ_5 、 ψ 和Ak的关系

图1和图2表明,随钢中B量增加,大于0.002%则屈服、抗张及塑性略有下降。原因是当钢中B>0.002%时,B-N、B-O、B-Fe等B相化合物数量增加,由前述易形成粗大粒状,甚至呈网状分布在晶界,成为脆性夹杂物,从而降低了钢的塑性。冶炼

加硼的目的是提高钢的淬透性和降低变形抗力,再次证明有微量B(0.001~0.002%)即可达到此目的。

图3显示出了本次试制淬透性检验情况(正火温度880~900℃,端淬温度850℃)。淬透性检验完全符合国家标准要求,J9和J15处带宽分别为6HRC和9HRC。

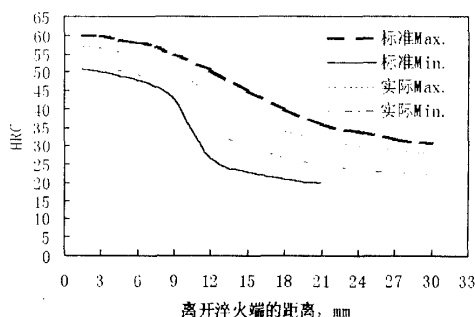


图3 40MnB钢淬透性曲线

4 结论

试制实践表明,采用BOF-LF-CC工艺可以成功生产汽车用优质钢40MnB。转炉冶炼内控成分设计合理,关键工艺设计顺行。钢材性能完全符合国家标准GB/T3077-1999的要求和用户要求。为稳定硼铁收得率以提高B的控制精度(0.001~0.002%),可继续开展LF精炼喂硼铁合金包芯线工艺试验。

参考文献

- 1 章守华编著. 钢铁材料学. 北京:冶金工业出版社. 1999;80~95.
- 2 王荣滨. 高强度螺栓选材与热处理工艺研究. 热处理, 2001, (1): 23~26.
- 3 朱应波. 40MnB钢淬透性的控制. 本钢技术, 1991, (2): 48~52.
- 4 王顺和等. 微量钛对稳定40MnB钢淬透性的有效作用. 特殊钢, 1990, (2): 56~57.
- 5 彭平等. 改善40MnBH淬透性的工艺研究. 宝钢技术, 1994, (5): 26~29.
- 6 唐历等. 攀钢汽车用优质钢的开发. 钢铁钒钛, 1999, (2): 46~51.
- 7 张扬等. 硼含量及其分布对40MnB钢冲击韧性的影响. 天津理工学院学报, 2000, (1): 23~27.