

CNIC-01123

SINRE-0074



CN9701130

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE
AND TECHNOLOGY REPORT

屏蔽用高硼钢和高硼铸铁研制

THE STUDY OF HIGH-BORON STEEL AND
HIGH-BORON CAST IRON USED FOR SHIELD

(In Chinese)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press



潘学荣：中国核动力研究设计院副研究员，
1987年毕业于南昌航空学院。

PAN Xuerong: Associate research fellow of
Nuclear Power Institute of China. Graduated
from Nanchang Institute of Technology Aero-
nautics in 1987.

CNIC-01123

SINRE-0074

屏蔽用高硼钢和高硼铸铁研制

潘学荣 吕继新 温耀曾 王在述
陈建廷 陈 文 孙丹琦 禹金木

(中国核动力研究设计院, 成都)

摘 要

研究了含硼 0.5% 高硼钢冶炼、锻造、热处理工艺; 探讨了高硼钢、含 4%Ni (或 2%Ni) 高硼钢、0.5%Ni-0.5%Mo 高硼钢的机械性能; 摸索了含硼 0.5% 铸铁熔炼工艺。试验结果表明, 试验室采用的高硼钢冶炼工艺、锻造工艺是可行的; 高硼钢的热处理制度为 1050°C/0.5 h 水冷+810°C/1 h 油冷; 高硼钢冲击韧性不稳定, 存在缺口敏感性, 其机械性能不能满足技术要求; 4 %Ni 或 2%Ni 高硼钢及 0.5Ni-0.5%Mo 高硼钢的机械性能均能满足技术条件要求; 试验室熔炼高硼铸铁工艺是可行的, 其性能基本满足技术条件要求。

The Study of High-Boron Steel and High-Boron Cast Iron Used for Shield

(In Chinese)

PAN Xuerong LU Jixin WEN Yaozeng WANG Zhaishu
CHENG Jiantin CHENG Wen SHUN Danqi YU Jinmu

(Nuclear Power Institute of China, Chengdu)

ABSTRACT

The smelting, forging, heat-treatment technology and the mechanical properties of three kinds of high-boron steels (type 1: 0.5% boron; type 2: 0.5% boron and 4% or 2% nickel; type 3: 0.5% boron, 0.5% nickel and 0.5% molybdenum) were studied. The test results show that the technology for smelting, forging and heat-treatment (1050°C/0.5 h water cooled + 810°C/1 h oil cooled) in laboratory is feasible. Being sensitive to notch, the impact toughness of high-boron steel type 1 is not steady and can not meet the technology requirements on mechanical properties. The mechanical properties of both high-boron steel type 2 and type 3 can meet the technological requirements. The smelting technology of high-boron casting iron containing 0.5% boron was researched. The tests show that this casting iron can be smelted in laboratory and its properties can basically satisfy the technology requirements.

前 言

在反应堆及其某些附属设备的制造方面,硼是一种很有价值的元素,因为它具有高达750 b ($1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$)的热中子俘获截面,且俘获后所产生的 γ 辐射易于屏蔽,从而使防护设备和屏蔽体系的重量与体积可以大为减小,此外其费用也较低廉。

较为合理的办法是使硼与铁等元素合金化、形成新合金——硼钢,这样才能使钢的优良性质,如机械性能、物理性能、化学特性以及在制造各种零件与机组时的加工性与装配性得到最大可能的利用。

较低含量的低硼钢(硼含量在0.003%左右),我国在50年代就开始研究。目前国内钢厂(如本溪钢铁公司、抚顺钢铁公司)生产低硼钢已有成熟的冶炼、冷热加工等工艺。低硼钢的研究和生产,主要是利用钢中微量硼来提高钢的淬透性,改善其断裂韧性,提高热强性。我国的低硼钢目前主要用于汽车、拖拉机等制造行业中。在国外,尤其在美国,低硼钢的应用更为广泛,如机械制造(汽车、拖拉机、船舶、机床等)、桥梁建筑、电力和石油等工业部门。

含硼量超过0.10%以上的钢称作高硼钢。最早研究高硼钢的是由奥斯曼(Osmond)于1890年开始,其后由基勒(L. Guillet)、波太文(A. portevin)继续进行研究。但他们的研究结果也未能得到实际应用。到本世纪中期,由于核工业的发展,为高硼钢开辟了新的应用领域,其研究工作又重新引起了人们的重视。

近年来国外广泛开展了含硼量在0.12%到4.0%的高硼钢和高硼不锈钢的研究工作,并采用了一些先进的技术设备,如真空除气,真空脱氧碳,真空加入复合硼铁,电磁搅拌,以便准确控制成分含量,稳定硼的回收率,使硼均匀分布于钢中,稳定钢的性能。

我国开展高硼钢的研究工作始于60年代末,目的是用于反应堆屏蔽防护工程,先后进行了含硼量为3.0%左右的高硼钢和高硼不锈钢初期研究工作。70年代中期又开展了含0.4%浓缩硼(相当于2.0%天然硼)不锈钢的研究工作。

尽管四十多年来国内外高硼钢的研究工作一直未中断过,但由于高硼钢中含硼量高,导致钢的塑性较差,不能满足工程结构材料的要求,使其应用范围受到限制。虽然高硼不锈钢有比较满意的工程性能,但价格十分昂贵,仍然未获得实际应用。

1 试验方法简述

1.1 高硼钢研究

高硼钢冶炼在10 kg中频真空感应炉中进行,采取经典的冶炼工艺,即在加硼前先加铝脱氧,加钛定氮,然后加入其它合金元素,最后于炉中加入硼铁,并用电磁搅拌,以加速合金化。减少硼的烧损,整个冶炼过程是在真空条件下进行的。

锻造在500 kg、150 kg空气锤下进行,锻件于电炉中加热,锻造时采用自由锻打。根据试验要求,将铸锭锻制成 $\phi 15 \text{ mm}$, $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 两种规格的试料。

热处理在箱式电炉中进行。经热处理后的试料机加工成不同规格的试样,进行机械性能、金相观察、扫描电镜、X射线衍射等试验。

1.2 高硼铸铁研究

高硼铸铁熔炼采用了两种方法。一是冲天炉熔炼,包内加入硼铁,然后浇注成400 mm

×300 mm×60 mm 长方形板；二是非真空中频感应电炉熔炼，炉内加入硼铁，浇注成 400 mm×300 mm×60 mm 长方形板，然后进行有关性能试验。

2 高硼钢试验结果及讨论

2.1 冶炼工艺研究

冶炼是高硼钢生产的第一道工序，目前我国生产的低硼钢全部采用电弧炉冶炼，而本冶炼工艺研究是在中频感应电炉中进行的。

2.1.1 冶炼用原材料

冶炼用的原材料及化学成分见表 1。

表 1 冶炼用原材料及化学成分的质量分数/%

材料	C	Al	Ti	B	S	P	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	Cu	备注
沸腾纯铁 DT ₂	0.025	—	—	—	0.025	0.015	0.02	0.035	—	—	—	—	余 Fe
镇静纯铁 DT ₁	0.025	0.39	—	—	0.005	0.012	0.02	0.012	0.03	—	0.07	0.002	余 Fe
硼铁	0.012	2.59	—	19.81	0.0012	0.027	2.79	—	—	—	—	—	余 Fe
纯 Al	—	99.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	其它成分不详
纯 Ti	0.10	—	99.8	—	—	—	0.15	—	—	—	—	—	0.015h 0.30Fe 0.05N
纯 Ni	—	—	—	—	—	—	—	—	99.8	—	—	—	—
纯 Mo	—	—	—	—	—	—	—	—	—	99.8	—	—	—

2.1.2 冶炼工艺

采用经典冶炼方法，即先加铝脱氧，加钛定氮，再加入其它合金元素，最后于炉中加入硼铁，整个冶炼过程在真空中下进行。冶炼工艺流程如图 1 所示。

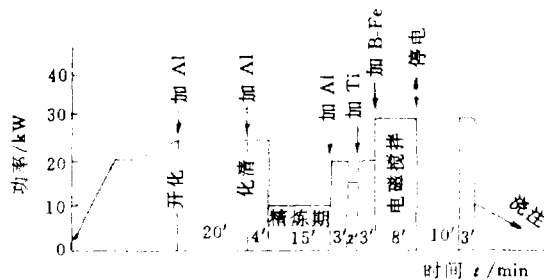


图 1 高硼钢冶炼工艺

冶炼中加铝脱氧分三次完成，以防止钢水大量逸出引起飞溅。由于铝同钢水中的氧反应生成氧化铝是一种放热反应过程，致使钢水温度明显升高，所以加钛前应适当降低功率，以便在稍低的温度下加钛定氮。提高功率后再加入硼铁。提高功率的目的是增加电磁搅拌作用和加速合金化，以减少硼的烧损。高硼钢熔点为 1410℃，实际浇注温度定为 1460℃。

最初冶炼高硼钢时选用沸腾纯铁 DT₂，由于沸腾纯铁 DT₂ 中含有较高含量的气体，尤其是高含量氧，所以在冶炼时由于气体含量高，钢水飞溅现象严重，钢的成分难于控制，浇注后的铸锭质量较差，有较多气孔和疏松，成材率不高。改用镇静纯铁 DT₁ 冶炼，上述现

象基本上得到控制，钢的成分较易控制，铸锭质量较好，成材率高。

2.1.3 硼的回收率试验

硼的回收率及稳定程度与高硼钢质量有密切关系，经过几年的试验，高硼钢硼的回收率可达80%以上，其结果见表2。

表2 硼的回收率

炉号	项目	化学成分的质量分数/%				硼的回收率/%
		C	Al	Ti	B	
880019	要求成分	≤0.04	0.70	0.30	0.50	87.0
	分析成分	0.012	0.80	0.31	0.51	89.0
89029	要求成分	≤0.04	0.70	0.20	0.50	87.0
	分析成分	0.01	0.45	0.17	0.48	83.5
89030	要求成分	≤0.04	0.70	0.40	0.50	87.0
	分析成分	0.015	0.34	0.34	0.48	83.5
9012	要求成分	≤0.04	0.70	1.20	0.50	87.0
	分析成分	0.019	0.508	1.27	0.507	85.0
9023	要求成分	≤0.04	0.70	1.20	0.50	87.0
	分析成分	0.019	0.625	1.21	0.53	82.5

从图1、表2可以看出，试验室采用的真空冶炼高硼钢工艺基本上是可行的，硼的回收率可达80%以上，钢的成分较稳定。

2.2 锻造工艺研究

含硼0.5%高硼钢可锻性以及采用何种锻造工艺是我们研究工作中重要的内容之一，因为它涉及到材料的工程应用价值和应用范围。

据文献[2]、[3]报道，当硼含量超过0.007%时，在钢的晶界上会出现低熔点的Fe-C-B三元共晶组织，容易在组织内产生脆性相而使钢的锻造性能变坏。当硼超过0.1%时还会有Fe₂B相沿晶界或晶内聚集析出，也会直接影响到钢的锻造性能。但若锻造工艺得当，则对钢的组织 and 性能将会产生有利的影响。硼钢的热加工变形程度对钢的韧性也有很大的影响，锻造变形量越大，沿晶界分布的“硼相”网会被打碎得越彻底，硼在钢中分布就越均匀，因而能使高硼钢的塑韧性得到改善。

根据Fe-B相图(见图2)可知，高硼钢的可锻温度范围较窄，约在900~1100℃之间，由于我们在试验中还添加了铝、钛两元素，则会进一步缩小高硼钢的可锻温度范围，给锻造带来困难。

几年的研究工作表明，高硼钢的锻造应采用表3的工艺。

表3 高硼钢锻造工艺

进料温度	升温速度	保温温度	保温时间	始锻温度	终锻温度	冷却	回炉次数
随炉加温	<800℃, 6~8℃/min ≥800℃, 2℃/min	1080℃	1 min/mm	1060℃	900℃	空冷	≤3

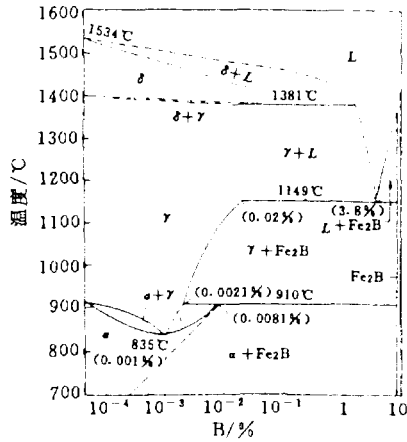


图2 微量硼含量的铁硼系平衡相图

试验表明，高硼钢始锻时，采用轻打快打，锻件开坯后增加打击能量，尽可能增大锻造比，以减少回炉次数，控制好中间火次温度和最后火次温度。

采用表3的工艺进行锻造，成材率较好，很少出现锻裂现象，说明该高硼钢锻造工艺是可行的。

2.3 热处理工艺及其性能、显微组织研究

2.3.1 热处理工艺

热处理是改善钢的组织及性能的重要手段。通过适当的热处理，能使钢的组织均匀化、提高强度、改善塑韧性，从而使钢获得良好的综合性能。

从图2可以看出，硼在 α -Fe和 γ -Fe中的溶解度随着温度升高而增加。硼在 α -Fe中的溶解度从700℃时的0.0004%增加到910℃时的0.0081%，在 γ -Fe中的溶解度从910℃时的0.0021%增加到1149℃时的0.02%。

当钢中硼的含量较高或冶炼、锻造工艺不适当时，高硼钢的晶界上将产生网状的硼化物聚集相，它能使晶界变脆，从而降低其性能，且硼含量愈高，产生的硼化物就愈多。

试验测得高硼钢的相变点 A_{c3} 为978℃，所以在制定热处理工艺时以此为依据，试验中主要采用了表4中的四种热处理制度。

表4 高硼钢热处理工艺

编号	热处理工艺
1	950℃/0.5h空冷+700℃/1h空冷
2	1020℃/0.5h空冷+700℃/1h空冷
3	1050℃/0.5h空冷+810℃/1h空冷
4	1050℃/0.5h水冷+810℃/1h油冷

注：1为法国推荐工艺。

2.3.2 高硼钢的机械性能

根据技术要求，含硼量0.5%高硼钢的机械性能必须满足以下指标：抗拉强度 $\sigma_b \geq 441$ MPa，屈服强度 $\sigma_s \geq 264$ MPa，伸长率 $\delta \geq 18\%$ ，冲击韧性 $a_K^U \geq 30$ J/cm²（最佳 $a_K^U \geq 50$ J/cm²）。

按照上述要求，我们开展了高硼钢的最佳化学成分和最佳热处理工艺的研究工作。

试验结果表明，表 5 中的化学成分是含硼 0.5% 高硼钢较为理想的化学成分。

对于表 5 中的化学成分，我们进行了表 4 中的四种热处理制度试验，并进行了机械性能试验，其结果列于表 6。另外还进行了无缺口冲击试验，其冲击值 $a_K \geq 300 \text{ J/cm}^2$ ，且试样未断，试样弯曲处也无裂纹产生。

表 5 高硼钢的化学成分

元素	C	Al	Ti	B	S	P	Si	Mn	Fe
质量分数/%	≤ 0.04	0.4~0.7	1.1~1.3	0.48~0.55	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.3	≤ 0.2	余量

表 6 高硼钢的机械性能 (室温)

热处理制度编号	机械性能							
	σ_b MPa	$\sigma_{0.2}$ MPa	δ %	ψ %	$a_K^V/\text{J} \cdot \text{cm}^{-1}$			
1	416.0	157.0	33.3	73.0	25.0	247.5	11.5	21.3
	420.0	151.0	32.5	77.0	(17.5)	12.5	27.5	240)*
2	432.0	153.0	37.8	81.0	43.1	8.0	19.3	115.0
	429.0	159.0	35.4	71.0	(180.0)	25.0	55.0	23.0)*
3	423.0	173.0	30.9	79.0	10.0	11.3	12.6	127.0
	415.0	163.0	31.4	78.0	(155.0)	8.5	9.4	7.5)*
4	397.0	167.0	31.8	75.0	37.2	102.9	22.5	34.6
	385.0	163.0	34.5	74.0	(43.5)	117.4	37.3	25.0)*

注：* 括弧内为重复试验结果；热处理制度编号与表 4 中编号对应。

从表 6 可以看出，高硼钢的强度和塑性满足技术条件要求，但冲击韧性较低，且存在着明显的缺口敏感性，重现性试验也较差。提高热处理冷却速度对提高冲击韧性有一定好处。经热处理制度 4 (即 $1050^\circ\text{C}/0.5 \text{ h}$ 水冷 + $810^\circ\text{C}/1 \text{ h}$ 油冷) 处理后的性能优于其它制度处理后的性能，尤其是冲击韧性。

对于高硼钢的缺口敏感性问题，曾进行了大量的试验。在冶炼中，严格控制各道工序，包括加料时间和浇注温度；在锻造中，特别注意锻造火次；热处理工艺也进行了一系列试验；在微观分析中进行了多方面的分析，但均未得到满意的结果。据文献 [4] 报道，硼钢的基体是脆性的，这主要是钢中硼含量过高，溶在基体中的硼使基体变脆。在这一点上，高硼钢与某些铁素体钢有些类似。在一些铁素体钢中，缺口脆性与碳的存在有关，当碳含量降低到很低的数值时 (0.003%)，其冲击韧性就变得很高。铁素体钢中，固溶状态下的碳，与高硼钢中的硼起着相同的脆化作用。从我们的大量试验结果来看，这一论断可以用来解释高硼钢为什么存在着明显的缺口敏感性。

为了提高高硼钢的冲击韧性，改善甚至消除其缺口敏感性，我们在不改变高硼钢的基本成分前提下 (即铝、钛、硼含量不变)，添加了镍、钼合金元素。试验中分别添加了 4% Ni、2% Ni 及 0.5% Ni 和 0.5% Mo，试验结果见表 7。

由表 7 可以看出，添加一定量的镍、钼合金元素后，高硼钢变成了高硼低合金钢，其综合性能有所改善，尤其是冲击韧性明显提高，且改善了缺口敏感性。为了排除添加镍、钼后高硼钢改善冲击韧性的偶然性，进行了重复性试验，其结果表明添加镍、钼合金元素后性能是稳定的。

表 7 含 Ni、Mo 高硼钢的机械性能

材料	机械性能 (1050℃/0.5 h 水冷+810℃/1 h 油冷)								硬度 HV
	σ_b MPa	$\sigma_{0.2}$ MPa	δ %	ψ %	$a_k/J \cdot cm^{-2}$				
4%Ni 高硼钢	573.0	368.0	31.4	70.0	172.5	184.0	168.0	179.0	229.0
	569.0	372.0	33.0	72.0	(136.0	144.0	135.0	139.0)*	237.0
2%Ni 高硼钢	463.0	225.0	31.7	74.0	181.6	201.4	198.8	197.1	242.0
	459.0	236.0	35.7	76.0	(177.5	180.0	182.5	183.8)*	238.0
0.5%Ni+0.5%	421.0	193.0	42.3	73.0	96.3	91.3	115.6	120.0	189.0
Mo 高硼钢	423.0	190.0	39.0	74.4	(145.0	145.0	165.0	144.0)*	

注：* 括弧内为重复试验结果。

由于硼在钢中的溶解度极低 ($\leq 0.02\%$)，与加入 0.5% 硼相比，绝大多数不能固溶，大多数硼只能以硼化物形式析出或聚集于晶界。镍、钼元素的加入，有可能改善了硼化物的分布状态，使之均匀和弥散分布，更为重要的是可能改善了高硼钢组织，使基体变得具有韧性，从而使冲击韧性明显提高。

4%Ni 高硼钢、2%Ni 高硼钢、0.5%Ni 和 0.5%Mo 高硼钢的性能基本上满足技术要求。

2.3.3 高硼钢的物理性能

用热导仪测定高硼钢的热扩散率，用 DSC 法测定其比热，再由热扩散率、比热、密度数据利用最小二乘法确定其热导率，其试验结果列于表 8。

表 8 高硼钢的物理性能 (不含 Ni、Mo)

试验温度 ℃	热扩散率 α $10^{-4} m^2/s$	比定压热容 C_p $kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	密度 ρ $g \cdot cm^{-3}$	热导率 κ $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C$
50	0.113 889	0.4593	7.7	40.278 1
60	0.112 4468	0.4645	7.7	40.218 28
70	0.111 0046	0.4714	7.7	40.292 22
80	0.109 5624	0.4754	7.7	40.106 2
90	0.108 1202	0.4796	7.7	39.927 93
100	0.106 678	0.4838	7.7	39.740 33
110	0.105 2358	0.4869	7.7	39.454 27
120	0.103 7936	0.491	7.7	39.241 25
130	0.102 3514	0.4948	7.7	38.995 47
140	0.100 9092	0.4975	7.7	38.655 79
150	0.099 467	0.4994	7.7	38.248 84
160	0.098 0248	0.502	7.7	37.890 5
170	0.096 5826	5.5058	7.7	37.615 64
180	0.095 1404	0.5092	7.7	37.303 02
190	0.093 6982	0.5121	7.7	36.946 79
200	0.092 256	0.5143	7.7	36.534 39

2.4 高硼钢的显微组织及其析出物

高硼钢有铸态、锻态、热处理状态时的微观组织见图 3、4、5。

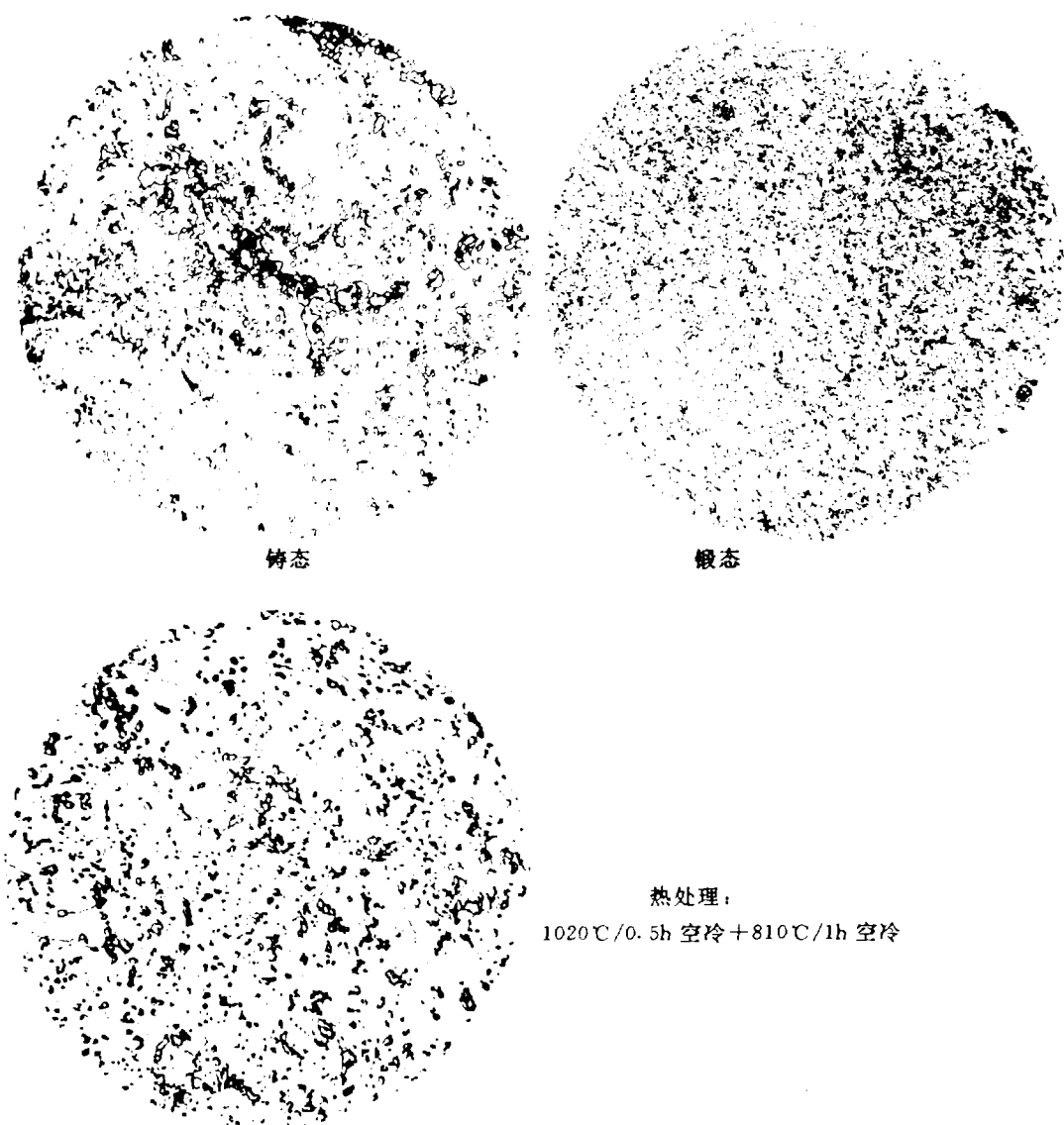
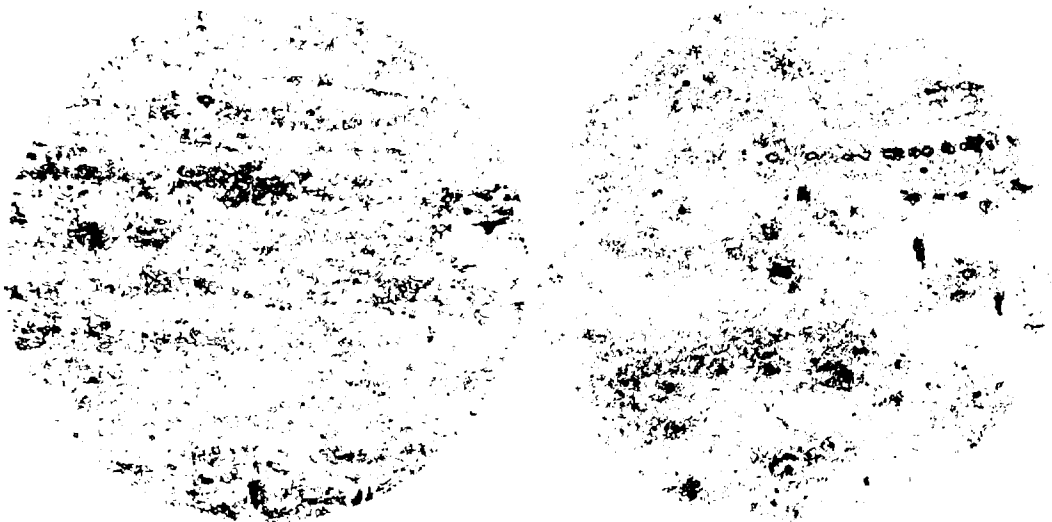


图3 Al-Ti-B型高硼钢微观组织 α 相+TiB₂ 3%硝酸酒精侵蚀 200×

从图3可以看出，高硼钢在铸态下，黑色硼化物大量聚集，多数成串分布，少数呈颗粒状分布；在锻态下，黑色硼化物呈小颗粒状均匀分布；在热处理状态下，硼化物呈现小颗粒状均匀分布，晶粒较大

从图4、5可以看出，高硼钢中加入镍、钼合金元素后，颗粒状的硼化物沿轧制方向分布。

经能谱仪分析这些黑色硼化物为钛硼化合物。再经X射线衍射仪分析，这些钛硼化合物为TiB₂。用定量金相法测定了硼化物在钢中的含量，见表9。



4%Ni 高硼钢 (纵向) 2%Ni 高硼钢 (纵向)
 图 4 含镍高硼钢微观组织 α 相+TiB₂;3%硝酸酒精侵蚀 200×
 热处理: 1050℃/0.5 h 水冷+810℃/1 h 油冷



纵向 横向
 图 5 0.5%Ni-0.5%Mo 微观组织 α 相+TiB₂;3%硝酸酒精侵蚀 200×
 热处理: 1050℃/0.5 h 水冷+810℃/1 h 油冷

表 9 高硼钢析出物含量

材料	高硼钢		4%Ni 高硼钢		2%Ni 高硼钢		0.5%Ni-0.5%Mo 高硼钢	
	锻态	热处理	锻态	热处理	锻态	热处理	锻态	热处理
析出量 %	17.0	10.5	14.0	8.2	14.0	8.0	10.5	6.8

由表 9 可知, 高硼钢经热处理后, 硼化物析出量较锻态时有所减少, 这是由于高硼钢在热处理时, 一部分硼化物在高温时固溶于基体的缘故。镍、钼合金元素的加入, 硼化物析出量有所减少, 这也可能是加入镍钼合金元素能提高高硼钢冲击韧性, 改善缺口敏感性的原因之一。

综上所述, 试验室冶炼、锻造高硼钢工艺是成功的, 4%Ni (2%Ni) 及 0.5%Ni-5%Mo 高硼钢的性能基本上满足技术要求。但从成本考虑, 作者认为屏蔽用钢最好选用 0.5%Ni-0.5%Mo 高硼钢。

3 含硼 0.5%高硼铸铁研究

试验按灰口铸铁标准 HT200 规定进行。用冲天炉熔炼高硼铸铁, 硼含量只能达 0.3% 左右, 不要满足技术要求。用 150 kg 中频真空感应炉在非真空下溶炼, 浇注成 400 mm × 300 mm × 600 mm 的长方形板, 见图 6。在板中央及四个角附近取样分析其化学成分, 结果见表 10。机械性能试验于 830℃/1 h 炉冷退水处理后进行, 结果见表 11。

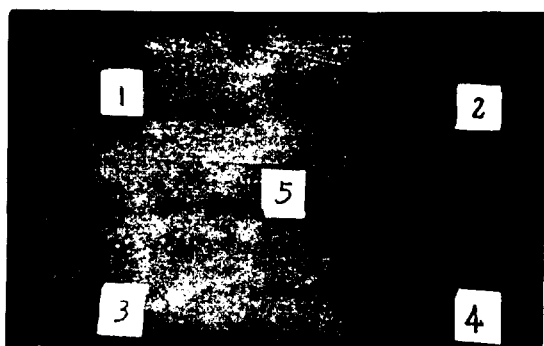


图 6 高硼铸铁

表 10 高硼铸铁化学成分的质量分数/%

材料	C	S	P	Si	Mn	B	Fe
HT200	3.0~3.2	≤0.14	≤0.3	1.2~1.5	0.6~0.9	—	余
高硼铸铁	3.15	0.006	0.18	0.98	0.32	0.52, 0.50, 0.51, 0.54, 0.52	余

表 11 高硼铸铁的机械性能

材料	抗拉强度 σ_b /MPa	延伸率 δ /%	断面收缩率 ψ /%	硬度 HV
HT200	≥145	—	—	190~240
高硼铸铁	114, 97, 128,	1.3, 0.8, 0.9	0.9, 0.3, 0.3	269

由表 10、11 可知, 硼在高硼铸铁中分布比较均匀, 其含量和机械性能基本上达到技术要求。

宏观观察高硼铸铁, 其表面较平整, 表面比较光滑, 组织较致密, 无明显缩孔。

总之, 试验室熔炼高硼铸铁工艺基本上是可行的。冶炼高硼铸铁有了一定基础, 其研究工作有待于全面进行。

4 结论

- (1) 试验室冶炼高硼钢工艺是可行的, 硼的回收率能达 80% 以上。
- (2) 高硼钢锻造工艺为: 加热温度 1080℃, 保温时间 1 min/mm, 始锻温度 1060℃, 终锻温度 900℃, 锻后空冷。
- (3) 高硼钢热处理工艺为: 1050℃/0.5 h 水冷+810℃/1 h 油冷。
- (4) 高硼钢的化学成分为: $C \leq 0.04\%$, $Al \leq 0.7\%$, $1.1 \sim 1.3\%Ti$, $0.48\% \sim 0.55\%B$, $S \leq 0.035\%$, $P \leq 0.035\%$, $Si \leq 0.3\%$, $Mn \leq 0.2\%$ 。
- (5) 不含镍钼高硼钢的性能不能满足技术要求, 其基体具有脆性, 且存在缺口敏感性。
- (6) 含 4%Ni 或 2%Ni 高硼钢的抗拉强度 $\sigma_b \geq 450$ MPa, 屈服强度 $\sigma_{0.2} \geq 230$ MPa, 延伸率 $\delta_5 \geq 30\%$, 冲击韧性 $\alpha_K^U \geq 130$ J/cm², 满足技术条件要求。
- (7) 含 0.5%Ni-0.5%Mo 高硼钢的抗拉强度 $\sigma_b \geq 420$ MPa, 屈服强度 $\sigma_{0.2} \geq 190$ MPa, 延伸率 $\delta_5 \geq 35\%$, 冲击韧性 $\alpha_K^U \geq 90$ J/cm², 满足技术条件要求。
- (8) 高硼钢中加入镍、钼合金元素, 使其基体变得具有韧性, 改善了缺口敏感性。
- (9) 试验室熔炼高硼铸铁工艺是可行的, 硼的分布比较均匀, 抗拉强度 $\sigma_b \geq 100$ MPa。

致谢

本项工作得到了我院黄新泉、苏兴万、贺文高、魏光荣、冯德诚、李川黔、韩桂荣、黄淑珍、李宁华, 我院二所科办罗再玉、王丛林、周斌, 一五〇工厂李兴华、王长民、许东河、季亦清、潘忠权, 四所李聪, 成都航空发动机公司冶金处调度室的大力支持, 在此深表感谢。

参考文献

- 1 Guillet L. J. Iron steel Inst 74. 207-18
- 2 硼钢研究文集, 冶金部钢铁研究总院
- 3 本溪钢铁公司一厂编, 硼钢. 北京: 冶金工业出版社, 1977, 11
- 4 Hochmann J, Desestret Franch A. High Boron Steels, September 1958
- 5 俞宝罗, 胡光立编, 合金钢与高温合金. 北京: 北京航院出版, 1985. 3
- 6 机械性能编写组编. 金属机械性能机械工业出版社, 1982. 10
- 7 刘永铨编. 钢的热处理, 北京: 冶金工业出版社, 1981. 2
- 8 Metals Handbook Sthedition. Volume 8, Metallagza-phy Stwutwis and phase Digzams.
- 9 祖荣祥编, 硼钢研究文集, 1981
- 10 北京机械工程学会铸造分会编, 铸件质量手册, 北京: 机械工业出版社, 1989

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01123 SINRE-0074: 屏蔽用高硼钢和高硼铸铁研制/潘学荣等著. —北京:原子能出版社, 1996. 12

ISBN 7-5022-1612-X

I. 中… I. 潘… III. ①核技术-研究报告-中国②硼钢-反应堆屏蔽材料-研制③含硼合金-铸铁-反应堆屏蔽材料-研制 IV. TL-2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 21237 号

©原子能出版社, 1996

原子能出版社出版发行

责任编辑: 武洁

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

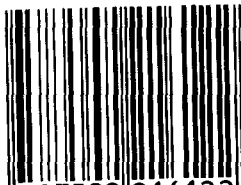
开本 787×1092 1/16 · 印张 1/2 · 字数 15 千字

1996 年 12 月北京第一版 · 1996 年 12 月北京第一次印刷

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre, and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN 7-5022-1612-X



9 787502 216122 >