

铸铁及熔炼学组第一次学术会议论文

硼 贝 氏 体 耐 磨 球 墨 铸 铁

沈 阳 机 电 学 院 杨景祥 赵博彦

阜新牧业机械总厂 刘青山

一九七九 九

前 言

近年来,硼铸铁在我得到迅速发展,用于制造内燃机车,汽车和拖拉机发动机的套及活塞环,水泵叶轮和机床导轨等重要另件,皆取得提高使用寿命的良好结果。

硼铸铁和硼磷铸铁,可根据另件的要求,除随含硼量不同可调正硼 碳化物的数量外,在机械性能上可制成HT20—40, HT30—54等牌号的铸铁〔1〕。

为了发展与提高硼铸铁以及扩大它的应用范围,一年多来,我们试验了蠕虫状石墨硼铸铁,硼球墨铸铁和硼贝氏体球墨铸铁,使硼铸铁机械性能的变化范围扩大,其抗拉强度可由20Kg/mm²提高到80Kg/mm²,这样就可以根据耐磨零件所受的载荷不同,选择不同品种的硼铸铁。

用本溪生铁在工频炉内熔制含硫较低的铁水(含S0.025~0.05%),用1号 稀土及硼铁在炉前复合处理,可使获得蠕虫状石墨铸铁的范围放宽,且可在要求的范围内调正硼碳化物的数量,抗拉强度可达33~45Kg/mm²,目前正在铁路系统内燃机车缸套上进行使用寿命试验〔2〕。

硼球墨铸铁和硼贝氏体球墨铸铁可逐渐使抗拉强度提高到80公斤/mm²以上。

承受较高载荷同时要求高耐磨性能的部件,在机械工业中并不鲜见,但过去多半采用特种钢材并经过特殊热处理的方法去解决。

硼贝氏体耐磨球墨铸铁,是耐磨材料的新品种,与硼铸铁相比,强度及韧性皆有明显改善,与超高强度贝氏体球墨铸铁相比,耐磨性能提高。因此能在承受较高负荷又同时承受高耐磨性能的部件上应用,并成功的代替了经过热处理的合金不锈钢。

近年来,采用颗粒机生产饲料以适应畜牧业走向大规模饲养和工厂化的需要是一个新的动态。颗粒饲料压制机的压模,过去都从国外进口,是用不锈钢经锻造,热处理,机械加工制成的,具有较高的机械物理性能。为使颗粒饲料压制机模具生产立足国内,充分利用我国资源,我们试验了硼贝氏体耐磨球墨铸铁,并用来生产颗粒机压模,装机使用效果良好,使用寿命已赶上和略超过英国进口不锈钢压模,在承受较高负荷同时承受高耐磨性能的材质方面迈进了一步,业经鉴定投产,因此本文着重介绍硼贝氏体耐磨球墨铸铁。

一 问题的提出及国外压模用材概述

科研题目是根据我国畜牧业发展和外贸部门生产出口颗粒饲料中存在的实际问题而提出的:

(一) 饲料工业发展概况及问题的提出:

由于人们对肉、奶、蛋等畜产品日益增长的需要,当前世界上,畜牧饲养已走向大规模工厂化的道路,饲料是畜牧业的物质基础,产量逐年增加,并向全价配合方向发展,一九七七年全世界配合饲料产量已达三亿二千万吨,其中颗粒状配合饲料占60%〔3、

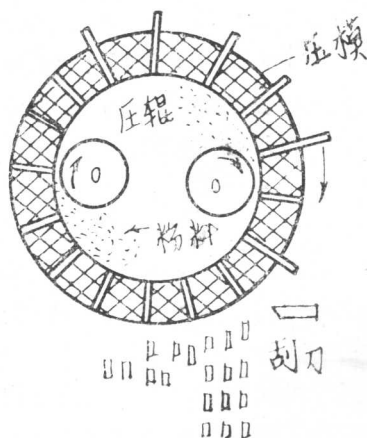
4、5〕，这是因为颗粒配合饲料能保证配合饲料的全价性，（营养全面），并具有体积小，不易吸潮便于储存和运输，从而有利于科学饲养，提高饲养效率以及机械化，现代化。

70年代颗粒饲料压粒机引进我国，现在为外贸部门出口加工颗粒饲料的工厂已有三十多家，生产的槐树叶粒和苜蓿草颗粒畅销日本，东南亚和欧洲市场，为争取外汇做出很大贡献。据外贸部门统计，一台颗粒机每年需要压模10个左右。进口压模每个需3000~7000元之多，价格昂贵，往往还不能保证生产，是当前生产迫切需要解决的关键问题。

我国机械化养猪，养鸡事业正在兴起，粮食部在组划饲料工业中，农机部在组划颗粒饲料压粒机的生产中，都把自制压模列与前题和关键，我厂将生产颗粒饲料压粒机及其成套设备，因此厂校合作研制压粒模的材料及其生产工艺，以适应我国畜牧业现代化的需要。

（二）压模工作条件和失效形式：

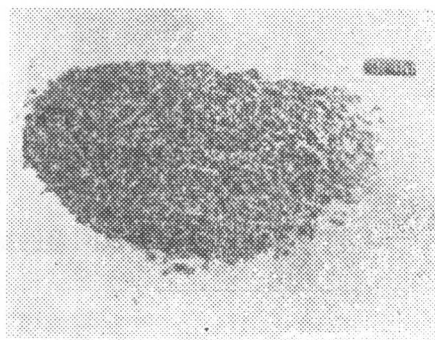
颗粒饲料压粒机的工作原理如图一所示，压模是多孔的园环状部件如图二所示，粉状饲料经给料器进入颗粒机工作空间，在压模与压辊相对滚动挤压下，从模孔挤出而成



图一 颗粒饲料生产原理示意图



图二压粒模



颗粒饲料图三

棒状，在压模外有刮刀，将园棒饲料截成颗粒如图三所示。

压模旋转时，以饲料为媒介带动压辊旋转，其线速度一般控制在7米/秒以下，模与辊的装配间隙约为0.3毫米，正常工作中压模与压辊不接触，因此压模只与饲料接触，产生磨料磨损，其次在挤压过程中受交变应力，也伴有冲击载荷，再其次由于饲料的性质不同，有不同的腐蚀作用，由于在工作中通蒸汽软化物料，压模也受蒸汽的侵蚀。

在上述条件下工作的压模，失效的形式主要是磨损和碎裂两种，磨损异常严重，进口高合金钢压模，工作400—500小时，模壁厚度磨掉竟达20毫米以上，随着压模壁厚变薄，压模的交变应力逐渐增加，到一定程度发生碎裂。因此在选材上必须兼顾和强韧性。

国外压模用材

根据文献〔3〕〔4〕和样品分析〔6〕，国外压模以用不锈钢为主，英国牌号为En56A，日本为SuS410，相当于1cr13不锈钢，含碳0.1%，含cr13%，金相组织是马氏体加少量铁素体，宏观硬度Rc为40—45之间。压辊用轴承钢和合金模具钢，金相组织为马氏体加碳化物，宏观硬度比压模高。

国外压模材料具有较高的综合机械性能，和良好的防腐能力。但用不锈钢生产压粒模，需大型锻压设备，成本高，我国高合金钢比较稀贵，难以实现，另外经我们调查和检验，绝大多数饲料接近中性，腐蚀作用不大，基于这些情况，我们选择了硼贝体球墨铸铁制造压模代替进口不锈钢压模。

二硼贝氏体球墨铁的研制

(一) 硼贝氏体球墨铸铁:

71年起我院曾和沈阳拖拉机厂一起,系统地探讨了等温温度对贝氏体球墨铸铁综合机械性能的影响,所得结果见图四。

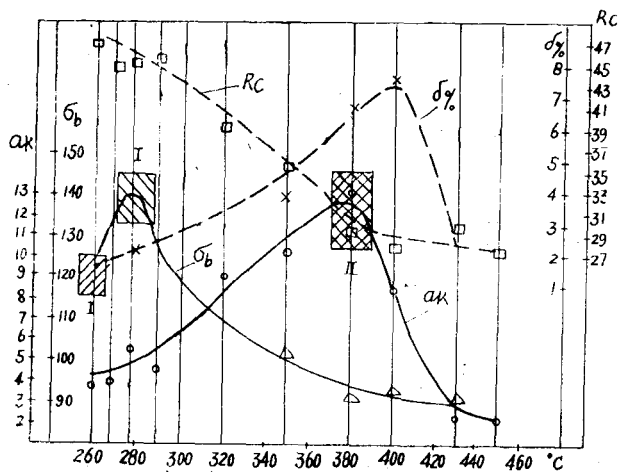


图 等温温度对 σ_b 、 $\delta\%$ 、 α_k 、Rc的影响

从图中我们认为有三个区域可供生产选择: I 区: 等温温度稍高于Ms线, 即240℃~260℃。这一区域的特点是硬度高, Rc可达45—50, 且具有一定强度和韧性其抗拉强度在100—120kg/mm², 延伸率>1%, α_k 值在1—4 kg/cm²。采用这样的热处理规范, 另件抗骤然冲击负荷易断裂, 但耐磨性较好。

II 区: 等温温度在270—290℃之间, 这时综合性能最佳, 我们采用这样的等温处理规范, 生产的28马力拖拉机螺旋伞齿轮, 虽未经表面强化处理, 已运行接近七年, 效果良好。

III 区: 等温温度在360℃~390℃之间, 此时在抗拉强度为90kg/mm²左右的情况下, 呈现良好的冲击韧性。

如前所述, 压模磨损异常严重, 虽然所受负荷也较大, 但断裂也是在磨损一定程度后发生的。为此在研制中加硼形成一定数量的高硬相, 增加抗磨能力, 并采用稍高于Ms线的低温等温处理<240—260℃>, 得到硼贝氏体球墨铸铁。

(二) 生产工艺简介

1 原材料及配料: 采用本溪Z15生铁60%, 回炉料30%, 废钢10%配料投炉, 球化剂用包钢6 稀土镁合金, 孕育剂用75%硅的硅铁, 硼铁是含硼14—15%的辽阳铁合金厂产品。

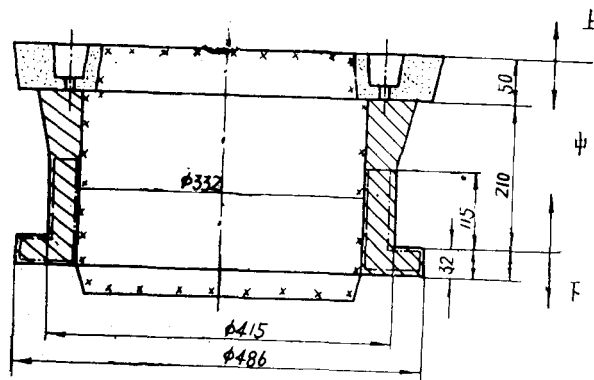
2 熔炼及炉前处理方法:

采用两排大间距, 一吨半冲天炉熔制铁水, 出炉温度在1380℃左右, 浇铸温度1300℃左右。

用400公斤提坝式浇包进行球化处理, 稀土镁合金加入量在1.6—2.0%之间, 碎成

1—6毫米的硼铁也加入包底，覆盖在球化剂之上，孕育剂加入量为0.8—1.0%，分两次加入。

3、压模铸造工艺：如图五所示：采用干型，干芯，上雨淋水口，正园周冒口。



图五 30HP压模工艺

4 热处理工艺：采用盐浴加热和等温处理，奥氏体化温度为900—920℃，保温40分钟，等温淬火温度为240—260℃，等温时间为90分钟。

(三) 试验结果：

按上述工艺，生产的若干组硼贝氏体球墨铸铁，其成分，金相，机械性能如表1所示。由表可见，硼贝氏体耐磨球墨铸铁，其金相组织中含硼碳化物可在5—20%范围内变化。虽然采用低温处理，抗拉强度随硼碳化物数量的不同，在70—100kg/MM²范围内波动，具有一定的冲击值（ak0.7~2.0kgM/CM²），硬度值在Rc44—50之间。这样的金相组织和综合性能，应有良好的磨损寿命。

三 硼贝氏体球铁的若干问题

(一) 硼对球化的影响：

硼是反球化元素，但在用稀土镁合金处理时，硼的反球化作用并不强烈。由表一可以看出，硼量在很宽范围内，都可得到良好的球化。然而随残留稀土镁量的不同，含硼量超过某一定值，石墨产生畸变，出现蠕虫状石墨及片状石墨。硼的这种反球化作用与球铁中残留稀土镁量有关。

1) 当硼球铁中残留稀土、镁量的总和在0.07%左右时，其中残留稀土和镁量大体相似，如表一中的B1组，当含B量为0.052%球化正常，提高到0.091%时，石墨全部变为片状。所以在这样残余稀土，镁量条件下，硼量不宜过高。

2) 当硼球铁中残留稀土镁量的总和在0.12%以上时，硼由微量调整到0.085%，球化仍正常。继续提高，含B达0.127%时，石墨呈蠕虫状，并有相当数量一次渗炭体出现。不同含B量的石墨形态如图片1~7所示。

3) 硼对球化作用影响

硼对球化的影响，在不同的结晶阶段是不同的。

表 1

硼贝氏体球铁成分：金相组织和机械性能。

试验编号	化 学 成 分 %							金 相 组 织			机 械 性 能				备 注		
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	Mg	Re	B	石 墨	基 体	σ p	ak		Rc	铸态 HB
B10	3.44	3.06	0.63	0.062	0.014	0.79	0.2	0.045	0.037	0	球 化	下贝+残A	100 95	3.05 2.8	47 46		
B11	3.39	2.80	0.65	0.06	0.014	0.091		0.039	0.032	0.052	球 化	下贝+10-15%BC	78.3 72.8	1.5 1.95	46 48		
B12	"	"	"	"	"	"		"	"	0.091	片 状	出现一次渗炭体					铸态
B22	3.3	3.2	0.52	0.054	0.017	0.79	0.21	0.076	0.078	0.085	球 化	下贝+15-20%BC	74 69	1.2 1.5	44 46	266~ 272	
B23	"	"	"	"	"	"	"	"	"	0.127	蠕虫状	出现一次渗炭体					铸态
B30		"	0.28	0.052	0.033	0.7	0.2	0.074	0.056	0	球化IB晶	下贝+残A+1%p共晶	127 119	4.0 4.9	45	241	
B31		2.8	0.28	0.05	0.002	"	"	0.068	0.085	0.06	球 化 I ₄ -IB	下贝+20%BC	71 72	1.7 1.0	50	275	
B41		2.5	0.28	0.054	0.026				0.063	0.018	球化IB	下贝+5-10%BC	60 90	4.6 1.5	49	255	
B42		"	"	"	0.026					0.049	球化IA	下贝+13-17%BC	89 76	1.3 0.7	50	272	
B43		"	"	"	0.026		0.26		0.063	0.053	球化IB	下贝+15-20%BC	82 81	1.0 0.9	50	282	
B44		2.51	0.28	0.004	0.026		0.33		0.058	0.034	球化IA	下贝+10-15%BC	81 91	1.6 1.6	50		
B 5		2.35	0.22	0.051	0.018		0.33		0.049	0.026	球化IA	下贝+10-15%BC	109.2 93.3	1.2 {		50	
													82.5	4.0			

注表中BC为硼碳化物 残A为残余奥氏体， 下贝为下贝氏体， P共晶为磷共晶。

①根据资料〔7〕，加硼使铸铁的奥氏体初晶析出线和石墨初晶析出线左移，使共晶点向下向左移动如图6所示，就同一成分而言，加硼增加了碳的活度和铸铁的共晶度，有助于初晶石墨的析出，

②在共晶结晶过程中，过量的硼使球墨畸变，阻碍以球状方式成长；硼在奥氏体中平衡分配系数很低，溶解度很小，在共晶奥氏体结晶时，残余液体中硼的浓度逐渐增加，当达到某一数值时，石墨将不以球状形式析出，其阻止石墨球化的作用属于晶界偏析型〔8〕。因此随铁水中硼量的增加其阻止球化作用将从共晶后期，转移到中期和初期，甚至在共晶凝固以前。所以随含硼量的不同，石墨分别以球状似球状，蠕虫状、片状析出。

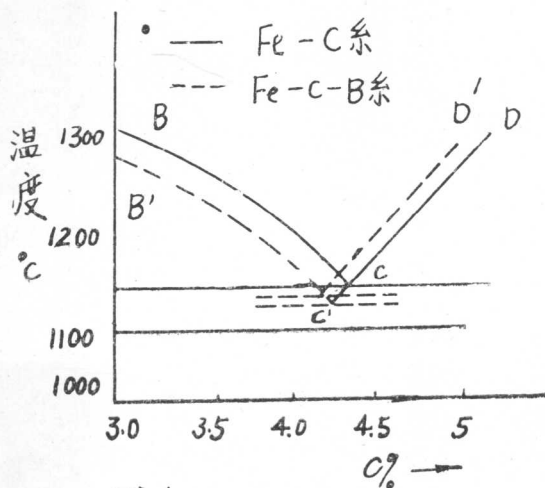
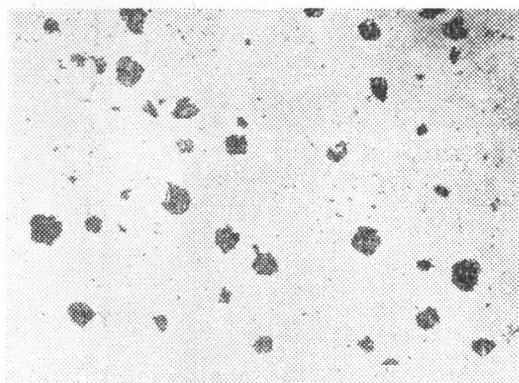


图6

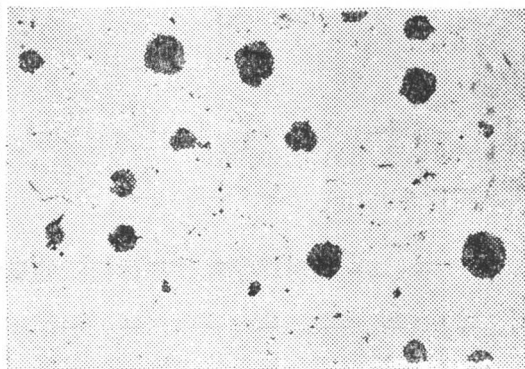
综上所述，在充分孕育的条件下，加硼球铁球化良好的基本条件是：

- ①具有共晶或过共晶成分，以过共晶成分更为有利。
- ②含硼量适当，不宜过高。
- ③足够的残余稀土镁量。

经多次验证，保证这些条件；获得硼球铁并无困难。



图片1 B20无B×100

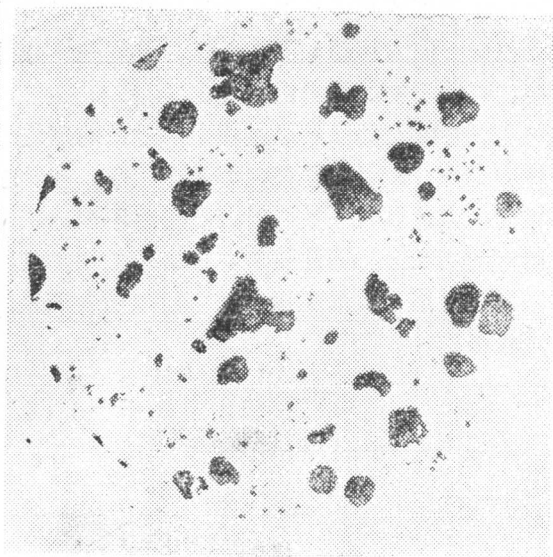


图片2 ×100 B0.081% B21



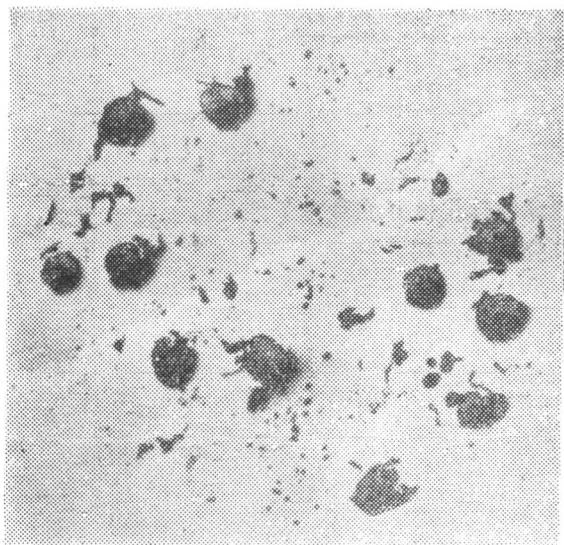
B23含0.127%

图片 3 × 100



B30无B × 100%

图片 4



B31含B0.06%

图片 5 × 100



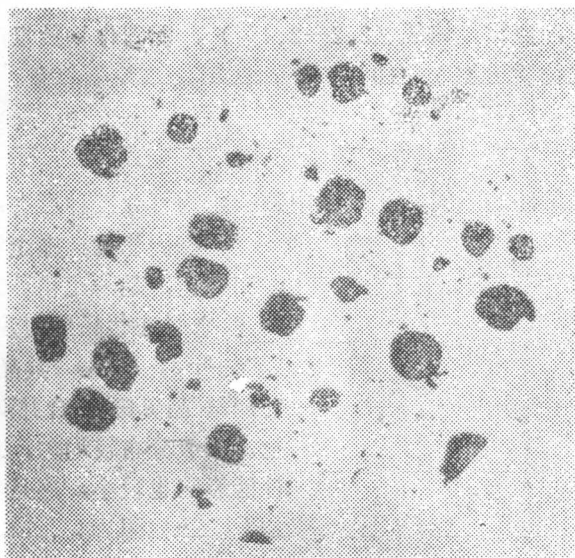
B41含B0.018%

图片 6 × 100

(二) 硼对球墨铸铁基体组织的影响:

1 球墨铸铁中加硼与在灰口铸铁中加硼一样, 将析出硼碳化物。

如前所述, 硼在奥氏体中溶解度很低, 在 γ 铁中最大溶解度为0.018, 由于碳的存在, 溶解度更低。所以球墨铸铁中加硼量超过其溶解量, 随着共晶结晶的进行, 在奥氏



B43含B0.053

图片 7×100

体结晶前沿的残余铁水中，硼的浓度逐渐增高，由于硼具有阻碍共晶团成长的作用，尤其球墨铸铁，石墨成长需通过奥氏体壳扩散、所以共晶团成长减慢，溶液过冷，使得共晶过程从开始按稳定系结晶，后期按介稳定结晶，这种转变硼球铁强于硼铸铁，因此在硼球铁中析出硼碳化物，在同样含硼量情况下，数量比硼铸铁为多。硼球铁的铸态组织为石墨 + 珠光体铁素体和硼碳化物四相共存。

2、析出硼碳化物的数量随硼量的增加而增加，此外加硼稳定 珠光体使铁 素体数量减少，系统调正硼量，铸态球墨铸铁的金相组织示如表 2，变化趋势示如 7 图，参看金相照片 8、9、10、11。

表 2

试样编组	B %	铁素体%	硼碳化物%	备 注
B 30	0	15 - 20%	1 % 磷共晶	含si2.8%
B 41	0.018	10 - 15%	5 - 10%	含si2.5%
B 42	0.049	5 - 10%	13 - 17%	"
B 43	0.053	5 - 10%	15 - 20%	"
B 31	0.06	5 - 10%	15 - 20%	含si2.8%
B 12	0.091	5 %	出现一次渗碳体及莱氏体 出现一次渗碳体及莱氏体	
B 23	0.127	5 % 以下		

3、硼碳化合物形态:

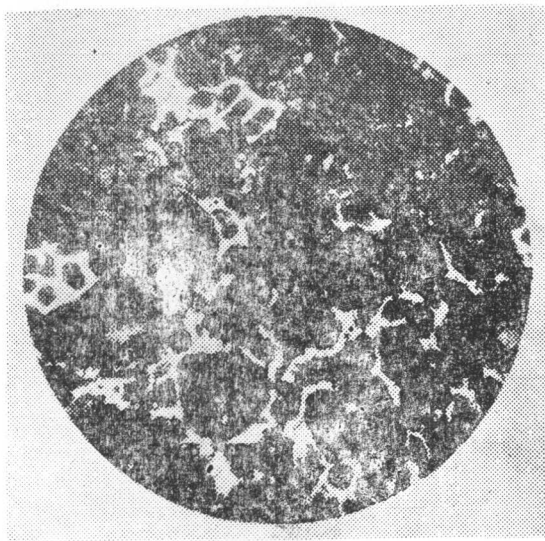
Figure 1 is a graph showing the relationship between the logarithm of the number of cells ($\lg N$) and the logarithm of the number of cells ($\lg N$). The y-axis is labeled $\lg N$ and ranges from 0 to 6. The x-axis is labeled $\lg N$ and ranges from 0.01 to 0.6. Two curves are plotted: a solid line and a dashed line. The solid line starts at approximately (0.01, 1.5) and rises to (0.6, 5.5). The dashed line starts at approximately (0.01, 1.5) and rises to (0.6, 5.0). Handwritten text in the upper left corner of the graph area reads: "O 2.5-2.8%" and "O 2.5-2.8%".

量大，孕育不良下形成的，且分布不均，块度较大。

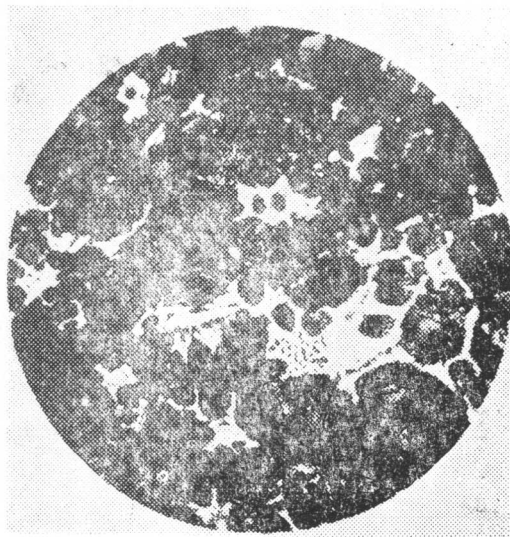
A circular micrograph showing a dense, granular texture, likely a histological section of tissue. The image is characterized by a complex pattern of dark and light areas, suggesting cellular structures and possibly some pathological changes. The overall appearance is that of a high-magnification view of a tissue sample.



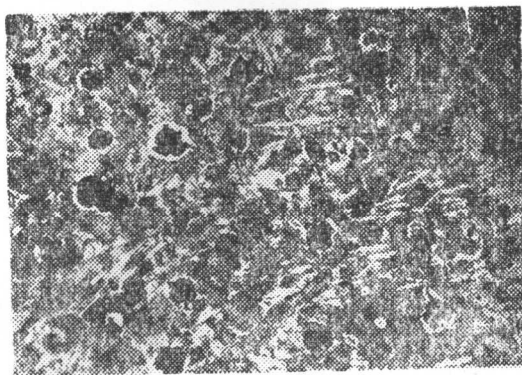
10



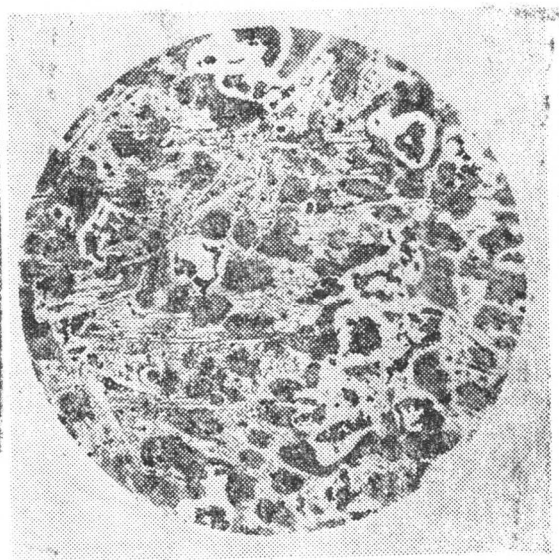
B42B0.049% 图片 10×100



B43B0.53% 图片 11×100

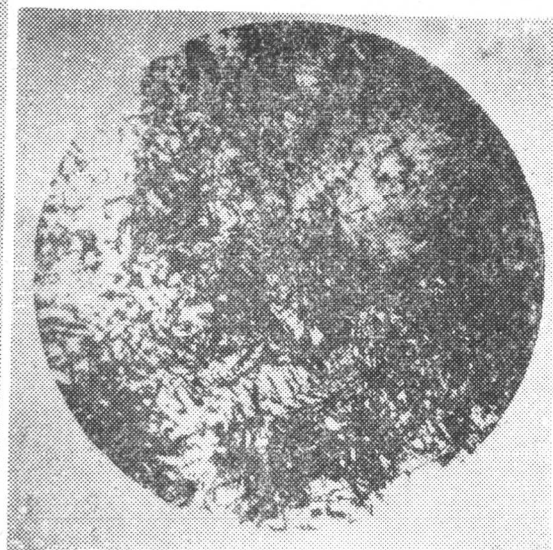
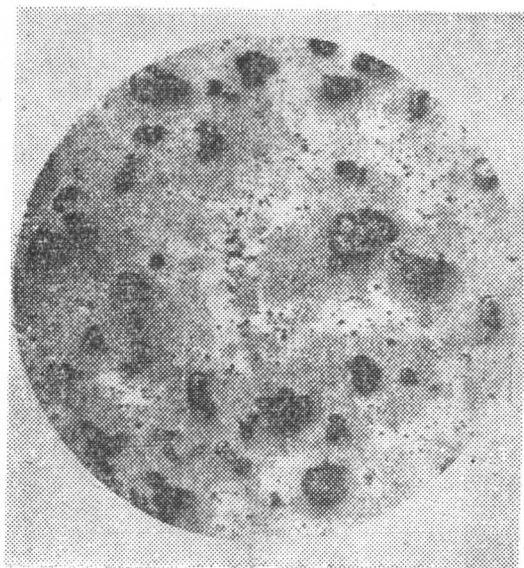


B21B0.081% (特浇 $\phi 15$ 金相试样
冷却较快) (图片 12×100)

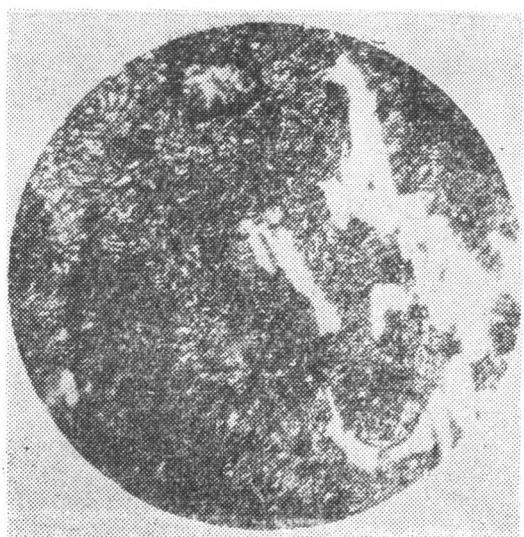


B23B0.127% 图片 13×100

在生产中发现，球径较小时，硼碳化物比较分散，细小、我们认为：为了得到理想的硼碳化物，必须良好的孕育，硼量不宜过高，残余稀土镁量和稳定碳化物的合金适量。



B30无B淬火后 $\times 100$ 和 $\times 500$ 组织有白亮区 图片00



B41B0.018图片14



B42B0.049图片15

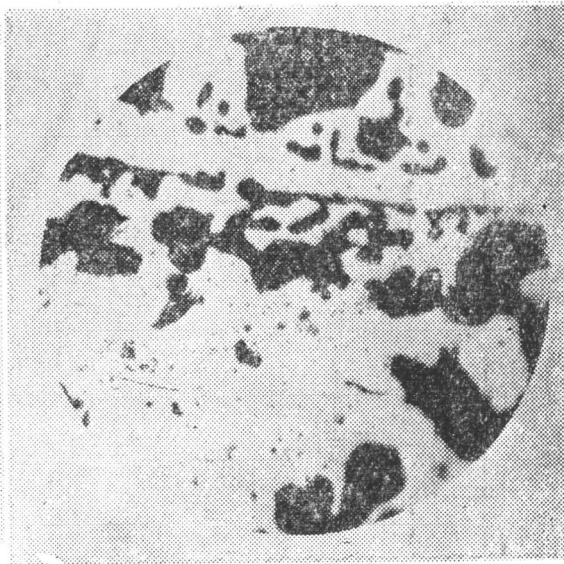
〈三〉等温淬火后的全相组织和硼对淬透性的影响

按所述等温淬火工艺，得到下贝氏体组织，其中硼碳化物比较稳定，加热和保温过程中（奥氏体化温度在 930°C 以下），硼碳化物不发生变化，所以等温淬火的硼球铁组织是下贝氏体加硼碳化物（图片19）。

加硼细化贝氏体针：同炉铁水，炉前及热处理工艺相同，加硼与不加硼贝氏体球铁



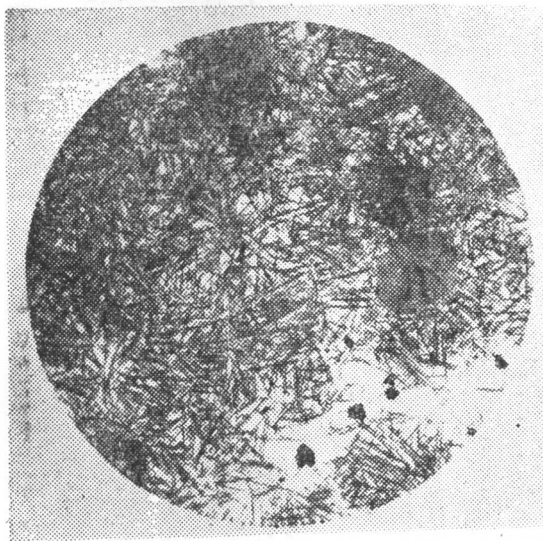
B43B0.053%图片16



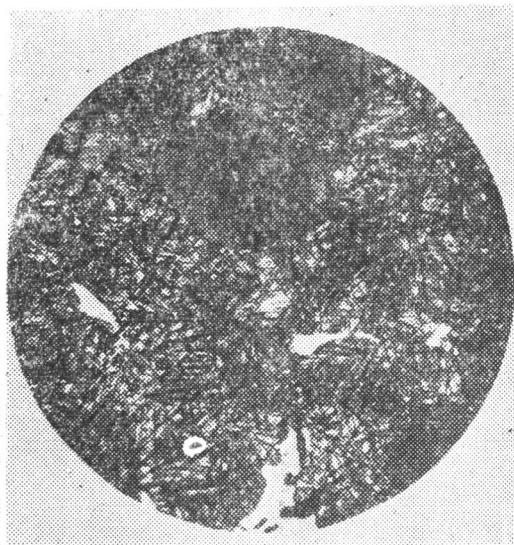
B31B0.06%图片17

的金相组织如图18、19所示，由图可见硼球铁中，下贝氏体针比无硼球铁细小，其他炉次对比试验也得同样结果。

加硼贝氏体球铁的电子显微镜图片如图20、21所示，并经过结构分析为 α -Fe晶体结构（如图18X分析图像）所以它是在针状 α -Fe上分布着高度弥散的碳化物小质点。

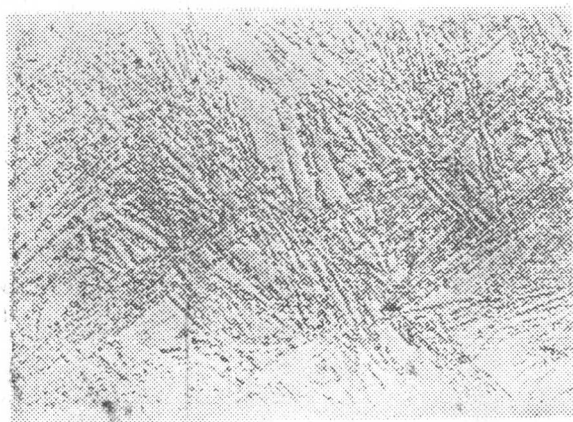


B20无硼针长有白亮区图片18×500

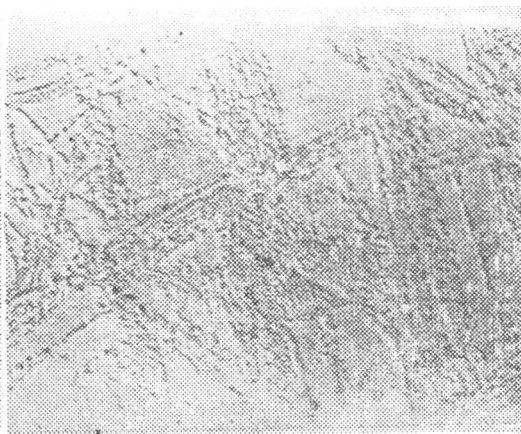


B21加硼下贝细小无白亮区图片19×500

硼是降低临界速度的元素，增加淬透性，压模壁厚50mm，工作厚度一般在20mm上，能否淬透与使用效果密切相关。对B22组生产的压模进行解剖，取样位置如图8



图片20、



图片21

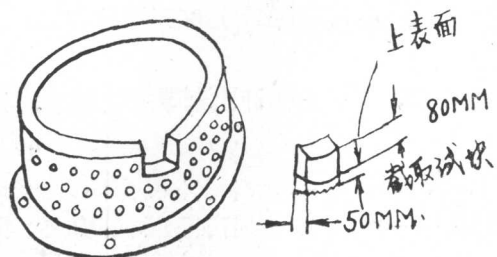


图8 压模解剖分析取样位置图

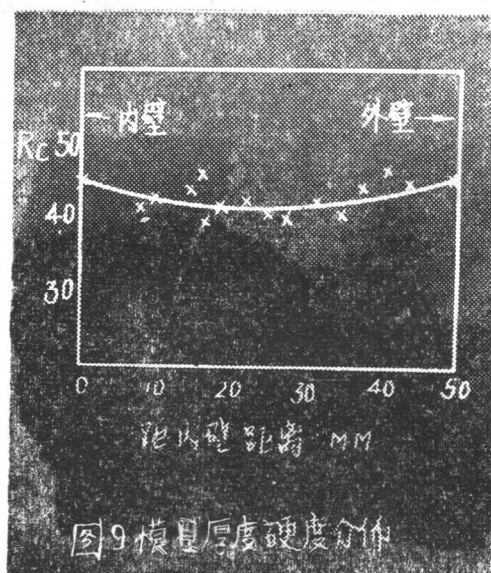


图9 模具厚度硬度分布

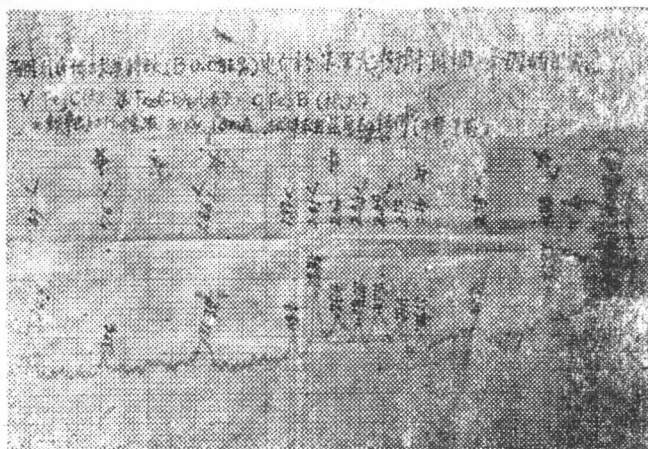


图17

所示，沿壁厚不同位置检查硬度，Rc值均在40—46之间，硬度差较小如图9所示。全相观察均为下贝氏体、白亮区极少。可见硼球铁淬透性较好，而且等温转变趋于完全。

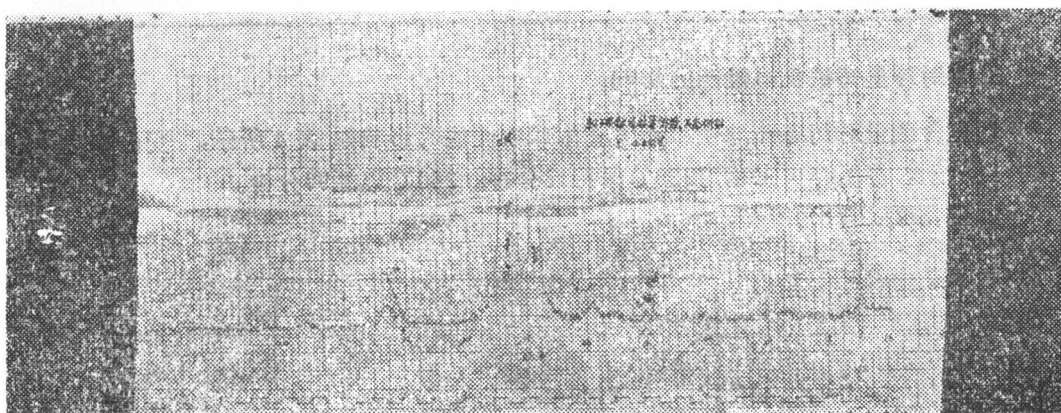
等温淬火后尤其是当我们采用较低温度处理的情况下，白亮区仍较少，是硼球铁的重要特点。成分近似，处理工艺相同，无硼及加硼球墨金相组织如图片18、19所示，由图片可见，加硼球铁使白亮区大大减少。

为验证这一结果我们做了一批含硼从零到0.06%的五组试样，同炉处理，奥氏体化温度为920℃保温18分钟，等温温度为260℃，时间90分钟。金相检查结果，无硼试样中有残余奥氏体（即白亮区）8—10%（参看B30图片00），而含硼从0.018%到0.06%的各组试样，均几乎看不到白亮区，参看图片15、16、17、18。

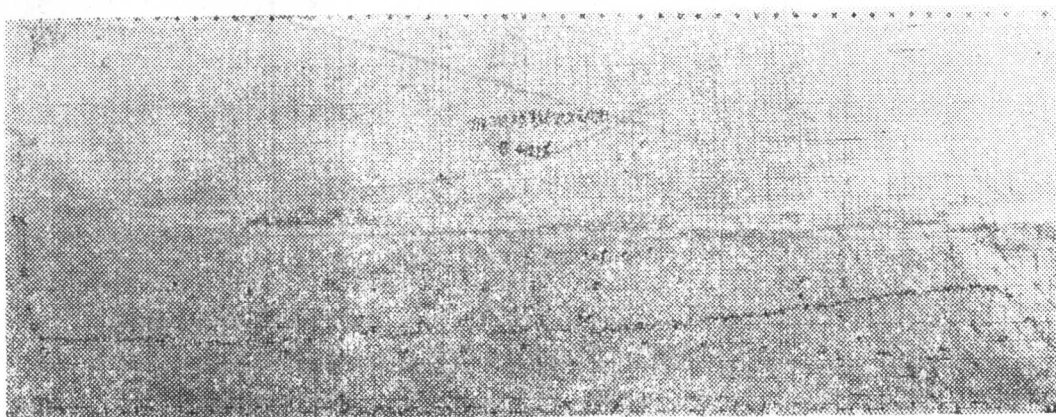
因此加硼可以细化贝氏体针，增加球铁的淬透性并使等温转变趋于彻底，显著减少白亮区，使厚大断面的内外组织趋于一致，硬度较为均匀。

（四）硼相结构和显微硬度：

在硼铸铁中我们对含硼碳化物的组成和结构进行了电子探针和X光结构分析，认为硼碳化物的组成相是合金含硼渗碳体〔1〕。在球墨铸铁中的“硼相”，我们用含B、0.081%经等温淬火后的试样和含B0.127%的铸态试样，分别进行X光结构分析，特微



（图18）含B0.081的贝氏体球铁X射线衍射图像



（图19）含B0.127%铸态球铁的X光衍射图像

峰曲线如图18、19所示，两块试样均显示出 Fe_3C 型结构，但用厚60mm大铸件的电解粉末分析时同时发现 Fe_2B 、 $(\text{CB})_6$ 及少量 Fe_2B (图17)结构，因此我们认为，在球铁中的硼碳化物仍含硼合金渗碳体，其类型为 $(\text{FeM})_3(\text{CB})_6$ (其中M为合金元素)。众所周知，渗碳体晶胞由16个原子组成，其中Fe原子12个，碳原子为4个，硼溶入渗碳体取代部分碳原子，取代数量可以由1到3，此理，对 $\text{Fe}_2\text{B}(\text{CB})_6$ 也适用。因此，硼碳化物的显微硬度也就不同，在硼碳化物中溶硼量多，显微硬度就较高。贝氏体硼球铁的硼碳化物中除熔有硼以外，还可熔入稀土、镁、钼、锰等元素，故球铁中硼碳化物的显微硬度稍高于灰铸铁中硼碳化物的显微硬度，其检测数据如表3所示。

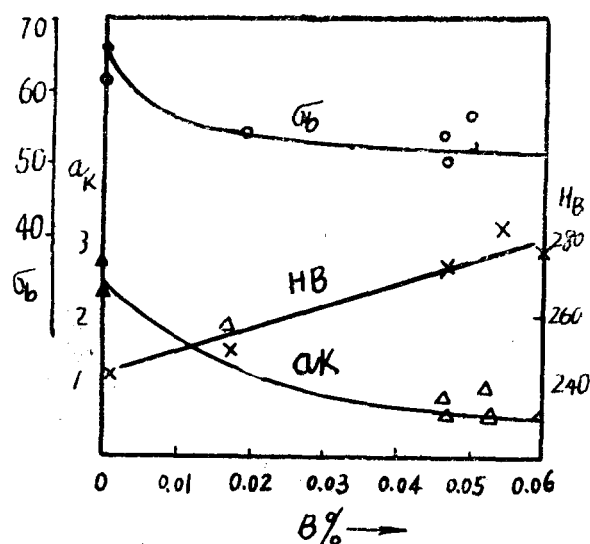
表 3

试 样 类 型	硼碳化物Hv	下贝氏体Hv	备 注
硼贝氏体球铁	1145 - 1225	609 - 623	载荷为50克
灰口硼铸铁	950 - 1180	——	

五硼对球墨铸铁机械性能的影响

调正含硼量对铸态硼球铁和硼贝氏体球铁性能的影响如表4所示，变化趋势如图10、11所示。等温淬火工艺为 920°C 保持18分钟， 260°C 等温90分钟。

由图表可以看出：



硼对铸态球墨铸铁机械性能

图 10