

硼钢研究文集

33-53

冶金工业出版社

硼 钢 研 究 文 集

冶金部钢铁研究总院 主编

冶 金 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书收集了在“冶金部第二届结构钢经验交流会”上交 流的关于硼钢研究的十四篇文章。内容包括关于硼钢生产、应用和研究的综合评述；硼在钢中的分布；硼相的溶解、析出规律及对硼钢性能的影响；对 硼钢韧性和断口的研究，对硼钢的混晶及非正常组织的研究；对15MnB高强度冷墩钢、20MnVB汽车齿轮钢及含稀土硼钢的研究，还有 回归分析法及径迹显微照相技术在硼钢研究中的应用等。

硼钢研究文集

冶金部钢铁研究总院 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 7 3/4 字数 204 千字

1981年3月第一版 1981年3月第一次印刷

印数 00,001~2,000 册

统一书号：15062·3567 定价 0.78 元

前 言

硼钢——以提高淬透性为主要目的而加入微量硼的碳钢及低合金钢，具有许多明显的优点。在钢中加入硼可以节约大量贵重的合金元素，明显改善钢的淬透性、机械性能以及冷变形等性能并降低钢的成本等，因此硼钢受到各国广泛的注意，几十年来发展很快。

我国自开始生产硼钢到现在的二十多年时间里，硼钢的生产不断发展，应用范围也日益扩大，在工农业生产和国防建设中都发挥了一定的作用。因此也推动了硼钢的研究工作，特别是最近几年，许多工厂、科研机关、高等院校等，对硼钢的研究十分积极、重视，进行了许多较深入、细致的工作，收到了很好的效果。一九七八年在贵阳召开的“冶金部第二次合金结构钢会议”上，对硼钢的研究工作进行了交流和讨论。会上提出的有关硼钢的研究报告，与以前相比，不但数量多，内容广泛，而且研究水平也有较大提高，这是十分可喜的。

为适应我国加速实现四个现代化、大力发展国民经济的需要，加强硼钢的生产、应用和研究工作，是十分必要的，以使这一立足国内资源、价廉的材料在国民经济中，特别是在汽车、拖拉机、农业机械、冷变形紧固件等方面获得更广泛的应用。

为了相互学习，交流经验，更好地促进硼钢生产、应用及研究工作的开展，会议决定以贵阳会议的研究报告为基础，编辑了这本《硼钢研究文集》，并由冶金部钢铁研究总院担任主编工作。

由于时间仓促，编者水平有限，文集中可能存在的问题和缺点，敬候广大读者批评指正。

编 者

目 录

加强研究工作, 促进硼钢发展

——试谈我国硼钢的生产、应用和研究·····	1
用径迹显微照相技术研究钢中微量硼的分布·····	23
40MnB钢 $M_{23}(CB)_6$ 的溶解、析出规律及对性能的影响·····	43
硼在铸钢中的分布·····	62
硼在奥氏体中的溶解度及硼钢的韧性和断口的研究·····	82
硼析出相与壳层状硼脆断口	
——关于中碳含硼结构钢脆化机理的讨论·····	103
稀土元素和硼在25MnTiBR钢中的作用·····	119
25MnTiBR钢中奥氏体晶粒粗大及混晶问题的研究·····	139
低合金渗碳齿轮钢中的粒状贝氏体组织·····	151
钢中“非正常”组织的研究·····	168
转炉低碳锰硼系高强度冷墩钢 15MnB ·····	184
20MnVB汽车齿轮钢的研究 ·····	200
用回归分析法研究20MnMoB钢中残余的Al、Ti及N含 量对B收得率的影响·····	214
用回归分析法研究 20MnMoB 钢的成分控制·····	224

加强研究工作，促进硼钢发展

——试谈我国硼钢的生产、应用和研究*

北京钢铁研究总院 祖荣祥

由于硼钢具有一系列优点——只要极少量的硼（一吨钢只需几克），就能显著提高淬透性，节约大量贵重合金元素，获得优良的机械性能，冷变形性能和切削加工性能等等，因此它一诞生就受到广泛的注意。四十多年来，尽管它走过的道路是曲折起伏的，但总的来看发展还是很快的。特别是最近十几年，出于节约合金元素、能量，降低成本，提高性能等目的，以及生产技术的进步，新型试验设备的出现等原因，对硼钢的发展产生了有力的促进，使硼钢再趋活跃，产量不断增加，研究工作也有很大进展。从表1可以看出，近年来美国碳硼钢的产量及在合金钢总产量中所占的比例都是逐年增加的。

我国镍、铬、钼等元素目前仍供不应求，而硼资源丰富，因此发展硼钢的意义很重大。纳入合金结构钢标准 YB 6—71 的硼钢有17个，在世界各国中是最多的，原因也在于此。

美国碳硼钢的产量（单位：万吨）

表 1

项 目 年 份	1970	1973	1974	1976
C-B 钢	1.52	2.07	2.48	7.6
合 金 钢	1141.71	1433.08	1510.04	1296.9
$\frac{\text{C-B 钢}}{\text{合 金 钢}} (\%)$	0.133	0.145	0.164	0.586

* 本文所谈硼钢系指利用硼的淬透性效果的低合金钢和碳钢，不包括加硼的不锈钢、耐热钢及原子能用钢等。

我国从1957年炼出第一炉工业硼钢以来，在这期间研制出了一大批结合我国资源、性能较好的钢号。据不完全统计，各钢厂生产过的硼钢近50种。在硼钢的生产、使用等方面积累了不少经验，研究工作也取得了一定的成绩。

但是，我国硼钢的发展，远不能适应生产建设的需要，与国外水平相比，也有较大差距，必须引起足够的重视，并尽快采取措施，迅速改变这种状况，使其发挥更大的作用。

一、硼钢的生产

1. 冶炼

冶炼是硼钢生产中非常重要的一个环节。怎样将极微量、化学性质又极活泼的硼加入钢中，使酸溶硼在钢中既保持一定的数量（酸不溶硼愈少愈好），而且尽可能地均匀分布，以保证硼充分发挥出其应有的作用的确是个难题。尽管早在二十年代初就已经发现硼提高淬透性的作用，但因为找不到正确的加硼方法而未能得到实际应用。直到1937年美国解决了这一问题，才生产出世界上第一炉工业硼钢^[1]。

硼与氧、氮结合力很强，一旦生成硼的氧化物、氮化物，硼将失去其作用。为了保护硼，加硼前必须充分脱氧、定氮，这已经成了冶炼硼钢的关键所在。为此在加硼前应先加入与氧、氮结合力比硼更强的铝、钛、锆等元素。这是一直沿用至今的经典法。

在经典法中加硼方式大致有两种。一种是硼与铝、钛等分别加入，即先加铝脱氧，后加钛定氮，最后于炉中或钢水包中加入硼；一种是硼与保护元素制成复合硼铁合金，一次加入。最常使用的这种合金之一的成分是：20%Ti，13%Al，4%Zr，8%Mn，5%Si，0.5%B^[2]。

迄今我国硼钢几乎全部用电弧炉冶炼，而且按经典法的第一种方法加硼。一般操作都是先插铝(1~1.2公斤/吨)，后加0.05%Ti（不计烧损）、再于炉中插0.003%硼（不计烧损），充分搅拌（即所谓的“三加三搅”制度）后出钢。

但是，由于加Al、Ti及硼铁的操作不同，加Al、Ti前钢水氧、氮含量不同，所以钢中残留Al、Ti量波动很大，以致硼的收得率、钢的性能很难保持稳定。这从表2所列数据看得很清楚。冶炼20MnMoB时，既使加入相同数量的Al（0.12%）、Ti（0.05%左右）；硼的收得率却相差极大，最高的达76.4%，最低的只有4.5%，这样的钢性能自然波动很大。

造成这种现象的原因之一，很可能与用电炉冶炼有关。因为电炉钢的含氮量比较高，一般约为0.008~0.016%（表3），而且不稳定，如表2，钢中氮含量的变化范围达到0.0051%，因此硼回收率波动很大。

Al、Ti、N量对20MnMoB钢硼收得率的影响 表 2

炉 号	冶炼时加入量(%)			成品钢中含量(%)				硼收得率 (%)	钢材性能
	Al	Ti	B	Al	Ti	N	B		
3632-3	0.12	0.052	0.0032	0.050	0.037	0.0032	0.0017	53.1	良 好
3653-4	0.12	0.050	0.0031	0.048	0.032	0.005	0.0013	46.1	良 好
3315-3	0.12	0.053	0.0050	0.046	0.025	0.0027	0.0025	50.4	良 好
3357-3	0.12	0.055	0.0055	0.064	0.042	0.0027	0.0042	76.4	合 格
2582-3	0.12	0.051	0.0037	0.023	0.02	0.0067	0.0009	24.3	淬透性不合
2656-2	0.12	0.050	0.0042	0.040	0.02	0.0078	0.0002	4.5	很 差
2663-2	0.12	0.054	0.0045	0.035	0.022	0.0065	0.0006	13.3	很 差
2500-2	0.12	0.051	0.0037	0.042	0.025	0.0060	0.0011	29.17	淬透性不合

不同炼钢炉冶炼的钢中氮含量及硼的回收率 表 3

炼 钢 炉	氮 含 量 (%)	硼 回 收 率 (%)
平 炉	0.004~0.008	40~80
电 炉	0.008~0.016	30~80
酸性转炉	0.014~0.018	
碱性底吹转炉	0.01~0.03	
纯氧顶吹转炉	0.002~0.004	50~80

另外与加硼方式也有关。Al、Ti、B分别加入，不能使硼充分受到保护，不但降低硼的回收率，而且硼分布不易均匀。

对经典法中的两种加硼方式，Szuch 等进行了研究^[3]。结果表明，加入复合硼铁的钢，淬透性比加入简单硼铁的钢好（图 1）。因为复合硼铁含硼量低，合金比重大，容易加入，故损耗少，而且每个细小的硼颗粒都可得到钛、铝、锆等元素的充分保护，就能保证硼有较高的收得率和分布均匀。

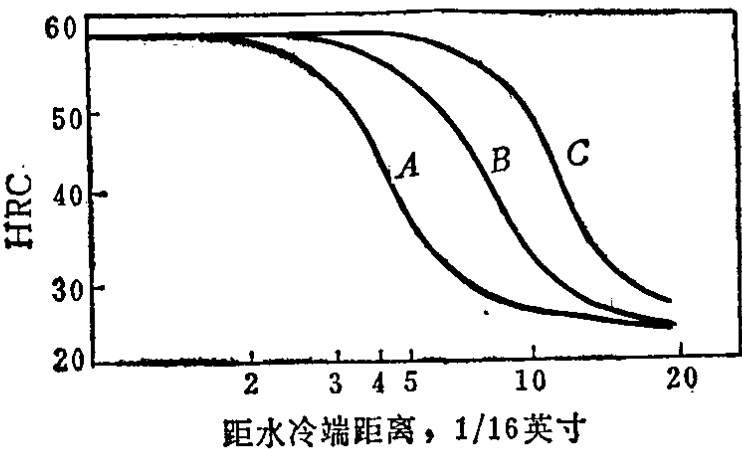


图 1 两种硼合金对SAE1047钢淬透性的影响⁽³⁾

A—不加硼；B—加简单硼铁；C—加复合硼铁

国内一些钢厂也曾试验用复合硼铁合金冶炼硼钢，效果较好，钢的成分均匀，性能稳定。但并未大量应用于生产，实是很可惜的。所用的五号复合硼铁合金的规定成分及对三炉进行成分分析的结果见表 4。

吉林铁合金厂生产的五号复合硼铁合金的成分(%) 表 4

元 素	C	Mn	Si	B	Ti	Al	Zr
规 定 成 分	<0.2	<4	5~9	0.5~3	17~27	9~17	1~4
分 析 结 果	0.106	1.97	4.72	2.56	21.67	12.67	1.94
	0.10	1.93	4.10	1.24	20.19	14.37	2.16
	0.07	1.59	5.28	1.04	18.39	13.98	

为保证钢中有足够数量的硼，不少工厂都逐步提高加钛量。有的研究报告也提出“提高加钛量到 0.08%”，“允许不含钛的 40MnB 钢残余 Ti 量不大于 0.06%”等等。这样高的残钛量对充分固定氮，保护硼，提高硼的收得率可能有好处，但对钢的一系

列性能也会带来危害，这是不能不引起注意的。国外许多研究表明，钛对钢的韧性有很不利的影响，即使在保持淬透性所需的最低含量下（0.02~0.03%），对很多钢，特别是低碳、高强度钢的韧性也很有害。如邦武立郎等证明，当 $Ti \geq 0.01 \sim 0.02\%$ ，80公斤级高强钢即发生显著脆化，冲击转变温度上升〔4〕。所以提高加钛量时必须十分谨慎。

国外在硼钢的冶炼中采用了一些先进的技术、设备。如真空除气、真空碳脱氧、测定钢水中氧、氮含量后，真空加入复合硼铁，并进行电磁搅拌等等。这样可以准确地控制各元素的含量，稳定硼的收得率，使硼在钢中分布均匀，从而得到淬透性带极窄，性能稳定的硼钢。我国目前的设备就显得陈旧，工艺也落后，这也是钢质较差的原因之一。所以今后应尽快采用先进的技术设备，才能显著提高硼钢质量。

电炉硼钢不仅硼波动较大，而且耗电量大，生产率低，成本高。因此，就我国目前情况来看，用电炉冶炼成分简单、使用量大，价格要求低廉的硼钢是非常不合适的。

一些钢厂也试验了用平炉冶炼硼钢。齐齐哈尔钢厂自1966年以来先后在碱性平炉上炼过九种硼钢。据1970~1975年统计，生产量达两万多吨。平炉钢含氮量较电炉钢低，约0.004~0.008%（表3），质量比较稳定，产量也大，但从长远观点看，平炉也不是发展方向，近来已有渐被取代之势。因此用平炉生产硼钢也不一定比电炉优越。

从表3可以看出，各种钢中以纯氧顶吹转炉钢的含氮量最低，仅为0.002~0.004%，硼的回收率最高，而且稳定。首都钢铁公司用30吨顶吹氧气转炉试炼15MnB，12Mn3B，收到很好的效果。生产的24炉15MnB钢（共600多吨），各种气体含量均很低，氮均在0.0050%以下，氢约0.00016~0.00025%，氧约0.0030%左右，去磷效果为70%，一般地硅<0.05%，磷<0.015%，硫约0.015~0.025%。硼收得率稳定，酸溶硼和全硼很接近，大多在0.0022~0.0032%范围内，钢的各种性能都很好。在冶炼

12Mn3B钢时，还进行了加钛与不加钛的对比试验。结果发现两者的光谱硼、酸溶硼、硼的回收率几乎是一样的。这样就有可能避免由于加钛而给钢的性能带来的一些不利影响。但因试验炉数还少，目前尚不能肯定地说纯氧顶吹转炉冶炼硼钢可以不用加钛，但这种可能性是存在的。而且，与电炉钢相比，目前残钛量已经下降到0.01~0.03%的范围了。

氧气顶吹转炉还具有成本低，产量高等许多优点，自问世以来发展很快。在日本，由于纯氧顶吹转炉的发展，已使平炉于1977年底完全从特殊钢生产中退出，现在日本的特殊钢有60%是用转炉生产的〔5〕。我国今后氧气顶吹转炉也必然会大大发展，因此用转炉生产硼钢很有前途，是今后的发展方向。

硼的作用主要是提高淬透性，硼钢特别重要的一项性能也就是淬透性。淬透性不稳定，给生产和应用将带来很大困难，如影响热处理变形，机加工效率、热处理后的性能以致零件寿命等等。所以控制硼钢的淬透性一直为人们所重视。国外早已有所谓的H钢，亦即保证淬透性的钢。美国将硼钢的H钢列入AISI、SAE标准已有25年以上的历史，保证淬透性的硼钢一直稳定地供应市场。日本汽车工业学会在1974年制定的硼钢标准中也列入了H钢〔6〕。

国内一些单位也提出希望钢厂供给一部分保证淬透性的硼钢。这种要求无疑是合理的，但限于生产条件、技术资料，还很难立即实现。一些单位现正进行这方面的研究和积累资料的工作。一旦能做到这一点，对保证硼钢的性能，推动硼钢的应用是非常有利的。

2. 热加工和热处理

硼钢以微量的硼代替了数量较多的其它合金元素，与淬透性水平相当的其它合金钢相比，合金总量低，高温变形抗力小，故容易塑性变形。硼钢的氧化皮松散易掉也有利于热加工。所以总的来看硼钢的热加工性能是较好的，热加工工艺也是比较简单的。

正是由于这种原因，人们往往对硼钢的热加工不太重视，较多地看到了硼钢易于热加工的一面，而忽视了不利于热加工的一面；只看到硼钢与其它许多低合金钢相似的一面，而忽略硼钢在热加工方面必须注意的一些特点。据了解，一些工厂对硼钢热加工工艺，如锻、轧加热温度、保温时间、变形量、终加工温度及随后的冷却速度等等，一般不太认真考虑，慎重选择，至于较深入、系统的研究，就进行得更少了。

热加工这一环节对硼钢组织、性能的影响之所以非常大，除了一般的塑性变形能显著改善钢材的组织之外，还因为在从钢锭到最终制成各种零件的整个过程中，热加工的温度在所有各种加热中可以说是最高的，因此对硼在固态钢中的各种存在形态之间的变化，其影响也是最大的。

一些研究^[7]指出，当钢中含硼量超过0.007%时，在晶界出现低熔点的Fe-C-B三元共晶，则产生热脆性而使热加工性能变坏。虽然一般硼钢中的硼量远小于0.007%，但由于生产控制不当，或因硼的偏析，也可能造成全体或局部区域的硼接近或达到这一数量而恶化热加工性能。所以对含硼量高或硼偏析较严重的钢进行热加工时就应当注意了。

硼钢的热塑性变形程度，钢锭重量、加工成品尺寸等对钢材韧性有很大影响。变形度愈大，硼在微体积内的分布愈均匀，沿晶界分布的硼相网被破坏得愈彻底，则钢的塑性、韧性也愈好。所以硼钢，特别是硼较高时，要慎重选择锭型，变形量，以获得优良性能。

应当严格控制热加工的加热温度及停锻、轧温度不要过高，保温时间不要过长，加热次数尽量减少，加工后尽量快冷。这是因为：

(1) 温度愈高则晶粒粗大，晶界减少，沿晶界析出硼相的可能性增加。有的研究还指出，加热温度愈高，在其后的冷却过程中硼相愈容易析出。上野正胜等^[8]所做的研究指出（图2），尽管经750°C保温再于500°C恒温转变的条件相同，但从1350°C冷

却时硼相沿晶界析出，而从1000℃冷却时并无硼相析出，因而两者相变的速度也不同，有硼相析出者相变速度加快。

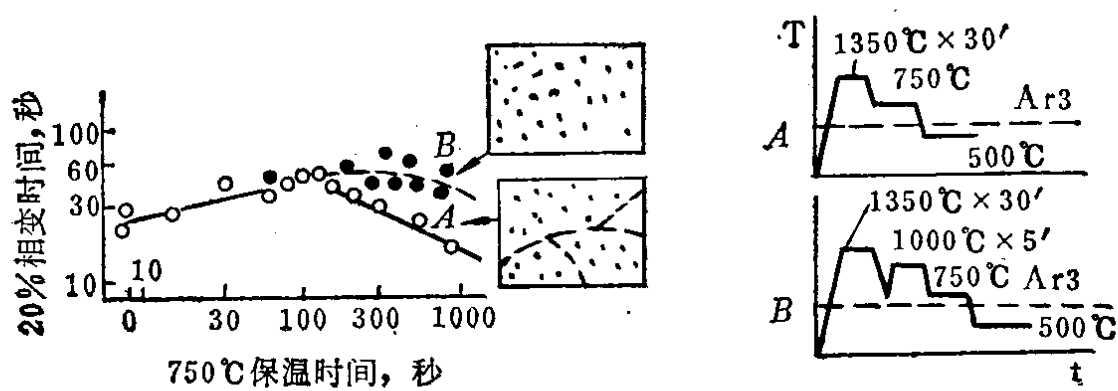


图 2 加热温度对硼相析出及相变速度的影响
(○—热处理 A；●—热处理 B)

(2) 高温、长时加热容易引起脱硼，即使采取有力的措施，如表面镀金属、在经过相当彻底脱氧的氩气中加热等，也很难完全避免。只有在 10^{-5} 托真空中加热，才能有效防止脱硼〔9〕。

(3) 热加工后冷却愈慢，硼相析出量愈大，粒度愈大〔10〕。而且热加工温度在钢的整个热历史当中是最高的，此时形成的硼相在以后按正常温度淬火、正火、退火时都很难改变，因而给钢的性能带来危害，特别是对韧性不利。

现在进行热加工时，有的或者为使钢尽量软化，易于锻造，或者由于控制、检查不严，锻轧加热温度往往过高，保温时间很长，停锻、停轧温度也较高（有的超过1000℃），而后的冷却速度又不注意控制（当然也受设备条件限制），使脱硼和硼相析出现象非常严重，给最终热处理后的性能埋下隐患。

国内外，尤其是国内对硼钢热加工方面的研究较少，资料不多，这还可能与大多数硼钢是用经典法冶炼的有关。随着硼钢的发展，特别是一些新的冶炼方法的采用，对这方面的要求会愈来愈高，相应的研究工作也会予以更大的注意。

硼钢热处理虽不复杂却很重要。在热处理过程中除去与一般

的钢相同的组织变化之外，硼的存在形态、分布特征等也发生变化，从而对钢的各种性能发挥不同的作用。所以硼能否起到应有的作用，在很大程度上取决于热处理制度的选择和操作情况。

许多研究^[11,12]都指出，当固溶硼为某一数量（或范围）时，对应有最佳淬透性，过量或不足都使淬透性下降。为得到这一最佳数量的固溶硼，除冶炼、热加工应满足一定的条件外，热处理制度必须很好选择。如淬火应在热加工后直接进行，或中间正火后进行，而不应退火后再在较低温度下淬火^[13]，以防止大量硼相析出，降低固溶硼量而损害淬透性。同样道理，淬火温度亦应根据钢的含硼量、化学成分、淬火前硼的状态等等条件来选择，而不应总是固定不变。

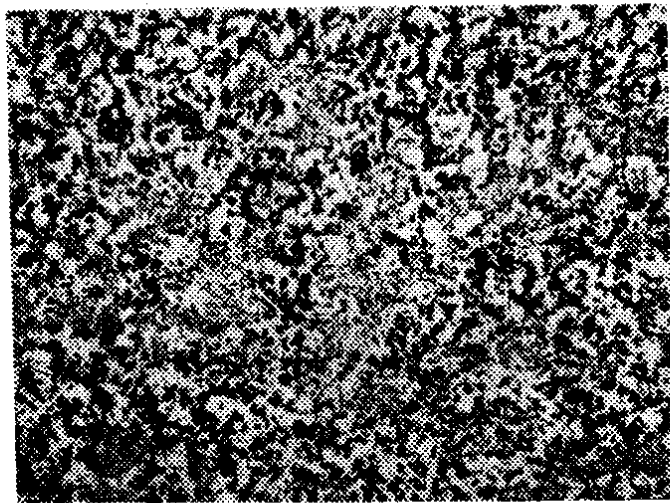
目前大多数工厂淬火前都不正火。但许多研究和实际经验已经证明硼钢在淬火前增加正火极有好处。特别是经较高温度（一般 950°C 以上）正火，可以消除或减轻硼相，改善硼钢淬火、回火后的性能。因此建议将预先正火这一条纳入有关的硼钢标准中，以保证性能稳定。

一些使用硼钢的单位提出，硼钢在机加工前，为降低硬度而进行正火之后，常出现粒状贝氏体组织（图 3），使材料机加工性能变坏，不仅影响产品质量，而且增加刀具损耗，降低生产效率。这种组织的出现虽与成分有一定关系，但与正火后的冷却速度亦有极密切的联系。许多单位的研究结果都指出，正火后冷速过快会产生这种组织，而采用退火或缓冷正火可以完全消除或大大减少这种组织。也应指出，粒状贝氏体组织并非硼钢所特有，其它许多钢中也可能出现，不能把出现这种组织视为硼钢的固有缺点。

至于退火处理，对硼相析出特别有利，因此除特别需要外最好不用，尤其不应退火后再在较低温度下进行淬火。

对于热处理工艺及其对硼钢组织、性能的影响，不少单位都曾做过一些研究，但鉴于热处理的重大作用，今后还必须大大加强这方面的研究和实验工作，还应特别强调，不但要制订合理的

热处理工艺制度，而且在操作时还必须严格遵守，认真执行。



(a) $\times 100$



(b) $\times 400$



(c) $\times 500$

图3 20Mn2TiB钢热轧空冷后的粒状贝氏体组织(a、b)
和经退火消除粒状贝氏体组织后得到的铁素体
+珠光体组织(c)

二、硼钢的应用

硼钢的一系列特点，规定了它的应用范围。硼加入钢中的主要作用是提高淬透性，这种作用可用硼的淬透性系数 f_B 来表示：

$$f_B = \frac{D_{1B}}{D_1} \quad (1)$$

D_{IB} 和 D_I 分别为含硼和不含硼(其它化学成分、晶粒度完全相同)的钢, 在理想淬火之后心部含有50%马氏体组织的直径。

但 f_B 的变化却相当复杂, 它与碳、硼含量、热处理等都有关系。Rahres^[14]整理出来的 f_B 与碳量的平均关系式是:

$$f_B = 1 + 1.5(0.9 - \%C) \quad (2)$$

由(2)式可知, 随着碳量增加, f_B 值减小, 亦即硼的作用减弱, 到共析成分附近, $f_B = 1$, 硼的作用为零。另外, 共析碳量减小, 硼的作用自然也变小。因此钢中含有较多其它合金元素, 特别是Cr、Mo等, 使共析碳量降低, 因而影响硼的作用。

所以硼加入低碳、低合金钢中效用最显著。正是基于这种原因, 各国硼钢的碳和合金元素含量都较低, 特别是C-B, C-Mn-B 钢受到愈来愈多的重视, 最近发展尤其迅速。

这种特点也使硼钢特别适用于较小截面的工件, 对大型工件效果不大, 因此为保证淬透性大型工件还必须同时依靠其它合金元素。所以充分利用Mn-B提高碳钢的低淬透性, 用于较小截面工件, 而把Ni, Cr, Mo等贵重元素用于更需要的高级材料中去, 以便更合理地利用资源, 充分发挥硼钢的优越性, 这几乎是目前各国都在考虑的问题。

在发展和应用硼钢时应当充分考虑到这一特点。

目前我国硼钢主要用于调质、渗碳零件方面, 在弹簧钢方面应用较少, 而作为冷变形用钢还开始不久。

中碳硼钢40MnB、40MnMoB、40MnVB、45MnB等, 被用来代替40Cr, 45Cr等钢, 调质处理后制造汽车、拖拉机等轴类及各种机械零件。20MnVB、20Mn2TiB、20SiMnVB、25MnTiBR等代替18CrMnTi、22CrMnMo、20Cr等, 渗碳热处理后制造各种齿轮, 使用效果都不错。

第一汽车厂至1973年止, 共使用40MnB、20Mn2TiB等钢约4万吨, 制造解放牌汽车二十万辆, 节约纯铬400多吨。用40MnB代40Cr制造转向节、二轴等零件; 用45MnB代45Cr制截面较大的轴件; 用20Mn2TiB代18CrMnTi制造变速箱及后桥齿轮。对

500辆锰硼钢试验车使用情况调查结果表明，硼钢零件寿命与铬钢相当，损坏形式相同，完全可以代替铬钢，正式用于生产。

20MnVB 和 18CrMnTi 钢齿轮的弯曲疲劳寿命 表 5

材 料	试 验 齿 轮	编 号	齿轮损坏的循环数 ($\times 10^4$ 次)
20MnVB	主 试	A_1	16.78
	陪 试	B_1	11.65
18CrMnTi	主 试	A_2	9.24
	陪 试	B_2	8.45

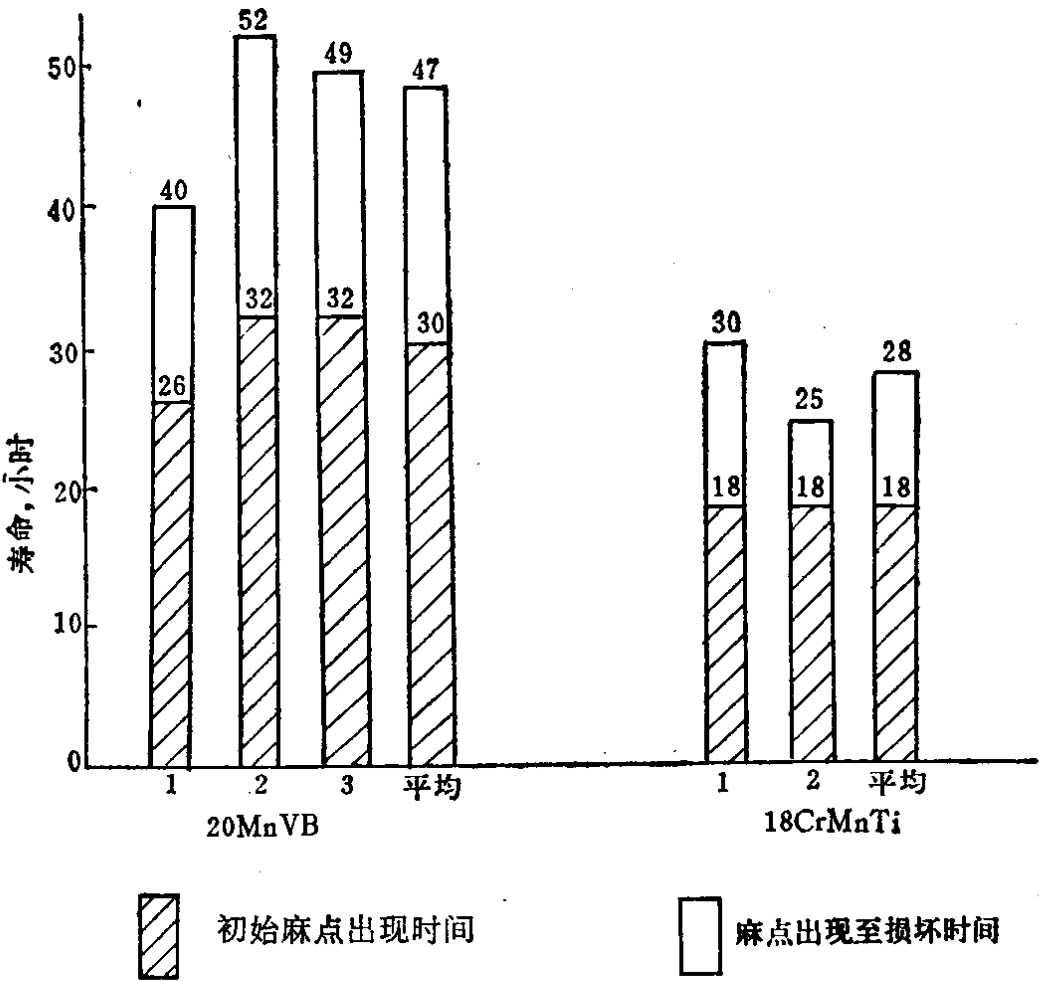


图 4 20MnVB与18CrMnTi钢齿轮接触疲劳寿命比较
(试验负荷105公斤·米，为主被动齿轮所能传动最大扭矩80%)