

国外低合金钢.合金钢

(1991-1995)

(总11-15集)

冶金部钢铁研究总院

TG 142.33-53

G 22

国外

低合金钢、合金钢



(总第11集)

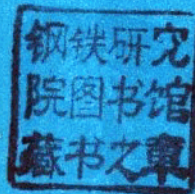
✓ 进口

送

1981-1985

11-15号

1991



冶金部钢铁研究总院

226069

国外低合金钢、合金钢

(内部发行)

1991年(总第11期)

主办: 冶金工业部
科学技术司
钢铁研究总院

编辑者: 冶金部钢铁研究总院
出版者: 《国外低合金钢、合金钢》编辑部
地址: 北京学院南路76号(100081)
印刷者: 北京百善印刷厂
发行者: 本刊编辑部

前 言

为配合《八五》国家重点科技攻关课题，大力发展我国的低合金钢和合金钢，冶金部科技司委托钢铁研究总院在《八五》期间仍继续编译出版《国外低合金钢、合金钢》情报资料，供有关单位和人员参考。

1991年出版一集，约22万字，内容包括综述、能源用钢、交通运输用钢、化工化肥用钢和工程机械用钢五部分。文章的选取力求密切结合《八五》攻关的实际需要，又考虑到未来发展动向。本资料对从事低合金钢和合金钢生产、使用、科研和教学人员很有参考价值。欢迎订购。《七五》期间出版的十集尚有少量剩余，仍可订购。

由于编译者水平有限，错误和不当之处，欢迎读者提出意见和批评。

编 者

1991年7月

[Handwritten signature]

目 录

一、综 述

汽车用钢铁材料的进步和展望	(1)
综合性能优良的含硼耐磨钢	(7)
汽车用钢的近期发展	(13)
沉淀硬化铁素体-珠光体 (AFP) 钢的发展	(19)
微合金HSLA钢的性能和加工处理	(24)
09Γ2C钢性能的改进与应用	(29)
锅炉和化工用高强度新型不锈钢管的开发	(34)
高强度低合金钢产品的发展	(39)

二、能源用钢

用作水力设备和泵叶轮的铸钢G-X5CrNi134和G-X5CrNi174的腐蚀疲劳强度	(43)
Cr-Mo-V钢锻件的蠕变变形和蠕变破断	(48)
寒冷地区石油管线用钢的炉外复合精炼	(52)
625合金复合UOE钢管	(53)
高韧性高强度厚钢板的生产方法	(55)
低温韧性好的高强度钢材的生产方法	(58)
低硬度低屈服比的高强度钢管的生产	(60)
22ΓЮ钢焊接钻管的耐蚀性	(62)

三、交通运输用钢

船舶推进器用沉淀硬化型不锈钢	(64)
汽车末端齿轮的感应加热表面淬火	(66)
无间隙原子钢的开发与应用现状	(68)
冲压成形性优良的冷轧钢板的生产方法	(70)
超深冲用冷轧钢板的生产方法	(72)
加工性能优异的冷轧钢板的生产工艺	(75)
局部变形能力优异的高强度冷轧钢板	(77)
韧性好的直接淬火型高强度钢板	(80)
低屈服比高强度钢板的生产工艺	(84)
高强度高韧性钢材及其生产方法	(86)
汽车用热轧钢板	(89)

四、化工化肥用钢

尿素设备用03Cr18Ni13Mo2.5钢和02Cr25Ni22Mo2N钢的腐蚀研究	(94)
--	--------

钙对Cr-Ni-0.7N不锈钢热加工性能的影响	(97)
耐蚀钢的脱磷问题	(101)
X7Γ28钢和X7Γ32钢的机械性能	(103)
在天然海水中长期暴露的低合金钢、高合金钢和涂层钢的耐蚀性能的研究	(106)
确保钢管所需延性的冷轧参数的测定	(109)
耐热高强度低合金钢	(111)
耐海水腐蚀性好的不锈钢厚板及复合钢板	(114)
性能得到改善的粉末冶金阀门钢的生产	(117)

五、工程机械用钢

破碎机耐磨部件用钢	(121)
破碎机部件用高韧性耐磨铸钢	(123)
低锰耐磨钢及其生产方法	(125)
含有2.1%C、12%Cr的耐磨铸铁	(128)
适合于硬钎焊的深冲用薄钢板	(129)
变形时效处理对09Γ2C+12X18H10T双层钢及其焊接接头韧性的影响	(132)
低磷含量对30CrMoNiV511耐热钢韧性的影响	(134)

汽车用钢铁材料的进步和展望

耿文范

(冶金部钢铁研究总院)

1. 前言

汽车工业对钢铁材料性能和质量的要求日益提高,而且需求量也不断增多。因此,汽车工业的发展促进了新钢种的开发和钢的生产工艺的改进。现代公路用车辆必须满足多方面要求,仅就所用钢板来讲,从加工性能特别好的软质钢板到高强度钢板种类繁多。新开发的品种有冷成形性良好的180~260N/mm²屈服强度级钢板。特别值得注意的是烘烤硬化钢和高强度低合金无间隙原子钢。在运货汽车方面,应予特别重视的是形变热处理的热轧带钢。通过采用高屈服强度钢减薄壁厚可使车辆轻量化,有利于减少燃料消耗,提高有效载荷。另外,在提高车辆行驶安全性和防污染环境等方面,对现代汽车用材料的要求也日益提高。估计钢铁材料

在汽车工程中今后仍将占据十分重要的地位,但是对于钢铁材料性能的要求,正在发生着迅速而巨大的变化,具有多功能特性的钢种将成为汽车工程中最重要结构材料。本文综述日前发展的几个重点材料。

2. 钢板

表1列出了新开发的水淬、回火高强度钢的成分和机械性能⁽¹⁾,其屈服强度可达 $\geq 60\text{N/mm}^2$ 。这类水淬高强度钢主要是由氧气转炉吹炼后经过钢包精炼和真空处理生产的,可以热轧宽带卷形式的薄带材产品或以四辊轧机生产的水淬薄板形式产品供货,主要用于制造起重机和运货汽车。为了获得适宜的供货状态组织(具有低碳马氏体和细晶贝氏体组织),可根据对产品厚度和规定最低屈服强度的要求,而在这种钢中添加各种

表1 水 淬 细 晶 结 构 钢

钢 号	蒂森公司钢号	化 学 成 分, %						
		C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	其它 \leq
StE 430V	A 537 C1.2	0.22	0.40	1.30	0.15		0.20	0.25Cu
StE 460V	XABO 47	0.15	0.40	1.20		0.20	0.40	
StE 500V	XABO 51	0.15	0.40	1.20		0.20	0.40	
StE 550	N-A-XTRA 56	0.20	0.60	0.80	0.70	0.20		
HY 80	HY 80	0.18	0.30	0.30	1.40	0.40	2.50	
StE 620	N-A-XTRA 63	0.20	0.60	0.80	0.80	0.30		
StE 690	N-A-XTRA 70	0.20	0.60	0.80	0.80	0.30		
StE 690	T1	0.20	0.30	0.80	0.50	0.50	0.90	0.05 V 0.003B
HY 100	HY 100	0.20	0.30	0.30	1.40	0.40	3.00	
StE 890	XABO 90	0.18	0.30	0.70	0.60	0.30	1.70	0.07V
StE 960	XABO 96	0.18	0.30	0.80	0.70	0.40	1.80	0.07V

钢号	蒂森公司钢号	机械性能 (30mm厚钢板)				
		屈服强度 N/mm ²	抗拉强度 N/mm ²	断裂延伸率 %	脆性转变温度 ℃	缺口冲击能 J
StE 430V	A 537 C1,2	430	550~690	22	-68	27
StE 460V	XABO 47	460	580~730	17	-40	30
StF 500V	XABO 51	500	620~770	16	-40	30
StE 550	N-A-XTRA 56	550	670~820	18	-60	27
HY 80	HY 80	550	—	20	-84	81
StE 620	N-A-XTRA 63	620	740~890	17	-60	27
StE 690	N-A-XTRA 70	690	790~940	16	-60	27
StE 690	T1	690	760~900	16	-46	20
HY 100	HY 100	690	—	18	-84	74
StE 890	XABO 90	890	940~1100	16	-60	27
StE 960	XABO 96	960	1000~1130	15	-40	27

合金元素，如锰，钼，铬，镍，钒和硼等。

新开发的最低屈服点在 220 和 340N/mm² 之间的抗时效 FHZ 钢⁽²⁾，它与热浸镀锌钢板的性能比较示于图1，FHZ 钢的拉伸屈服强度较低而延伸率较高。高的延伸率和较低的 R_e/R_m 屈服强度比，说明这种新钢种

具有良好的冷加工性。该钢的机械性能波动范围是很窄的，类似于热浸镀锌深冲钢。这就说明了即使是很难压锻成形的部件也能使用 FHZ 钢板制造。这种 FHZ 钢板是在高强度热浸镀锌钢板的基础上发展成功的，因为发现在热浸镀设备上有可能实现淬火时效，从而通过钢成分和工艺参数的最佳化，开发了无间隙原子的或者是在热浸镀后加以过时效处理的加磷和加铌合金化的钢种。

蒂森钢铁公司目前生产的适合客车和运货汽车用的成形性良好的热轧钢板产品⁽³⁾的强度范围为 250~900N/mm²。图2示出了所有具有良好韧性和制造性能的钢种。图3举例说明了钢在使用性能上的改进效果。

美国伯利恒钢铁公司开发了几个适于制造汽车车身的烘烤硬化性抗撞凹性钢种⁽⁴⁾，这几个钢种之间的主要差别在于成形

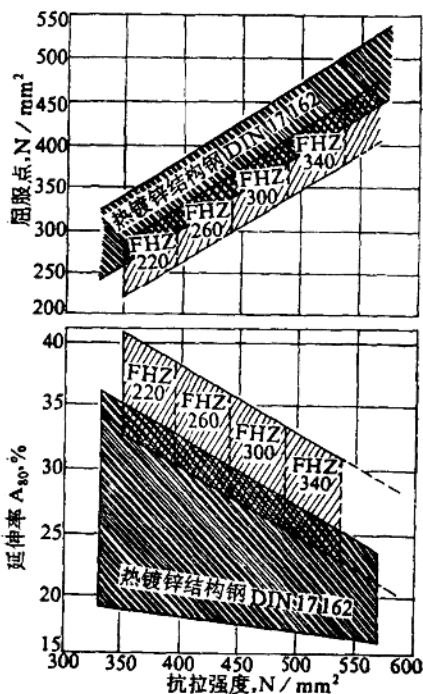


图1 FHZ钢的性能与热浸镀锌结构钢的比较

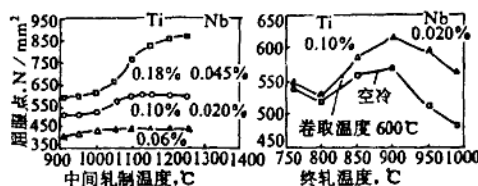


图2 轧制参数对微合金化热轧钢带屈服强度的影响

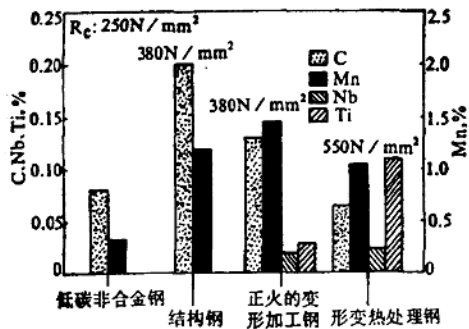


图3 热轧带钢和薄板钢的合金化效果原理图

加工性和屈服强度的高低。尽管德国赫施钢铁公司开发的这类钢减薄了钢板的厚度，但由于其烘烤硬化效果而提高了它的抗撞凹性能（见图4）。日本川崎钢铁公司^[5]通过适当控制钢中C、N、S、酸溶Al等含量和轧制制度，开发出加工性和烘烤硬化性优良的热轧钢板。

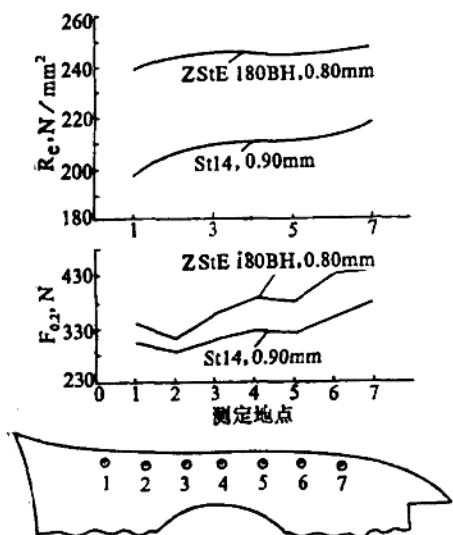


图4 汽车翼子板的屈服强度和抗撞凹性
(与塑性压凹0.2mm深坑有关的力)

奥钢联开发的高强度冷轧薄板钢ALFORMBH具有如下特性^[6]：①在室温完全不时效，加工者可以指望这种钢甚至经过半年以上的长期室温储存后机械性能和烘烤硬化性仍十分稳定，屈服强度也不会提高；②性能均匀度高；③由于垂直各向异性r和

延伸率A₀值高，保证了优良的可成形性；④焊接性优良，烘烤硬化钢实际上具有如同深冲钢一样的焊接性；⑤在纯氢气氛中高对流退火后表面清洁度很高。

日本川崎钢铁公司的开发者们指出^[7]，降低超深冲冷轧薄板钢的碳含量能改进r值和塑性，但仅仅通过降低碳含量(至20ppm)并不能获得足够高的机械性能。为了将残余碳稳定化需要添加强碳化物形成元素。在同样的加工工艺条件下，加钛钢比加铌钢具有更好机械性能。往加钛钢中同时添加少量铌，可得到细晶热轧带钢，从而减小了机械性能的平面各向异性。钛-铌钢的机械性能随着连续退火温度(760~880℃)的提高而提高，高温退火能显著改善机械性能。r值很高的钢和塑性很好的钢分别可由高钛钢和低钛钢来获得。新型EDDQ钢(即超深冲优质钢)已被用于制造集成汽车零部件，例如汽车大侧架和形状复杂的油盘。

苏联中央钢铁研究所的研究者指出^[8]，目前受到重视的碳当量约为0.06的C-Si-Mn钢(含碳0.2~0.4%)，在贝氏体区短时间等温保温后在γ+α相区加热热处理形成残留γ含量≤20%的显微组织。这种γ相不论在室温还是在低温冷却至-100℃时都是稳定的。这种钢的冷轧薄板是汽车用超高强度结构材料。

在汽车制造工程中涂层钢板的用量也是相当大的，改进涂层钢板质量也是当前的重要课题。目前无间隙原子钢无论如何也难以完全满足现代汽车用涂层钢板的要求，因为它有如下的一些缺点，如在光整冷轧过程中过低的压力不能充分平整，而且在镀锌层扩散退火过程中必须严格控制温度。这就增加了获得优质涂层的难度。为此，开发了一种新型超低碳钢，并且在这种钢中的碳只有一部分同铌结合。还发现钢中的游离碳对于生产更可靠的镀锌扩散退火涂层钢板的益处是很显著的^[9]。

3. 锻件等使用的结构钢

在发动机、传动系统、转向装置以及轮毂等方面使用的高级结构钢（如图5所示）具有优良的使用性能和工艺性能，估计今后在汽车制造中仍将保持其关键地位^[10]。

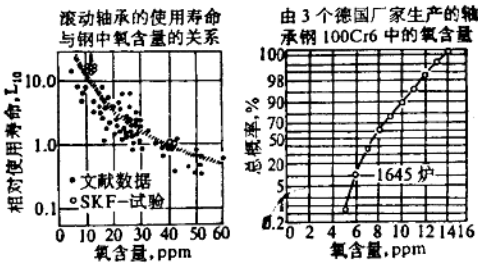


图5 减摩轴承的使用寿命与减摩轴承含氧量的关系

锻造发动机部件和底盘部件用的沉淀硬化铁素体-珠光体钢已被推广应用于运货汽车的转向节轴（从淬火回火 41CrS4 改为 38MnSi VS5, BY），运货汽车前桥梁（由淬火回火的 30MnCr B5 或 41CrS4 钢改为 27MnSiV S6+Ti, BY）以及汽车焊接结构，锻造轴承架/驱动桥壳（由 16MnCr5 淬火回火钢改为 27MnSiV S6+Ti, BY）^[11]。

日本神户钢铁公司^[12]研究了低碳含硼钢的化学成分、热锻条件和锻后冷却速度对于钢锻件强度和韧性的影响。被研究的钢成分(%)在下列范围内变化：C 0.06~0.18, Si 0.25~1.05, Mn 1.5~2.5, Cr 0.5~1, Mo 0~0.25, Nb 0~0.04。实验条件是在再加热温度 1250℃、锻造温度 1200℃、锻造比为 75% 和锻造后立即水淬的基础上在较宽的范围内进行变化。研究结果表明，水淬钢获得了优良的强度和韧性的匹配，其夏比冲击值比抗拉强度为 100~140N/mm² 的试样要高出 10N/cm²。

德国蒂森特钢公司和克虏伯钢公司对于汽车部件用硼钢的研究^[13]指出，硼在钢中的溶解量在 0.001~0.004% 范围内可达到提高钢淬透性的最佳效果，但是硼对氮的亲

力很高，如果形成硼的氮化物就会失去硼的提高钢淬透性的效果，故必须避免。发现铝和钛是防止硼形成氮化物的有效元素。图6示出了钢中添加铝或铝+钛之后能获得最佳加硼（在 0.001~0.005% 范围内）效果所容许的钢中含氮量。

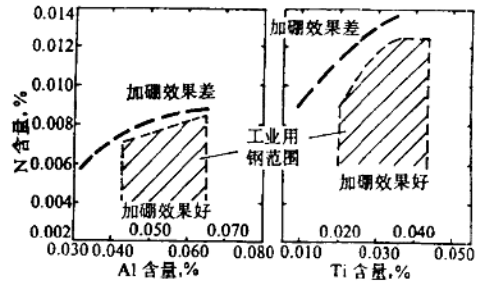


图6 钢中铝和钛含量对加硼效果的影响

硼已用于提高含碳 < 0.8% 的非合金钢以及含碳 0.2~0.4% 的合金钢（例如 26NiCr-MoV8 5 或 20NiCrMo 14 6 钢）的硬度。硼合金钢特别适合冷加工。因此，这类钢已用于生产长期使用的紧固件。迄今，强度级在 8.8 的螺钉已越来越多地采用含硼合金钢来制造。由于 32CrB4 钢的良好淬透性已被用于制造强度级为 10.9 和 12.9 的螺钉。

苏联中央钢铁研究所研究了加热温度（1000~1200℃）和变形温度（800~1200℃）以及加工变形量（20~70%）对汽车锻件（温锻和控制锻）用钒-铌钢显微组织和机械性能（包括不同钢的高温强度与温度的关系、断口形貌转变温度、疲劳性能）的影响^[14]。结果表明，低温加工（或温加工成形）能够使钒-铌钢形成铁素体-珠光体组织，其铁素体和珠光体晶粒尺寸 ≤ 12~14 ASTM 晶粒度，且韧性高达 1.0~1.2MJ/m² 和脆性断口转变温度低于 -40℃。

F. Leroy 等人^[15]研究了由锻造和切削加工制造的发动机部件用钛钙微合金化钢，指出这类钢通过控制夹杂物（氧化物和硫化物）含量能够比单纯加硫更加有效地改善切

削加工性。今后有可能通过三元显微组织控制来生产最佳化的加钙、钛微合金化钢。这种三元显微组织控制是：①控制钛的氮化物和碳氮化物析出，从而控制晶粒度并造成最小的刀具磨损机制；②控制含0.02~0.1% S的不同钢种中硫化物的形状、成分和分布状态，从而确保切屑的脆化和碎化。由于氧化物涂层以及自润滑相能够沉积在刀具表面上防止铁沉积物引起的扩散损伤，所以能减少由于氧化物对刀具的磨损；③通过精确的过程控制（包括加铝脱氧后的特殊钙处理）可

控制氧化物的形状、大小和状态。

4. 不锈钢和耐热钢

近年来，由汽车的外装件到排气系统部件用的功能材料已成为不锈钢和耐热钢应用的重要领域。为适应汽车发展的需要也在不断开发性能更好的新型不锈钢和耐热钢。

德国蒂森特殊钢公司与克虏伯钢铁公司对运货汽车用不锈钢作了大量研究^[16]。运货汽车用的最重要的不锈钢有DIN 17440和DIN 17441，还有新型铁素体不锈钢。这些不锈钢的化学成分列于表2，适合于各种用

表2 不 锈 钢 的 化 学 成 分 (wt%)

钢 号	C	Cr	Mo	Ni	其它元素
1.4512	≤0.08	10.5~12.5	—	—	Ti6×%C~1.00
1.4003	≤0.03	10.5~12.5	—	0.3~1.0	Ma0.5~1.5, N≤0.03
1.4589	≤0.08	13.5~15.5	0.2~1.2	1.0~2.5	Ti0.30~0.50
1.4301	≤0.07	17.0~19.0	—	8.5~10.5	—
1.4541	≤0.08	17.0~19.0	—	9.0~12.0	Ti5×%C~0.80
1.4401	≤0.07	16.5~18.5	2.0~2.5	10.5~13.5	—
1.4571	≤0.08	16.5~18.5	2.0~2.5	10.5~13.5	Ti5×%C~0.80

途，例如油罐汽车、大客车和集装箱等。X2Cr11或 Nirosta 4003不锈钢，是克虏伯钢铁公司专门作为耐蚀结构材料而开发的一种新型铁素体不锈钢^[17]。X2Cr11不仅材料成本低廉，而且还具有下列特性：高的动态和静态强度；良好的焊接性；容易加工成形；良好的耐磨性和耐蚀性。这类钢的性能主要是由于含有大约11.5%的铬并添加少量的锰和镍所赋予的。钢的碳和氮含量被限制在很低的水平。这种不锈钢的最低屈服强度为320N/mm²，大大高于其它不锈钢（例如DIN17 440/17 441）。

汽车排气系统是使用耐热钢、不锈钢的主要部位。汽车排气消声系统材料要承受由于下列因素所引起的复杂应力状态：①高温（高达950℃）；②腐蚀（主要是由于内部腐蚀性冷凝液所引起的）；③疲劳载荷（经常是在高温下）。国际社会对汽车排放有毒

气体的控制要求日益严格。为消除有毒气体，目前采用三元催化净化器是最有效的方法。一般说来，排气系统可以分为高热负荷区和严重湿腐蚀区。为了确保这种高效催化净化系统的功能，必须采用确保具有足够高的耐高度侵蚀和热应力的材料。

铬镍奥氏体不锈钢一般都具有较高的延伸率，加工性能比较好，并且还耐热，所以在高温下使用比较稳定。然而这类不锈钢有两个重要缺点，一是热膨胀系数高（例如Nirosta 4541铬镍不锈钢在20至600℃之间的热膨胀系数为18.5×10⁻⁶mm/m·℃）；另一个缺点是价格高。铁素体不锈钢则不存在上述奥氏体不锈钢的缺点，热膨胀系数小而且价格低廉。早期开发的铁素体不锈钢（如Nirosta 4509等）有加工性差的缺点。德国克虏伯钢铁公司新开发的铁素体不锈钢DIN 1.4512^[16~18]具有更高的耐蚀性和高

温强度,而且加工成形性也好。在成形性良好的Nirosta不锈钢基础上,进一步开发出两个改良型新钢种,一是Nirosta 4520 Zr·Ti·Nb适用于要求高温强度的区域;另一个是Nirosta 4520 Mo适用于要求高度耐湿腐蚀的区域[18]。

为了使不锈钢在900℃以上的高温下具有优异的抗氧化性,日本日新钢铁公司发现至少要含有18%的铬,并且添加至少0.8%的锰对改善表面氧化膜的粘附性很有效。就高温强度来说,添加适量的铌是有效的,但是增加碳会使铌的溶解量减少,以致强度降低。如果添加的铌过量,则会增高焊缝的热裂纹敏感性。根据上述结果开发出一种新型铁素体不锈钢Fe-19Cr-1Mn-0.45Nb[19],该钢在高于900℃的温度下具有很好的高温抗氧化性和高温强度。

德国VDM镍技术公司发展的“Aluchrom”合金(Fe-Cr-Al合金)[20]已在汽车排气系统催化技术领域中使用了许多年。该合金比陶瓷材料具有更多的优越性,如静态和动态强度较高,耐交变热应力好,而且导热性也较好。使用40~50μm厚的薄箔既可少占空间又增加了固定空间中的表面积。这类Fe-Cr-Al合金可以通过改变铝含量和通过添加稀土、锆和铌来改进其热性能,可望成为一种较廉价的实用材料。对于满足低的到中等的热性能要求(低的峰值温度,例如在速度有一定限制的大型发动机中)可以使用含合金元素较低的耐热钢Aluchrom W(Fe-15Cr-4.5Al)。如果使用温度较高(例如在小型高速发动机中)需要采用更高级的合金钢Aluchrom ISE(Fe-20Cr-5Al-0.02RE)和Aluchrom ILC(Fe-20Cr-5Al-0.18Zr)。由于铝含量增加到5%,并且还添加了稀土元素或锆,所以具有很好的高温使用性能。为了满足更高的要求(高的排气温度,例如在没有行驶速度限制的赛车中)则推荐使用加钨的高合金材

料Aluchrom Y(Fe-20Cr-5Al-0.06Y)。

德国蒂森特殊钢公司为了促进利用粉末冶金法生产传统的阀门钢,评价阀门钢的性能并与熔炼法生产的阀门材料进行比较[21]。当初采用了两个很普通的阀门钢X45CrSi93(DIN钢号No.1.4718)和X50CrMnNiNbN219(No.1.4882)进行了研究,结果证明了粉末冶金法生产的材料甚至还优于熔炼法生产的材料。图7示出两种方法所生产的材料在各种试验温度下10³h的蠕变断裂强度的比较。对于X45CrSi93钢,由粉末冶金法生产的钢的蠕变断裂强度值比熔炼法生产的材料要高得多。关于X50CrMnNiNbN219钢,则由两种方法所生产的材料,在蠕变断裂强度上只有很小的差异。

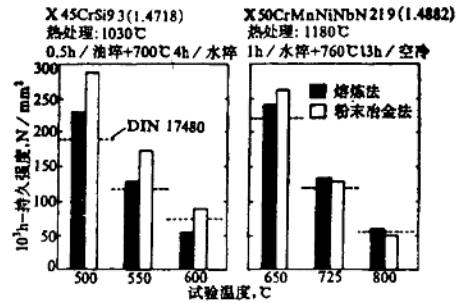


图7 不同方法所生产的阀门钢的10³h蠕变断裂强度的比较

5. 结束语

钢铁工业为满足汽车生产厂家对材料的需求,不仅限于供应制造质量好且经济的车辆用最佳钢种,而且还趋向于与汽车制造部门合作以便及时地提供符合汽车要求的半成品。钢铁厂家和汽车制造工业都必须接受和克服未来发展的巨大挑战。除了广大竞争者和超负荷的挑战外,还有来自对汽车产品提出的社会要求和生态学要求的挑战。

今后,随着对汽车性能和舒适性要求的不断提高,具有更高强韧性和更高耐蚀性的材料、色调新颖的表面处理钢板,以及具有特殊功能的新型复合材料(例如减振复合钢

板等)的开发和应用必将不断扩大。

参 考 文 献

- [1] J. Degenkolbe et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 44, 46~47
- [2] W. Bleck et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 14~16
- [3] W. Bleck et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 51~52
- [4] R. Pradhan, Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 18
- [5] 登板章男等, 公开特许公报, 昭64-191739
- [6] P. Stiaszny et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 102~103
- [7] H. Abe et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 113
- [8] N. M. Fonstein et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 101
- [9] A. Jouet et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 30, 33
- [10] D. Danckert et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 54
- [11] J. A. M. Hertogs et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 66~68
- [12] M. Katsumata et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 60~62
- [13] S. Engineer et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 74
- [14] A. A. Petrunenkov et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 56
- [15] F. Leroy et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 58~59
- [16] G. Hunscha et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 48
- [17] J. Federwisch et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 118~119
- [18] J. Federwisch et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 129~130
- [19] Y. Uematsu et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 77
- [20] U. Brill et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 134~135
- [21] B. Huchtemann et al., Stahl Eisen, 1990.9.14, Spec. issue, 69~70

综合性能优良的含硼耐磨钢

祖荣祥

(冶金部钢铁研究总院)

1. 前言

迄今耐磨金属材料的发展大致经历了四个阶段:最古老而著名的Mn13型高锰钢是第一代耐磨金属材料。这种材料在碰撞磨损和强烈冲击相结合的苛刻工作条件下能产生强烈的加工硬化,因而显示出良好的耐磨性。但是也存在许多不足。主要是原始硬度较低(小于布氏硬度HB220),如果在强烈冲击或碰撞磨损以前,在软性工作条件(即低应力磨损或滑动)下只产生一般的奥氏体加工

硬化,则很快被磨损。切削性差,限制了使用范围,主要用作铸件,不能进一步加工成形。这种材料如用来制作推土机刀片之类的工件,因在操作条件下接触面间比压力不大,不能产生强烈冷作硬化故耐磨性不高。始于本世纪30年代的镍硬铸铁属于第二代。其耐磨性优于Mn13钢,但是脆性大。第三代耐磨金属材料是本世纪70年代兴起的高铬铸铁(钢)。含有约11%以上的铬,其硬度为锰钢的10倍,故耐磨性极高,但脆性仍然较

大。为适应冲击韧性要求高的工作条件而出现了各种耐磨合金钢及金属复合材料——第四代耐磨金属材料。通过整体淬火回火的合金钢具有良好的综合力学性能，使工作在磨料介质下的耐磨性提高，可代替 Mn13 钢，效果良好。

土木建筑机械、矿山机械等使用的材料不仅因承受泥砂、矿石等硬颗粒的磨损而要求有极高的耐磨性，而且为满足生产制造、修理等要求而必须同时具备优良的成形性及焊接性。此外，对强度、塑性、韧性、抗延迟断裂性等也有很高的要求，所以必须具有全面的、优良的综合性能。欲满足上述要求是有相当大困难的。这是因为：第一，上述一些性能是相互制约、甚至是相互矛盾的。例如硬度对耐磨性有决定性的影响，提高材料硬度可增加耐磨性，但同时也会导致脆性和裂纹敏感性增大，塑性、韧性和加工成形性一般也随之变坏。且焊接性与耐磨性之间也存在着类似的问题。所以必须全面统筹和协调这些性能，才能达到满意的结果。第二，这类材料用量多，消耗大，因此得特别考虑经济性。这就要求材料的合金元素含量少，生产工艺简单，以降低成本。解决这一难题的可行的办法是采用含硼钢。因为硼在钢中所具有的独特行为使它对钢的各种性能产生独特的有利影响。

2. 硼对耐磨钢性能的影响

众所周知，硼能极大地提高钢的淬透性，而且所需数量极少。其作用为一般合金元素的几百倍乃至上千倍(0.0010~0.0030% 硼的作用分别相当于 0.6% Mn、0.7% Cr、1.5% Ni 的作用^[1])，所以用少量硼可取代大量合金元素，具有显著的经济效果，特别适合作为要求用量大、价格低廉的土木建筑及矿山机械等用的耐磨材料。

钢中加入硼后不但淬透性大为提高，而且硼钢可以采用水淬，既节省淬火用油又容易获得马氏体组织和高硬度，因而使含硼钢

具有良好的强度和耐磨性，只要硼含量合适、生产工艺恰当、保证完全淬透，就不会降低塑性和韧性，甚至还可以提高^[2]。所以在耐磨性良好的硬度范围(HRC50~60)内，硼钢的综合力学性能良好，在淬透性相同的钢中硼钢的淬火变形和开裂危险最小。

化学成分是决定钢加工成形性的主要内在因素之一。几乎所有合金元素都使钢的变形抗力提高，而碳的作用尤为突出。硼几乎是唯一不提高钢变形抗力的元素。由图1^[3]可以看出，钢中加入硼后并不改变碳量与变形抗力的关系，即不因加硼而提高变形抗力，可是淬透性却大大提高(尽管含碳量由 0.3~0.5% 降至 0.2% 以下)。

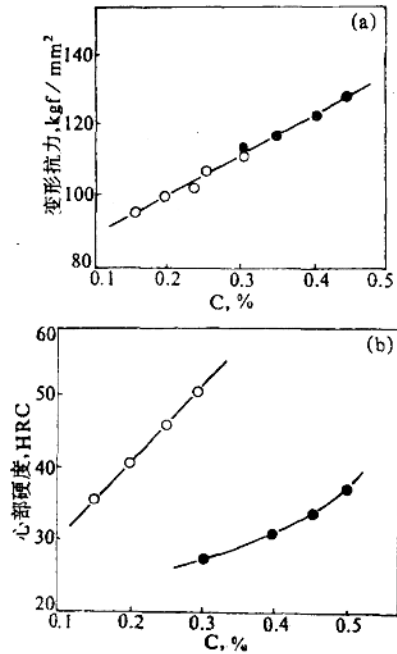


图1 碳钢(●)与含硼钢(○)φ20棒材球化退火后的变形抗力(a)和水淬后心部硬度(b)

对另一个重要性能——焊接性，硼也有十分有利的作用。决定钢焊接性的主要内因是化学成分，尤其是碳含量，故用碳当量 C_{eq} 和焊接裂纹敏感系数 P_{cm} 的大小可以间接地衡量钢的焊接性好坏：

$$C_{e,q} = C + \frac{1}{24}Si + \frac{1}{6}Mn + \frac{1}{5}Cr + \frac{1}{40}Ni$$

$$+ \frac{1}{4}Mo + \frac{1}{14}V (\%)$$

$$P_{c,m} = C + \frac{1}{30}Si + \frac{1}{20}(Mn + Cu + Cr)$$

$$+ \frac{1}{60}Ni + \frac{1}{15}Mo + \frac{1}{10}V + 5B (\%)$$

微量的硼可取代大量合金元素和降低碳含量,使碳当量 $C_{e,q}$ 大大降低,而仍能保证良好的淬透性,这样就可以解决钢材高硬度、高耐磨性和良好焊接性之间的矛盾。再从焊接裂纹敏感性来看。尽管计算 $P_{c,m}$ 的公式中硼项的系数为5,远远大于碳及各合金元素项的系数,但是钢中的硼含量却比钢中的碳及各合金元素的含量要少得多,所以硼对 $P_{c,m}$ 的影响仍然是极小的。例如,当钢中含碳量为0.35%时,为保证达到一定的淬透性系数($f=2$)所需加入的合金元素量及使 $P_{c,m}$ 值增加幅度之间的关系如图2所示。由图2可以看出,在使钢保持一定的淬透性的前提下,硼的加入量不仅比Mn、Mo、Cr低得多,而且因加硼 $P_{c,m}$ 的增量 $\Delta P_{c,m}$ 只有Mn、Mo、Cr的大约 $\frac{1}{3}$ 、 $\frac{1}{4}$ 和 $\frac{2}{9}$ ^[4],所以硼钢不

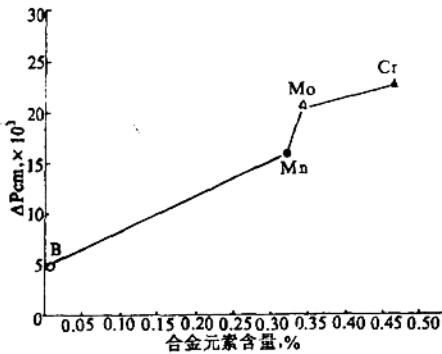


图2 合金元素含量与 $\Delta P_{c,m}$ 的关系

容易出现焊接裂纹。

图3表示焊前预热温度与 P_w 的关系^[5],

$$P_w = P_{c,m} + \frac{H}{60} + \frac{K}{40000} (\%)$$

式中H为材料的含氢量, K为焊缝拘束度。

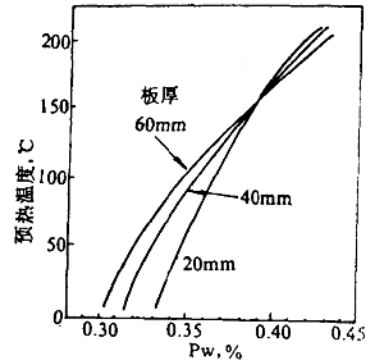


图3 P_w 值与焊前预热温度的关系

当H、K值固定时, P_w 仅由 $P_{c,m}$ 决定,故 $P_{c,m}$ 的大小也就决定了焊前的预热温度。由图3可知, P_w 值愈大,所需预热温度愈高。厚度为20、40和50mm钢板不需焊前预热的 P_w 应分别小于0.33、0.31和0.30%。若取 $K=10h$, $H=0.5cm^3/100g$,则 $P_{c,m}$ 应分别小于0.32、0.29和0.28%。

硼改善钢的焊接性大致通过两条途径:

其一是如上所述硼显著提高淬透性,从而可减少钢中碳及合金元素含量,使 $C_{e,q}$ 、 $P_{c,m}$ 、 P_w 值低、焊接性优良。一般,碳低于0.07%就基本上消除了零度以下焊接时的冷裂危险性。其二是加硼使铁素体晶粒细化,改善焊接区性能,尤其是韧性。因为含硼钢中的碳氮化钛(加钛时)和加铝硼钢焊接时氮化铝固溶、冷却时生成的氮化硼都可作为铁素体的相变核心,使晶粒细化。对第一条途径应注意控制含硼量及尽量降低氮含量。对第二条途径应有合适的硼氮比,当然还希望夹杂物呈弥散分布,保证有效细化铁素体而提高韧性。

对硼改善焊接性已有不少研究,并开发出许多含硼焊接用钢,制造压力容器、桥梁、海洋结构等,焊前预热温度大大降低,甚至不预热即可焊接^[6,7]。

3. 综合性能优良的含硼耐磨钢的开发及其应用

由于硼的上述特殊作用，利用微量硼，再配合少量其它合金元素，使钢具有低碳板条马氏体组织，并以弥散析出的碳化物强化，是获得强韧性、焊接性好的耐磨钢的有效措施。例如一种经济的低碳锰硼钢^[5]，其化学成分(%)为：0.13 C, 0.32 Si, 1.60 Mn, 0.0025 B, C_{eq} 0.429%, P_{cm} 仅为0.239%。具有优良的力学、耐磨及抗延迟断裂性能。厚度14mm的钢板经热处理后 $\sigma_{0.2} = 100 \text{kgf/mm}^2$ ($1 \text{kgf/mm}^2 = .8 \text{MPa}$), $\sigma_b = 115 \text{kgf/mm}^2$, $\delta = 23.8\%$, $9E_0 = 4.8 \text{kgf} \cdot \text{m}$, ($1 \text{kgf} \cdot \text{m} = 9.8 \text{J}$),

$T_c = 22^\circ\text{C}$ 。磨损对比试验结果表明耐磨性良好，磨损减重仅为SS41的65%。不经预热即可进行熔池极二氧化碳气体保护焊，无焊接裂纹。可用于多种工业机械、土木工程构件及推土机、压路机等耐磨零件。

英国钢铁公司每年生产硼钢10万吨以上，生产的中碳硼钢淬火回火后广泛用于土建工程。中碳锰硼钢(有时加入少量Cr、Mo)用于制造履带板，其硬度高，耐磨性好。其中几种具体成分及夏比V型缺口冲击性能见表^[8]。

日本各生产厂开发出大量含硼耐磨钢，

表1 C-Mn-B 钢履带板纵向夏比冲击性能

化学成分, %					冲击能, J						淬火后 硬度 HRC
C	Mn	Cr	Mo	B	860°C水淬后			淬火+200°C回火			
					-20°C	-40°C	-60°C	-20°C	-40°C	-60°C	
0.32	1.52	0.07	0.01	加入	14	19	18	18	20	18	52
0.28	1.15	0.34	0.11	加入	31	22	22	46	27	24	50
0.28	1.11	0.29	0.10	加入	35	27	22	35	28	28	48
0.28	1.08	0.29	0.11	加入	23	23	22	31	27	22	52

成分、热处理、性能等各有特点。从文献报道来看，日本在这方面的研究工作最为活跃，成绩颇为令人注目。

小松制作所生产多种含硼钢用于建筑机械、制造车轮及刀刃等部件^[9]。车轮的履带环要求耐磨及疲劳性能，可用Mn-B系强韧钢经调质加高频淬火、回火处理，基体硬度HB 331~388，表面硬度HRC 50~58，强度超过 120kgf/mm^2 。履带销要求高弯曲疲劳强度和高应力破坏强度，可用中碳硼钢制造，经喷水淬火、回火，HRC 58~63，弯曲疲劳极限大于 90kgf/mm^2 (50万周)。履带靴受到砂土严重磨损，使用Mn-Cr-B系强韧钢制造，经水雾淬火回火，HRC 45~53, $\sigma_b > 150 \text{kgf/mm}^2$, $a_k > 3 \text{kgf} \cdot \text{m/cm}^2$ 。刀刃类希望能达到HRC 56~60 (目前为48~54HRC)，而韧性则要求保持原有水平，

为此寄希望于提高钢的纯度及晶界强化等的炼钢、加工、热处理技术的发展。挖土机爪尖，可用SAE 86B30 (或Si-Cr-Mo系)强韧钢，淬火、回火后HRC 46~52, $\sigma_b = 170 \text{kgf/mm}^2$, $a_k 4 \sim 7 \text{kgf} \cdot \text{m/cm}^2$ 。推土机推板除因土砂磨损要求高耐磨性外，还须有良好的焊接性，采用Mn-Cr-(Mo)B系耐磨高强度钢板制造(如0.28 C, 1.74 Mn, 0.37 Si, 0.55Cr, 0.10 Mo, 0.0035 B)，热处理后HB为360~400, $\sigma_b = 120 \sim 140 \text{kgf/mm}^2$ 。部分钢号的化学成分列于表2^[4]。这些钢的含碳量都比较低，除硼外还含有Si、Mn或Cr等。这些元素的作用是辅助硼进一步提高淬透性，并产生固溶强化、析出强化等，以增加钢的强度、耐磨性。硼提高淬透性的机制与一般合金元素不同，硼钢特别适宜采用水淬这样的激烈冷却处理

表2

小松制作所的硼钢(含硼 0.0005% 以上)

钢 号	C	Si	Mn	Cr	其 它
SCrB430H	0.28~0.33	0.15~0.35	0.80~1.10	0.90~1.20	
SCrB435H	0.32~0.39	0.15~0.35	0.85~1.05	0.90~1.20	
SMnB430	0.30~0.33	0.15~0.35	1.20~1.50	<0.30	Ti 0.04以下
SHSC-2H	0.28~0.34	1.60~1.90	0.30~0.70	0.50~0.70	Mo 0.05~0.20

[10]。为防止可能的热处理变形,可采用压床、旋转等技术加以控制。SCrB430H可制造拖拉机、推土机等的大型履带板、掘进器杆。SCrB435H制造履带联杆、履带衬。SMnB430可制造小型履带衬、履带环等。

随着工作条件的苛刻化,要求建筑机械用钢有更高的硬度,如表面硬度高于400HB。为了适应这种需要,日本钢管公司通过适当调整碳、钛、硼、氮含量和改善淬火方法以最大限度发挥硼的提高淬透性的作用而开发了焊接性好、硬度高的NK-Everyhard系列钢[11]。该钢为Ti-B系,并分为标准型和合金型两种。后者成分中加入Mo、V并增加Cr以提高低温韧性和淬透性,保证板厚在 100mm 以内时达到所需硬度。在热处理中控制淬火冷速和冷却的终止温度,防止高硬度钢中容易出现的延迟断裂和淬火裂纹以及减少热处理变形。表3和表4分别为NK-Everyhard钢的化学成分和力学性能。这些钢表面硬度完全符合标准要求。各种钢的止裂预热

温度都在 25°C 以下,所以可不预热而直接进行焊接。拘束度大时,对硬度高的EH500(板厚为 40mm),手工焊的止裂预热温度为 175°C 。气体保护电弧焊的止裂预热温度比手工电弧焊要低得多,故焊接性相当好。

为解决耐磨性和脆性、裂纹敏感性之间的矛盾还开发了耐磨性、韧性皆优的含硼ARES70钢[12,13],其成分见表5。该钢因加硼不仅大大提高了钢的淬透性,而且热处理后的耐磨性、冲击性能比原用ARES70更好,但并不损害焊接性,制造耐磨件的工作寿命更长、并明显降低成本。这些钢的具体性能是:原用钢经 $150\sim 450^{\circ}\text{C}$ 回火后, $E_{\text{c}} \leq 1.0\text{kgf}\cdot\text{m}$,ARES70+B经 300°C 以下温度回火后大于 $2.1\text{kgf}\cdot\text{m}$, $\text{HV} \geq 455$ (要求值分别为2.0和392)。轧态下两钢耐磨性差别不大,但经相同热处理后则ARES70+B钢更优越(图4),这与其硬度间的差别是一致的。

住友金属公司进一步研制出可用于生产

表3

NK-Everyhard系列钢的化学成分(%)

类型	钢	板厚 mm	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ti	B
标 准 型	EH320	19	0.12	0.30	1.45	0.019	0.005	0.25	—	—	0.010	0.001
	EH360	19	0.15	0.34	1.44	0.020	0.006	0.25	—	—	0.006	0.002
	EH400	20	0.21	0.34	1.56	0.025	0.004	0.23	—	—	0.008	0.002
	EH450	19	0.27	0.33	1.48	0.020	0.005	0.21	—	—	0.008	0.001
	EH500	19	0.32	0.23	1.07	0.005	0.002	0.49	—	—	0.010	0.002
合 金 型	EH320A	19	0.10	0.35	1.27	0.019	0.005	0.63	0.21	0.049	0.013	0.001
	EH360A	19	0.17	0.26	0.95	0.014	0.003	0.61	0.22	0.043	0.014	0.001
	EH400A	20	0.20	0.35	0.95	0.015	0.001	0.59	0.22	0.044	0.010	0.001
	EH450A	20	0.26	0.30	0.99	0.018	0.006	0.58	0.21	0.045	0.011	0.001
	EH500A	20	0.30	0.31	0.64	0.014	0.001	0.91	0.22	0.044	0.012	0.001