

国外 低合金钢、合金钢

2

(总第4集)

1987

冶金部钢铁研究总院

前 言

为配合《七五》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，冶金部科技司和钢铁司委托钢铁研究总院在今后几年内，将有针对性地、不定期编辑出版《国外低合金钢、合金钢》情报资料，供有关单位和人员参考。

1986年已出版两个文集，每集各约30万字。这两集的主要内容为：工程机械用钢、汽车双相钢、齿轮钢、模具钢和不锈钢。1987年仍计划出版两集，第1集已在7月出版，第2集将在今年11月出版。内容分综述、低合金钢、合金钢、工艺性能和使用性能四部分。文章的选取，力求密切结合《七五》攻关的实际需要，又考虑到未来发展的新动向。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，每集定价3.00（个人订购1.50元）。

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，以便在随后的文集中加以改进，也欢迎向本刊投稿。

编 者

1987年11月

KAD74/0704

目 录

一、综 述

海洋结构用高强度低合金钢的发展——工业和试验钢长期暴露试验结果.....	(1)
重工业应用的耐磨材料.....	(9)
造船和港口用钢的现状与发展趋势.....	(14)
切削工具钢的技术发展动向.....	(21)
未来的宇航材料.....	(25)
最近的高温用复合材料.....	(28)
电力工业用材料.....	(32)
特殊钢水平连铸的发展和经验.....	(37)
微合金化元素铌在钢中的应用.....	(43)
极低温结构用无磁不锈钢.....	(51)
快中子增殖堆的开发与材料开发.....	(55)
硼钢应用的最新发展.....	(60)

二、低合金钢

高强度钢用于建筑的可能性.....	(71)
铁锈稳定化处理的 COR-TEN 钢的耐大气腐蚀性.....	(76)
可成形TS 980 MPa 级冷轧钢的生产.....	(79)
加工性良好的极薄热轧钢板.....	(83)
拉伸强度为80kg/mm ² 级的低碳贝氏体强韧钢的生产方法.....	(87)
含贝氏体的复合组织钢的强度和延性.....	(90)
耐硫化物应力腐蚀开裂的高强度钢.....	(97)
耐氨应力腐蚀破裂钢.....	(100)
硼对高强度厚钢板性能的影响.....	(102)
NKK 型低合金 HH 钢轨的开发.....	(106)
脱氧和变性处理对钢轨钢性能的影响.....	(113)

三、合 金 钢

表面渗碳钢的生产方法.....	(119)
以 Fe-Mn-V-C 为基可调整组织的新型经济耐磨钢.....	(121)
核电站用高强 Mn-Ni-Mo 钢 (SQV2B) 的机械性能.....	(124)
模具钢.....	(129)
新的冷作工具钢.....	(133)
火箭燃烧室用210kg/mm ² 级超高强度钢的开发.....	(138)

稀土元素对 SKH51 高速工具钢性能的影响.....	(141)
高硬度和耐热性好的低合金无钨高速钢.....	(145)
新研制的高耐蚀性填充材料.....	(148)
化工油轮用高强度高耐蚀不锈钢.....	(154)
杂质元素和工艺添加元素对 03X17H14M3 钢耐蚀性的影响.....	(160)
矿车用双层耐蚀薄板钢.....	(162)
尿素工厂建造用新型焊条.....	(165)
耐蚀工具钢 50X14MΦ	(170)
微量元素在核反应堆材料中的作用.....	(172)
耐磨低合金铸钢的性能.....	(176)

四、使用性能和工艺性能

小钢厂和特殊钢厂的主要设备——小方坯连铸机.....	(179)
冷挤压用特殊结构钢连铸方法.....	(182)
连铸 9%Ni 钢厚钢板的材质特性.....	(187)
碳和锰对冷轧钢板深冲性的影响.....	(192)
低合金高强度冷轧钢板的组织对工艺塑性指标的影响.....	(198)
钢的夹杂物和残留元素对焊接性的影响.....	(201)
高强度管线钢的氢致裂纹敏感性.....	(207)
用小型计算机预测钢的淬透性.....	(213)
TiN 离子注入的 M-50 轴承钢的腐蚀性能	(218)
冷拔钢同时进行热处理和超声波处理.....	(220)
缩短高速钢的退火时间.....	(222)
刀具的表面涂层.....	(224)
核废物处理装置用材的选择.....	(229)

海洋结构用高强度低合金钢的发展

——工业和试验钢长期暴露试验结果

F. Blekkenhorst 等

本文主要研究合金元素对海水中的均匀侵蚀、点蚀和缝隙腐蚀的影响。鉴于形成腐蚀防护层对于金属的腐蚀行为十分重要，因此本工作中也包括了对此类防腐层的性质和成分的研究。

材 料

本研究所用试验钢的化学成分和机械性能列于表1。试验钢可分为三组：

I) 由 Hoogovens 和 Hoesch 制备的14种试验钢；

II) 由冶金试验中心 (CSM) 制备的6种试验钢；

III) 从西欧生产厂家获得的15种工业生产的海洋结构钢。

第一组 (代号H) 中碳、铝、铬和钼元素的含量变化如下 (成分均为重量%)：

碳 (2个级别)：<0.01和0.15%

铬 (2个级别)：0和1.5%

铝 (2个级别)：0和1.5%

钼 (3个级别)：0、0.5和1.5%

最多可获得24种成分的钢。由于涉及到成本和实际困难，只选择了表2中所示的14种成分。非合金钢 (代号 H1) 只作为对比。

碳含量分别为0.15和<0.01%的试验钢是由 Hoogovens 和 Hoesch 冶炼的。钢锭加热到1250℃，轧成25mm厚，然后剖成片。将片轧至~3mm厚。最终尺寸为300×150×~3mm。最后，对高铝含量的钢按所要求的显微组织进行热处理。

H15、H16、H17、H21 和 H23 钢：在900℃加热5分钟；

H22和 H24钢：在650℃加热60分钟。

其他钢保持轧制状态，按照这种方法所获得的显微组织如表3所列。

第二组试验钢 (代号 C) 含有不同数量的碳、铝、铬、铜、镍、钼和锰。

第三组 (代号 I) 工业生产钢是为了与试验钢比较。II 和 III 组钢试样的尺寸为 300×250×~5mm。

试样的制备

暴露以前，所有试样均在带缓蚀剂 (Armohib 28) 的50℃的10% HCl中酸洗，以便去除铁鳞。酸洗后所有试样均用水和乙醇喷洗。

试样安装在可容纳294个试样的试验架上。图2 (略) 示出该试验架的照片。试验架用涂有环氧防护涂层的碳钢制成。为了防止电偶接触，试样用尼龙螺栓和螺母固紧，在试样和试验架之间垫有尼龙垫片。

每个试验架上的每种钢有5个试样作一般腐蚀和点蚀研究。缝隙腐蚀试验使用两对试样，每对包括2个用螺栓固紧在一起的试样。

暴 露

在北海选择了两个暴露地点：

1) 荷兰登赫尔德西北70哩45m深处；

2) 苏格兰东海岸90m深处。

每处均在海底安放了三个试验架。

由于在回收试验架时有一部分遇到了困难，因此只包括了下列暴露时间：

从45m深处：1.6、4.0和7.2年；

从90m深处：2.6年 (2个试验架)。

评定方法

表 1

试验钢的化学成分和机械性能

钢 代号	化 学 成 分 (重量%)										机 械 性 能*			注					
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	N	Nb	Sn		Ti	V	$\sigma_s, \text{kgfmm}^{-2}$	UTS, kgfmm^{-2}	$\delta, \%$
H1	<100	3100	5000	90	50	<100	4700	<100	<50	<100		300				34	42	20	
H3	<100	3500	5100	90	50	<100	4700	<100	<50	<100		310				42	50	18	
H4	<100	3400	5100	100	80	15000	4600	<100	<50	<100		460				45	53	19	
H5	<100	3500	5400	90	50	<100	15000	<100	<50	<100		400				42	51	18	
H6	<100	3300	4800	100	80	13800	16000	<100	<50	<100		500				58	65	15	
H10	1600	2300	5200	150	150	16000	4700	250	250	370		600				74	99	16	
H11	1400	2600	4900	170	160	340	14700	230	150	520		640				67	81	16	
H15	<100	3900	5200	100	90	100	5100	100	16000	200		560				56	61	11	
H16	<100	4000	5000	80	90	16000	4800	100	16000	200		560				44	50	13	
H17	<100	4000	5100	100	90	100	14200	100	15700	200		580				59	80	14	
H21	1500	2800	5600	120	150	340	5000	220	13000	370		600				77	99	15	
H22	1600	2600	5600	130	170	15600	4700	300	12800	390		600				62	91	12	
H23	1500	2600	5600	120	130	400	13700	210	13200	490		500				81	100	13	
H24	1600	2400	6400	160	160	15000	13700	300	12500	500	0.47	570	10	30	<10	64	66	24	
C1	420	2800	26100	80	90	280	100	200	10400	280	0.47	570	10	30	<10	64	77	20	B=20ppm
C2	210	3200	25500	60	110	10460	100	190	10500	190	0.57	<10	10	20	<10	>36	50	24	正火
C3	700	2200	20000	60	110	10200	100	2300	9500	3400	0.48	<10	70	20	<10	>36	52	22	...
C4	760	2300	6160	50	120	8500	100	1800	3000	3100	0.42	220	80	20	<10	>36	51	34	...
C5	750	2700	5840	60	110	9500	100	190	3200	160	0.45	210	70	20	<10	45	60	32	...
C6	1680	8000	6600	100	120	9800	4300	290	2300	50	0.47	10	...	30	<10	>64	77	20	正火
T1	1180	4800	13600	90	50	700	140	670	290	720	0.76	270	150	30	80	>36	50	24	...
T2	1130	2500	9000	360	170	5500	350	3500	440	3000	0.81	100	130	20	540	>36	52	22	...
T3	1480	6000	9320	90	60	5500	3200	1420	5600	790	0.96	<10	140	260	<10	>70	80	22	...
T4	1860	3000	13400	200	110	250	100	130	250	240	0.65	670	50	30	470	>36	58	20	...
T5	620	2700	11500	100	130	180	100	9200	420	13200	0.53	680	10	10	<10	>36	58	20	...
T6	160	4300	13300	120	200	7200	100	150	280	110	0.57	<10	140	10	<10	>36	57.8	23	...
T7	1840	3200	11100	120	230	930	280	1700	180	2800	1.04	440	230	40	70	>36	57.8	23	...
T8	1900	4400	14400	260	120	160	100	380	600	3000	>0.67	100	40	30	90	>36	57.8	23	...
T9	1530	3400	13100	170	110	180	100	260	560	190	0.67	360	40	50	740	>36	57.8	23	...
T10	1700	3700	13600	220	150	190	100	260	550	410	0.61	350	60	50	80	>36	57.8	23	...
T11	10700	3400	14800	200	60	2100	100	200	440	2300	0.66	730	50	40	610	56	65	33	...
T12	1830	5400	16000	180	140	300	100	5600	540	160	0.69	<10	30	1870	150	47	57-74	17	...
T13	1460	3000	11700	320	30	690	100	770	200	1600	0.89	450	210	20	110	40	36	33	正火
T14	1640	4000	12600	140	160	540	100	340	70	520	0.49	490	70	30	70	50	52	...	正火+回火
T15	1650	500	7020	1290	220	370	100	4200	<50	5600	0.60	<10	160	<10	<10	38	38	...	乳剂状态

* $1 \text{ kgfmm}^{-2} = 9.81 \text{ MNm}^{-2}$, $\delta_{11} = 5\text{d}$ 试样所获得的 δ 。

表 2 Hoogovens/Hoesch 试验钢中合金元素含量(重量%)的因子设计

C	0.01						0.15					
Mo	0		0.5		1.5		0		0.5		1.5	
Cr	0	1.5	0	1.5	0	1.5	0	1.5	0	1.5	0	1.5
Al 0	1		3	4	5	6				10	11	
Al 1.5			15	16	17				21	22	23	24

表 3 Hoogovens/Hoesch 钢的显微组织

钢	状 态 *	显 微 组 织
H1	轧制状态	含变形岛(奥氏体?)的铁素体基底
H3	轧制状态	变形铁素体
H4	轧制状态	含岛(奥氏体?)的铁素体基底
H5	轧制状态	变形铁素体
H6	轧制状态	含岛(奥氏体?)的铁素体基底
H10	轧制状态	细贝氏体+铁素体岛
H11	轧制状态	含贝氏体的等轴铁素体
H15	900°C 5min, ac	粗大的部分再结晶铁素体
H16	900°C 5min, ac	粗大的再结晶铁素体
H17	900°C 5min, ac	粗大的部分再结晶铁素体
H21	900°C 5min, ac	针状铁素体+珠光体
H22	650°C 60min, ac	等轴铁素体+珠光体
H23	900°C 5min, ac	铁素体层+珠光体/贝氏体
H24	650°C 60min, ac	铁素体和珠光体层

* ac=空冷

用来评定各种形式腐蚀的方法如下:

均匀腐蚀

暴露期间的平均均匀腐蚀速率是根据重量损失利用下式计算的:

$$v_{\text{腐蚀}} = 10^{-3} (G_1 - G_0) / dA t \dots \dots (1)$$

式中 G_1 和 G_0 为暴露前后的试样重量(g)
(腐蚀产物用刷子清理, 在含缓蚀剂(5ml/l Armohib 28)的10% HCl中酸洗, 用水和乙醇冲洗, 然后干燥), 10^{-3} 系数是换算成正确尺寸的结果, d 是合金的密度 (Mgm^{-3}), A 是暴露的试样表面积 (m^2), t 是暴露时间(年)。

其结果是用多重回归分析法处理的, 计算得出下列公式的系数:

$$v_{\text{腐蚀}} = r_0 + r_1 (\%C) + r_2 (\%Al) + r_3 (\%Cr) + r_4 (\%Mo)$$

$$+ r_5 C (\%C * \%Al)$$

$$+ r_6 (\%C * \%Cr)$$

$$+ r_7 (\%C * \%Mo)$$

$$+ r_8 (\%Al * \%Cr)$$

$$+ (\%r_9 Al * \%Mo)$$

$$+ r_{10} (\%Cr * \%Mo) + e \dots (2)$$

式中 r_0 为通用平均值, r_{1-10} 为回归系数, e 为试验误差。

点 蚀

点蚀会影响到结构部件的机械强度, 在某些情况下穿孔时刻也就决定了结构的寿命。因此, 重要的是要能预测出经过某一暴露时期以后某一特定表面积内所出现的最大蚀坑深度(MPD)。对于在海水中的低合金钢, 可以看到在暴露试样的整个面积内不同大小和深度的蚀坑分布随钢种而变化。

Gumbel和Aziz指出，复制试样的MPD 是按照所谓的“极值分布”，也叫“Gumbel”分布而呈统计分布。通过应用极值统计就可以表征每类钢的点蚀行为，而且即使在暴露的试样数目和表面积不同的情况下也能对各种钢进行比较。方法如下：

测量某类钢的每一个暴露试样的 MPD。将这些值按照逐级增加的顺序和由 1 至 N（N=试样总数）的数目排列。某一试样中 $MPD \leq x$ 的出现机率可以表示为 $\phi(x) = n / (N + 1)$ ，式中 n 是按照 MPD 增加的顺序排列的 $MPD = x$ 的试样数。

可以引入一个 y 变量，它依分布参数而定，并通过下式与 $\phi(x)$ 发生关系，即

$$\phi(x) = \exp[-\exp(-y)] \dots\dots\dots (3)$$

极值分布理论预示者，只要 MPD 遵循 Gumbel 分布，y 和 x 之间就会出现直线关系。

通过试验测得的 MPD 值 x 可以利用极值

机率纸画出它与 y 的关系曲线。而极值机率与 y 和 x 都是直线关系（图 3）。倘若 $\phi(x)$ 是表面积为 A 的暴露试样 $MPD \leq x$ 的出现机率，那么 $MPD > x$ 的出现机率则为 $[1 - \phi(x)]$ 。这意味着，为了得出 $MPD > x$ ，平均就必须暴露 $1 / [1 - \phi(x)]$ 试样。这个数目就叫做相当于 $A / [1 - \phi(x)]$ 表面积的返回期，式中 A 为一个试样的表面积。这个表面积可以沿着极值纸的纵座标画出（图 3）。倘若要对某一暴露时期的不同低合金钢的点蚀行为作出评价，就必须对 x-y 图表中代表不同钢的直线加以比较。首先必须确定一个允许的 MPD。对于这个临界蚀坑深度 $x_{\text{临界}}$ ，最好的钢要有一个蚀坑深度超过 $x_{\text{临界}}$ 所需的最大预计表面积。另一个基本上得出同样结论的可能判据是从 x-y 图表中得出的单位表面积（即 1m^2 ）内所预计的 MPD。

蚀坑深度是利用刻度的测微计测定的，并根据一般侵蚀的影响进行校正。

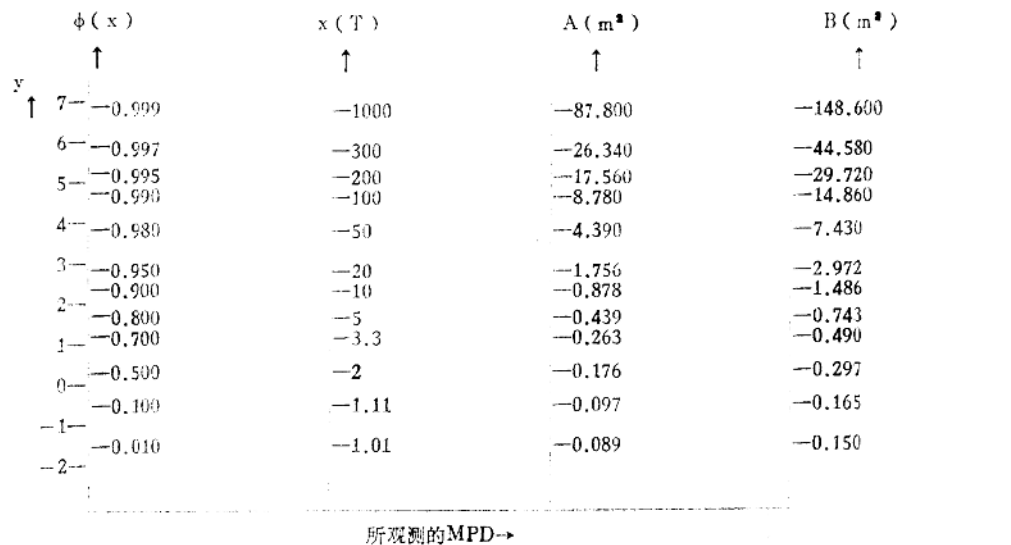


图 3 表示不同纵座标的极值机率纸：术语见公式（3）：MPD=最大蚀坑深度
 机率 $\phi(x) = \exp[-\exp(-y)] = n / (N + 1)$ 返回期 $T(x) = 1 / [1 - \phi(x)]$
 A=Hoogovens 试样的面积（ $0.0878\text{m}^2/\text{试样}$ ） B=冶金试验中心和工业试样的面积（ $0.1486\text{m}^2/\text{试样}$ ）

缝隙腐蚀
 缝隙腐蚀试验的方法是将两个试样用螺

栓连接在一起，在试样的邻近两侧之间留出
 一条小的缝隙。要特别注意防止试样和螺栓

材料之间发生电偶接触（用尼龙环和衬垫）。

对每台试验架上的每种钢安装两个这样的电偶试样。这种类型试验的结果只能是定性的，但是，如点腐蚀那样，试验的目的也是要对不同的钢加以比较。一个不利的因素是，有些试样不是扁平的，从而导致缝隙的尺寸发生变化。为此还检验了用来隔离试样和试验架的尼龙环部位的外观。这种方法能更好地显示出钢对缝隙腐蚀的敏感性。

结果

暴露以后的试样外观

暴露以后全部试样中的相当一部分都发现覆盖有海生物。对于暴露在90m深的钢，表面覆盖范围从10至30%；在这里覆盖物主要为苔藓虫门群体。暴露在45m深的试样，表面覆盖范围为10~80%，覆盖物主要为藤壶、管虫和海银莲花（图4，略）。大多数藤壶和管虫均聚集在锈层中。不论在哪个深度都没有发现钢种和生物污着量或性质之间有任何关系。

酸浸以后可以看到，所有高铝、低碳含量的H15、H16和H17均沿轧制方向的沟槽优先受到腐蚀。暴露时间越长，这种局部腐蚀就越明显，在暴露7.2年以后有些试样便穿孔。然而在暴露7.2年以后，上述钢同样试样的其他部分则未受到侵蚀（图5a，略）。

相反，高铝、高碳含量的H21和H23钢的表面则和不含铝的其他试验钢的表面一样光滑（图5b，略）。暴露7.2年以后，高铝、碳和铬含量的钢H22和H24的蚀坑大而深，从而导致穿孔（图5c）。暴露4年以后，沟槽腐蚀和大而深的蚀坑就已经变得较为明显。

一般腐蚀速率

一般腐蚀速率是在假定所有试样均得到回收的情况下根据暴露在45m深的试验架上5个试样的平均值和暴露在90m深的10个试

样的平均值而计算的。Hoogovens/Hoesch试验钢的一般腐蚀速率随暴露时间的变化如图6所示。高铬含量的H4、H6、H10钢和高铬、高铝含量的H16钢的性能最好，腐蚀速率为 $\sim 0.03 \sim 0.04$ mm/年。非合金钢H1的性能最坏，暴露不到四年，腐蚀速率即为 $0.11 \sim 0.12$ mm/年。暴露7.2年以后留下的原始表面积部分太少，以致不能准确评价。只含铝一种合金元素的钢（H3、H5和H11）也是属于试验钢中最坏的，但是，随着暴露时间延长，性能似乎有点提高的趋势。

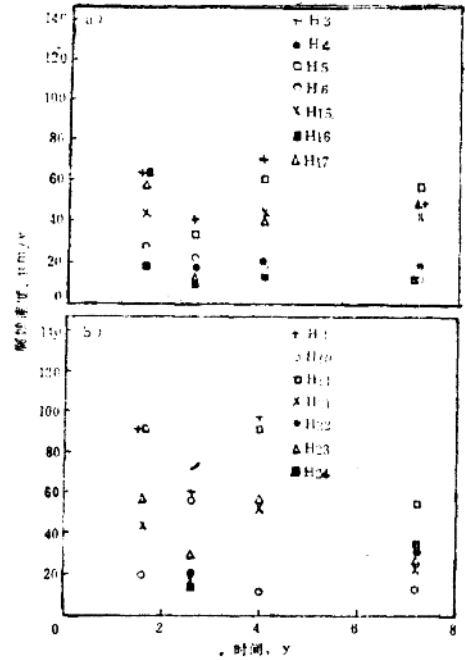


图6 I组试验钢的一般腐蚀速率随暴露时间的变化

冶金试验中心制备的试验钢的一般腐蚀速率见图7。侵蚀最少的钢（C6）含有铬、铝和钼；其他钢都侵蚀得比较严重。

工业钢的腐蚀速率如图8所示。随着暴露时间的延长，有些钢（I2、I5、I6、I7和I12）的腐蚀速率有下降的趋势。钢I2、I6、I7、I12和I13是性能最好的工业钢，暴露7.2年以后，其腐蚀速率为 $0.06 \sim 0.08$ mm/年。钢I4、I10及I14是最坏的钢，腐蚀速率为 0.14

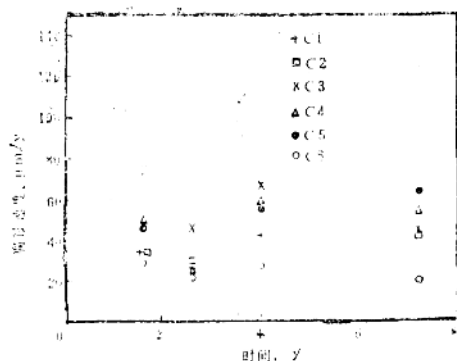


图7 II组试验钢的一般腐蚀速率随暴露时间的变化

~0.16mm/年。暴露在90m深的钢的性能好坏的排列和暴露在45m深的钢是一样的，但是腐蚀速率要低得多。

为了研究合金元素的影响，利用多重回归分析法分析了Hoogovens/Hoesch 试验钢的一般腐蚀速率数据。

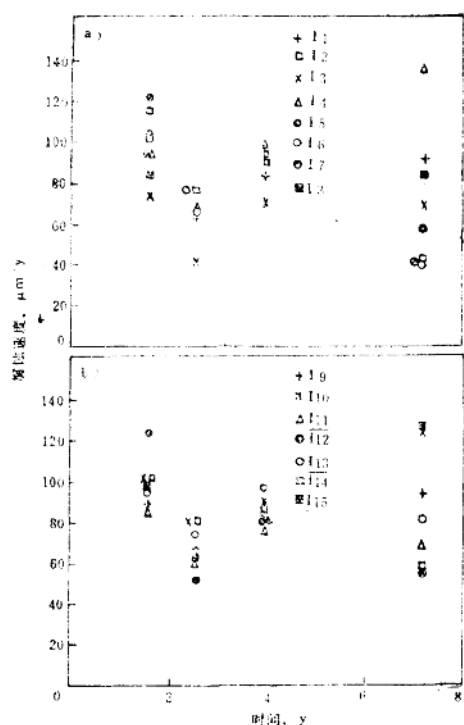


图8 III组钢的一般腐蚀速率随暴露时间的变化

在该分析中使用的是单个试样的数据，而不是平均值，以便使统计计算更加精确。所短缺的H1和H3钢（暴露7.2年后）的腐蚀数据用暴露四年以后所取得的腐蚀速率代替。

T（绝对）试验值>2的回归系数被认为是有效的。表3（略）列出了所有钢和不同暴露时间下的有效回归系数。铝、铬和钼及Al+Cr复合随时间而变化的95%置信度范围的回归系数上、下限如图9所示。分别分析了在90m深暴露2.6年的两个试验架上的试样，以便按照相同的统计有效数来作全部计算。对这两个试验架计算得出的回归系数所作的比较表明，结果的准确性认为是令人满意的。

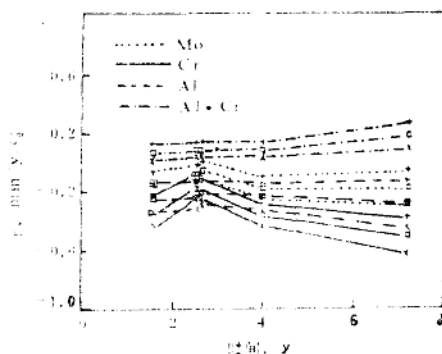


图9 随时间而变化的合金元素对腐蚀速率影响的回归系数的平均(□)和95%置信度范围(+, x)

点腐蚀

根据极值统计表对点腐蚀行为可能作出的各种解释如图10所示。每一个暴露期后都可以绘出所观测到的MPD与y的关系曲线。这条曲线（图10a）的典型特征是：

1) 在1m²暴露面积下的MPD（使用这个任意外推值是为了能够比较具有不同试样表面积 的钢）；

2) 斜率α。

很明显，某一钢在1m²面积下的MPD低和斜率α高，则说明点蚀行为是有利的。暴

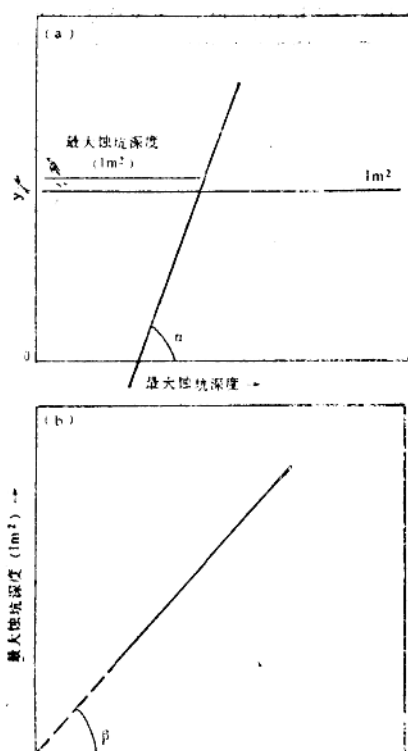


图10 极值统计在钢性能好坏排列上的应用

a) 预测某一暴露时期后若干试样在 1m^2 表面积下的最大蚀坑深度 (MPD) 值的曲线; b) 1m^2 表面积下的MPD与暴露时间的关系

露时间对 1m^2 面积下的MPD的影响如图10b所示;斜率 β 是代表某一钢的特征。 β 值低,则说明点蚀行为有利。上述分析结果列于表4。

缝隙腐蚀

一般说来,不希望现有低合金钢对缝隙腐蚀敏感。而且一般腐蚀量不是很小,因此,即使在长时间暴露以后,要找出缝隙腐蚀的确凿迹象,有时也是相当困难的。

对缝隙腐蚀的敏感性看来是比较难以预测的,尤其是对工业钢;尽管有些试样没有显示出任何缝隙腐蚀,但是在相同成分的其他试样上,这种类型的腐蚀却很明显。

Hoogovens/Hoesch试验钢H16, H21, H22, H23和H24及CSM钢在所有暴露时间

下均发现有缝隙腐蚀的明显迹象。不含合金元素的H1钢和含1.5Mo的H11钢在所有暴露时间下均没有出现任何缝隙腐蚀的迹象。

在工业钢组中I1, I2, I7, I8, I9和I12钢暴露7.2年后均出现缝隙腐蚀。

结论

从上面所叙述的研究中可以得出如下结论。

1. 试验钢中添加铬和铝,虽然它们的相互影响有点不利,但被认为对一般腐蚀速率始终是具有良好影响的。发现添加0.5% Mo是有好作用的,然而添加1.5% Mo则有害。一般说,碳没有明显的影响。合金元素对一般腐蚀行为的影响有点取决于暴露时间。工业钢的试验结果也具有类似的趋向。

2. 含铝和铬以及0.5% Mo的钢在海水 中具有比较好的抗腐蚀性能,是因为在金属的表面形成了一层连续的 Fe_3O_4 保护层,同时由于合金元素的组合使得孔隙度较小,并使粘着良好。

3. 发现试验钢的最大蚀坑深度是按照“极值分布”而呈统计分布的,从而可以对不同表面积的试样进行比较,并通过外推而得到每种钢任一 1m^2 面积试样的最大蚀坑深度。

4. 铝和铝有提高最大蚀坑深度的趋向,后者的影响则取决于暴露时间。碳和铬没有什么影响。关于工业钢则没有得出结论。

5. 从显微镜观察,显微组织对Hoogovens/Hoesch试验钢局部腐蚀的性质是有一定影响的。再结晶晶粒的两头腐蚀较严重,而脱碳边缘的腐蚀似乎较少。

6. 虽然偶尔观察到缝隙腐蚀,但对于所研究的低合金钢,这种类型的腐蚀侵蚀并没有成为一个问题。

7. 90m深处的腐蚀速率稍低于45m深处的腐蚀速率。

8. 合金元素对腐蚀行为的影响并不决定于暴露的深度。

表 4 不同暴露时间后预测的 1m^2 面积下的最大蚀坑深度 (MPD), α 和 β : 术语见图10

钢	2.6年 (90m)		4.0年 (45m)		7.2年 (45m)		β
	MPD ($y \sim 1\text{m}^2$), mm	α	MPD ($y \sim 1\text{m}^2$), mm	α	MPD ($y \sim 1\text{m}^2$), mm	α	
H1	0.61	0.17	1.52	0.22	3.60*	+	0.362
H3	0.38	0.05	1.38	0.19	3.67*	+	0.320
H4	0.37	0.07	1.38	0.19	1.22	0.16	0.186
H5	3.43	0.07	1.57	0.24	1.26	0.11	0.194
H6	0.33	0.06	1.09	0.13	1.75	0.37	0.255
H10	0.37	0.10	0.80	0.14	0.76	0.09	0.110
H11	0.66	0.17	1.52	0.15	3.49*	0.04	0.364
H15	0.57	0.12	1.73	0.21	2.42	0.39	0.354
H16	0.38	0.06	1.33	0.20	1.39	0.16	0.208
H17	0.48	0.13	1.24	0.14	1.91	0.29	0.277
H21	0.44	0.07	1.32	0.14	0.91	0.09	0.193
H22	0.59	0.12	1.19*	+	2.56	0.16	0.364
H23	0.75	0.18	1.14	0.07	2.03*	0.11	0.285
H24	0.43	0.09	1.15*	+	2.81	0.33	0.405
C1	0.89	0.22	3.20	0.39	8.48*	+	0.742
C2	0.68	0.15	2.54	0.36	6.79*	+	0.588
C3	0.76	0.15	2.18	0.25	5.43*	+	0.513
C4	0.56	0.13	2.08	0.41	5.55*	+	0.482
C5	0.57	0.12	2.02	0.12	5.33*	+	0.469
C6	0.43	0.09	1.68	0.33	4.54*	+	0.388
I1	0.75	0.23	2.52	0.57	2.85	0.50	0.424
I2	0.73	0.12	1.49	0.13	1.89	0.37	0.270
I3	0.55	0.08	2.24	0.44	4.18	0.47	0.609
I4	0.39	0.06	1.51	0.21	2.68	0.42	0.391
I5	+	+	+	+	+	+	+
I6	+	+	+	+	+	+	+
I7	0.48	0.101	2.72*	+	1.37	0.13	0.176
I8	0.47	0.09	2.08	0.54	1.76	0.28	0.272
I9	0.59	0.09	1.93	0.30	3.33	0.59	0.483
I10	0.53	0.16	2.17	0.37	5.92*	+	0.500
I11	0.48	0.14	1.57	0.36	1.63	0.16	0.247
I12	0.48	0.11	2.38	0.42	2.18	0.34	0.336
I13	0.83	0.24	1.88	0.57	1.99	0.33	0.179
I14	0.75	0.22	1.82	0.28	2.85	0.45	0.409
I15	1.14	0.27	1.87	0.24	1.81	0.40	0.254

* 外推值 + 未得到数据

9. 最好的试验钢的一般腐蚀速率比非合金对比钢的下降 $1/2$ 至 $3/4$ 。证明有可能把这种良好的耐一般腐蚀行为和低的点蚀敏感性结合起来。

参考文献 (略)

黄桂煌节译自《Br. Corros. J.》, 1986, 21, No3, 163~176

重工业应用的耐磨材料

宇野兵卫

1. 前言

船舶、车辆、飞机等运输机器、工厂（水泥厂、炼铁厂、炼钢厂、锅炉厂）、重型机械（汽轮机、柴油机）、精密机械（油泵、自动装置）、土木建筑机械、钢结构等重工业产品用材料，好多是属于耐磨用途的，使用了几乎所有种类的耐磨材料。本文概述了重工业产品所用耐磨材料以及对它们的评价。

2. 磨损种类及损坏事例

图1表示日本川崎重工业公司研究所将过去约十年中发生事故进行原因调查的事例按摩擦和磨损形态进行分类。滑动摩擦约占摩擦形态的70%，其中磨料磨损和粘着磨损的比例大致相同。磨料磨损指的是：异物混入轴承引起的磨损，船舶推进器的砂冲蚀和水泥窑孔筛与砂的磨损等。最近，随着船舶用燃料的质量变差，油中混入的硬质粒子

使机器的磨损增加。

粘着磨损有：泵、阀门的滑动部件的磨损、各种发动机的活塞环与汽缸内衬之间的磨损，齿轮发生的蚀坑和剥落均属此类磨损。

在以上的事例中，有关土木建筑机械或锅炉和鼓风机，输送管道等发生的砂土磨损几乎都不包括在磨料磨损中。此类机械装置在进行寿命设计时必须考虑磨损。最近对耐磨性提出更高的要求，正在积极试用陶瓷等新材料，对耐磨材料的发展正予以更大的关注。

3. 磨料磨损

磨料磨损分为三类：凿削、研磨和擦伤。表1是各种磨损形态和制品以及检测方法的分类情况。根据表1所示的产品功能，用各种方法进行检测，各厂家选用特定的材料。

表 1

磨损形态、产品和检测方法

	分 类	特 征	产 品	检 测 方 法
砂土磨损（磨料磨损）	凿 削	非金属颗粒压划金属表面，挖去比较大的金属粒子产生沟状磨痕	破碎机 铲式装载机 推土机 动力铲	美国制动闸板法 小松制作所的方法 Climax 方法 神户制钢的方法 川崎重工的方法
	研 磨	磨料吸入金属间破碎时在金属表面产生塑性流动、疲劳、碳化物破碎	球磨机 链轮 推土机（辊子 滑履、链杆）	Haworth 方法 小松制作所方法 Brinell 方法
	擦 伤	砂粒流向金属表面时，加在砂上的力使金属表面产生轻微的划痕	叶轮 空气输送管 喷嘴	Staffer 方法 三菱重工砂本方法 宫野方法 磨机法

4. 耐磨材料

通常用的耐磨材料列于表 2，还试图采

用涂覆和表面处理以提高耐磨性或耐粘附性。

表 2

耐 磨 材 料

材 料		种 类
金 属	锻 钢	碳素钢、合金钢、工具钢等
	铸 钢	低合金铸钢、高合金铸钢、高锰铸钢
	铸 铁	低铬铸铁、镍硬铁、高锰铸铁、锰铬铸铁、高铬铸铁、高铬铝铸铁
非 金 属	硬 质 合 金	WC-Co
	陶 瓷	氧化物系、氮化物系、碳化物系、硼化物系和玄武岩
涂 覆		橡胶、聚氨酯、尼龙
表 面 处 理		复合(包覆)、涂敷、镶铸、热装、冷装
		表面淬火(高频、火焰)、渗碳淬火、氮化、渗硼、渗硫、激冷、电镀、堆焊、喷丸硬化、辗压加工、Al、Cr等扩散处理

金属受砂土的磨损，与金属和金属之间的磨损形态不同。耐磨性同硬度之间存在相关性，硬度对耐磨性有决定性作用，认为几乎不受碳含量和组织或合金成分的影响。在选择耐磨材料时，根据用途，在考虑经济性的同时也要求材料的韧性、焊接性和加工性能。最近已在砂土、泥浆输送管内采用了聚氨酯衬套。新开发的6000m级深海潜水船用的超高压海水泵的柱塞和缸体上喷镀氧化铝+氧化钛和热镀铝钛合金以提高耐磨性和耐腐蚀性，锅炉喷嘴和送风机叶轮采用陶瓷方案等均取得良好的效果。

5. 几种产品的磨损特性评价

5.1 煤灰输送管

由于石油紧张，有效使用煤炭再次为人们所重视，因此建设了煤炭火力发电站等大规模煤炭燃烧锅炉，为有效利用灰渣，产生大量的煤灰要在综合灰渣处理厂进行处理。煤灰是用空气输送，这时硬的煤灰在输送管内高速流动，管内产生磨损。

特别在弯管部位，煤灰向管壁冲击频率高，使磨损增大。据此，直管使用碳素钢，弯管使用高硬度的高铬铸铁和玄武岩铸石。为了提高耐磨性，还研究了通过管道的粉体

的磨损特征。

评价输送管的耐磨性必须考虑的因素包括：(1)管的材料，(2)粉体的性状，(3)冲击角度，(4)冲击速度。采用粉体试验装置进行材质的磨损试验。磨损试验方法见图2(略)，试验参数为：空气压力 $1\sim 5\text{kg/cm}^2$ ，喷射距离为50mm和75mm，冲击角(θ) $10\sim 90^\circ$ ，试片尺寸 $20\times 45\times 5\text{mm}$ ，冲击速度 $25\sim 60\text{m/s}$ ，煤灰的平均粒度约 $27\mu\text{m}$ ，成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 ，硬度HV $750\sim 1300$ 。

5.1.1 直管材料的耐磨性

直管所用的材料列于表3，硬度都比较低。图3示出，在喷射压力 $P=1\text{kgf/cm}^2$ 的条件下，试验材料间的耐磨性差别不大，在冲击角 $\theta=45^\circ$ 或 75° 时，显示出最大的磨损量。当 $P=3\text{kgf/cm}^2$ 的条件下，磨损量增加，相当于 $P=1\text{kgf/cm}^2$ 条件下的5~10倍左右，而铸铁管与其它三种材料间差异较大。铸铁管磨损量少，最大的磨损量在高角度一侧。其它材料在相同的冲击角下，磨损量大致相同。

由于磨损条件对材料的耐磨性影响非常大，因此要充分掌握实际的磨损条件，这样

表 3

试验材料的化学成分与硬度(%)

	种 类	C	Si	Mn	Cr	HV
现 用 材 料	S 钢管 *	0.46	0.16	0.75	0.04	210
	铸 钢 管	0.43	0.35	1.42	0.83	220
	铸 铁 管	3.61	2.86	0.62	1.46	240
低 成 本 材	STPG 38	0.16	0.14	0.37	—	140
	SGP	0.14	0.15	0.30	—	140

* 泥浆输送用钢管

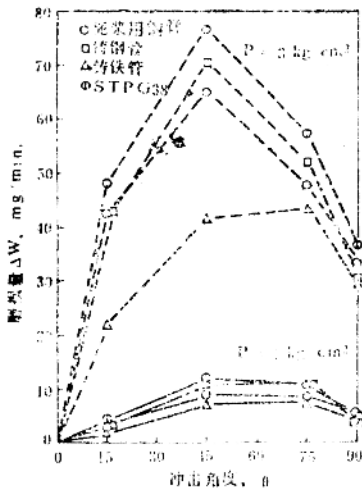


图 3 直管材料的试验结果

表 4

试验材料的化学成分(%)

种 类	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
YC 2	3.00	0.73	0.73	0.032	0.018	26.20	—	—
YC 6	1.57	1.22	0.61	0.025	0.021	20.10	—	—
YC 8	3.37	0.95	0.60	0.026	0.019	16.20	0.48	2.16
STPG 38	0.16	0.14	0.37	0.020	0.020	—	—	—

理的高铬铸铁减少1/10~1/20。经渗硼处理生成的硬度为 HV 1550、厚 30μm 的硼化层对低角度下的磨损具有显著的效果。

由于高铬铸铁属于高硬度脆性材料，在高冲击角下磨损量增大，如果同时使用挂底衬等措施将取得更为有效的结果。

5.2 隧道掘进机

采用钻机挖掘岩石隧道的方法在工程上受到重视，已取代了原来的爆破法。现已

才能选定合适的材料。

5.1.2 弯管材料的磨损特征

弯管用高铬铸铁，它的化学成分列于表 4。STPG38用作对比材料。高铬铸铁为正火状态，其组织为M+γ_R和(Fe、Cr)₇C₃、(Fe、Cr)₂₃C₆碳化物，硬度在 HRC60 以上。

高铬铸铁的耐磨性示于图 4，随着冲击角的增大，磨损量增多。与 STPG 38 比较时，特别是低角度一侧，看出磨损量的差别。高铬铸铁中的高硬度碳化物对低角度时磨损具有有效的作用。

另外，用同样的方法对高铬铸铁渗硼处理的效果也进行了研究，其磨损量比正火处

研制出流体输送式隧道钻机(掘削直径 2000mm)。

隧道钻机是属于把圆盘刀具压在岩盘上破碎岩石掘进的机械(图 5 略)。

环套状刀具热装在刀具的本体上，挖掘磨损后可以更换。

环套状的刀具有两种：一种是软岩石到硬岩石均可使用的圆型环套，另一种是适于特殊高硬度岩石的镶有硬质合金齿的环套。

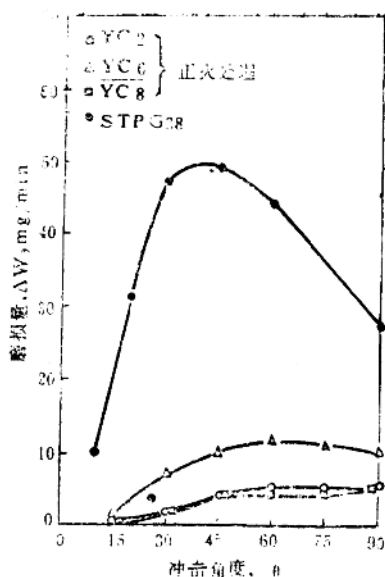


图4 高铬系铸铁正火后冲击角与磨损量的关系

这种环套不仅要求耐磨性高，为了减少因裂纹引起环套的更换，还要求良好的韧性。

5.2.1 环形刀具材料的耐磨性

掘进性能（掘进速度与推力、转数、掘进扭转力矩、压力等）的检测是在近似结构的模型装置（掘进直径870mm）上进行试验的，并在实机上实际掘进长2km进行试验，取得各种数据。

实挖掘试验的各种材料的环形刀具所作耐磨性试验结果以寿命比列于表5。高速工具钢寿命最长。但从单位挖掘量的价格和刀具更换所需要的时间等综合情况看，工具钢最经济。因此，通常用的环形刀具系工具钢。

表5 不同材质环具的寿命比较

材质	工具钢	高速工具钢	中碳钢
寿命	1.0	1.3	0.57

5.2.2 环形刀具材料的韧性

要求环形刀具材质的耐磨性的同时，还要求韧性。从环形刀具材料的用途判断，冲击疲劳性能应是重点考虑的特性。作者用夏

比冲击试验机的低频冲击试验和阿姆斯式高频冲击试验检测材质的冲击疲劳特性（图6略）。试验材料主要是工具钢，为了比较也用渗碳淬火钢和强韧钢，材料的类型与状态示于表6（略）

把硬度与在3kgf·cm冲击能力下，试样断裂时的冲击次数（寿命）的关系示于图7。工具钢D的寿命所以明显低下是由于这种材质没有经过环形锻造，原来的锻造线与负荷成直角方向的缘故。在同样硬度下与工具钢相比，渗碳淬火钢寿命短。工具钢中碳化物弥散的情况下，它的韧性取决于基体韧性。工具钢与渗碳钢的韧性不同主要原因在于它们的基体碳浓度和残余奥氏体含量不同。

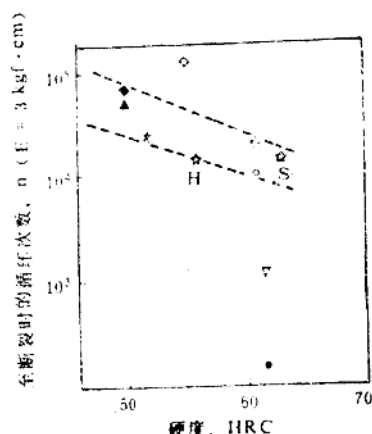


图7 硬度与至断裂时的循环次数的关系

工具钢经深冷处理和提高回火温度，对提高冲击疲劳寿命没有显著的影响。冲击疲劳寿命与无缺口冲击值之间没有明显的对应关系。在实机使用条件下，用冲击疲劳特性评价材质更合适，但有待查明影响冲击疲劳特性的冶金因素并确立试验方法。

5.3 燃料泵

船舶用燃料是C重油的精制品。最近采用了热分解和接触分解法，与原来只在常压或减压蒸馏的情况相比，其燃料油的性状变

为粗劣化、质重和高粘度。这种粗劣油不仅质重、高粘度，而且在它的组成中，芳香族、沥青质等难燃性物质增加，对发动机的燃烧特性有恶劣的影响。另外硫黄和钒的增多促进腐蚀磨损。触媒粒子的混入成为磨料磨损的原因。接触分离法用的触媒粒子 Al-Si 共晶体，破碎微粒化，没能回收混入油中，成为燃料泵气缸内衬的异常磨损和过滤器堵塞等事故的原因。

5.3.1 耐磨性

试验对象是四冲程中速柴油发动机燃料泵柱塞用SUJ3淬火回火钢，缸套用SCM420渗碳淬火钢。所用试验材料列于表7。磨损试验是在销盘式磨损试验机上进行的。用贴在圆盘上的刚玉砂纸的磨损特性来模拟评定触媒粒子的磨损特性（图8，略）。

磨损试验结果用磨损率与硬度的关系列于图9。比较材质的耐磨性时得出，渗碳处

理材质耐磨性最好，其它处理方法依次为陶瓷喷镀，氮化处理，电镀，渗碳，淬火回

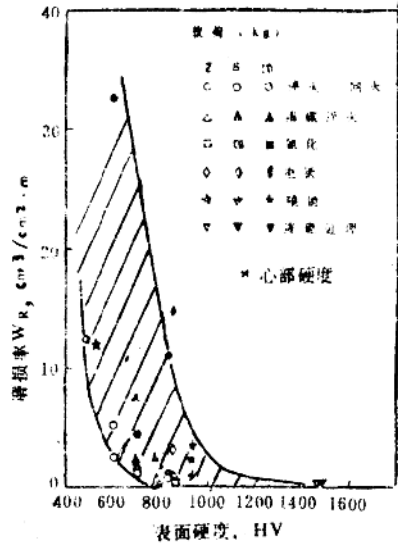


图9 磨损率与硬度的关系

表7 试验材料种类和表面硬度

		材 质	热处理和表面处理		表面硬度 (mHV)
现用部件	柱 塞	SUJ 3	淬火、回火		720
	缸 套	SCM 420	渗碳淬火		700~800
试 验 样		SUJ3	淬火、回火		698
		SKD11	淬火、回火		606
		SCM420	渗碳淬火		772
		"			681
		SACM645	气体氮化		852
		SKD11			822
		SUJ3	电 镀	硬质铬	824
		SKD11		无电解镍	847
		SKD11	喷 镀	90%Al ₂ O ₃ , 10%TiO ₂	932
				75%(WC+12%Co), SF合金, NiAl 金属间化合物	780
				WC+12%Co	792
		SKD11	渗碳处理 (粉末法920℃×5h)		1460