

金属耐磨材料学术会议

论文选集

前 言

中国金属学会第二届金属耐磨材料学术报告会于1983年10月在山东烟台地区召开。从第一届金属耐磨材料学术会议到第二届学术会议，时间仅有两年，国内金属耐磨材料的研究工作进展很快。这些研究工作无论反应在生产上或在磨损机理方面都取得较好的成绩。会上交流的论文有120多篇，内容涉及高锰钢、合金钢、合金白口铸铁、表面合金化和磨损机理等方面。为扩大交流面，在中国金属学会的支持下，我们编辑了这本选集。

由于选集篇幅限制，不能刊载更多的会议交流论文。为了弥补这个缺陷，我们除推荐部份文章至《钢铁》和《电力机械》编辑部外，其余论文只能把题目和作者通讯地址刊载在本选集上（见第235页“未收入选集的会议论文题录索引”）。

在本选集编审过程中得到钢铁研究总院一室、《钢铁》编辑部和《电力机械》编辑部有关同志大力帮助，仅致以谢意。

由于时间匆促和编者水平有限。文集中可能有缺点或错误之处，请读者指正。

张 清

一九八四年四月

目 录

国内外抗磨材料研究的发展动向	王兆昌 (1)
我国水轮机的气蚀与泥沙磨损	吴培豪 (8)
莱武相 (Lave Phase) 强化铁基抗磨合金的研究	董元源 (14)
低合金铸钢耐磨性及磨损形式的研究	仝健民 陶 璘 (23)
新型耐热抗磨材料研究	徐延伟 聂永福 (29)
锤头用耐磨铸钢 30 CrNiMoRe 的研究与应用	廖承驹等 (34)
45钢中渗碳体形态对粘着磨损的影响	高彩桥 张泽国 (41)
两种低合金钢的磨料磨损研究	张 清 田 蕃 (45)
煤粒和石英砂作为磨料的三体磨料磨损特性	邵荷生 陈华辉 (51)
ZG90Mn ₂ CrSiV 耐磨铸钢整体抛丸叶轮的试验研究	刘鸿祺等 (57)
热处理对高碳低合金钢干滑动磨损的影响	朱维翰 (62)
碳含量和组织形态对碳素钢抗冲击磨粒磨损性的影响	刘炳日 于长山 (65)
45Mn ₂ 淬火钢球在磨机中的试验研究与应用	刘时彦等 (69)
奥氏体的稳定性与形变强化能力的研究	陈希杰 (75)
大型高锰钢齿板的制造工艺	桂林冶金机械厂 (81)
高锰钢多次冲击疲劳特性的研究	王振明等 (84)
高碳锰合金耐磨铸钢的试验研究	李茂林等 (88)
提高高锰钢抗磨性能的探索	沈绍璈 (93)
高锰钢中的磷共晶	陈振民 (96)
关于高锰钢硬化机理的几个问题	郭筑筑 (101)
化学成分及热处理对奥氏体锰钢性能的影响	吉林工业大学铸造教研室 长春发电设备修造厂 (106)
高铬铸铁风扇磨冲击板磨损面的微观分析	周庆德 王小同 (111)
高铬白口铸铁断裂韧性的研究	饶启昌等 (115)
定向凝固高铬铸铁耐磨性的初探	苏俊义等 (121)
高铬铸铁的材质与热处理	唐山水泥机械厂耐磨材料组 (127)
高铬铸铁热塑性变形研究	孙 逊 李 达 (134)
稀土变质高铬铸铁性能研究	李世奇等 (140)
高铬铸铁在建材、冶金工业上的应用	王全忠 (146)
钨系合金白口铸铁组织与磨损特性的研究	任善之等 (151)
改变硼系合金白口耐磨铸铁碳化物形态与分布的研究	尚 可等 (157)
影响中锰球铁“磨段”抗磨性的主要因素	吕尚谋 (164)
硬质合金复合材料堆焊的现状	黄文哲 (167)

组成合金耐磨性能的研究·····	张庆安 仝健民 (173)
铸渗法制造耐磨复合材料的研究·····	易又南等 (179)
Fe 基堆焊耐磨合金的组织形态与抗磨料磨损的关系·····	李炳均等 (186)
工业镀铁层抗磨料磨损性能的研究·····	孙一唐 刘先波 (190)
碳化钨颗粒堆焊中碳量对组织结构和耐磨性的影响·····	杨瑞林等 (195)
用渗钒处理提高提动阀耐磨性的研究·····	陈敏熊等 (201)
钢和铸铁气体碳氮共渗层抗粘着磨损的研究·····	刘以宽 李润宝 (205)
渗硼 + 渗硫复合处理提高 Cr12MoV 钢耐磨性的研究·····	欧阳梦兰 谢以新 (209)
磷含量与热处理对化学沉积镍磷合金层的耐磨性的影响·····	李根富等 (215)
高速钢离子轰击热处理渗层的耐磨性和抗咬合性·····	袁贵叔 邹敢锋 (221)
气缸套表面压嵌碳化硅处理的工艺参数及耐磨机理·····	韩 健 (226)
高韧性 γ' 单相渗氮层的磨损特性·····	林化春 李凤照 (229)

国内外抗磨材料研究 发展的动向

王兆昌

(北京钢铁学院)

导 言

在各个工业部门中,均应用许多物料的研磨破碎设备,其中许多工件受到磨料磨损,十分迅速即行失效,造成停工及材料和人力的浪费给国民经济造成巨大损失。在我国当前电力、矿山和建材等工业用的设备中,易磨件寿命低已成为发展生产的严重障碍。各个工业部均将其易磨损件列为重点攻关课题。提高抵抗磨料磨损的材料的质量是提高易磨件寿命的关键。虽然弹性聚合物和橡胶等也在一些易磨件上得到应用,但抗磨材料目前仍以钢铁材料(高锰钢,低合金钢及白口铸铁)为主。我国在抗磨材料方面的研究进展较快,特别是白口铸铁的研究在一些领域已达到和超过世界先进水平。

我国抗磨材料的研究在各方面都有进展,但目标不够明确,主攻方向不够突出。本文试图根据抗磨材料的发展历史,应用和生产的现状,从材料科学的原理的角度加以分析和讨论,提出关于抗磨材料的未来的研究发展方向,供我国广大抗磨材料研究人员参考,使我国的抗磨材料的研究能为四化建设做出更大贡献和更快赶上世界先进水平。

高锰钢的研究发展动向

高锰钢最早用于生产抗磨件已有将近一百年的历史,具有良好的强度和韧性并能在使用中加工硬化,抵抗磨料磨损,所以过去广为应用。近年由于低合金钢和白口铸铁性能不断提高,而高锰钢在冲击负荷不大的高应力碾研磨损条件下,由于不能加工硬化而不抗磨,所以制做球磨机衬板及冲击破碎锤头等逐渐用其它材料代替高锰钢。即使一些冲击负荷较大的凿削磨损件,如铲齿也改用组装的白口铁件,圆锥破碎机的衬板改用组合式铸造的白口铁,使用寿命均可成倍提高[1, 2]。高锰钢的产量在国外曾有一时期逐年下降。然而高锰钢有其特殊优越性能,在一些受到大冲击负荷的凿削磨损件,仍属最安全可靠,无法用其它材料代替,所以关于高锰钢的研究仍然受到一些人的重视。

标准高锰钢的成份中,碳和锰含量是影响其脆性的主要因素,仍然是在100年前Hadfield提出专利的范围之内。生产厂倾向于使碳含量 $<1.2\%$,以减少铸件脆性和开裂倾向,尤其是厚件和复杂件采用低碳(0.9~1.1%)。我国有的厂采用高碳(1.4~1.6%C)高锰钢生产水泥磨机衬板,则该件已非高锰钢适用件,而可用白口铁代替。锰含

量虽然在 11~15% 时对机械性能影响不大, 但最好采用 $Mn > 12\%$ 和 $Mn/C > 10$ 以避免铸件冷却时发生珠光体转变和保证韧性。硅高亦将加速珠光体形成和针状碳化物析出, 一般规定 $Si < 0.6\%$ 。磷由锰铁带入对韧性和抗磨性不利, 当碳含量高时影响更为显著, 在我国已受到注意, 但磷含量规定在 0.05% 以下并无意义。磷还影响去除冒口时和焊接时的开裂倾向, 因此焊肉的磷含量不应超过 0.03%。铝加剧磷对高锰钢热裂的不利影响, $Al < 0.06\%$ [3]。

铬合金化可以提高高锰钢的屈服强度, 减少使用中的变形程度。高锰钢衬板销钉变形后就将使拆卸困难。含 2% Cr 的高锰钢锤头和圆锥破碎机衬板可以有更高的抗磨性。但铬合金化使晶介碳化物析出倾向增加, 不适于在含碳量高时和生产厚重件时使用。一般高锰钢标准规定含铬量 $< 0.5\%$ 。钼合金化可以提高高锰钢在 980°C 时的高温强度及延性, 因此减少其热裂倾向。同时钼显著抑制珠光体转变及延缓碳化物析出, 改良厚壁件的延性。国外生产重型铸件或截面厚度变化大的件都在高锰钢中加入达 1% Mo。我国一些厂生产高锰钢铲齿也加钼。加入钼还可以减少高锰钢件, 如铁路道叉焊接时的开裂倾向。

稀土、钒和钛少量加入可以细化结晶组织, 抵制形成晶介碳化物的倾向, 但效果不大而且不够稳定。Ti $> 0.4\%$ 促使碳化物和氮化物沉积, 对韧性不利。我国一些厂生产高钛高锰钢虽然抗磨性可能提高, 但韧性将受影响。

采用高碳含量, 钼、钒、钛合金化并进行弥散硬化热处理使奥氏体组织中弥散分布碳化物提高抗磨性 (在我国用此法制造铲齿提高寿命 70~170%) [4]。但热处理工序繁复和成本增加使这种工艺经济上并不合理。国外高锰钢生产仍然采用标准热处理而认为弥散处理不可行。

长而薄的高锰钢件, 如格筛及复杂件在水韧处理后强烈歪扭, 需校直后才能使用, 因此研究铸态高锰钢, 如此能源和成本均可降低。铸态高锰钢含碳 0.7~1.0%, 厚度 $> 75\text{mm}$ 者含碳量还应更低, 因此抗磨性低。韧性也比热处理的高锰钢低。合金成份中需加入 1~2% Mo 阻止珠光体转变及针状碳化物析出, 硅和磷含量需严加控制; 件厚时还需加入镍。采用激冷铸造高锰钢件性能可以更高。

高锰钢进行钢包吹 Ar, N₂ 进行净化处理及复合铸入白口铁可提高抗磨性且简单易行。

为提高奥氏体锰钢的加工硬化能力, 将锰含量降低到 6—8%, 使其 M_s 仍低于室温和在水韧处理后得到奥氏体组织, 如此发展了少锰钢。少锰钢含碳 0.8~1.0% 和钼 0.5~1.5% 可以有高韧性而且抗磨。少锰钢韧性高于马氏体钢但比标准高锰钢低 (约 = 1/4), 不能在大冲击时代替后者。少锰钢已成功地用于生产各式磨机的衬板。我国生产含碳 1.6% 的 2Mn10Ti 钢制做风扇磨打击板比原用 Mn13 钢寿命提高 30% 以上。对于 Mn8 钢及 Mn6 钢制做球磨机衬板的研究正在进行中。生产中高冲击负荷的抗磨件, 少锰钢有前途。

关于高锰钢加工硬化的机制 [5] 各家说法不一, 但通常认为与形变时产生高位错密度有关, 而未发现任何应变马氏体。加工硬化分为三个阶段, 即 (1) 易滑移阶段, 滑移只在一个滑移系内发生, (2) 第二阶段随着形变量加大, 滑移在多个晶面族和滑移系内

发生。此时硬化机制有三，即（a）位错交割产生割阶使位错运动困难；（b）位错交割和再交割成位错缠结或三维网络，位错在某一滑移面运动时会割过以不同角度穿过此滑移面的其它位错形成林位错。此时由于位错间的弹性作用使位错运动受阻。（c）位错相互作用形成胞状结构或亚晶粒互相锁住同时胞壁成为位错运动的障碍。（3）当第三阶段开始后，足够高的应力使被阻挡住的位错借助于交滑移而运动，故此阶段称为动态软化阶段。

高锰钢屈服强度低，易于塑性形变并不等于加工硬化能力好。但高锰钢具有低的堆垛层错能，形成很宽的堆垛层错带使位错交割困难也使交滑移难于发生。另外高锰钢固溶体中溶解的碳可以向形变后产生的结构缺陷处偏析，形成柯氏气团，因此成份对高锰钢的加工硬化率影响很大。锰和镍对加工硬化过程不利，而增加硅，钼和铬则有利。少锰钢有更高的加工硬化速率〔6〕，但〔3〕提出不同看法。少锰钢由于有更高的 M_s （ $0 - 40^\circ\text{C}$ ）和 M_d 温度，因而能在冲击磨损时生成应变马氏体。

总之高锰钢有其特殊优越性能。在高冲击负荷的严厉凿削磨损条件下应用，还无更好的材料。研究改进高锰钢的质量即应以这类应用为基础。高锰钢的生产工艺对质量有很大影响，也需重视。研究发展少锰钢用于使用标准高锰钢时韧性有富余的冲击磨损条件更为合适。我国研究奥氏体锰“白口铸铁”含 $C1.75 \sim 1.85\%$ 及 $Mn7.7 \sim 8.3\%$ ，实质即为高碳少锰钢，制做颚板寿命为高锰钢的二倍。

低合金钢的研究发展动向

低合金钢有良好的抗磨性与韧性的综合性能，生产成本不高，而且可以有多种不同的性能，因此适用于生产各类磨料磨损件。按照〔6〕，抗磨低合金钢按照碳含量可分为三类，见表一。

表一 抗磨低合金钢的性能和用途

类别	含碳量 %	热处理	硬度 HB	夏氏冲击值呎镑	用途
低碳	0.18~0.30	淬火+回火	300—500	15—22	履带板, 铲齿
中碳	0.30~0.45	淬火+回火	270—550	~10	履带板, 摆锤, 衬板
高碳	0.50~1.00	正火+回火	350—550	4~8	泵件, 颚板, 破碎辊

高中碳低合金钢淬透性高，能够使 200mm 厚截面淬透。珠光体钢很少用于抗磨。可以用不同淬火介质的马氏体抗磨钢的成份见表二〔1, 2〕。

国外热加工的低碳（ $\sim 0.15\%C$ ）镍铬钼钢，淬火回火后硬度 $HB320 \sim 415$ ，具有强度，延性和可焊性，用于生产推土机和装卸机的叶片和刀片，生产便利，使用可靠和便于维修。

我国低合金钢最初即用于制做承受一定冲击负荷的抗磨件〔7〕。钢的含碳量分为中碳（ $0.35 \sim 0.40\%C$ ）及高碳（ $0.60 \sim 0.85\%C$ ）两大类，合金元素主要为铬、锰、硅、钼。钢在淬火回火后硬度，高碳者 $HRC > 55$ ，中碳者硬度 $HRC43 \sim 53$ ，冲击韧性均

表二

抗磨低合金钢的成份

	化 学 成 份 %						硬度	夏氏冲击	件 厚	特 点
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	HRC	值 ftlb	mm	
空 淬	0.4~0.6	0.9~1.2	1.4~1.7	0.65~1.6	0.5~0.65		58~59	5.4~6.1	75~100	硬度大不 需液淬
水 淬	0.30~0.35	0.3~1.5	0.80	0.5~2.0	0.4	0.6~ 0.9	47~52	20~27	200	强 韧 可 焊 结
油 淬	0.35~0.60	0.7	0.6	0.6~2.0	0.5		53~58		200	抗 磨

为 $1 \sim 2.5 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{cm}^2$ 。低合金钢板锤使用寿命比高锰钢高 $60 \sim 330\%$ ，以高碳者更好。以后中碳铬锰硅钢制做球磨机衬板使用寿命比高锰钢高 $1 \sim 2$ 倍。拖拉机履带板也改用 $31\text{Mn}2\text{Si}$ 钢。低合金钢在冲击负荷不大的条件下代替高锰钢制做抗磨件均能有好的效果。生产中存在的问题主要是淬裂。

低合金钢的研究应以空淬或油淬后获得高硬度而延性又不降低为主要目标。虽然实验室测试结果表明抗磨性与含碳量有关，但碳含量不宜过高，以 $0.3 \sim 0.5\%$ 为宜，如此减少淬火开裂，有利于获得板条状马氏体和高延性。制做碾辊等冲击负荷和形变不大的件则可选用高碳。提高淬透性采用硅、锰、铬、钼、钒和硼综合合金化应立足于我国资源，发展自己的低合金钢系列，同时对于合金元素对淬透性的影响及钢的 CCT 曲线应进行系统研究，为制订热处理工艺提供理论依据。合适的热处理工艺是发挥合金作用的关键。钢的冶炼应达到低硫和低夹杂。钢的断裂韧性与其抗磨性的关系是应该研究的新领域。

简单形状的抗磨件，如衬板和磨球，用量又大，则应采用轧制生产。

虽然低合金钢受到强韧白口铸铁的威胁，但前者在抵抗意外冲击形变则更可靠。

白口铸铁的研究发展动向

白口铸铁具有优异的抗磨性，但韧性低。自从近年其韧性不断提高以后，已逐渐发展为重要的抗磨材料，应用范围已扩大到一些冲击磨损件如锤头等，因而受到国内外普遍重视。

国外冷硬珠光体白口铸铁已很少使用。本世纪30年代开始研制成功镍铬（即镍硬）马氏体白口铸铁，铸态厚截面亦可得到马氏体组织、硬度可达 HRC62 有一定的韧性，用于制造泵体，衬板。但镍铬铸铁中，碳化物仍属 M_3C 型，显微硬度 $\text{HV}900 \sim 1100$ ，而且成为连续网状对韧性不利。高铬铸铁含铬 $> 12\%$ ，Cr/C 比高，碳化物则改变为 M_7C_3 型，显微硬度高（ $\text{HV}1300 \sim 1800$ ）而且成为断开分布，从而使其韧性和抗磨性大增，应用范围则进一步扩大到冲击磨损件和凿削磨损件如衬板，锤头，颚板等，代替高锰钢可以提高寿命几倍。我国推广应用高铬白口铸铁的同时研究发展适合我国资源的低合金马氏体白口铸铁，并采用降低碳含量，热处理和变质处理等工艺，改变碳化物的分布，提高白口铸铁的韧性。此种强韧性低合金马氏体白口铸铁在生产抗磨件中取得很大经济效益，同时发展了抗磨白口铸铁的冶金原理。以下分别叙述各类白口铸铁的研究发展动

向。

镍铬马氏体白口铸铁，含镍2.75~5.0%和铬1.1~3.5%，生产磨机衬板在磨铁矿石时表现优异，但磨机中延性要求高的件及大磨机的衬板则以采用高铬铸铁更好。许多国家都感到镍紧张，因此研究以铜锰钼代镍，结论认为只能部份代替，否则影响抗磨性〔7〕。另外也有人研究阿尔曼锰合金白口铸铁，虽然关于它的性能和组织已有介绍但应用较少。含镍量及冷速对镍硬铸铁马氏体量及硬度的影响也有研究。

我国为提高镍铬铸铁辊质量，在镍铬铸铁中加入稀土和硼可以使碳化物显微硬度和热稳定性更高，使铸铁宏观硬度和高温硬度更高。

为代替镍铬铸铁，我国研究发展几个系的马氏体白口铸铁。铜铬白口铸铁含铜3.3~3.75%和铬1.2~1.7%和钼0~0.4%，铸态组织为贝氏体+渗碳体，硬度HRC55~60，制做焦油白云石双轴搅拌机浆叶和衬板，寿命超过高锰钢十倍。但高铜将形成晶介铜相影响韧性。稀土铬白口铸铁含铬3.5~4.2%盐浴淬火后组织为马氏体+碳化物，HRC65~69，制做抛光机叶片，满足使用要求。

锰系白口铸铁（含Mn5.5~6.5%）是根据我国资源发展的经济有效，生产便利的马氏体白口铸铁，可以在冲天炉中熔炼和铸态使用。目前已研究了锰硼及锰铜铬钼两类，三种不同含碳量水平的中锰白口铸铁。高碳的中锰白口铸铁用于生产泵体和衬铁等件取得明显的经济效果。中低碳的中锰白口铸铁正试用于生产球磨机衬板和磨球。对于中锰白口铸铁组织中易出现残留奥氏体，其对抗磨性的影响及其与成份及热处理的关系均做了试验研究。

硼系合金白口铸铁分为高碳低硼组和低碳高硼组，经过油淬和回火处理，HRC62~65，已用于生产灰渣泵。

目前具有一定韧性而又十分抗磨的高铬白口铸铁在国外受到最大重视。英、美和西德等使用高铬钼白口铸铁，苏联则使用高铬锰白口铸铁，而法国则研制高铬钒白口铸铁。各国结合本国资源研究发展性能更高的抗磨白口铸铁。

高铬钼白口铸铁依照铬含量分成三组。26~30%Cr组含碳0.5~1.8%，抗磨性并非最高，但抗腐蚀性高，尤其热处理成马氏体组织可以比奥氏体组织有更高的抗腐蚀性。这组铸铁用于生产砂浆泵和制砖模。我国用此铸铁生产高炉钟斗可以很好地抵抗高速高温带有粉尘的气流的冲蚀，比堆焊的钟斗寿命提高2.5倍。这组铸铁用于生产轧钢导板，抵抗高温钢坯的磨损，效果也好。

20%Cr组淬透性最高，生产厚壁件的抗磨性可以与50mm以下的薄壁件相比。热处理的厚达150mm的20%Cr铸铁件硬度可达HB650—720。并且这组铸铁的韧性高，因此做为抗磨材料受到重视，已大量用于生产球磨机和棒磨机的衬板。目前这组铸铁有两种不同成份，即20Cr2MoCu及20CrMoNi。前者应用更广，能够更快地从铸型中取出，在热处理时加热阶段不易开裂而且在空冷后有更低的残留奥氏体。我国曾用含Cr17—19%Mo2.3~3.2%的白口铸铁生产平盘磨煤机辊套及衬板。

15%Cr组是高铬钼铸铁中含铬最少，成本最低而且含碳更高。依照含碳量又分为三类适用于不同用途。15%Cr铸铁中加入钼、镍、铜等可以使其具有更高的淬透性，已用于生产破碎辊，冲击锤等100mm以下的件。目前国外已将高铬铸铁用于生产轧辊取得很好

的经济效果。15%Cr白口铸铁用于生产360mm小型和线材轧辊有很好的抗磨性而用于生产带钢热连轧机的大直径精轧前架辊有很好的抵抗斑带疵病的能力。欧洲约60%热连轧机均使用高铬铸铁辊。21~22%Cr白口铸铁用于制做冷轧工作辊，硬度>HS90，硬化层厚，耐磨性和抗表面粗糙性好，对事故抵抗能力强。西德预计五年内将此铸铁辊推广应用于全部冷轧机。我国推广应用15Cr2MolCu白口铸铁生产破碎燧石的锤头，水泥磨机衬板及平盘磨煤机辊套及衬板，砂浆泵等均取得很好效果。对于其热处理工艺与件的壁厚的关系做了试验研究。激冷铸造可以使抗磨性改良。

高铬铸铁合金含量高，易于在组织中形成残留奥氏体，在重复冲击时造成剥落，对此国外进行了专门研究。镍、锰和铜强烈压制Ms及Mf温度，加入高铬铸铁中可以使热处理后组织中残留奥氏体达50%，而且使临介下热处理时奥氏体转变困难。钼则不大降低Ms，且能扩大临介下热处理的时间温度极限，使残留奥氏体降到20%以下，而且产生二次硬化，补偿由于马氏体回火引起的硬度损失。

为提高高铬铸铁的抗磨性而加钒可以形成高硬度的星形VC，将Cr₇C₃锚住，但钒的加入量需达3~5%以上。在高铬铸铁中加入少量硼形成高硬度的碳氮化物也可以使抗磨性提高。日本专利则提出加硼可以改变高铬铸铁中碳化物形状。

高铬白口铸铁的严重缺点是成本高。国外研究降低合金含量，使铸态得到珠光体组织，不需退火即可进行机加工，而且热处理时允许快速加热和缩短奥氏体化时间及降低奥氏体化温度，但空淬时则最低合金含量又需保证不发生珠光体转变。合金含量低还可以减少铸造和热处理时开裂的倾向。国外对16~18%Cr铸铁的合金化已有定量的公式。

目前许多煤和矿物的大型加工设备都需用厚达250mm以上，重达几吨的高铬钼铸铁件。成份为亚共晶成份，控制含碳量(2.4~3.0%C)含铬量(18~22%)，Si<0.6%，均将对淬透性有利，且可避免铸造及热处理开裂。热处理时需避免迅速加热产生高的热梯度及相变应力。从奥氏体化温度冷却太快或不均匀也是造成淬火开裂的主要原因。铸件冷到550°C以下即可开始缓冷。低温回火温度取450~525°C[8]。

苏联根据本国资源研制铬锰白口铸铁含C2.5~3.2%，Cr12~15%和Mn3.5~5.0%Mo0.3~0.6%。件厚可达200mm淬火硬度HRC60—63。制做泵件和磨机衬板。锰含量选择合适，既与钼共同保证淬透性同时又不致使奥氏体中碳的极限溶解度增加，因而减少碳化物量和增多残留奥氏体量，以致降低抗磨性。铬锰铸铁用稀土和钼酸钙变质处理，制做抛丸机叶片寿命可提高[a]。这类白口铸铁的研究应重视。

苏联，日本等国研究高钒白口铸铁。组织中VC具有很高的显微硬度，成为星形，方形和球形，与基体组织结合紧密，在磨损过程中既不破裂也不变形。对于钒铸铁的合适成份及热处理，获得高抗磨性及制件的良好使用经济效果都待研究。

钨系白口铸铁是结合我国资源研究的碳化物具有高显微硬度且成为孤立分布，能与高铬铸铁比美的抗磨材料。对于不同钨含量对碳化物的结构和显微硬度的影响已做了系统研究，并且用含18%W的白口铸铁制做混凝土搅拌机叶片，使用寿命达到高铬铸铁水平[10]。但高钨铸铁生产成本高和韧性不够大，近年已未进行研究。而低钨铸铁的研究仍在进行。以钨代钼完全可以用于合金白口铸铁解决钼铁紧张问题。

白口铸铁的抗磨性在各类钢铁材料中居于首位，然而脆性也居于首位，因此应用受到许多限制。碳化物包围金属基体，因而裂纹极易沿脆性相扩展是白口铸铁韧性低的主要原因而且也影响到抗磨性。白口铸铁的抗磨性与其断裂韧性成正比〔11〕。改变碳化物的分布和形貌已成为当前白口铸铁研究的焦点。提高合金含量改变其与含碳量之比可使碳化物由 M_3C 型改变为其它型。由于碳化物结构改变，其结晶增长特性改变，因而形貌和分布也改变，如高铬，高钨和高钒白口铸铁皆是。然而高合金化必然使生产成本增高，并且生产过程中易出现开裂。

白口铸铁通常都是亚共晶，碳化物是在共晶结晶时形成，因此碳化物的增长必然受共晶结晶条件的影响而非如同在液相中自由增长（钒、钛碳化物可能例外）。反常共晶，即金属基体包围碳化物应决定于两个共晶相分别的结晶增长速度。变质处理有可能改变 Fe_3C 共晶的增长。稀土元素是有效的变质剂，苏联研究〔12〕也已肯定其在白口铸铁中的变质效果。稀土是我国富有资源急待开发利用。稀土变质处理白口铸铁的试验结果表明，随稀土变质量增加，碳化物的形貌由粗大聚集物的网变为网结处局部断开的网，再变为许多长带和个别孤立的块，最终变为大的孤立块，白口铸铁韧性也随之提高。但过量变质也不好〔13〕。

将低碳白口铸铁进行高温奥氏体化处理，碳化物网的尖角部份必然溶解而碳化物也同时在曲率半径大的地方沉积，如此碳化物网断开并且碳化物向团块形增长。高温锻造白口铸铁可以将碳化物碎断，使其具有高塑性。锻造白口铁还可以进行热处理使其强度韧性进一步提高〔14〕。

总之，白口铸铁已发展为十分重要的抗磨材料。除推广应用高铬铸铁外还应研究发展以本国资源为基础的合金马氏体白口铸铁。对改变碳化物的形貌，提高断裂韧性和抗磨性的研究应重视。

结 束 语

研究发展抗磨材料应重视成本效益及我国资源和生产条件，应根据不同抗磨材料的特点和用途研究改进其抗磨性。技术措施应以冶金原理为指导。

参 考 文 献

- [1] John Dodd "Trends in the production, utilization and development of abrasion-resistant alloys in America" Climax Mo. Co.
- [2] John Dodd "Progress in the development and use of abrasion resistant alloy iron and steels in the mining industry" Feb. 1981
- [3] John Tasker "Austenitic Mn steel-fact and Fellacy"
- [4] 陈希杰，首钢机械厂 "关于高锰钢弥散热处理工艺的研究" 1981.2.
- [5] 安志义等 "ZG 2 Mn 10 Ti 组织结构的分析与研究"
- [6] Charles. .W. Briggs 《Steel Castngs Handbook》
- [7] 《一机冶金系统球磨机衬板，反击式破碎机板锤联合攻关试验技术总结》1978年4月
- [8] John Dodd "Factors affecting the production and Performance of thick section high

(下转第13页)

我国水轮机的气蚀 与泥沙磨损

吴培豪

(水利水电科学研究院)

一、我国水轮机气蚀磨损的情况

如何充分利用我国丰富的水能资源，加快水电建设，对保证四化规划的实现具有十分重要的意义。为此必须加强前期工作，做好一系列有关的科学研究工作。其中水轮机的气蚀与泥沙磨损问题，是多年来严重影响水电站安全经济运行的突出问题之一。必须加强研究，及早予以解决。

根据调查，国产水轮机的气蚀破坏指数 K^* 值属于Ⅲ级与Ⅲ级以上的约占半数以上。



图1 沙田水电站1号机运行11253小时叶片气蚀穿孔。

大部份水轮机投入运行后，每隔1~2年即需停机检修。有的运行几千到一万小时，叶片即发生穿孔或缺口（图1）。一般要经过多次修补，也有因破坏过于严重，难以修复，再加上很多水轮机，常发现存在裂纹等缺陷，因此常被迫频繁停机进行检修。水轮机的检修，成为决定水电站检修间隔与工期长短的决定性因素之一。

根据一些报导，国外大多数水轮机气蚀都很轻，大部份电站的检修周期，可以长达7~10年以上。

我国是一个多沙河流的国家，修建在黄河流域的一些水电站，以及一些排灌机械，普遍遭受泥沙的严重危害。如三门峡电站，运行一个汛期后效率就下降5~6%。不少排灌机械的部件，使用一个汛期后就无法再用举例如图2。此外在西北内陆河区域，该地区沙漠多，磨损问题也十分突出。东南、西南地区，虽然植被较好，平时河水较清，但汛期往往仍挟带一定数量的泥沙。最近投入的长江中游的葛州坝电站，二台机经过一年

* 气蚀指数 K 是水电部科技委根据1963年气蚀调查结果，按水轮机气蚀严重程度制定的划分办法。 $K = V/F \cdot t$, V 为气蚀体积, F 为水轮机叶片背面总面积, t 为运行小时数。 $K \geq 0.115 \times 10^{-4}$ 毫米/小时为Ⅲ级。

多运行时间，都已发现有气蚀、磨损破坏。一些水头较高的径流式电站，导水机构、迷宫装置等一些流速较高的部件，破坏也十分迅速。有的电站也必须每年进行大修或更换抗磨板等各种部件。有的电站也必须每年进行大修或更换抗磨板等各种部件。

水电站因气蚀磨损造成的危害是：降低了机组的效率，损失了电能；被迫进行频繁的检修，增大了检修费用；常常造成了系统供电紧张的局面；此外水轮机遭受破坏后，加剧了振动，造成了大量不安全因素，缩短了使用寿命；使水电站不能发挥应有的经济效益。据初步估计，每年因气蚀、磨损造成的电能损失即达 20 亿度以上。随着今后水电站的日益增多，机组单机容量的日益增大，所造成的影响与危害也将愈来愈大。

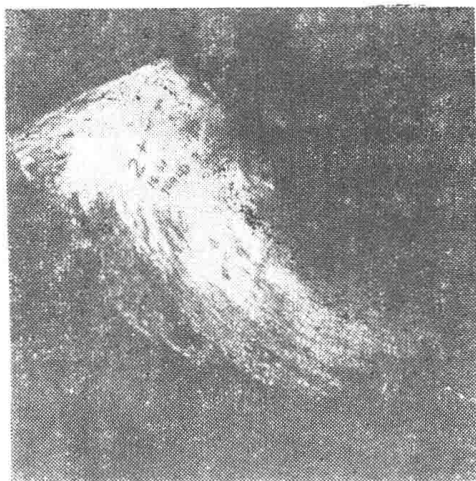


图 2 榆林水电站不锈钢叶片运行 10161 小时后磨损情况。

二、水轮机气蚀、磨损的特点与破坏机理

(一) 气蚀

气蚀是水流通过水轮机叶片或流道中某个部位，当该处压力下降到某一临界值（通常接近汽化压力）时产生的一种现象。从模型试验可以观察到，此时在该部位上出现了气泡，气泡逐渐增大并随水流带到下游高压区时，又发生溃灭（压缩），打击在材料边缘上就造成气蚀破坏。所以水轮机中的气蚀，常常发生在流道中流速较高，压力较低，或易于产生分离脱流，造成负压的部位上。例如冲击式水轮机的喷针、喷咀靠出口处；转轮叶片的背面，转轮室与叶片的间隙部位；以及突体的后部，与脱流区等。

水轮机遭受气蚀破坏后常见的形态是：初期往往仅发现材料表面有变色，失去金属原有的光泽，碳钢有时出现锈痕，不锈钢常变成灰白。随后表面逐渐变成麻面，最后发展成海棉蜂窝状；材料大量剥蚀，叶片发生穿孔或折断。对破坏面进行解剖，常发现破坏向深部曲折发展，见图 3。

过去一般认为，气蚀破坏是球形气泡在压缩、溃灭过程中产生的压力波所造成的。近年来，通过高速摄影等方法观察趋向于认为，气泡在近壁面处的压缩是非对称性的，最后被水流穿通而形成“微射流”打击在材料上而造成破坏（图 4）。

对材料在气蚀作用下产生破坏的机理，多年来有各种不同的解释、有机械（力学）的，化学的、电化学的、热力的等各种不同的见解。近年来多数认为破坏由各种因素综合组成，但在某一条件下某种因素可能起主导作用而已。

泥沙磨损是由水流挟带的泥沙所造成的。所以水轮机中磨损的部位，与水轮机中水流的运动有密切关系。各种正压面或突出物的迎水面都易受到泥沙的打击而发生磨损，但在叶片背面负压面，也经常发现有磨损。此外各种旋涡脱流区，易于卷入泥沙或使沙

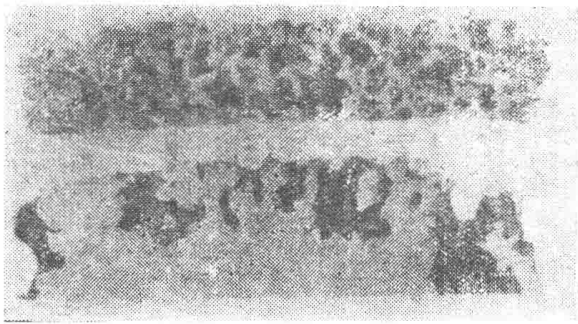


图3 蜂窝状气蚀剖面。

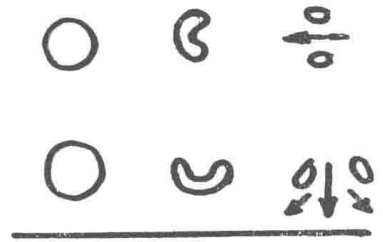


图4 微射流示意图

粒集中的部位，也易产生磨损。流速愈高，磨损也愈严重。常见的磨损部位如冲击式水轮机喷针与喷嘴，特别是靠近出口处；水斗的正面，水轮机叶片的正背面，特别是靠外缘与出水边处；导叶、叶片与流道中突出物的头部迎流面，绕流体的边缘，以及各种缝隙的进口等。

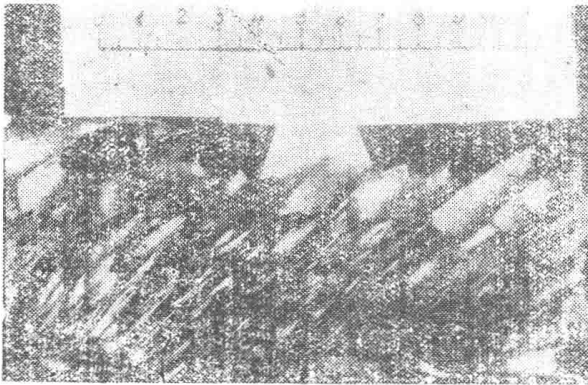


图5 典型的鱼鳞状破坏图。

水轮机的磨损，可以分为普遍磨损与局部磨损两大类。普遍磨损通常表现为大面积的波纹状或鱼鳞状（图5），深度相对较浅；有时表现为磨光磨亮。局部磨损则表现为局部的较深的沟槽、坑等，一般发生在水流有较剧烈变化的地方，如绕流某些障碍物或某些易于引起脱流或发生旋涡的部位上。有时磨损还表现为稀疏的小点小坑，划痕与擦伤等痕迹。但不论那种形式的破坏，磨损后的金属表面与气蚀不同的是，

表面常仍保持金属原有的光泽与密实状态。此外磨损的痕迹常带有明显的方向性，通常与水流方向一致。但由于泥沙颗粒与水比重的不同，有时两者也会产生某些偏离。

在大片波纹、鱼鳞状的破坏面上，有时还常可发现夹杂一些针孔、或一小块蜂窝状破坏。说明该区域同时遭受气蚀与泥沙的侵袭。通常称这种破坏为“联合作用的破坏”。这种情况通常发生在叶片背面等易于产生气蚀的部位上，但由于叶片表面遭受磨损后水流条件恶化，也可能促进某些部位气蚀的产生。但如磨损强度较大时，有时气蚀破坏痕迹也可能被磨去或掩盖而不易觉察出来。

对泥沙磨损的机理，多数认为，主要属于机械作用的破坏；但也有人认为还可能存在其它一些作用。机械破坏，通常又认为与泥沙打击的角度、速度等有关。小角度时，主要是“微切削”、擦划等作用；冲角较大时则发生撞击，塑性变形，脆化或疲劳等。

对材料在含砂水流中表面出现波纹鱼鳞等特征，目前还存在一些不同的见解。有的认为主要与水流的紊动或附面层的旋涡等有关。有的认为是由气蚀所造成，纯磨损只能是愈磨愈光。这些观点牵涉到破坏的根本原因与应采取的防护措施，有待于进一步很好研究加以弄清。

三、有关水轮机常用材料的研究

防护水轮机免受气蚀、磨损的危害可以从以下两个途径入手，一是改进设计；二是改善材质，以下着重介绍材料方面的问题。

早年制造的水轮机，大多采用铸铁。抗气蚀性能较差，也不便修补。在第二次世界大战前，逐渐改用铸钢。二次世界大战后，随着水轮机参数的不断提高，单机容量的逐渐增大以及对水轮机性能更高的要求，采用合金钢与高合金钢陆续增多。我国在五十年代时，主要采用25号、30号铸钢，以后逐渐改用20硅锰钢，六十年代后期，开始注意在叶片背面等易气蚀部位采用不锈钢等保护。早年采用不锈钢板铺焊方式的较多，常发现在气蚀区易鼓起或脱落等。故目前改用堆焊的较多或用堆铺结合的方法。近十余年来，开始陆续采用不锈钢，用整铸或铸焊结合的方法制造了一批水轮机，但数量还不多。

目前国内外所采用的不锈钢，多数是用含铬13%的钢种，复面则有时用1Cr18Ni9Ti等钢。法国有的公司则习惯用17-4镍铬不锈钢；苏联推荐使用：0Cr12Ni3Cu，最近向冰岛、阿根廷出口的水轮机仍用低镍的10Cr12NiCu与0Cr12NiCu制造。

除了广泛采用各种不锈钢制造水轮机外，有不少国家，如美国、加拿大、日本等一部份制造厂，为了节约造价，仍采用低碳钢制造转轮，再在背面易气蚀部位采用不锈钢保护。如目前世界上容量最大的七十万千瓦的大古力和依泰普水轮机，就是采用这种办法。

从国内外水电站运行情况来看，水轮机采用不锈钢制造或作为保护层后，大部份水轮机气蚀推迟或大大减轻。但国产用不锈钢制造的水轮机，有的运行一段时间后，仍很快发现有气蚀。

有泥沙场合，目前还缺乏抗磨性能优良的钢种。一般也采用Cr13等不锈钢。当泥沙含量不多，颗粒较细时，也能收到良好的效果。但当泥沙含量较多或磨损强度较大时，上述钢种与普通碳钢相比就并无显著差别。苏联在需要抗磨场合推荐采用1Cr18Ni3Mn3Cu2，据介绍，其抗磨性比20硅锰钢提高1.3~5倍，大致与0Cr12NiCu相当。据介绍主要考虑是损伤后可焊性好，可以不预热，便于修补。美国A.C.公司主张用Cr20Ni10。

此外各国还试验与采用过各种复面保护的办。如法国对冲击式水轮机的喷针等部件采用镀铬、热液喷镀，高硬焊条堆焊等办法。日本试用过等离子喷镀与自溶性合金粉末喷焊等办法。苏联曾在原型电站上进行过表面硬化堆焊各种高硬焊条以及各种非金属涂层等试验，还在水泵叶片上进行过用金属陶瓷做复面保护的试验，据介绍可显著提高耐磨性。

我国从五十年代后期起，在抗磨材材与复面、涂层等方面也进行了大量的试验研究工作。在抗磨损与气蚀方面，曾研制出Cr5Cu、Cr8CuMo、0Cr13Ni4CuMo、0Cr13Ni6Mo、0Cr13Ni4Mo等钢种，已在一些电站上得到了应用。近年来还有一些单位正在试验采用17-4 PH等沉澱硬化不锈钢。在堆焊材料方面，除上述钢种外，还研制出堆277

(铬锰系列)、耐磨1号(高碳高铬)等抗气蚀或抗磨蚀性能较好的焊条。目前有关单位正在对这些焊条进一步改进提高。在喷镀技术方面,目前有不少单位正在开展等离子喷涂与自溶性合金粉末喷焊等试验。此外还进行了大量非金属材料做涂层保护的研究,有环氧、聚氨脂、尼龙、搪瓷、橡胶等。上述各种材料与涂层,有不少已在水轮机与排灌机械上得到了应用。

从国内外大量试验研究与应用实践的经验来看,有以下一些需要继续加强研究或值得注意的问题:

1. 在抗气蚀磨损的材料方面,1Cr18Ni9Ti与Cr13系列的钢种都有较好的抗气蚀性能,并能适应某些不良的水质条件。但在抗磨方面,目前还缺乏性能优良的钢种。磨损强度不太剧烈的场合,采用Cr13系列不锈钢有一定效果,但磨损剧烈场合,则同样迅速遭受破坏。从大量试验看,提高材料的硬度是提高抗磨能力的重要因素。但作为水轮机母材,必须同时具备相应的强度与工艺性(加工性、可焊性等),因此妨碍了很多高硬合金的应用。因此除了应继续加强耐磨合金钢的研究外,还应结合水轮机制造特点与各种另部件的不同要求(强度、加工方法、磨蚀条件等),开展多途径多品种抗磨材料与工艺方法的研究。

在抗磨材料的研究中还有一个突出的问题是气蚀区的磨损问题。一些非金属材料大多有较好的抗磨性能,但在气蚀区普遍存在粘合不牢,易脱落等问题。某些金属材料的抗气蚀性能虽优于非金属材料,但抗磨性能则还不理想。这是目前急待努力解决的主要矛盾之一。

2. 一种材料的抗气蚀、磨损性能常常不是绝对的,例如1Cr18Ni9Ti的抗气蚀性能在流速较低时比20硅锰钢好十余倍,但随着流速的增大,差别愈来愈小。磨损也有类似的情况,在磨损强度剧烈时,各种钢种之间的差别也逐渐缩小。泥沙打击角度较大时,有时某些硬度较高的钢种反不如较软的钢耐磨,而打击角度较小时则相反。泥沙颗粒的粒径与形状,对不同钢材也有不同的影响。因此必须很好研究不同电站的具体条件(同一水轮机不同部位气蚀、磨损的条件也是不同的),选用合适的材料,才能更为经济而有效。

对材料的性能进行鉴定时,要很好研究试验室条件与原型的差异。苏联在六十年代曾推荐采用18CuSiMn钢,在原型电站使用中发现性能很差,105片叶片已更换了44片。我国也曾发生类似的经验教训。

3. 大量实践表明,一种试验室性能优良的新钢种,要在工业生产中得到推广,还必须很好解决工业生产中的冶炼、铸造、热处理、加工等问题。不少工业铸件的性能常常低于试验室,有时甚至差别很大,不同钢种也不一样。例如国内采用与国外成份、性能相近的不锈钢制造的水轮机,抗气蚀、磨损性能往往低于国外用同样钢种制造的水轮机,有的甚至相差十几倍。仔细检查后,常常可以发现,很多气蚀磨损是从材质缺陷处发生的,如气孔、夹渣、裂纹、材质疏松,铸造型线偏差大,再加上加工粗糙,波浪度大等等,都是促进产生气蚀、磨损破坏的原因。还有一些水轮机,发现材质偏析,机械性能达不到设计要求等。某电站的水轮机,曾发生全部叶片折断事故。最近对葛州坝某一叶片取样试验,发现不同部位材料的抗气蚀能力相差一倍。从已运行的两台水轮机观

察,所产生的气蚀磨损与材质的缺陷也有很大关系。

4. 对不便更换或不宜更换的另部件所用的材料或所采用的保护办法,要充分考虑损坏后易于修补的可能性与方便性。一般水电站水轮机机坑都比较潮湿,通风条件较差;直径较大的水轮机,吊出比较费时,往往会延长工期。而在机坑中焊补或作业时,则常常需要进行条件较差的仰焊与立焊等。故母材最好能不预热,对焊条要求可焊性好,烟雾小,不含有毒的蒸汽等。如苏联对 30Cr10Mn10 钢与焊条,即因毒汽大并易裂已停止使用。

5. 目前国产钢材的价格还比较昂贵,水轮机中常用的一些不锈钢约为碳钢的4~6倍,国外仅为1.5~2.5倍,复面仅1.2倍。因此在保证满足抗气蚀、磨损性能的前提下,也要努力逐步降低成本,提高其经济性。

四、结束语

水轮机气蚀、磨损是多年来严重危害水电站安全经济运行的突出问题之一。尤其是泥沙磨损,国外缺乏成熟的成功经验可供参考。多年来很多单位对各种材料与保护办法进行了大量的试验研究,已取得了不少成就,但还不能完全满足要求,必须进一步加强这方面的研究工作,同时要加强相应的基础理论与机理的研究,使之获得更好的解决。

参考文献

1. 于开泉 水力机械气蚀损坏实验与防护1981
2. 水电设备质量调查资料 水电部水电设备质量调查组1982
3. 郭中兴、张录勋、王志高 水机磨蚀1983No 1
4. 吴培豪 国外泥沙对水轮机的磨损及其防护简介1982
5. Тимирбулатов М. Г. И.Р.Кранин Энергомашиностроение 1979 № 8、9
6. Casting Materials for hydrauic Plants E.W.News 1964
7. R.T.Knapp. J.W.Daily. F.G.Hamitte Cavitation 1970

(上接第7页)

Cr-Mo alloy iron castings”

- [9] М. Е. Гарбер “Огивки из Белых износотойких Чугунов” 1972
- [10] 朴东学 “钨对钨系白口铸铁碳化物的影响” 1981.
- [11] К. Н. Zum Gahr “Optimizing Fracture Toughness and Abrasion Resistance in White Cast iron” Metallurgical Trans. A Vol. 11A p. 613
- [12] А.И.Яченко等 “Структуро-о Бразование в Цериевых Белых Чугунов”《литеиное Производство》(1974) No.7
- [13] 王兆昌等 “稀土变质白口铸铁的凝固形貌” 1981年8月
- [14] 姜振雄等 “锻造强韧性白口铸铁的研究”