

# 化学成分对铁-铬-碳系堆焊材料 抗磨蚀性能的影响

斯重遥研究员 金恒昀副研究员 李式运助理研究员  
郑笔康助理研究员 杭承钊助理研究员\*

(中国科学院沈阳金属研究所)

## 摘要

为解决水轮机在含沙水中的快速破坏，对铁-铬-碳系堆焊材料进行了研究，并在自行设计、制造的沙水旋流磨蚀试验机上进行了评定堆焊材料的抗磨蚀性能试验。试验结果表明，材料的抗磨蚀性能主要决定于初生析出相碳化铬的含量。随着碳、铬含量的降低，初生析出相由硬度高于共晶的碳化铬变为硬度低于共晶的合金固溶体，从而降低了堆焊层的硬度与抗磨蚀性能。含碳量进一步降低，堆焊层组织中的共晶将减少，固溶体相将相应增加，这样堆焊层的硬度与抗磨蚀性就会进一步降低。硼能提高高碳高铬白口铁焊条堆焊层的抗磨蚀性。硼对13%铬钢焊条堆焊层的抗磨蚀性的影响比对高碳高铬白口铁焊条更加明显。随着含硼量的增加，13%铬钢焊条堆焊层的硬度与抗磨蚀性基本成直线增长。

## 一、序言

在含沙水中工作的水轮机，其严重气蚀区常常受到快速破坏，需要经常检修，甚至在汛期也要被迫停机放水，造成在经济上与能源上的很大损失。因此，解决水轮机快速破坏的问题，就成为发展我国水电事业的一项重要任务。

导致水轮机快速破坏的机理在学术上有不同的看法<sup>[1]</sup>。有的认为是泥沙冲刷磨损，有的认为是气蚀破坏。通过多年现场试验与观察，根据在含沙水电站小水洞试件表面的磨蚀情况<sup>[2]</sup>，可以认为含沙水中工作的水轮机，其严重气蚀区快速破坏的机理，

\* 廉玉芬、郑凤珍、侯连亭、[赵景悠]、常树芝、张丽坤等同志参加了工作。

既不同于泥沙冲刷磨损，又不同于气蚀，而是两者联合作用下的破坏。这种破坏要比泥沙磨损或气蚀严重得多。造成快速破坏的原因是由于水中存在着泥沙。沙粒在气蚀作用下得到巨大的附加速度，以高速冲击、切削和犁沟金属表面，有的沙粒甚至嵌入磨蚀表面（图1）（图版1），造成表层材料严重变形与损伤。因之，联合作用下的磨蚀破坏，其本质属于磨料磨损的范畴。

基于上述观点，对发展水轮机抗磨蚀堆焊材料，首先考虑的是抗磨性，其次是抗气蚀性。即在材料有良好抗气蚀性能的基础上，致力于提高抗磨性，保证材料有相当数量且其硬度能与泥沙相抗衡的显微组织。

堆焊是解决水轮机快速破坏经济而有效的工艺。在六十年代初期，研究出了高碳高铬耐磨1号堆焊焊条作为水轮机抗泥沙磨损、抗气蚀堆焊材料。在此基础上，进一步研究铁-铬-碳系堆焊焊条的化学成分、堆焊层组织与硬度对材料抗磨蚀性能的影响，对于了解水轮机在严重气蚀区快速破坏的原因以及发展水轮机抗磨蚀堆焊材料有重要意义。

## 二、试验材料与试验方法

试验材料的主要化学成分范围为：C0.1%~3.5%、Cr7%~36%、B0%~2%。按常规方法测定焊条的化学成分及堆焊两层的堆焊层硬度。

堆焊层的抗磨蚀性能在自行设计、制造的转叶带动水沙旋流式磨蚀试验机上测定。该机能使试件表面受到泥沙磨损和气蚀的联合作用。磨蚀试件的尺寸为 $46 \times 26 \times 7\text{mm}$ ，试件上堆焊层的厚度为 $2 \sim 4\text{ mm}$ 。所用的试验参数列于表1。

表1 磨 蚀 试 验 参 数

项 目	参 数 1	参 数 2
水流速度 (m/s)	23	13.2
水流冲角 (°)	9	9
磨 料	尖角石英砂	<1mm浑河沙
水加入量 (L)	4.5	5
磨料加入量 (kg)	1.5 (每隔20min更换一次)	1.5
试验时间 (min)	40	300
标准试件材料	18-8不锈钢或G3	G3
抗磨系数符号 *	$E_1$ 钢	$E_2$

\* 抗磨系数 $E = \text{标准试件失重}/\text{试验材料失重}$

## 三、试验结果与讨论

### 1. 焊条中碳、铬含量对堆焊层抗磨蚀性能的影响

11%~12% Cr钢焊条在含0.47%~1.85% C范围内，堆焊层的抗磨蚀性不受含碳量变化的影响。7% Cr钢焊条堆焊层的抗磨蚀性能低于11.5% Cr钢焊条，并随含碳量的不同而变化。当碳为1.15%时，堆焊层的抗磨蚀性能最佳，见图2。

含C1.2%铬钢焊条，当含铬量从7%增加到12%时，堆焊层的抗磨蚀性提高40%以上。进一步提高含铬量反而会使堆焊层硬度与抗磨蚀性能降低，见图3。

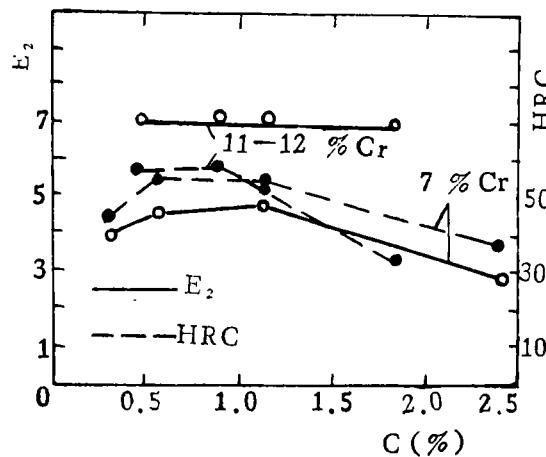


图2 7%Cr与11%~12%Cr的焊条中  
碳对堆焊层抗磨蚀性能的影响

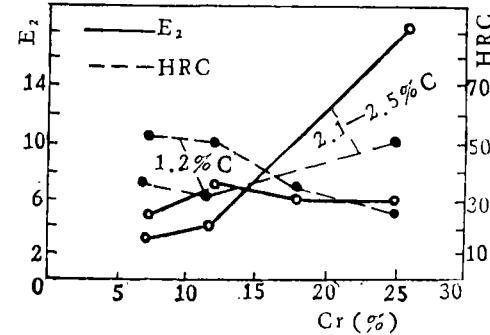


图3 含C1.2%铬钢与含C2.1%~2.5%铬铁  
焊条中铬对堆焊层抗磨蚀性的影响

含C2.1%~2.5%铬铁焊条堆焊层的抗磨蚀性能随着焊条含铬量的增加而显著提高(图3)。当焊条含铬量从6.8%增加到25%时，堆焊层的抗磨蚀性能约提高六倍。

当Cr/C为6与10时，堆焊层的抗磨蚀性随着碳、铬含量的增加而提高(图4)。

高碳高铬焊条中Cr/C为11或12时，堆焊层抗磨蚀性的提高与焊条中碳、铬含量的增加大致成线性关系(图5)。

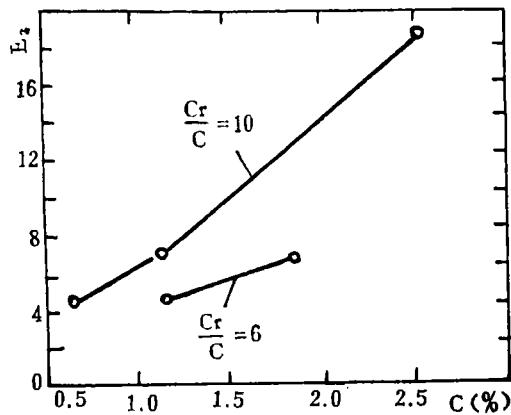


图4 Cr/C为6、10时，焊条中碳含量  
对堆焊层抗磨蚀性的影响

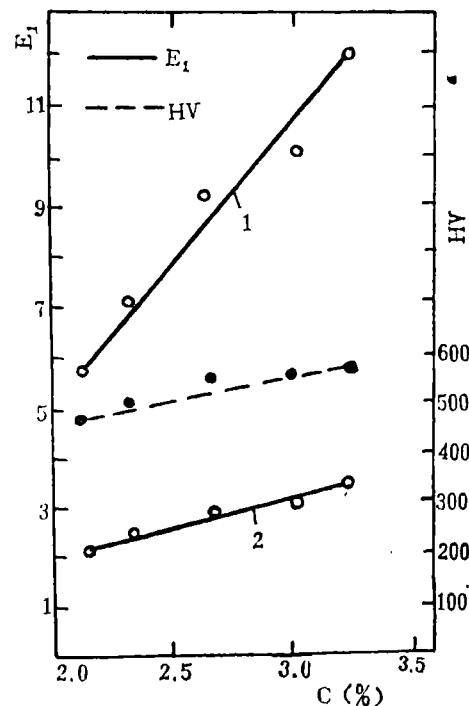


图5 焊条中Cr/C为11或12时，C堆焊层硬度与  
不同粒度沙粒下对磨蚀性的影响  
1. 140~200目，2. 22~40目

堆焊层基体含铬量的增加对提高高碳高铬白口铁抗磨蚀性的效果远不如增加碳化铬明显。表2中 $F_1$ 与Cr3焊条含铬量相同，但由于前者含碳量高， $F_1$ 焊条堆焊层的抗磨蚀性高出Cr3焊条40%以上。

## 2. 堆焊层组织与硬度对抗磨蚀性能的影响

表2中所列的试验焊条，堆焊层组织都是共晶(HB588)加初生析出相碳化物(HB1145)或固溶体(HB382)。随着碳、铬含量的降低，初生析出相由硬度高于共晶的碳化物转变为硬度低于共晶的富铬固溶体。进一步降低含碳量会使共晶数量减少，固溶体相增多，导致堆焊层硬度降低，抗磨蚀性能显著变坏。

表2 高碳高铬白口铁焊条堆焊层的抗磨蚀性能

试 验 焊 条	焊条的主要化学成分(%)与Cr/C			堆焊层共 品含量 (%)	堆 焊 层 (HV)	磨 料 粒 度			
	C	Cr	Cr/C			相对抗磨蚀性 $E_1$			
						22~40目	140~200目		
$F_1$	3.51	29.98	8.54	—	671	4.64	13.01		
Cr1	3.24	36.15	11.16	—	582	3.51	12.21		
Cr2	3.06	34.01	11.15	57.0	563	3.15	10.06		
Cr3	2.66	29.71	11.17	49.4	563	3.00	9.24		
Cr4	2.35	27.54	11.71	33.3	512	2.54	7.06		
Cr5	2.15	25.73	11.96	—	481	2.35	5.78		
Cr6	1.83	23.37	12.77	26.2	419	2.20	4.52		
18-8不锈钢标准试件 0.08%C, 18.4%Cr, 9.5%Ni, 0.49%Ti				—	152	1.00	1.00		

堆焊层的组织结构对磨蚀表面的破坏形貌影响很大。18-8不锈钢因有均匀的单相奥氏体组织，磨蚀表面呈均匀的细鱼鳞状。对于具有不同硬度多组织的材料，磨蚀表面的破坏形貌比较复杂。表2中Cr1堆焊层由于接近共晶成分，初生析出相不多，晶粒较小，磨蚀表面也较均匀，可以见到凸出的小颗粒碳化物硬相质点（图6）（图版1）。随着堆焊层偏离共晶成分，如Cr4~Cr6，堆焊层由于低硬度固溶体相的比重急剧增大，磨蚀表面形成优先磨蚀掉的固溶体相凹坑与周围凸出的共晶硬相组织，它有着与金相组织相类似的形貌（图7）（图版1）。这些情况说明高碳高铬白口铁焊条的堆焊层中，碳化物对抗磨蚀性起着重要的作用。

## 3. 硼对铁-铬-碳系焊条堆焊层抗磨蚀性能的影响

高碳高铬白口铁焊条中加入1.6%硼，堆焊层的抗磨蚀性显著提高（图8）（图版1）。因为硼增加堆焊层的共晶数量并形成高硬度的硼碳化物。

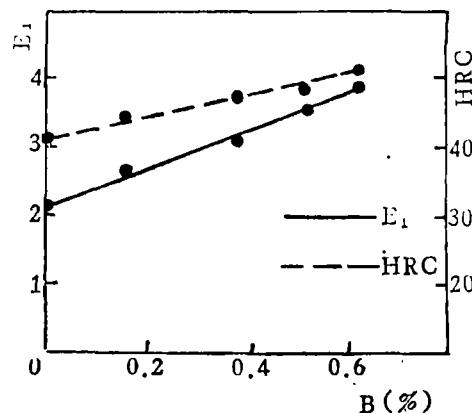


图9 0.1%C、13%Cr钢焊条中，含硼量的增加与堆焊层硬度与抗磨蚀性的提高成线性关系

硼对0.1% C、13% Cr钢焊条堆焊层的抗磨蚀性能的影响比它对高碳高铬白口铁焊条更加明显。图9表明，随着含硼量的增加，堆焊层共晶数量增加，堆焊层硬度与抗磨蚀性能基本成直线增长。

### 三、结 论

1. 铁-铬-碳系焊条中，堆焊层的抗磨蚀性能主要决定于焊条的碳、铬含量。7% Cr钢焊条堆焊层的抗磨蚀性能随着含碳量不同而变化。11%~12% Cr钢焊条堆焊层的抗磨蚀性不受含碳量的影响。高碳高铬白口铁焊条堆焊层的抗磨蚀性能随着含碳量增加而线性地提高。
2. 高碳高铬白口铁焊条的抗磨蚀性主要决定于碳化物含量。随着焊条碳、铬含量的降低，堆焊层中初生析出相由碳化物变为固溶体，使堆焊层的硬度及抗磨蚀性能降低。
3. 堆焊层的组织结构对磨蚀表面的破坏形貌影响很大。由于堆焊层中碳化物、共晶和固溶体的抗磨蚀性能不同，磨蚀表面的破坏形貌有着与金相组织相似的形貌。
4. 硼能提高高碳高铬白口铁焊条堆焊层的抗磨蚀性能。硼对0.1% C、13% Cr钢焊条堆焊层抗磨蚀性能的影响比它对高碳高铬白口铁焊条更为显著。

### 参 考 文 献

- (1) 杜 同:《摩擦磨损》, (1980), №1, P16。
- (2) 中国科学院金属研究所:《金属材料在含沙水中破坏特性的影响》, (1983)。

(1983年12月6日收到)

EFFECT OF CHEMICAL COMPOSITION ON  
THE EROSION-CAVITATION RESISTANCE OF SURFACING  
MATERIALS OF Fe-Cr-C SYSTEM FOR HYDROTURBINE

Research Professor Si Zhongyao, Research Associate Professor Jin Hengyun,  
Research Instructor Li Shiyun, Research Instructor Zheng Bikang,  
Research Instructor Hang Chengzhao

(Shenyang Institute of Metal Research, Academia Sinica)

**Abstract**

In order to find an erosion-cavitation resistant material for hydroturbine, surfacing materials of Fe-Cr-C system were studied and evaluated in the laboratory with rotating blades type erosion-cavitation test apparatus which was designed and made by ourselves. Test results show that the ability of surfacing material to resist erosion-cavitation is essentially dependent on the quantity of primary chromium carbide in the microconstituents. Decreasing the carbon and chrome content in surfacing material would change the primary phase from chromium carbide, which is harder than eutectic, to alloyed austenite, which is softer than eutectic. Therefore, it would also lower the hardness and the erosion-cavitation resistance of surfacing material. Further decreasing the carbon content would further lower the hardness and the erosion-cavitation resistance due to the decrease of eutectic and increase of austenite. The effect of B on the erosion-cavitation resistance of surfacing layer of 1.15% C, 12% Cr steel electrode is more pronounced than on that of high carbon, high chrome white iron electrode. To increase the boron content in 0.1% C, 13% Cr steel electrode would almost linearly increase the hardness and the erosion-cavitation resistance of surfacing material.