



### 水利水电工程抗空蚀材料研究新进展\*

27  
78-81

李伟, 梁川

(四川大学, 四川 成都 610065)

TV47  
TV131.32  
TG174.2

**摘要:**从金属材料、掺混高分子聚合物的脆性材料、IPN类材料三个方面叙述了抗空蚀材料研究的新进展,分别探讨了各自抵抗空蚀作用的机理。在总结这些成果的基础上,对今后抗蚀材料的研究,提出了一些新的观点和建议。

**关键词:**空蚀;抗蚀材料;抗蚀性

**中图分类号:**TV131.3+2;TG174

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2000)02-0078-04

## 1 前言

在高速水流中,空蚀是常见的水力现象。它是由水流内部许许多多尚未溶解的空气或蒸汽气核在低压区失稳后形成气泡,再由高速水流的高度紊动,被随流带走。当带到下游高压区时,由于内外压差迫使气泡突然溃灭,气泡溃灭过程时间极短,只有几百分之一秒,致使周围水流质点的动量在几乎无穷小的时间内发生较大变化,从而产生巨大的冲击力,其最大可达上万个大气压。这种巨大的冲击力不停地冲击着固体边界,给固体表面造成严重的剥蚀。空蚀在水工建筑物中会造成蚀坑、麻点等;在水力机械中还会引起诸如噪声、振动一类的次生现象,引起机组大修间隔缩短、效率下降,造成巨大的经济损失。

为防止空化对过流固壁的破坏,国内外对过流体型、选取抗蚀材料、掺气减蚀等方面进行了许多研究,取得不少成果。到目前为止,对抗蚀材料的研究,主要针对抗蚀材料的不同可归纳为以下几个方面。

## 2 金属材料的抗蚀研究

对金属材料的抗蚀研究,主要针对泵、水轮机一类的水力机械以及闸门等金属结构的过流面,在高速水流情况下,通常会发生空蚀破坏。金属材料的空蚀破坏是一种疲劳破坏,蚀区呈现海绵状或蜂窝状蚀坑,破坏区域金属亦不再是本来的银白色,而呈暗灰色。为了增强叶轮、导叶一类零部件的抗蚀能力,研究的方向是“以硬制硬”,即设法提高零部件空蚀区的硬度,从而增加材料的疲劳强度,以抵抗在冲击作用下零件表面抗局部破坏的能力,增加抗蚀性。

利用常规的热处理方法,改变金属材料的金相

结构来增加材料表面硬度是传统的方法。经研究发现,单一 $\alpha$ 相金属的硬度和屈服强度均比较小,易于空蚀破坏;单一 $\beta$ 相的金属强度较高,但材料的冷脆性大,塑性强度低,易开裂。而 $\beta+\alpha$ 相组成的合金材料具有二者的优点,其抗蚀性较好。607结构钢的金相组织为马氏体和奥氏体,马氏体组织比较脆硬,奥氏体组织的机械性能较好,再经高温回火,607结构钢的强度、韧性均较好,其抗空蚀能力也较强。铬锰钢在受压塑性变形时,其中奥氏体可形成马氏体而使表层硬化,当表层破坏后,又可形成新的坚硬马氏体表面层来抵抗水流空蚀破坏的作用,见图1。

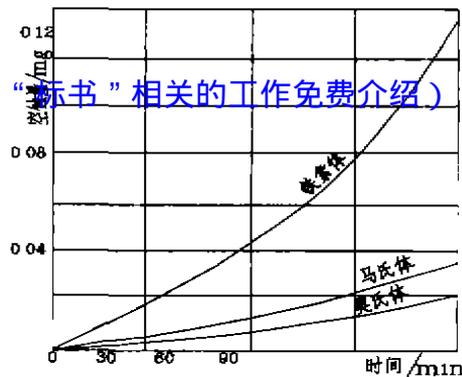


图1 各种金相结构下不锈钢的抗空蚀能力图

在实际应用中,陈文革利用低铬镍合金莱氏体铸钢 ZG93,代替平常制作转轮所用的碳素钢和不锈钢,发现转轮的服役寿命得到了延长。许健、潘健等人研究发现,0C,13N,6Mo 马氏体不锈钢抗气蚀损坏的综合性能为 ZG30 的 4~10 倍,为 1C,18N,9T 奥氏体不锈钢的 3~7 倍,具有很好的抗磨蚀性能。但它的硬度很高(HRC>50),对于蚀坑堆焊后无法正常打磨,且其抗裂性能差。

提高金属材料硬度也可采用离子注入的方法。吴建华、柴恭纯在金属表面注入 N<sup>+</sup>发现,离子注入后产生的晶格畸变,阻止了位错移动及滑动,它们之间凝聚而形成的可塑形态的表面层,增加了表面硬

收稿日期:1999-07-07

\* 国家自然科学基金资助课题(59679006)



耐磨性。这了很好的效果。在提高金属材料表面硬度上, 还可利用喷丸法, 使表层金属冷作硬化, 从而提高表面硬度。但这种方法要求专用设备, 不适于在电厂修补中应用。

随着激光技术在工业生产中应用的推广, 使得材料抗空蚀性得到提高。捷克的 Miroslav Harbovsky 利用制泵常用材料制成的试件, 在常规热处理后, 用 2.5 kW 的连续 CO<sub>2</sub> 激光再进行硬化处理。结果发现, 材料抗蚀性全部得到提高, 且对于不锈钢抗蚀性的提高特别明显。

硬度大的金属通常具有较高的抗蚀性, 但在有些情况下却例外。例如: 铝青铜的硬度比普通碳钢和铸铁都低, 但其抗空蚀性却较二者都好。分析认为, 铝青铜的结晶晶粒较普通碳钢和铸铁的结晶晶粒更

细, 在外力作用下, 同样的变形量可能在更多的晶粒中发生, 产生较为均匀的变形, 而不致造成局部应力集中, 以至引起裂纹过早地产生和发展, 从而增加其抗蚀性。由此可见, 仅利用硬度来判断金属材料的抗蚀性能是不全面的, 材料的韧性、致密程度在对其抗蚀性的影响中都起着一定作用。

空泡溃灭对材料的破坏作用是一种高频机械脉冲力的作用, 其加载速率高, 是一种动态过程, 且含有疲劳破坏的特点。通常对材料的研究都是从材料静态性能考虑, 未考虑到材料受力时的动态特性, 也没能考虑多个空泡溃灭对材料的疲劳作用, 难以真实地反映材料受力过程。为研究材料在多次冲击作用下的性能, 利用冲头以一定能量  $E$  作用在旋转着的试样上, 直到断裂。将不同冲击能量  $E$  和疲劳寿命  $N$  绘制在单对数坐标图中, 得  $E-N$  曲线见图 2。

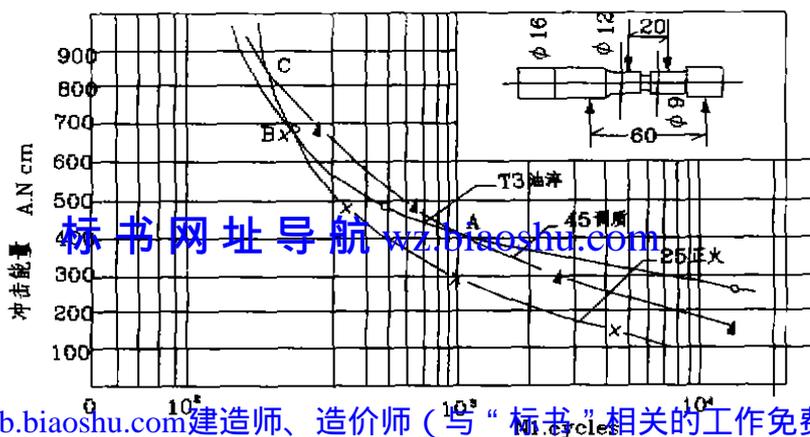


图 2 冲击能与冲击疲劳寿命关系示意图

可以看出, 三种不同强度、韧性材料的  $E-N$  曲线存在交点。交点以左, 韧性高、强度低材料寿命长, 即韧性控制多冲寿命; 交点以右, 则是强度控制多冲寿命; 经过交点, 寿命的控制因素发生转移。但由于冲击头尺寸远远大于空泡溃灭冲击波及微流的作用半径, 此项研究与空蚀破坏是否具有可比性还需进一步探讨。国外的富尔普姆斯水电站根据这个原理, 在低流速区采用以聚氨酯为基础的粘弹性材料, 其余部分采用高硬度的戴特伯镀层, 转转寿命估计能由 1 年提高到 4 年。

金属材料的抗蚀, 一味强调硬度并不是一种完美的方法。当材料硬度太大时, 切削加工就会遇到困难, 不利于过流边壁的修整, 同时也加大了加工成本。由以上对金属材料冲击疲劳寿命的研究看出, 若要提高材料的多冲寿命, 应使材料具有一个适当的硬度与韧性的配比。这样, 在空蚀作用下, 材料能够缓冲微射流或冲击波的作用力, 减轻空蚀的破坏。同时, 考虑到零件加工的经济性和内应力分布问题, 零

件的表面处理技术应当是今后研究的一个重点。

### 3 掺混高分子聚合物脆性材料的抗蚀研究

混凝土是一种典型的脆性材料, 它在水工建筑物中用量也最大, 用它来研究脆性材料的抗蚀性具有很好的代表性。混凝土的空蚀破坏, 首先是粘结混凝土骨料的水泥浆被破坏, 使得单个骨料颗粒暴露出来, 形成麻点状蚀坑。随着水泥浆的进一步掏空, 最终骨料也被冲走, 周而复始, 蚀坑越变越大。为加强混凝土的抗蚀性, 如今的研究大多是向着提高其强度的方向发展。提高混凝土强度的方法有许多, 其中最具有代表性的有以下几种。

在普通混凝土干燥后, 从表面使单分子化合物渗入, 经加热或其它方法, 使其形成聚合物浸渍混凝土, 可以增强抗蚀性。黄河水利委员会科研院对聚合物砂浆的抗空蚀能力进行过研究。不同聚合物所制



名称	抗蚀率	抗蚀能力 ( $\times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ )
环氧砂浆	1 100	0.60
聚酯砂浆	1 347	0.45
浸渍钢纤维高强水泥砂浆	2 345	0.42
浸渍钢纤维普通水泥砂浆	332	1.82

表 2 不同性质水泥砂浆抗蚀能力比较表

水泥砂浆名称	抗压强度/ $\times 10^5 \text{ Pa}$ (与普通水泥砂浆之比)	抗蚀能力
普通水泥砂浆	235	1.00
高强水泥砂浆	616	8.37
乳胶高强水泥砂浆	102	2.14
聚酯水泥砂浆	1 347	43.90
浸渍钢纤维普通水泥砂浆	630	12.26
钢纤维普通水泥砂浆	303	0.97
钢纤维乳胶高强水泥砂浆	222	1.98
钢纤维高强水泥砂浆	687	4.89

成的砂浆的力学性质及最大空蚀率见表 1,几种砂浆的抗空蚀性能见表 2。

南京水利科学研究院也对不同材料的抗空蚀性能进行了研究,试验条件为流速  $V=48 \text{ m/s}$ ,水流空化数  $\sigma=0.1\sim 0.136$ ,试验结果见表 3。

表 3 各种材料抗空蚀及抗磨蚀试验结果表

序号	材料种类	抗压强度 ( $\times 10^5 \text{ Pa}$ )	抗拉强度 ( $\times 10^5 \text{ Pa}$ )	抗磨蚀速度 ( $\text{h} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) $^{-1}$	抗空蚀试验龄期及强度 龄期/d 强度( $\times 10^5 \text{ Pa}$ ) $^{-1}$
1	高强砂浆	605	54	0.84	230~233 4.43
2	高强混凝土	637	47	0.80	127~131 1.05
3	高强混凝土+真空作业	572	47	0.78	127~131 0.78
4	高强混凝土+钢纤维	691	71	0.66	107~131 4.00
5	EP-6101 环氧树脂砂浆	1 075	171	1.62	122~136 58.18
6	EP-6101 树脂砂浆	942	140	1.64	184~185 31.41
7	干硬性砂浆	526	41	0.67	139~140 1.22
8	AE-320 树脂砂浆	923	180	3.64	36~41 55.17
9	AE-320 树脂胶泥	950	196	1.33	123~124 113.00

近年来,对硅粉混凝土的抗蚀性研究较多。硅粉是冶炼硅合金或硅金属时高纯度的石英与焦炭发生还原反应生成的一种副产品,  $\text{SiO}_2$  含量一般在 90% 以上,颗粒极细,比表面积大,活性很高,它与水泥的水化产物反应生成 C-S-H 凝胶,使  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体减少,晶粒细化,可有效改善混凝土的浆体结构。黄继汤,龙在明利用文丘里空蚀设备,在不同水灰比条件下,研究了不同硅粉掺量的混凝土的抗空蚀性能,发现在普通混凝土中,掺入硅粉后,对其抗蚀性大有改善。而且不同的水灰比具有不同的最佳硅粉掺量。在此基础上,尹延国、胡献国、朱元吉进一步探讨冲刷磨损机理后,提出在掺入活性硅粉的同时,在**高强混**

凝土中加入高效减水剂,对混凝土的抗蚀性大有提高。但硅粉混凝土容易产生早期裂缝,故必须采取限量掺入及保湿养护措施。

为增强混凝土的抗空蚀性能,添加材料的研究前景广阔。针对混凝土结构中存在大量的不同种类、不同孔径的孔隙这个特点,添加材料的掺入应能填充这些孔隙,增加混凝土的密实度,并与孔隙的壁粘结成具有一定强度的结构。并且,掺入材料最好能充分吸收外界对混凝土的冲击功,吸收震动能,提高混凝土的抗冲击性能。

### 4 IPN 类材料的抗蚀研究

为防止空蚀的破坏,在空蚀区表面使用各种保护层是近年来研究的热点。国内外多采用聚合物板材、橡胶、氟于橡胶以及氨基甲酸酯等材料,其中橡胶类材料弹性模量低,可以承受较大的应变,具有良好的抗蚀性。但在实践中却发现,由于粘接不牢,常发生大块剥落或撕裂现象。这类材料充分利用高分子材料所具有的高回弹性、高柔韧性的特点,在空蚀作用下,材料表面发生弹性变形,吸收冲击功,缓冲空蚀作用力,从而减轻空蚀破坏,被称为“以柔克刚”的方法。一些非金属材料空蚀性能示于表 4 中。

表 4 非金属材料的抗空蚀性能表

材 料	试验时间/h	试件状态
高密度低模量的聚烯烃	10	未发现破坏
低密度高压力的聚乙烯	10	破坏
卡普隆	48	开始破坏
树脂 68	9	破坏
硬聚氯乙烯	2	破坏
在 ZG20SiMn 上的弹性覆盖层	17	覆盖层破坏
喷涂在 ZG20SiMn 上的聚乙烯	2	覆盖层破坏
钢 1Dr18Ni10Ti	34	失质 10 mg

薛希亮等人根据 VE 树脂分子结构具有良好的力学性能、化学稳定性和粘附能力,研制出了 YHR 常温涂覆材料,对葛洲坝三号船闸反弧门的气蚀区进行修补。经 27 个月使用后,观测发现,整扇反弧门面板及相应门楣上均未见到气蚀坑,涂层表面光滑平整,无局部脱落。防蚀效果良好。

在黄河小浪底水电站,经研究发现,保护水轮机受蚀部件最有效的办法是采用碳化钨涂层,这是一种称为快速氧化燃烧层(简称 HVCO)的热力喷射工艺中常采用的材料。此工艺是将微小的碳化钨颗粒加热到略低于熔点,并以超声波速度喷射到部件上,形成一层薄薄的保护层,以起到防蚀作用。这种方法在实际工程应用中具体效果怎样,由于小浪底电站还未投入运行,尚有待检验。



对抗蚀材料大量的硬质相... (2) 基体组织应具有较高的韧性,保证优异的抗冲击、抗疲劳性能; (3) 基体与硬质相应具有良好的互溶性,使其在使用条件下,前者能有效地支持硬质相不被剥落,后者能最大程度地溶入基体,使其进一步得到固溶强化。他具体在 20SiMn 和不锈钢母材上喷熔了 SPH 材料,发现涂层与两种基材间均具有较好的互溶性,而且抗蚀性好。

随着 IPN(Interpenetrating Polymers Networks 互穿网络聚合物)技术的出现,其材料特有的柔顺性和高回弹性,逐渐被人们认识到了它们在水利工程应用中的巨大潜力。梁川、吴持恭在对 IPN 材料的抗蚀耐磨性能分析中发现,IPN 材料的分子链通过链的形变快速吸收、传递和分散外力,从而减轻了各个网络的受力强度,延缓了网络的疲劳破坏,能起到一定的缓冲作用,可减轻空蚀。具体针对环氧树脂/聚氨脂(EP/PU)互穿聚合物研究发现,当 EP/PU = 70/30 时,两种聚合物共混的协同性最好,互穿也最充分,此时材料的断裂强度和断裂能最大,表现出良好的回弹能力和抗疲劳破坏能力,因而具有良好的抗蚀性。表 5 为 IPN 材料的力学性能表。

表 5 EP/PU 不同组分的力学性能表

性能指标	重量比 EP/PU			
	2/3	1/1	1/2	1/3
杨氏模量/MPa	2 374.0	1 015.4	524.7	239.1
扯断伸长率/%	2.01	211.9	105.1	160.1
断裂强度/MPa	29.11	37.67	22.45	15.29
断裂能	0.025	1.806	1.140	1.637

## 5 结 语

由于空蚀对材料作用的复杂性,仅从材料的角度来研究防蚀是不够的,应把水力学中空蚀作用机

理与材料抗蚀行为联系起来进行防蚀研究。例如,在空化强度大和空化强度小的情况下,韧性材料和脆性材料抗蚀机理是否一致;材料的哪一项机械性能指标起主导因素等。由于空蚀作用在速度、压力等诸多方面存在的比尺效应,如何统一空蚀强度量化标准,以利于材料抗蚀性之间的比较,也是一个需要探讨的问题。在抗蚀材料方面,就目前研究的成果来看,质地致密均匀、具有高硬度、高回弹性的材料普遍抗蚀性好,这应该是研制抗蚀材料的一个新的方向。今后在利用新技术,跨学科研究方面应由宏观的力学作用,深入分析材料分子或晶粒在微观下抗蚀的机理。

### 参考文献:

- [1] 陈文革,一种新型的抗磨蚀材料[J],机械工程材料,1998年,(4).
- [2] 吴建华,柴恭纯,离子注入技术在水轮机材料空蚀改性中的应用[J],水利水运科学研究,1994年,(3).
- [3] 孙寿,水泵汽蚀研究的现状[J],水泵技术,1995年,(3).
- [4] 李修树译,水轮机的泥沙磨蚀问题[J],水利水电快报,1997,(31).
- [5] 黄继汤,龙在明,硅粉混凝土抗空蚀性能试验研究[J],水利学报,1991,(1).
- [6] 尹延国,胡献国,朱元吉,水工高强混凝土抗磨耐蚀性试验研究[J],水利水电技术,1998,(12).
- [7] 薛希亮,蒋硕忠,方绪非,水工建筑物抗气蚀高分子涂层材料的研究[J],长江科学院院报,1993,(1).
- [8] 许健,潘健,黄智泉,魏建军,赵予生,OCr13Ni4~6MoRe 抗磨电焊条在水电站抗磨蚀修复中的应用[J],水利水电技术,1998,(6).
- [9] 梁川,吴持恭,一类 IPN 材料的抗蚀耐磨性能分析[J],水利学报,1997,(12).
- [10] 陈晓平,水轮机抗磨蚀技术进展[J],水利水电技术,1996,(12).
- [11] 梁川,汝树勋,高学敏,IPN 材料的抗空蚀实验研究[J],泄水工程与高速水流,1996年2月.
- [12] 黄继汤,空化与空蚀的原理及应用[M],北京:清华大学出版社,1991.
- [13] 郑修麟,材料的力学性能[M],西安:西北工业大学出版社,1996

### 作者简介:

李伟(1972年-),男,四川西昌人,四川大学研究生,从事水力学研究。  
梁川(1957年-),男,重庆荣昌人,四川大学水电学院党委书记,教授,博士生导师,从事水力学教学与研究。

## “西电东送”中的四川水电建设

四川省电力局石万俭局长最近撰文阐述了四川省在西部大开发“西电东送”战略中水电发展的必要性、重要性以及发展前景。向从事水电工作的同仁们展示了四川省水电发展的美好前景,对于我们了解当前及今后的四川省水电发展方向颇有裨益,现转摘要点于后。

水电在西部大开发中举足轻重,已引起中央和地方领导的高度重视。

一、实施“西电东送”战略,是立足于西南水电资源优势,实现可持续发展战略的必然选择。

- (1) 实施“西电东送”战略,是实现全国能源资源优化配置的需要。
- (2) 实施“西电东送”战略,符合全国电力结构调整的需要。
- (3) 实施“西电东送”战略,是实现可持续发展战略的必然选择。
- (4) 实施“西电东送”战略,有利于实现共同富裕。
- (5) 实施“西电东送”战略,功在当代,利在长远。

二、加快西南水电基地建设,实施“西电东送”战略,不仅必要,而且可行。实施西部大开发战略,为加快西南水电开发,实现“西电东送”提供了难得

的历史机遇。四川将吸引更多的国内外资金,为“西电东送”和向西北送电的跨流域调节补偿骨干水电项目的启动和建设打下坚实的财政基础。四川水能资源得天独厚,是西部大开发的重点,发掘四川省巨大的水能开发利用潜力,必将成为四川经济增长的主导产业,开发水电,实现“西电东送”已被四川省委、省政府确定为五大支柱产业之首,并将具体战略思路分近期、中期和远期三个步骤实施。

三、实现“西电东送”战略目标,必须立足全国,统筹考虑,中央应在建设贷款和税收方面给予优惠。

(1) 明确开发水电就是开发西南,关键是要把规划工作抓好。西南水电开发和“西电东送”要放在全国的大格局统筹考虑。四川水电要参与全国一次能源的平衡,要立足全国,做到全面规划,重点突破。

(2) 在水电建设贷款和税收方面给予优惠。建议水电建设期为贷款宽限期,还款年限为30年,同时将新建大型水电工程的增值税按现行小水电税率(6%)征收(电网应缴纳的增值税不变),以促进西南水电的开发,变资源优势为经济优势。

本刊记者 李燕燕 稿