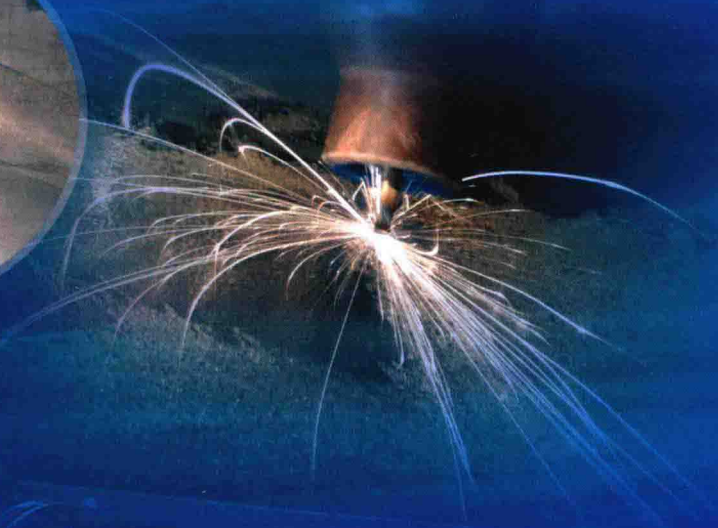


DIANHUOHUA CHENJI JISHU JIQI SHUIDIAN YINGYONG

电火花沉积技术及其水电应用

王建升 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

电火花沉积技术及其水电应用

王建升 著

常州大学图书馆
藏书章



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书采用了新型电火花沉积技术,制备出了多种具有细小晶粒弥散分布的微纳米复合结构 WC-Co 涂层及其不同工艺结合的复合涂层结构,然后分别从电火花沉积工艺参数、涂层的物相分析、涂层的非平衡凝固组织特征、涂层的表面形貌、涂层的显微硬度、涂层的耐磨性能及其机理、涂层的高温氧化性能及其机理和电火花沉积技术在不同水电厂的实际应用 8 个方面进行了深入研究。

本书对电火花沉积微纳米涂层及复合涂层进行了系统研究,对其性能介绍全面,所得结论深刻。适合于国内金属表面处理专业的研究生和表面处理技术人员,以及从事水利水电行业机械设备磨损领域的工作人员参考使用。

图书在版编目 (C I P) 数据

电火花沉积技术及其水电应用 / 王建升著. — 北京:
中国水利水电出版社, 2017. 5
ISBN 978-7-5170-5494-8

I. ①电… II. ①王… III. ①电火花加工 IV.
①TG661

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第112631号

书 名	电火花沉积技术及其水电应用 DIANHUOHUA CHENJI JISHU JIQI SHUIDIAN YINGYONG
作 者	王建升 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 9 印张 213 千字
版 次	2017 年 5 月第 1 版 2017 年 5 月第 1 次印刷
定 价	50.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

我国是水力资源极为丰富的国家，水电已成为我国重点发展的可再生能源之一，但我国的河流泥沙含量大，河流的大量含沙导致水电厂水轮机的磨蚀破坏，严重影响水电设备的寿命和安全运行。目前的水轮机转轮的表面强化和磨损修补除了普通堆焊能发生冶金结合外，其他的一些保护措施基本属于机械结合，涂层与基体结合能力较差，容易遭受泥沙的冲击和强气蚀的破坏作用而导致涂层脱落，不能起到保护延长水轮机过流部件寿命的作用。本书介绍的由电火花沉积技术制备的微纳米合金涂层，不仅致密的涂层与基体之间属于冶金结合，而且涂层还具有非常高的硬度、耐磨性、耐气蚀性和耐冲击性。本书介绍的电火花沉积技术在水利水电行业的研究与应用对于延长水利工程机械产品寿命、节能节材、减少排放、提升相关企业的技术水平和市场竞争力具有重要的意义。

本书主要介绍了获得优化的电火花沉积工艺参数及其对 WC-Co 涂层组织、结构、性能的影响规律，以及成功制备出的 WC 和 Co 成分比例不同、多种具有细小晶粒弥散分布的微纳米复合结构 WC-Co 涂层，并研究了电火花-等离子复合涂层和电火花-激光复合涂层。电火花沉积涂层具有非平衡凝固的组织特征。对电火花沉积微纳米涂层及其复合涂层的显微硬度、耐磨性能和高温氧化性能进行了系统测试。介绍了沉积层的磨损形貌和高温氧化形貌，并对涂层在各种条件下的磨损机理和氧化机理进行了分析。本书利用电火花沉积工艺把陶瓷硬质合金熔覆于铸钢不锈钢材料表面，使该表面产生不融于基体的超细高熔点碳化物，使这些碳化物能够弥散、细小地分布于基体相中，形成的这些相组织互不相溶，在使用过程中可以长期保持相结构，具有长期热稳定性。这样能保证沉积层具有高温硬度、高温耐磨性能和长期的高热抗氧化性能。本书研究的电火花微纳米涂层，经云南德宏福榕大盈江水电开发有限公司、黄河小浪底水电站、新疆塔里木水电厂和云南大寨水力发电厂等单位使用，在水轮机上制备的涂层使用性能良好，经济和社会效益显著，同时保护了环境。发展系

列化的电火花沉积技术及其复合涂层技术，对中国水电行业的经济和社会发展均具有重大意义。

在本书的撰写以及实验研究过程中，华北水利水电大学的同事和北京科技大学的校友以及河南三门峡水电厂、云南大盈江水电厂、大寨水利水电厂和小浪底水电站等单位的领导、工程师、工人师傅给予了大力帮助，同时家人也给予了大力支持，在此一并表示衷心的感谢！

本书得到中国科技部国际科技合作项目“非晶纳米晶复合涂层的制备及其极端条件下的性能研究”（批准号：2006DFA52240）、水利部 948 推广项目“硬面涂层技术在水利过流部件中的应用”（批准号：201048）、校高层次人才启动项目“电火花沉积水电站水轮机叶轮抗磨蚀技术”（批准号：40121）的赞助，特此表示感谢！

由于本书的内容多为本人最近几年的研究成果，并且受水平及能力所限，如有不足之处，敬请读者批评指正。

王建升

2017 年 4 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电火花沉积技术意义	1
1.2 电火花沉积技术研究现状	4
1.3 电火花沉积技术在水电厂的必要性	7
1.4 本书研究内容	20
第 2 章 电火花沉积技术工艺研究	22
2.1 时间对沉积层质量研究	22
2.2 功率对沉积层质量研究	23
2.3 频率对沉积层质量研究	24
2.4 电压对沉积层质量研究	25
第 3 章 电火花沉积层表面形貌分析	27
第 4 章 电火花沉积 WC-Co 涂层物相分析	30
4.1 电火花沉积 WC-4Co 涂层物相分析	30
4.2 电火花沉积 WC-8Co 涂层物相分析	32
4.3 电火花沉积 WC-15Co 涂层物相分析	34
4.4 电火花沉积铁基非晶涂层物相分析	34
第 5 章 电火花沉积层截面组织及能谱分析	36
5.1 电火花沉积 WC-4Co 截面组织及能谱分析	36
5.1.1 电火花沉积 WC-4Co 截面组织及能谱分析一	36
5.1.2 电火花沉积 WC-4Co 截面组织及能谱分析二	39
5.2 电火花沉积 WC-8Co 截面组织及能谱分析	42
5.2.1 电火花沉积 WC-8Co 截面组织及能谱分析一	42
5.2.2 电火花沉积 WC-8Co 截面组织及能谱分析二	45
5.2.3 电火花沉积 WC-8Co 截面组织及能谱分析三	48
5.2.4 电火花沉积 WC-8Co 截面组织及能谱分析四	49
5.3 电火花沉积 WC-15Co 截面涂层及能谱分析	52
5.3.1 电火花沉积 WC-15Co 截面组织及能谱分析一	52
5.3.2 电火花沉积 WC-15Co 截面组织及能谱分析二	55

5.4	沉积层结晶组织生长过程探讨	58
5.5	电极成分含量对组织结构的影响	60
5.6	沉积层超细组织形成机理探讨	61
第6章	电火花沉积层显微硬度的分析	64
6.1	电火花沉积 WC-4Co 涂层显微硬度分析	64
6.2	电火花沉积 WC-8Co 涂层显微硬度分析	65
6.3	电火花沉积 WC-15Co 涂层显微硬度分析	67
6.4	电火花沉积 Fe 基非晶涂层显微硬度分析	68
第7章	电火花沉积层耐磨性能的研究	70
7.1	电火花沉积 WC-4Co 涂层磨损性能研究	70
7.1.1	电火花沉积 WC-4Co 涂层室温磨损性能研究	70
7.1.2	电火花沉积 WC-4Co 涂层高温磨损性能研究	73
7.2	电火花沉积 WC-8Co 涂层磨损性能研究	76
7.2.1	电火花沉积 WC-8Co 涂层室温磨损性能研究	76
7.2.2	电火花沉积 WC-8Co 涂层高温磨损性能研究	78
7.3	电火花沉积 WC-15Co 涂层磨损性能研究	82
7.3.1	电火花沉积 WC-15Co 涂层室温磨损性能研究	82
7.3.2	电火花沉积 WC-15Co 涂层高温磨损性能研究	85
7.4	电火花沉积铁基非晶涂层耐磨性能研究	87
第8章	电火花沉积层高温氧化性能研究	89
8.1	电火花沉积 WC-4Co 涂层高温氧化性能研究	89
8.2	电火花沉积 WC-8Co 涂层高温氧化性能研究	91
8.3	电火花沉积 WC-15Co 涂层高温氧化性能研究	92
8.4	电火花沉积层高温氧化机理探讨	94
第9章	电火花沉积层复合涂层的研究	97
9.1	电火花沉积与等离子熔覆复合涂层研究	97
9.1.1	复合涂层物相分析	98
9.1.2	复合涂层截面形貌分析	99
9.1.3	复合涂层硬度变化	100
9.1.4	复合涂层耐磨性能分析	100
9.2	电火花沉积与激光熔覆复合涂层研究	101
9.2.1	复合涂层物相分析	102
9.2.2	复合涂层截面分析	103
9.2.3	复合涂层线能谱分析	104
9.2.4	复合涂层硬度变化	104

第 10 章 电火花沉积技术在水力发电厂的应用 106

10.1 电火花沉积技术在小浪底水电站的应用 107

10.2 电火花沉积技术在大盈江水电厂的应用 110

10.3 电火花沉积技术在新疆塔尕克水电厂的应用 115

10.4 电火花沉积技术在大寨水力发电厂的应用 118

10.5 电火花沉积技术在三门峡水电厂的应用 120

附录 125

参考文献 133

第 1 章 绪 论

1.1 电火花沉积技术意义

现代表面技术是构筑在表面科学基础理论之上,由现代物理方法和化学方法与传统表面技术相结合而发展起来的,涉及一切表面和界面领域以及各种金属、非金属、陶瓷、复合材料的先进制备技术,是一种几乎可以在一切材料表面上获得材料本身没有而又希望其具有的功能特性的表面材料成形与制备技术。由于现代表面技术的特点以及通过表面技术所获得表面材料的特性,它的应用领域极为广泛,几乎涵盖了所有的高新技术领域和工业、民用领域,如航天、航空、航海、冶金、钢铁、交通、石油、化工、建筑、水利、机械等领域。随着我国国民经济和社会的发展,高技术领域和工业、民用领域所使用的结构材料、功能材料越来越多地寄希望于通过表面技术来大幅度提高材料的表面性能或赋予材料表面以新的性能。

中国是世界上水力资源最丰富的国家,水电站数量与装机容量均居首位,2015 年我国的水电装机容量已经突破 3.2 亿 kW,跃居世界第一。但是,我国水电发展的广阔前景和世界第一的装机容量,是建立在地形高低悬殊、河流落差大、泥沙含量高的特殊地域条件形成的高水能蕴藏量基础上的。因此,我国河流含沙的严重程度也名列世界前茅,水轮机冲蚀损伤问题十分突出。据有关课题专家的调查统计,我国年输沙量在万吨以上的高含沙河流有 115 条,运行于这些河流上的水轮机都存在不同程度的冲蚀磨损,其中黄河及其支流、红河、长江及其支流的水轮机冲蚀尤为突出。

据保守估计,在全国约 1.9×10^8 万 kW 的水电装机容量中,有近 8000 万 kW 的机组遭受冲蚀磨损。例如,葛洲坝水电厂最高水头 26m,为轴流式机组,转轮为 0Cr13Ni5Mo 或 0Cr13Ni4Mo 材料铸造,总装机容量 271.5 万 kW。葛洲坝的水轮机叶片冲蚀速率 4.3mm/a,由于从左岸到右岸过机含沙量逐渐增大,首台机组运行两个汛期就发现有明显的空蚀磨损破坏,且一台比一台严重。右岸机组运行 3 年后,比左岸运行 10 年的机组损坏程度还严重。刘家峡水利枢纽位于甘肃省兰州市,是黄河上游的一座大型水利枢纽,水库总库容 57 亿 m^3 ,电站总装机 1160MW。年均含沙量 $2.53\text{kg}/\text{m}^3$,由于汛期泥沙含量增大,水轮机磨蚀严重,4 号机一个汛期后,水轮机叶片及下环出现大面积鱼鳞坑,抗磨板磨穿,导叶立面呈锯齿状。在扩大性大修中,转轮的补焊面积达 40m^2 ,堆焊焊条 7t。青铜峡水利枢纽总装机 272MW,年均含沙量 $7.68\text{kg}/\text{m}^3$,水轮机为轴流转桨式,由于含沙量大、水库淤积严重、水轮机蜗壳包角小 (135°) 以及水轮机吸出高度不满足要求等原



因,水轮机磨蚀十分严重。截至1987年年底,电站运行15年,共进行了13次扩大性大修(1725d),28次一般性大修(239d),每年平均检修2.6次,检修274d,而检修的主要工作就是处理水轮机的磨蚀问题。叶片受磨蚀破坏,呈现千疮百孔且面目全非,由于泥沙磨蚀十分严重,进入20世纪80年代初期,水轮机转轮开始出现严重的破坏;单个叶片经一个检修周期运行失重最长达800kg,占叶片重量的16%;最大坑深40mm,约占叶片厚度的2/3。黄河中游建设最早的三门峡水电站,多年平均含沙量 $37.6\text{kg}/\text{m}^3$,最大含沙量 $911\text{kg}/\text{m}^3$,水轮机为轴流转桨式。由于高含沙量,水轮机磨蚀十分严重,4号机运行3630h,叶片背部铺焊的3mm厚不锈钢板大部分脱落,叶片与中环间隙由7~8mm扩大到20mm,叶片失重780kg;运行7595h,叶片背面母材呈蜂窝状,叶片与中环间隙扩大到40~50mm;运行31000h,叶片头部150mm×250mm三角区被磨掉,叶片与中环间隙扩大到120mm。

在我国的其他流域,含沙水流对水轮机的危害也十分严重。新疆天富热电股份有限公司红山嘴电厂,共建有4个梯级引水式电站,设计总装机容量57050kW。河床多数为砂砾层,汛期水流中经常夹带大量的砂砾、杂物,加之该厂引水渠处于砂砾层坡地上,东岸山体下雨滑坡,泥沙入渠加大渠水含沙量。河水中泥沙对水轮机过流部件如转轮、底环、顶盖、活动导叶、蜗壳、座环、大轴护套、补气架、尾水锥管等均造成较重的磨损。转轮叶片背面靠下环的出水边冲刷成大沟槽、穿孔或脱落,叶片进口靠下环弧形转角处磨损成三角形小缺口。底环上平面布满鱼鳞坑或沟槽。蜗壳管壁磨薄、磨穿,尾水锥管磨穿、撕裂等现象经常发生。内蒙古三盛公水电站装机容量2000kW,建站34年,水轮机过流部件不断受到黄河泥沙磨损和空蚀的严重破坏,已经报废8只转轮,最短服役期仅4年;同时,磨损和空蚀导致发电机出力下降约20%。西北、西南及南方地区一些较高水头的电站冲蚀损伤更为严重。

解决高含沙水流条件下水轮机的磨损问题有两个主要途径:一是结构设计,即从流体力学理论出发,改变过流部件的线性和曲面,降低汽蚀条件,减少磨损;二是材料与表面处理,即从材料学和摩擦学理论出发,选择高抗汽蚀、冲蚀磨损的过流部件材料,采用表面涂层、表面强化或表面耐磨结构等方法,提高耐磨性,减少磨损。与结构设计相比,材料与表面处理技术是目前我国最适用、最快捷、最有效的方法。

表面处理是为了提高水轮机转轮的可靠性和使用寿命,改进产品的质量和增加经济效益,对水轮机转轮的关键部位进行特殊的强化处理势在必行。鉴于此,各种表面强化技术应运而生,并在许多领域中起着防护、耐磨、强化、修复以及装饰的作用。表面强化技术的最大优势,就是能够以各种方法制造出比基体材料本身性能更优异的表面薄层,使之具有更高的表面硬度、耐磨性及耐腐蚀性等性能。

目前,常用水轮机转轮等过流部件表面的强化技术主要包括环氧金刚砂涂层防护、聚氨酯弹性涂层防护、碳化钨喷涂层防护、抗磨焊条堆焊防护。

环氧金刚砂砂浆涂层是由环氧树脂、固化剂、增韧剂、稀释料、填充料拌成的砂浆,底层与母材的黏结强度可达40~50MPa,中层抗拉强度13MPa,抗压强度50MPa,剪切强度30MPa。环氧金刚砂涂层在三门峡、天桥、青铜峡、八盘峡等黄河上的大中型轴流式机组上已经有多年的应用,如在三门峡1987年更换的4号机组叶片,叶片背面空蚀区堆



焊后, 未进行打磨, 正背面均涂以环氧涂层, 1989 年汛期后背面涂抹的环氧涂层全部脱落, 而正面的涂层完好, 这充分说明环氧涂层不能用于强空蚀区。三门峡在 1989—1994 年的 6 年汛期发电试验, 再次证明环氧涂层不能用于强空蚀区。空蚀区域的环氧涂层开始掉了, 因为环氧涂层与叶片基体的结合不是非常牢固, 所以环氧涂层就由空蚀严重区域开始成片脱落。

聚氨酯弹性涂层防护主要为聚醚型聚氨酯涂层, 它主要为有机高分子化合物, 但与母材黏结强度不够, 因此在强空化区脉动负压的长期作用下底层产生剥离, 造成涂层脱落。这是叶片背面空化区涂层脱落的重要原因。空化击穿空泡溃灭时产生上千大气压的微射流, 反复作用于涂层表面, 当涂层厚度不足时, 冲击力将击穿弹性涂层, 到达金属表面, 破坏黏结层, 引起软涂层脱落。对于黏结层的老化疲劳破坏, 万家寨经验表明, 使用初期的涂层脱落很少, 2000h 内基本不脱落, 但随着时间的推移, 脱落强度相应加大。三门峡等水电站在导水叶等固定部件上使用聚氨酯涂层, 在进水边头部经常发生撕裂脱落, 与汛期水流中含有石块、树根等尖锐、坚硬物体有关, 聚氨酯的抗磨性能虽然较好, 但机械强度较差, 易于被划伤, 一旦局部被划伤, 相邻区域就会被撕裂。强空化区空化击穿, 使黏结层被破坏, 造成涂层脱落。

碳化钨喷涂层防护主要为超音速火焰喷涂 WC 粉末, 是通过以火焰为热源, 将 WC 粉末状的材料加热至熔融或半熔融状态, 并将加速形成的熔滴高速喷向基体, 形成涂层。由于涂层材料是在半熔融状态下喷向冰冷的基体, 所以涂层与基体的结合并不非常牢固, 碳化钨喷涂涂层在有些空蚀严重、泥沙冲蚀厉害的电站涂层脱落现象还是普遍存在的。例如, 小浪底电站碳化钨涂层在空蚀区域出现了大量脱落, 根据小浪底 6 台水轮机碳化钨涂层脱落情况分析, 碳化钨涂层抗空蚀和硬物冲击的能力不够理想, 这主要是黏结强度还不够高, 在空蚀和有冲击的情况下, 易造成片状脱落。碳化钨喷涂的涂层厚度一般为 $100 \sim 500 \mu\text{m}$, 超音速火焰喷涂涂层主要适合于具有耐热耐蚀特别是耐化学腐蚀性能的工件, 对结构钢提供抗蚀防护应用, 如建筑、桥梁、船身、甲板、大平体穿、拖船等, 热喷涂都取得了良好的长效保护。对于要求耐冲击、强力摩擦环境下工件不适合。

水轮机磨蚀防治和修复的诸项措施中, 抗磨材料的堆焊是一项常用的方法, 特别是对于叶片背面的强空化区、转轮室中环等磨蚀强度大的区域。常用的堆焊材料有各类不锈钢焊条、CoCrW 合金焊条、金属陶瓷等。如果汛期泥沙含量增大, 如刘家峡水电站经过一个汛期后 4 号机的水轮机叶片及下环出现大面积鱼鳞坑, 抗磨板被磨穿, 导叶立面呈锯齿状。在扩大性大修中, 转轮的补焊面积达 40m^2 , 堆焊焊条 7t。堆焊抗汽蚀耐磨效果还不错, 缺点是堆焊中的夹渣、气孔、裂纹等存在于堆焊层内部, 经机械加工后, 往往暴露于堆焊表面, 影响了堆焊层质量; 而且堆焊烟尘大、药皮易脱落、焊条的工艺性较差、工期长、工人劳动强度大。

电火花沉积技术是直接利用电能的高密度能量对金属的表面进行沉积处理的工艺。它把电极材料 (硬质合金如 WC、TiC 等) 作为工作电极 (阳极), 在氩气中使之与被沉积的金属工件 (阴极) 之间产生火花放电, 在 $10^{-6} \sim 10^{-5}\text{s}$ 内电极与工件接触的部位达到 $8000 \sim 25000^\circ\text{C}$ 的高温, 直接利用火花放电的能量, 将电极材料转移至工件表面, 构成沉积层的沉积方法。电极材料与工件材料产生冶金结合形成沉积层。由于形成含电极材料的合金化



的表面沉积层,使工件表面的物理性能、化学性能和力学性能得到改善,而其心部的组织和力学性能不发生变化。经电火花沉积后,在零件表面上形成 $5\sim 200\mu\text{m}$ 的显微硬度高达 $1100\sim 2500\text{HV}$ 的白亮层,并存在过渡层。表面沉积层与基体的结合强度高。电火花沉积可有效提高零件表面的耐磨性、耐蚀性、热硬性和高温抗氧化性等。

电火花沉积处理与激光表面处理、等离子熔覆、热喷涂和堆焊等表面强化技术相比较,具有许多特点,这些特点为:电火花沉积是在空气或氩气中进行,不需要特殊、复杂的处理装置和设施,如真空系统或特制的容器等,因此工艺设备简单,携带方便,使用灵活,设备投资和运行费用低;电火花沉积可对一般几何形状的平面或曲面零件、设备表面施行沉积,提高硬度和耐磨性;电火花沉积不会使工件退火或热变形;电火花沉积层与基体的结合非常牢固,不会发生剥落现象,属于冶金结合;沉积层厚度、沉积层质量与沉积参数(电压、功率、频率、时间等)操作因素有关,因此可通过对沉积参数的调节和沉积时间的控制来获得不同的工艺效果;电火花沉积处理后工件可做最终工序使用,即使要求加工,加工余量也很小;操作方法容易掌握,不会产生有毒气体、液体等环境污染物,噪声小。

电火花沉积技术能在设备、工件表面产生微纳米非晶材料。因为微纳米非晶材料独特的结构特征表现出一系列特殊的理化及力学性能,从而提高材料的综合性能、发展新一代高性能材料创造出许多传统材料所不具备的性能或难以达到的高性能。非晶态合金是20世纪中期才发现的一种新型材料,其微观结构为短程有序而长程无序,这种结构决定了它具有许多晶态金属不具备的优异性能,如高韧性和高耐蚀性等。电火花沉积在一般工件上产生微纳米非晶颗粒,有效地提高其强度、硬度,并增强材料韧性,克服传统材料耐蚀、耐磨性能无法协调的不足,形成耐蚀、耐磨综合性能优异的复合涂层,提高传统机械转动部件、过流部件以及要求具有高抗腐蚀、磨蚀、冲蚀的使用性能的油气田钻采设备质量,发展适用于我国高泥沙水环境的水轮机叶片防护材料、超临界汽轮机末级叶片抗水蚀涂层材料和钻杆抗高硫化氢腐蚀涂层材料,可以大幅度提高我国汽车关键零部件的自给能力,显著提高其使用性能和服役寿命等。由此可见,电火花沉积技术不仅具有很高的技术创新性,而且具有很强的产业化应用前景,大幅度提高材料的各方面综合性能,对于提升传统结构材料的性能和延长服役寿命、发展高性能的功能材料,无疑具有巨大的潜在优势。对于形成新的特别是社会可持续发展需要的高新技术产业群、采用高新技术改造传统产业、提升传统产业产品的性能和技术含量、提高“节能减排”水平,具有重要的意义。

1.2 电火花沉积技术研究现状

电火花沉积技术的发展概况,首先从电火花强化设备和强化工艺说起。

1943年,苏联的拉扎连科夫妇提出电火花强化工艺,并很快地遍及各工业发达国家,收到了显著的效果。1950年,苏联中央电气科学研究所研制了YJIP系列电火花表面强化机,中央机器与工艺学研究所也研制HE系列电火花表面强化设备。1964年,摩尔达维亚科学院应用物理研究所及所属基希涅夫实验工厂研制了手工操作和机械化的ЭФИ系列强化机产品,在苏联的机器制造、工具、仪器等工业部门得到广泛应用;该厂在20世纪70



年代生产了采用可控硅和晶体管脉冲发生器的新型 ЭИ 系列强化机产品, 改变了合金化控制方法, 并使用了新型操作工具。据报道, 1978—1979 年间在苏联应用的 37 台 ЭФИ-78 型强化设备共节约资金约 40 万卢布。欧美和日本分别从 20 世纪 50 年代和 60 年代开始研究和应用电火花表面强化工艺, 主要产品有美国制造的 1269、TVNGCARB220 和 F-5 型, 英国制造的 SPARKCARD, 法国制造的 CARBUMATIG, 日本制造的 DEPOSITION 等。这些设备一般为功率在 200W 以内的手工操作设备, 主要用于模具和刀具的表面强化。匈牙利、保加利亚等国也生产类似产品, 特别是保加利亚专家提出了采用独立式脉冲电源的非接触电火花强化方法, 并研制了 ЕЛФА 系列产品。进入 90 年代后, 日本的电火花强化技术得到很大发展, 研制的 Spark depo 强化设备功率较大, 涂层厚度有所增加, 可获得较均匀的表面沉积层。

国内强化机的研制始于 20 世纪 50 年代, 但因条件限制, 没有得到推广。70 年代, 因在模具和刀具上的应用而重新受到关注, 国内一些单位进行了这方面的研制工作。苏州电加工机床研究所研制了 D91 系列产品, 该系列强化机后由泰州海陵电器厂批量生产。近几年来, 在强化机的研制上取得了新的进展, 航空第一集团下属的西安庆安集团有限公司研制出 ZS-116 型电火花强化机, 特点是电流调节范围大, 可用于多种电火花强化工艺; 2006 年中国农机院所研制出新型脉冲发电电火花表面沉积设备, 特点是采用先进的功率开关元件 IGBT 控制设备的充放电过程, 并设计了一套控制电路, 使放电能量大为提高, 工艺过程更加稳定可靠。另外, 采用了高速旋转电极, 且每一次放电能量一致, 从而提高了沉积层的质量和厚度, 降低了表面粗糙度。

要研究电火花表面沉积技术, 应该从电腐蚀现象开始。早在 19 世纪初, 电腐蚀放电现象就被人们所发现。例如, 在插头或电触开关的触点接触或断开时, 电火花放电往往把接触表面烧毛、腐蚀成粗糙不平的凹坑而逐渐损坏。长期以来, 电腐蚀一直被认为是一种有害的现象, 人们不断地研究电腐蚀的原因并设法减轻和避免电腐蚀。研究结果表明, 电火花腐蚀的原因是: 电火花放电时, 放电通道在瞬时产生大量的热能达到很高的温度, 足以使任何金属材料局部熔化、气化而被蚀除掉, 形成放电凹坑, 人们在研究抗腐蚀办法的同时, 开始研究利用电腐蚀对金属材料进行加工和利用。20 世纪 40 年代, 苏联利用电极和工件之间的火花放电, 把金属蚀除下来, 称为电蚀加工。日本、英国、美国等国家随之进行大量的研究, 称为电火花加工 (Electrical Discharge Machining, EDM)。20 世纪 50 年代, 苏联利用电极和工件之间的放电进行工件的表面强化和修复, 称为电火花强化 (Electrical Discharge Hardening, EDH)。传统电火花表面强化理论的研究, 国外许多学者作了比较广泛的研究。苏联学者研究了强化层最可能的基本形式并得到了影响最佳强化效果的一些结论, 认为最有前途的改善表面质量的方法是减少单个脉冲能量、采用非接触火花放电系统和保证必要的生产率的高频独立式脉冲发生器。最近出现的电火花沉积 (Electro-Spark Deposition) 新工艺是从传统工艺基础上发展起来的, 这种新工艺被国内外工业界接受和应用, 也才是最近的事。为了在使用中能获得最佳沉积过程, 并事先预测沉积层的特性, 就必须知道影响沉积层的相结构、物理—化学性能、应力状态和它的硬度、粗糙度、耐磨性、高温稳定性等各种因素, 这些因素包括电极材料、介质成分、电气规范、电极振动方式等, 许多学者都对这些有关沉积性能的因素进行了部分的实验和研究。



这些研究不系统、不全面,对沉积工艺、沉积机理、沉积层内部微观结构的研究很少。目前国内外研究现状如下:国外 Liu Dongyan 等人用电火花沉积技术,采用铜模铸造技术生产的非结晶合金棒 Fe-Cr-Mo-Gd-C-B 作为电极在 304 不锈钢基体上进行电火花沉积,沉积层产生微晶或纳米结构,均匀分布且冶金结合,涂层的平均厚度约为 $30\mu\text{m}$,涂层的显微硬度高达 1542kg/mm^2 ,提高了不锈钢的耐磨性能。E. A. Levashov 等用电极成分为 TiC-40%Ni 合金中添加纳米添加剂,研究了涂层的密度、厚度、硬度、杨氏模量和耐磨性。国外 A. Cakir、V. Alexander 等人研究了在合金钢、钛合金、TiC-Ni 基合金等材料上沉积 WC-Co (碳化钨-钴) 硬质合金材料,研究了涂层的厚度、表面形貌、组织结构、成分、涂层的密度、杨氏模量、涂层硬度、室温耐磨性等。这些研究都显示了电火花沉积层具有复杂的物相组织结构,沉积层的显微硬度和室温耐磨性都得到了很大的提高。国内 Xie Yu-jiang 等人研究了富含 γ 相的超耐热合金的电火花沉积层的微观形态,极好的超耐热合金易于产生焊接裂纹。然而,对于这些合金,希望在这些零件上进行熔化焊接和无缝沉积。He Y. 等用电火花沉积技术把 Ni-20Cr- Y_2O_3 氧化弥散加强 ODS 合金涂层,研究了涂层的高温氧化性能。Li Zhengwei 等人用电火花沉积工艺来提高 Ti_3Al 和 TiAl 的金属化合物的抗氧化性能,涂层厚度为 $15\sim 20\mu\text{m}$,成分呈梯度分布,与基体冶金结合。高伟等人对含有 Y_2O_3 颗粒的电火花沉积 Al 和 NiCr 涂层的热耐蚀性能进行了研究。汪瑞军等人研究了单个脉冲电火花沉积点的形成,以钛合金、45 钢为基体材料,电极材料为 WC92-Co8 陶瓷,在研究单个电火花沉积点的基础上,研究了涂层的组织结构和性能。尚正恒等人对镁合金电火花沉积非晶和镍基合金基础上,研究了涂层的组织和性能。王建升等人在铸钢、铸铁、不锈钢、H13 钢等材料上研究了电火花沉积 WC-Co 合金后涂层的厚度、组织结构、物相分析、成分分析、涂层的硬度和室温耐磨性等。

目前电火花沉积技术国内外报道应用领域主要有:核反应堆建设中,美国哈佛工程开发实验室的 Johnson 等人利用电火花沉积工艺对快中子增殖反应堆的关键部件表面改性强化,改善部件表面的耐磨性和耐腐蚀性,并有效地减少放射性核物质扩散核反应堆上的应用,代替了爆炸枪/HVOF 涂层,能获得冶金结合,均匀的纳米结构涂层;304 不锈钢阀门上的应用;核工业中核心零件的应用;气体涡轮机或汽轮机上的应用;模具上的应用;航天航空上的应用,国内某航空发动机公司与中国农机院表面工程技术研究所合作,采用大中系列电火花沉积系统在飞机发动机叶片榫槽处(Ti 合金)成功制造了高可靠性耐微动磨损的强化层,大大提高了发动机叶片的使用寿命;美国海军上的应用,电火花沉积可以修补船上原有轴杆和轴承,来提高舰船的利用率;医疗方面上的应用,在手术器具和针夹持器上的插头用电火花沉积的方法沉积铬碳来代替昂贵的钨碳铜焊插头,这样,不但能节省成本,而且因为碳化铬的超耐蚀性使寿命提高了好几倍;再如其他方面的应用,金属材料在高温、氧-硫环境中的腐蚀是许多行业生产中头痛的难点问题。采用电火花沉积强化适当的材料,可大大减少材料剥蚀,延长使用寿命,被保护的材料包括低合金钢、不锈钢和钛合金等。

上面的这些研究工作有力地促进了该项技术的发展,但由于电火花沉积技术的实用性很强,上面的研究侧重于研究多一些,理论研究和实际应用方面结合得还不是很多,电火花沉积工艺在核电、汽车、航空和医疗等行业已经有了一些成功应用的报道,但有些理论



研究落后于其实际生产应用,本书针对其理论研究及其一些新型应用做一些探讨。

1.3 电火花沉积技术在水电厂的必要性

我国河流特点之一是含沙量较大,年平均输沙量 1000 万 t 以上的河流有 115 条,直接入海泥沙总量达 19.4 亿 t。黄河是我国泥沙含量最多的河流,年输沙量 16 亿 t,平均含沙量 $37.5\text{kg}/\text{m}^3$,均居各河流之首。黄河及其支流上的水电站,都存在或面临水机磨蚀问题。水机磨蚀破坏的主要危害表现在:检修周期缩短,检修工作量增加,机组运行效率降低,检修成本高,生产不安全。以黄河三门峡水电厂为例,水轮机运行 15000h 必须扩修,其中 4 号机运行两年过流部件严重损坏,效率下降 8.7%,而一般水电站大修期在 5 年左右。黄河两岸引黄泵站水泵过流部件一般运行 2000~4000h 即报废或更换,扬程高的水泵仅运行 1000 多个小时便报废。黄河上较早投产的大中型水电站有龙羊峡、刘家峡、盐锅峡、八盘峡、青铜峡、天桥、三门峡 7 座水电站,共装置 40 台机组,总容量 3731MW。其中,混流式水轮机 18 台,轴流转桨式水轮机 22 台,这些机组的工作水头与运行条件有较大差别,机型及材质、加工水平也各不相同。由于黄河的超大泥沙含量,使这些黄河上的水电站深受泥沙的危害,水轮机泥沙磨蚀严重地威胁着机组的安全。根据各电站水轮机的泥沙磨蚀状况分析比较,可以概括出黄河上水电站的水轮机泥沙磨蚀规律和特点。

黄河是我国的第二大河,黄河的水能蕴藏量为 4054.8 万 kW,可开发水能资源 2800 万 kW。新中国成立后,在黄河干流上先后建起了 11 座大中型水电站。还有公伯峡、拉西瓦等大型水电站正在建设中。在黄河上的水电站普遍遇到一个棘手的问题,就是泥沙对水轮机的严重磨蚀。

黄河发源于青海省巴颜喀拉山北麓的约古宗列盆地,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东 9 省(自治区),在山东省垦利县注入渤海,全长 5464km。

黄河流域位于北纬 $32^{\circ}\sim 42^{\circ}$ 、东经 $96^{\circ}\sim 119^{\circ}$ 之间,西起巴颜喀拉山,东临渤海,北界阴山,南至秦岭,总面积为 79.49 万 km^2 (包括黄河内流区 4.23 万 km^2)。从河道长度和流域面积看,黄河为中国的第二大河。

根据主要自然地理条件,将整个黄河流域分为青海高原区、宁蒙灌区、阿(拉善)鄂(尔多斯)沙漠草原区、黄土高原区、汾(河)渭(河)地堑谷地区、崤熊(耳)太(行)山区、下游冲积平原区、鲁中地垒山岳区等区域。黄河泥沙主要来自中上游黄土高原,龙羊峡以上的青藏高原植被较好,河流含沙量较小,青海省的唐乃亥水文站年平均含沙量仅 $0.55\text{kg}/\text{m}^3$,平均年输沙量仅 0.11 亿 t。黄河在贵德以下进入黄土高原,泥沙逐步增加,其间有大夏河、洮河及湟水等汇入,到兰州站平均年输沙量达 1.13 亿 t。兰州以下,有祖厉河汇入,泥沙进一步增加。尤其是黄河穿越山、陕峡谷,流经黄土沟壑地区,植被差、汛期暴雨集中,水土流失严重,大量的泥沙在汛期注入黄河,是黄河泥沙的主要来源。从河口镇至龙门,有皇甫川、窟野河、三川河、无定河等多泥沙支流汇入,使龙门的平均年输沙量剧增至 10.6 亿 t。龙门至三门峡间,又有泾河、渭河、北洛河、汾河汇入,年输沙量进一步增加,三门峡的年输沙量达到 16 亿 t。



黄河产水产沙和河床淤积的总形势是,内蒙古头道拐以上的上游区水多沙少,但青铜峡到头道拐河段河床仍有相当量的淤积;头道拐至潼关的中游区沙多水少,潼关以下的中、下游区来水含沙量较小,河床淤积主要在龙门至河口区段(包括潼关至三门峡、三门峡至小浪底的两个峡谷水库)。河口尾间段河流周期性改道摆动,三角洲不断淤积向海洋推进。黄河各支流的水沙情况见表 1.1。

表 1.1 2000 年黄河干支流重要控制水文站实测水沙统计表

河流	站 名	集水面积 /km ²	径流量 /亿 m ³	输沙量 /亿 t	含沙量 /(kg/m ³)	中值粒径 /mm
黄河	唐乃亥	121972	154.500	0.053	0.34	0.019
黄河	兰州	222551	259.600	0.251	0.97	0.014
黄河	头道拐	367898	140.200	0.284	2.03	0.010
黄河	龙门	497552	157.200	2.190	13.90	0.027
黄河	潼关	682141	186.000	3.410	18.30	0.023
黄河	花园口	730036	165.300	0.835	5.05	0.005
黄河	高村	734146	136.900	1.160	8.47	0.034
黄河	艾山	749136	107.800	0.953	8.84	0.032
黄河	利津	752032	48.590	0.222	4.57	0.029
洮河	红旗	24973	24.700	0.085	3.42	无资料
皇甫川	皇甫	3199	0.306	0.091	296.00	0.041
窟野河	温家川	8645	1.717	0.058	33.50	0.013
无定河	白家川	29662	6.749	0.285	42.20	0.032
延河	甘谷驿	5891	1.155	0.109	94.20	0.024
泾河	张家山	43216	7.550	0.940	199.00	0.020
北洛河	湫头	25154	5.880	0.340	87.20	0.023
渭河	华县	106498	35.540	1.490	41.90	0.018
汾河	河津	38728	1.506	0	0.02	0.093
伊洛河	黑石关	18563	13.610	0.002	0.17	0.007
沁河	武陟	12894	4.044	0.003	0.66	无资料

奔流澎湃的黄河穿峡谷、越草原、纳万流、汇百川,过青海、走四川,九曲回转来到甘肃刘家峡大型水利枢纽。库区有一多泥沙河流(洮河)挟带大量泥沙流入库区,形成清浊分明的界限,见图 1.1。汛期的刘家峡水库,泥沙含量大大增加,兰州水文站测得黄河的年输沙量已经达 1.13 亿 t,黄河开始显示它的本色。

黄河流经甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西,开始与黄土并行,夏季降水到来时,千沟万壑如千万条黄龙,大量的泥沙倾泻到黄河中,使黄河形成含沙量居世界之首的泥河。

黄河在中游穿越了世界最大的黄土高原,穿行在 725km 长的晋陕峡谷之间,泥沙越来越多,它的容颜越来越“黄”。当黄河穿过著名的“龙门”后,年均输沙量达到 10.6 亿 t,之后又接纳了汛期高含沙量的泾河、渭河、北洛河,形成黄河中下游的河段。

黄河到三门峡时,水流的泥沙含量已经达到惊人的程度,年均输沙量达到 16 亿 t,这



图 1.1 汇入洮河泥沙的刘家峡水库

些从排沙洞喷出的流体，就是高浓度的泥浆或砂浆。最高含沙量竟达 $911\text{kg}/\text{m}^3$ 。如果说三门峡以上的河段在非汛期还有比较清的时候，三门峡以下河段则几乎全年浑浊。

黄河在中下游是名副其实的“浑水河”，见图 1.2～图 1.4。



图 1.2 黄河穿越晋陕峡谷

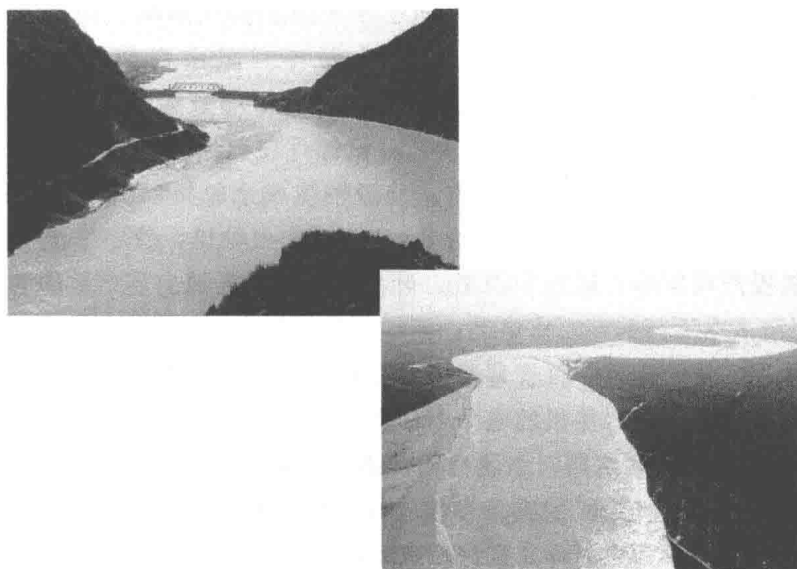


图 1.3 高含沙量的泾河、渭河汇入黄河