

学校编码: 10384
学号: 19820131152989

分类号_____密级_____
UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

铸铁表面液相微弧放电等离子体碳氮共渗
研究

Study on the carbonitriding cast iron by liquid micro-
discharge plasma

李俊雄

指导教师姓名: 杨思泽
专 业 名 称: 电子与通信工程
论文提交日期: 2016 年 月
论文答辩时间: 2016 年 月
学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席: _____
评 阅 人: _____

2016 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

液相微弧放电等离子体电解碳氮共渗技术是一种新兴的表面改性技术。相对于传统表面改性技术，它具有能耗低、不需要真空装置、成本小、环境污染小、工艺简单等特点，在航空航天、军工、机械、电子、医疗、装饰等许多领域具有广阔应用前景。

本论文采用液相微弧放电等离子体电解碳氮共渗技术，在乙酰胺甘油水溶液电解液体系中对铸铁表面进行了碳氮共渗处理。电源参数为：电流大小固定为 3 A，频率固定为 100 Hz，占空比固定为 25 %；电解液配方为：去离子水 750 mL，乙酰胺 150 g，甘油 80 mL，加入 2 g 粉状 NaCl 颗粒以增加电解液的导电性。

与文献较多报道的将铸铁工件作为阴极工作电极实现渗碳氮化不同，本论文是基于铸铁工件作为阳极工作电极的研究成果。通过扫描电子显微镜观察研究了渗透层的表面和断面形貌，XRD 物相分析定性分析了渗透层的物质结构组成，显微硬度测试、电化学腐蚀测试、摩擦磨损测试分析等方法探讨了不同渗透时间（0 s，30 s，60 s，90 s，120 s）对渗透效果的影响。实验结果表明，当施加电流固定为 3 A 时，处理很短时间就能在铸铁基底表面形成良好的共渗层。渗透层的表面结构比较粗糙，由很多球状凸起和火山口状凹坑组成。随着处理时间的增加，渗透层的厚度增加，不过随着处理时间的增加，渗透层的生长速率减小。渗透层的组织结构主要由碳铁和氮铁化物组成。处理时间为 120 s 时，渗层具有最优的硬度和耐磨损性能；处理时间为 60 s 时，渗层具有最优的耐腐蚀性能。同时，处理后铸铁的摩擦系数显著减小，摩擦性能显著提升。因此，经过处理的铸铁材料的硬度得到了显著提高，同时也大大改善了其耐腐蚀性能、耐磨性等机械性能。

关键词： 铸铁； 等离子体； 碳氮共渗

Abstract

The liquid micro-discharge plasma carbonitriding technology is a novel surface modification. Compared to traditional technology, it has several advantages such as avoiding vacuum equipment, low cost, environmentally friendly and simple process. So it has many applications in various fields, such as aerospace, automotive, electronics industry, medical treatment.

The carbonitriding cast iron by the liquid micro-discharge plasma is investigated with a solution of acetamide and glycerin. The source parameters are as follows: Current is 3 A, frequency is 100 Hz, duty circle is 25 %. The electrolyte is composed of 750 mL deionized water, 150 g acetamide and 80 mL glycerin, adding a little sodium chloride to enhance the conductivity of the solution.

Influence of different treatment time on the characteristics of cast iron is investigated by scanning electron microscope, X-ray diffraction, microhardness, electrochemistry testing as well as friction-wear testing. Results show that carbonitriding layers are formed in several minutes at the current of 3 A. The morphology of the layer is rough with micro-craters and spheroids. The thickness of the layer increases as the treatment time extends, while the growth rate of the layer reduces. The elements of the layer are carbon (C), nitrogen (N) and ferrum (Fe). The best microhardness and wear resistance performance of treated cast iron occurs after 120-sec plasma treatment. The corrosion resistance of cast iron are most significantly improved after 60-sec plasma treatment. Moreover, the friction coefficient of treated cast iron has reduced after plasma treatment. In conclusion, the microhardness, wear resistance as well as the corrosion resistance of the cast iron are significantly improved after liquid plasma treatment.

Key words: Cast iron; Plasma; Carbonitriding.

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 表面改性传统方法	2
1.2.1 渗碳处理.....	2
1.2.2 渗氮处理.....	2
1.2.3 表面发黑处理工艺.....	3
1.2.4 表面磷化处理.....	4
1.3 等离子体电解渗透的研究现状	4
1.4 等离子体电解渗透技术的应用	7
1.5 等离子体电解渗透技术的潜在商业应用	8
1.6 本文研究目的和研究内容	8
1.6.1 研究目的.....	8
1.6.2 研究内容.....	8
第二章 铸铁表面液相微弧放电等离子体碳氮共渗的理论基础.....	10
2.1 液相等离子体表面改性技术介绍	10
2.1.1 等离子体电解沉积.....	10
2.1.2 等离子体电解氧化.....	11
2.1.3 阴极等离子体电解渗透.....	12
2.2 液相微弧放电等离子体碳氮共渗的放电过程	13
2.3 等离子体电解渗透反应机理	15
2.4 阳极等离子体电解渗透的探索	19
第三章 实验设备和研究方法	21
3.1 实验技术路线	21
3.2 实验材料	21

3.3 实验设备	21
3.4 电解液体系	23
3.5 实验方法	24
3.6 液相微弧放电等离子体碳氮共渗薄膜的表征方法	24
3.6.1 扫描电子显微镜 (SEM)	24
3.6.2 X 射线衍射 (XRD)	26
3.6.3 显微硬度测试分析.....	28
3.6.4 电化学腐蚀测试分析.....	28
3.6.5 摩擦磨损测试分析.....	29
3.7 本章小结	32
第四章 实验结果和讨论	33
4.1 SEM 分析.....	33
4.2 XRD 分析.....	37
4.3 摩擦磨损分析	39
4.4 耐腐蚀性分析	41
4.5 维氏硬度分析	45
4.6 本章小结	45
第五章 总结与展望	47
参考文献	48
在校期间发表论文	54
致谢.....	55

Contents

Abstract in Chinese.....	I
Abstract in English	II
Chapter 1 Overview	1
1.1 Preface.....	1
1.2 Traditional methods for surface modification.....	2
1.2.1 Carboning.....	2
1.2.2 Nitriding.....	2
1.2.3 Oxidation.....	3
1.2.4 Phosphorusing.....	4
1.3 Research overview on PES	4
1.4 Application of PES	7
1.5 Commercialization of PES	8
1.6 The Purpose and the main idea of the research	8
1.6.1 The purpose of the research	8
1.6.2 The Main idea of the research.....	8
Chapter 2 The theory of plasma carbonitriding.....	10
2.1 Introduction of the electrolytic plasma technology.....	10
2.1.1 PED	10
2.1.2 PEO	11
2.1.3 Cathodic modification of PES	12
2.2 The liquid micro-discharge plasma carbonitriding technology.....	13
2.3 The Schematic of PES.....	15
2.4 Anodic modification of PES	19
Chapter 3 Devices and research methods.....	21
3.1 The process of the research	21
3.2 Samples	21

3.3 Devices.....	21
3.4 Electrolyte system	23
3.5 Research method	24
3.6 Characteristics of the liquid micro-discharge plasma	24
3.6.1 SEM	24
3.6.2 XRD	26
3.6.3 Micro-hardness	28
3.6.4 Electrochemistry testing.....	28
3.6.5 Friction-wear testing	29
3.7 Conclusion	32
Chapter 4 Results and discuss	33
4.1 Results of SEM	33
4.2 Results of XRD	37
4.3 Results of friction-wear testing	39
4.4 Results of electrochemistry testing	41
4.5 Results of micro-hardness	45
4.6 Conclusion	45
Chapter 5 Summary and prospect	47
Reference.....	48
Publication during master study	54
Acknowledgements	55

第一章 绪论

1.1 引言

“等离子体”英文 Plasma，是一种由自由电子和带电离子作为主要成分的物质形态，最先由郎缪尔（Langmuir）在 1929 年气体放电实验中命名^[1]。

我们熟知，生活中物质主要可以分为固、液、气三态。一般情况下，随着温度的增加，可依次发生这三态的转变过程。当通过气体放电或者加热可以使得中性原子或者分子电离，产生物质的第四态——等离子体态。等离子体主要由自由运动和相互作用的正负离子组成，因为正负电荷成对，电荷总量相等，对外宏观表现为电中性。

等离子体之所以称为物质的又一种基本形态，在组成和性质上，它与固、液、气有本质区别。一般气体由分子组成，分子间作用力可用分子运动理论模型描述。仅当分子碰撞时有明显效果，这种相互作用力为短程力。而等离子体中，带电粒子之间产生的库仑力是长程力，带电粒子的碰撞效果远远小于库仑力的作用，库仑力占主导作用。在等离子体中，带电电荷的定向运动产生电流，继而产生磁场，正离子或者负离子的集中可产生电场。因此等离子体的上述特性能够从本质上称为第四态。

常见的等离子体有霓虹灯、日光灯、电弧中的发光气体，闪电、极光等。等离子体可分为高温和低温等离子体，一般常用电子温度和离子温度来表示等离子体温度。若两者相等，称为高温等离子体，若两者不相等，称为低温等离子体^[2]。

高温等离子体包含丰富的离子、电子、分子、激发态原子以及自由基，且各粒子温度近似相等，这么高的温度为信息、能源、材料、环境、空间物理特别是核聚变等科学的迅速发展提供了新的可能。低温等离子体是在常温下发生，离子温度小于电子温度，可应用于表面改性、杀菌、污水处理、医疗美容等方面。

伴随着低温等离子体技术、受控热核聚变以及气体放电的研究，作为理论和实验基础的等离子体物理学迅速发展为一个独立学科，很有学术和工业发展前景。因为等离子体现象复杂，应用广泛，等离子体物理学正从理论、实验和数值计算

这三个方面，相辅相成地发展。

近年来，液相等离子体放电得到了科学家的研究，作为一种新兴的等离子体技术，它是传统等离子体技术在工业上的有效补充。最开始，科学家观察到溶液中的瞬时放电。在水溶液中，放电可以产生等离子体放电通道，这些放电通道内有大量的等离子体，它们的能量很高，可以产生高温、紫外光辐射和极强的冲击波^[3, 4]。利用液相等离子体技术可以对材料表面进行电化学处理，是一种表面改性手段或者涂层保护方法。不同的液相等离子体技术、不同的处理材料、不同的处理工艺的差别，都会对最终处理效果有不同的影响。总体来说，它们的共同特点是：首先都是在液体环境下进行，施加一定的电压信号在处理材料上，然后处理工件材料的表面会看到微弧放电现象，即电极反应过程^[5]。

1.2 表面改性传统方法

1.2.1 渗碳处理

渗碳处理，即将工件放在含碳物质中加热，以增加工件含碳量的热处理工艺。渗碳工件一般为低碳钢。原理包含三个基本过程：一、分解：含碳物质分解形成活性碳；二、吸附：钢件表面吸附活性碳原子，溶解在表层奥氏体中；三、扩散：表层含碳量增加，与心部含碳量形成浓度梯度差，表面碳向内部扩散。工件渗碳后还要经过淬火，淬火后观察表面显微组织为高硬度马氏体，表面硬度可达 HRC 58 ~ 63，渗碳层 0.8 ~ 1.2 mm，此工艺在飞机、汽车等的机械零部件广泛应用，如轴、齿轮^[6]。

1.2.2 渗氮处理

卢森堡的 Georges J.^[7]在 1999 年发明了一套活性屏离子渗氮装置，如图 1.1，将直流高压电源的阳极接在真空炉壁上，阴极接在真空室金属屏上，悬浮的工件置于金属屏内。当施加高压电源后，反应室内气体发生电离，并轰击到金属屏上，向工件提供了氮化物颗粒或者活性氮物质。此装置的渗氮过程是间接的，活性氮物质不是直接轰击工作表面，而是先轰击金属屏，起到消除边缘效应的作用，同时，渗氮比较均匀，可以处理不同形状的工件。实验结果^[8-10]证实，活性屏渗氮，

可以在工件表面获得氮过饱和奥氏体的渗层，耐腐蚀性更好更均匀。

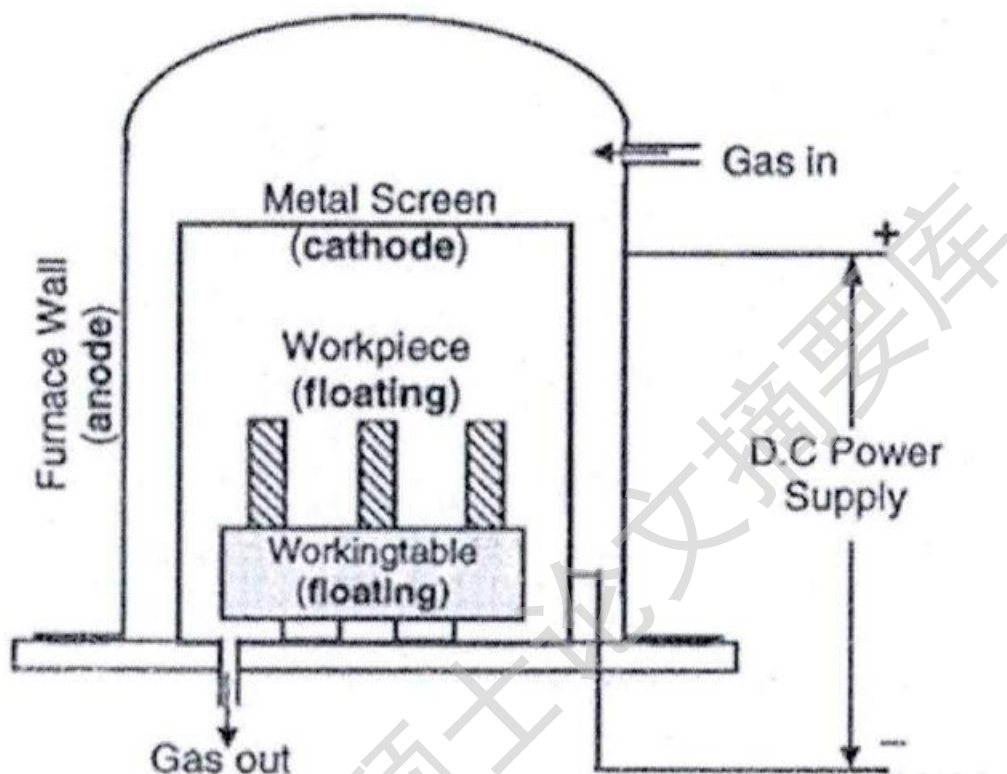
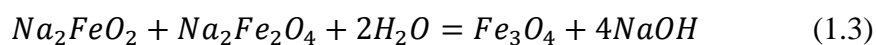
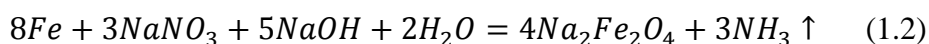
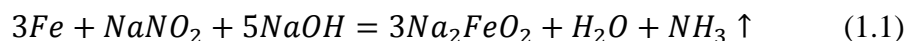


图 1.1 活性屏渗氮原理示意图^[7]

1.2.3 表面发黑处理工艺

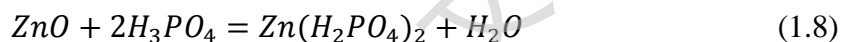
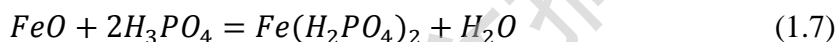
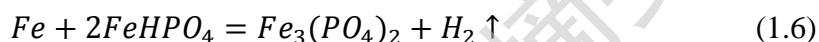
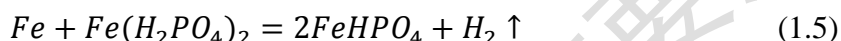
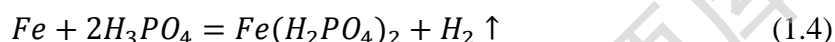
钢铁表面发黑处理^[6, 11, 12]的表面氧化膜具有深黑蓝色，又可叫做发蓝，此工艺是在特定的化学溶液中放入钢铁工件，并使工件表面生长一层致密氧化膜，是一种氧化处理过程。经过此工艺后钢铁表面同时具有防锈和装饰作用。用的比较传统的方法是将 NaNO_3 、 NaNO_2 和 NaOH 作为溶液，煮沸大约 1 h ~ 1.5 h，在表面生成氧化铁： Fe_3O_4 。化学反应式如下^[11]：



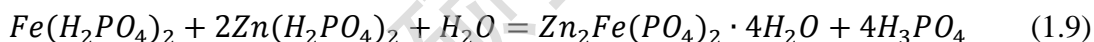
但是此工艺缺点明显：能耗大、时间长，环境污染严重，效率低等等^[6]。

1.2.4 表面磷化处理

表面磷化处理是用正磷酸盐溶液处理工件表面,并生长一层磷酸保护膜的工艺,保护膜具有不溶性。磷化液主要包含 H_3PO_4 、 $Zn(NO_3)_2$ 和 ZnO 。在工件和磷化液的相互作用过程中,磷化膜形成,表现出比较好的耐腐蚀性能。薄膜层有润滑性能,能降低摩擦,有良好吸附性,广泛应用涂料底层和零件润滑层。化学反应式为^[13]:



随着磷酸盐的浓度增加,在溶液的溶解达到饱和后,自然会析出沉积在工件表面。锌离子的浓度增大,磷酸铁和磷酸锌在水中反应生成在水中不能溶解的复合磷酸铁锌磷化膜,该反应式为:



生成的 $Zn_2Fe(PO_4)_2$ 提高了工件的表面活性和膜层和基体的粘附着力。但是,磷化液中的亚硝酸钠等对环境严重污染,对人体有害^[14]。

1.3 等离子体电解渗透的研究现状

作为一种新型的表面改性技术,等离子体电解渗透是在一个开放的大气压的工作环境下,通过配置特定的电解液体系,施加一定工作电压,工件电极整体轻微受热,并发生复杂的化学反应。在渗透处理后,溶液中电解液起到直接淬火的效果,在短时间内,便可获得高硬度、耐磨性强、耐腐蚀性能强的渗透薄膜^[5,15-19]。等离子体电解渗透技术近年来在处理铸铁这类材料的研究应用较为广泛,发展迅速。研究人员花费了大量心思,对等离子体电解渗透技术进行了研究,极大提高了材料表面的机械性能。

2001年, Nie^[20]复合运用等离子体电解渗透与等离子体浸入离子处理,获得类金刚石渗层,提高了钢铁表面硬度和耐磨性。2002年, Meletis等^[21]成功地通

过工件表面渗 C、N 化，实现钢铁表面清洁，并在钢铁表面沉积 Al 陶瓷层，提高了钢铁材料的耐腐蚀性。2007 年，Alievkhazraee 等^[22]研究了实验参数的最优化，在实验过程中，对渗层形成和厚度有主要影响的是施加电压、处理时间，电解液体系浓度和电解质电导率。

工作电压电流、处理时间、工件的性质、温度和电解质浓度，都对渗层薄膜的厚度、显微硬度、耐磨性和耐腐蚀性等性能也有影响^[23]。尽管研究人员在实验电参数对渗层厚度、腐蚀性、耐磨性和硬度的影响的原因上面有部分分歧^[24-26]，不过实验中得出的一般性结论是：在一定范围内，随着所加电压的增大，处理时间的延长，实验温度的上升，渗透层的厚度不断增加，基体材料的硬度也在慢慢增加，渗透层的耐磨性也在慢慢增加。另外，电解液的浓度等其他电参数也会影响渗层的性能，薛文斌等^[27]重点研究了不同的甘油浓度对不锈钢表面等离子体电解渗透过程的影响，实验证明，甘油浓度的提高和渗透电压的上升能有效地增加薄膜厚度和薄膜硬度。

2005 年，Tarakci 等^[28]是在甘油电解液体系中，利用 PEC/N 工艺，在纯铁的表面获得了渗碳层，渗透层的相主要由马氏体和 Fe₃C 组成，处理之后的表面显微硬度达 850 HV。随着材料的处理时间从 10 s 慢慢增加到 60 min，渗透层厚度也从最薄的 12 μm 增加到最厚的 78 μm。

2006 年，Campos 等^[29]则做了腐蚀性评价，他们对 PEB 渗透工艺处理过的钢铁样品，在 NaCl 溶液中进行了电化学腐蚀性能测试。在电参数处理时间为 4 h 的情况下，材料表现出最好的抗腐蚀性。而渗层表面的相通过 XRD 分析，包括 FeB 和 Fe₂B。

2007 年，Taheri 等^[30-32]在尿素电解液体系中，为了研究渗透层的耐腐蚀性，着重设计了不同的实验参数，并进一步进行了最优化。他得出的结论是，如果需要制备到最佳耐蚀性的的渗透层，所需的工艺电参数是，实验施加电压为 260 V，处理时间为 6 min，尿素电解液体系浓度 1150 g/L。通过对钢铁进行了包括 PEC/N、PEB/N、PEB/C 和 PEN/B/C 处理，针对渗透层的机械特性做了相关报道。结果表明，分别经过 PEC/N、PEB/N、PEB/C 和 PEN/B/C 的渗透后，工件材料的显微硬度分别是 1400 HV，2100 HV，1900 HV，1890 HV，耐磨因子则分别为 1.18，0.28，0.65，0.70 mg/cm²·h。材料表面的相组分导致不同的磨损

机制。

2007 年, 沈德久等^[33]在乙醇胺电解液液中, 对 Q235 钢碳氮共渗处理做了一些报道, 他的研究成果为, 施加 150 V 电压处理时间 75 s 下, 制备了 70 μm 的渗透层厚度, 显微硬度达到 750 HV, 为未处理时的 4.5 倍。而相组成包括奥氏体、马氏体和各种化合物。工件材料也表现出明显提高的耐腐蚀性和耐磨损性。

2010 年, 薛文斌等^[34]配置了 80% 甘油、20% 水溶液的电解液体系在钢铁表面做了 PEC 处理, 分析了渗透层的微观组织结构, 评估渗透层的摩擦学行为。他在 350 V 电压信号下, 渗透处理 3 min, 制备的渗层硬度达到 762 HV, 渗透层厚度也达 85 μm 。干摩擦环境中, 渗透层磨损比未渗透层低了一个量级。薛文斌同时对实验施加电压和实验放电处理时间对材料渗碳的影响做了研究。研究成果为, 处理 5 min 的样品, 渗层厚度大约为 100 μm , 硬度大约为 880 HV。获得质量最好的渗透层的电参数为电压 350 V, 处理时间为 3 min。

2011 年, Ashtari Alnakhaei 等^[35]做的研究是, 对钢铁表面 PEN/C 处理之后, 观察渗透层表面微观形貌特征和研究摩擦学性能。他的研究结论为, 脉冲电源的电参数和表面形貌微观特征有极大的关系, 而且渗透层的摩擦性能和表面特征又息息相关关系, 材料表面制备了紧凑致密的渗层。

2011 年, Cavuslu 等^[24]对纯钢铁做了 PEC 工艺处理, 在 80% 甘油电解液体系中, 他分别做了温度为 750 $^{\circ}\text{C}$ 、800 $^{\circ}\text{C}$ 、900 $^{\circ}\text{C}$ 、950 $^{\circ}\text{C}$ 下的渗层研究, 而处理时间有分为 5 min、10 min、30 min。制备的渗透层厚度从 20 μm 到 160 μm , 物相组成大致为马氏体、 Fe_3C 和奥氏体, 显微硬度从 550 HV 到 850 HV。

2012 年, Rastkar 等^[25]做的研究是在尿素电解液溶液中, 通过 PEN/C 处理, 分别施加 110 V、180 V、220 V 的电压, 检测材料的表面性能变化。该研究表明, 通过 XRD 分析, 渗透层表面组织存在碳铁和氮铁的相, 分别为 θ - (Fe_3C) 和 ϵ - $(\text{Fe}_{2-3}\text{N})$ 相, SEM 分析可知渗透薄膜具有裂纹和微孔结构, 通过显微硬度测试, 渗透薄膜的硬度能达到 1280 HV, 大大提高了基体材料的硬度, 是基材的 3~4 倍; 通过摩擦磨损实验, 渗透薄膜的磨损量也减小了一个数量级, 由摩擦磨损机制转变为粘着磨损机制。

2012 年, 杨群等^[36]也做了比较细致的研究, 他配置了甲酰胺和氯化钠溶液的电解液体系, 对 40Cr 钢进行 PEC/N 共渗。他的成果表明, 工件表面经过

处理后可以看到多孔形貌，渗透层包括外层白亮层、中间过渡层和内白亮层。XRD 分析得出，外层白亮层组织由 $\epsilon\text{-Fe}_2\text{N}$ 、 $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}$ 、 Fe_5C_2 、 Fe_3C 和 $\alpha\text{-FeN}$ 态的马氏体组成，而 SAED 测试证实，内层的白亮层确实为 $\alpha\text{-FeN}$ 马氏体。渗透层的显微硬度达到 650 HV，工件处理后明显有更优越的耐蚀性。

1.4 等离子体电解渗透技术的应用

等离子体电解渗透技术的第一个应用是金属表面清洁，它能有效地去除金属表面的氧化物和杂质污染，金属和合金都能够通过该技术做清洁。等离子体电解渗透技术相比于其他工艺手段有如下优势：首先，工艺工序简单，单一步骤。很多金属表面处理工艺如热浸镀需要多重处理工序清洁，而等离子体电解渗透技术可以单一工序处理不同尺寸形状的表面杂质；然后，等离子体电解渗透技术的环境污染小，它并没有像传统方法一样使用有害的酸性物质清洁金属表面。它也不像传统方法一样使用抽真空的设备，需要巨额的设备资金和维护成本；第三个优势是它能获得良好的表面形貌，能够提高金属表面的黏附性和润滑性。最后，等离子体电解渗透技术能有效提高材料的寿命，也提高耐腐蚀性、耐磨性和机械性能。

等离子体电解渗透技术的第二个应用是金属表面涂层。我们已经知道它可以提高金属表面的许多特性，如耐腐蚀性、耐磨性等等^[23]。等离子体电解渗透技术有如下几个优势：首先，高沉积速率，通过等离子体电解渗透技术，Zn 涂层的沉积速率可以达到 $1\ \mu\text{m}/\text{s}$ ^[37]；然后，它能使涂层有很大的界面结合能。强大的键能结合力，让涂层没有很明显的分层。Meletis 提到了他实验中等离子体电解渗透的结合力大于 $70\ \text{MPa}$ ^[21]，优越的结合键能可能因为局部的高温引起；最后，等离子体电解渗透技术能够在工件表面产生纳米晶粒结构^[38]。纳米晶粒结构能够表现优越的涂层特性，而纳米材料因为独特的性能收到科学界的广泛关注。

等离子体电解渗透技术的第三个应用是表面合金。为了提高钢铁表面的硬度，科研学者有通过渗碳^[38]、渗氮^[39]、碳氮共渗^[20,40]的方法来实现。Belkin^[41]报道了详细的等离子体电解渗透表面合金方法，表面合金处理的强大驱动力是因为基底和等离子体区的化学物质和化学性质的不同。金属表面合金处理可以是非金属元素如 O, C, N, B, 或者是金属元素如 W, Mo, V 等等^[41]。有意思的是，等离

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.