

Ion Bombardment
Technology of Penetration
and Diffusion



离子轰击
渗透
技术

杨烈宇 等著

人民交通出版社

离子轰击渗扩技术

Lizi Hongji Shenkou Jishu

杨烈宇 等著

人民交通出版社

离子轰击渗扩技术

杨烈宇 等著

责任编辑：蔡培荣 蒋明耀

封面设计：涂 浩

人民交通出版社出版发行

(北京和平里东街15号)

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本：850×1168¹/₄；印张：22.5 插页：3 字数：50千

1990年8月 第2版

1990年8月 第1版 第1次印刷

印数：0001—2000册 定价：25.00元

02-209-176-3

ISBN 7-114-00732-9

TB·00004

内 容 提 要

离子轰击渗扩技术是一项新兴的金属表面强化技术。这项高科技的应用曾多次荣获国家发明奖、部省级重大科技成果奖等，并向国外出口。本书所发表的都是作者多年来的研究成果和实践经验的总结。

本书分8个部分共27篇，详尽地论述了离子轰击渗扩技术的基础理论和离子渗氮、离子氮碳共渗、离子氮碳钛共渗、离子氮碳钛硫共渗、离子轰击复合处理、离子渗碳、离子沉积等离子渗扩技术和工艺设备的研制，以及在柴油机、航空发动机、纺织机械、模具和其它各种机械工程中的应用。

本书可供从事离子轰击渗扩技术的研究和应用人员、各类机械制造与修理和热处理专业的技术人员及有关院校师生学习和参考。

Abstract

The ion bombardment penetration and diffusion technique is a new technique of surface strengthening of metals. The high-level technique has been awarded national invention medals, and significant science and technology achievement prizes at ministerial and provincial grades, and has been exported abroad. The articles published in this book are summary of research achievements and experiences of authors in many years.

In this book there are 8 sections and 27 articles. They discuss the fundamental theory of the ion bombardment penetration and diffusion technique, ionitriding, ion nitrocarburizing, ion nitro-carbo-titanizing, ion nitro-carbo-titanizing with sulphur, ion bombardment complex treatments, ion carburization, ion deposition and development of ion treatment equipments etc., and deal with applications in diesel engines, aircraft engines, machines of the textile industry, moulds and other mechanical engineerings.

The book is suitable for the study and reference of researchers and engineers who work on ion bombardment penetration and diffusion technique, and technical personnel, teachers and students who are engaged in mechanical manufacture, reparation and heat treatment.

前 言

离子轰击渗扩技术是利用低真空稀薄气体辉光放电产生的离子来轰击金属或合金表面，使工件加热到所需的温度，导致表面渗入某一种或几种元素并向内部扩散，实现表层化学成分和组织的改变，从而赋予工件表面特殊的性能，如耐磨损、耐疲劳、耐腐蚀、抗高温氧化和提高一定的热强度等，以延长工件寿命的一项新兴的金属表面强化技术。它与传统的固、液、气态介质中的渗扩工艺（常规化学热处理）不同，因为它是把作为物质第四态的等离子体应用在化学热处理中，是化学热处理领域中的应用和发展，故又有等离子体化学热处理的命名。这项技术与常规化学热处理比较，有渗层质量特优、表面强化效果突出、被处理的工件变形小、能成倍提高工效和无公害等特点，近年来已成为国内外用以延长机械零件和工模具寿命的一项令人瞩目的高技术。

本书是根据大连海运学院金属材料工艺研究所近年来在杨烈宇教授主持领导下，集体主攻离子轰击渗扩技术的科研成果和实践经验的总结编著而成，其中包括荣获国家发明奖、部省市级重大科技成果奖、申报的发明专利和向国外出口的技术等多种项目，很值得科研单位的研究人员、大专院校师生、民用和军用生产企业的各类机械工程技术学习参考。

全书分为八个部分共27篇，其中杨烈宇教授执笔撰写了第1、2、3、4、5、11、18、23、25、27篇，并参与了其它篇的工作；冯广勤教授执笔撰写了第14篇并参与了第11、13、15篇的工作；王富山副教授执笔撰写了第12篇并参与了第11、13、14篇的工作；鲁济顺高级工程师执笔撰写了第24、26篇并参与了第18、25篇的工作；倪暹副教授执笔撰写了第16篇并参与了第10、

11、17篇的工作；李国卿博士执笔撰写了第6、19、20篇并参与了第18、24、25篇的工作；顾卓明博士执笔撰写了第7、21、22篇；杨道正工程师执笔撰写了第9、10篇并参与了第5、6、7、8、11、14、16、17、18、23、24、27篇的工作；刘承仁工程师执笔撰写了第8篇并参与了第23、24、25、26篇的工作；刘世永讲师执笔撰写了第18篇；孙俊才讲师执笔撰写了第15篇；李一力讲师执笔撰写了第13篇并参与了第9、10、27篇的工作；扈心坦博士研究生执笔撰写了第17篇并参与了第16篇的工作；蒋成海讲师参与了第21、22篇的工作；孙长礼工程师参与了第11、13、14篇的工作；史雅琴工程师参与了第9、10、13篇的工作。全书由杨烈宇教授逐篇审校。书中金相照片由刘之敏高级工程师、杨道正工程师拍摄，史雅琴工程师协助。

由于我们的水平有限，书中难免出现错误和缺点，诚盼读者指正。

目 录

·基本 知 识·

1. 离子轰击渗扩技术概述..... 1
2. 离子轰击渗扩技术经典理论基础——气体放电的物理特性..... 27

·离子渗氮及氮碳共渗·

3. 工业纯钛TA2的离子渗氮..... 82
4. 离子软氮化离子氮碳共渗的研究与应用.....100
5. 4Cr14Ni14W2Mo奥氏体钢加套低温离子氮碳共渗研究及其在柴油机排气阀上的应用.....154
6. 低碳钢横机针板离子软氮化工艺的研究.....190
7. 3Cr2W8V钢模具离子软氮化的研究202
8. 38CrMoAlA钢离子氮碳共渗工艺研究及其在塑料挤出机套筒螺杆上的应用.....215
9. 不锈钢 2 Cr18Ni8W2A表面深层离子氮碳共渗工艺研究及其在飞机发动机分油衬套上的应用.....232
10. 航空发动机40CrNiMoA 火焰筒固定销离子轰击渗扩强化工艺研究.....242

·离子三元及四元共渗·

11. 灰口铸铁加钛离子软氮化研究及其在柴油机气缸套和活塞环上的应用.....259
12. 离子氮碳钛三元共渗处理气缸套和活塞环的装船试验及其结果分析.....324

13. 离子氮碳及氮碳钛加硫多元共渗的研究	347
-----------------------------	-----

· 离子轰击复合处理 ·

14. 船用柴油机喷油嘴离子轰击复合热处理的研究	385
15. GCr15 钢离子氮碳共渗加淬火一回火工艺研究	398
16. 离子轰击渗扩技术在低温镀铁修复工件上的应用	429
17. 镀铁层经离子氮碳共渗处理后出现某些异常现象的 初探	458

· 离 子 渗 碳 ·

18. 无附加热源离子渗碳工艺研究	468
19. 丙酮—氨离子渗碳工艺研究	490
20. 离子渗碳设备、工艺及特性的综合研究	499

· 离 子 沉 积 ·

21. 钢铁表面离子镀Cu—Pb合金固体润滑膜的研究	552
22. 铝合金表面离子沉积 (Ti, Al) N膜的工艺和膜层 性能的研究	568

· 设 备 研 制 ·

23. LD50ZT型离子渗氮炉的研制及应用	609
24. ZDL-15A多用离子轰击炉的研制总结	645
25. ZLCD-65-50A真空离子渗碳多用炉的研制	670
26. ZLB300AZT辉光离子轰击炉的研制	681

· 其 它 ·

27. “氢”在离子轰击渗扩技术中的行为初探	697
------------------------------	-----

· 主要参考文献 ·

CONTENTS

• Elementary knowledge •

1. An Introduction to Ion Bombardment Technology of Penetration and Diffusion 1
2. The Foundation of Classical Theory of Ion Bombardment Technology of Penetration and Diffusion—The Physical Characteristics of Gas Discharge 27

• Ion-nitriding and Ionitrocarburizing •

3. The Ion-nitriding of Titanium TA2 82
4. The Study and Application of Ionitrocarburizing 100
5. Research on the Process of Low Temperature Ionitrocarburizing by Adding Auxiliary Sleeve Cathodes to 4Cr14Ni14W2Mo Austenite Steel Surface and Its Application in the Exhaust Gas Valves of Diesel Engines 154
6. Research on the Ionitrocarburizing of Low Carbon Steel Knitter Needle Bed 190
7. Research on Ionitrocarburization of 3Cr2W8V Steel Mold 202
8. The Study of Ionitrocarburizing of 38CrMoAlA Steel and Its Application to the Muff and Screw Bar of Plasticator 215
9. Investigation on the Process of Deep Layer Ioni-

trocarburizing of 2Cr18Ni8W2A Stainless Steel and
Its Application in the Separating Oil-Bush of Air-
crafts232

10. Investigation of Ion Bombardment Penetration
and Diffusion Strengthening Technology of 40CrNiMoA
Fix Pins of Flame Tube of Aircraft Engine242

• Ionitrocarbotitanizing and Ionitrocarbotitanizing
with Addition of Sulphur •

11. The Study of Ionitrocarbotitanizing of Gray
Cast Iron and Its Application in the Cylinder Liners
and Piston Rings of Diesel Engines259

12. Operating Tests of Ionitrocarbotitanized Cylin-
der Liners and Piston Rings and Results Analysis324

13. Investigation on the Process of Ionitrocarburi-
zing and Ionitrocarbotitanizing With Addition of Sul-
phur347

• Ion Bombardment and Complex Heat Treatment •

14. Investigation on the New Technology of Ion
Bombardment and Complex Heat Treatment of Oil Noz-
zles for Marine Diesel Engines385

15. The Study of Quenching and Tempering of
GCr15 Steel Treated by Ion-nitrocarburizing398

16. Application of Ion Bombardment Technology to
the Repairing of Parts Plated with Iron at Lower Tem-
peratures429

17. The Primary Study of Some Strange Phenomena
Happened in a Complex Treatment of Non-etching Iron
Plating and Ionitrocarburizing458

• Ion Carburizing •

18. Plasma Carburizing Process in a Common Ion-nitriding Furnace	468
19. Research on Ionic Carburizing with Acetone-Ammonia	490
20. A Comprehensive Study on the Equipment, Process and Specific Properties of Plasma Carburizing.....	499

• Ion Depositing •

21. Investigation of Ion Plated Cu-Pb Alloy Solid-film Lubricants on Steel and Cast Iron	552
22. Investigation of Ion Depositing of (Ti, Al)N on Aluminium Alloys and Properties of (Ti, Al) N Coating	568

• Development of Equipment •

23. Development and Application of LD50ZT Type Ion-Nitriding Furnace	609
24. Development of ZDL-15A Ion Bombardment Furnace for Multi-purpose.....	645
25. Development of Vacuum Multi-purpose Plasma Carburizing Furnace	670
26. Development of ZLB 300 AZT Ion Bombardment Furnace	681

• Other •

27. The Primary Study of the Action of Hydrogen in Ion Bombardment Penetrant and Diffusion Technology.....	697
--	-----

• Major Reference Document •

基 本 知 识

离子轰击渗扩技术概述

An Introduction to Ion Bombardment Technology of Penetration and Diffusion

提 要

本篇就离子轰击渗扩技术的定义、基本方法和特点、通用设备、技术应用举例和历史发展简况, 进行较全面的综述。

Abstract

This paper gives a general survey of ion bombardment technology of penetration and diffusion, including its definition, basic method, technological characteristics, universal equipments, applied examples and the historical development in broad outline, etc.

一、定 义

离子轰击渗扩技术可以称为离子轰击化学热处理, 简称为离子轰击热处理或离子热处理。它是利用低真空中稀薄气体辉光放电产生的离子及高能中性粒子轰击金属或合金表面, 导致工件加热到所需温度, 使表面渗入某一种或几种元素并向内部扩散而实现改变其表层化学成分和组织, 从而获得特殊的表面性能, 如耐

磨、耐蚀、耐疲劳、抗高温氧化和提高一定的热强度，以延长工作寿命的一类新兴技术。

离子轰击渗扩处理虽在真空中进行，但它基本上不外加热源，只能算作是真空热处理的一个特殊分支；它与传统的固、液、气态中的渗扩工艺不同，是近年来的物质第四态等离子体在化学热处理领域中的应用发展，故又有等离子体化学热处理的命名。

二、基本方法和特点

离子轰击渗扩处理的基本方法如图1-1所示。即：将工件置于真空容器（图1-1中的1），送入低压 $133\sim 1330\text{Pa}$ （ $1\sim 10\text{Torr}$ ）的含渗剂气体（图1-1中的5），以工件为阴极（图1-1中的6），以金属真空容器器壁为阳极（图1-1中的1），或另设阳极，然后通过直流电源（图1-1中的2）在阴阳极间加上300V以上的直流电压，使气体电离产生辉光放电，此时意味着有大量高能带电和中性活性粒子向工件表面作定向运动，如图1-2所示。这样就实现了对工件的升温、保温和渗剂元素的渗入与扩散，因此离子轰击渗扩技术的主要特点即在于在真空状态下加热和利用辉光

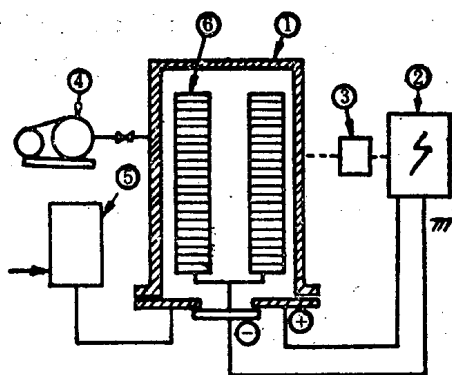


图1-1 离子轰击装置简略示意图

1-真空容器；2-直流电源；3-测温装置系统；4-真空泵；5-渗剂气体调节装置；6-待处理工件

放电两方面。现概述如下：

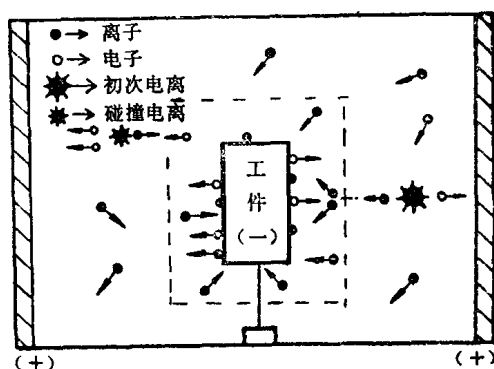


图1-2 在直流电场作用下，真空容器中的粒子运动示意图

1. 在真空状态下加热

即在远低于大气压的低气压气体之特定空间状态（即稀薄气体状态）下加热。它具有如下优点：

1) 有常规真空热处理优越的金属学效果，即工作不氧化，不脱碳（因氧的分压很低，氧化作用被抑制），表面净化、脱脂、脱气，因而处理后的工件表面质量好。

2) 渗剂不氧化、活性强，且工件表面净化活化、对渗入元素吸收快、扩散快，因而渗速快，同时渗剂气氛为低压 133~1330 Pa，可显著节约气源。

3) 因不受或很少受炉外因素影响，便于控制工艺参数以获得所需渗层，且确立了的工艺容易稳定，再现性好，因而处理质量也稳定。

4) 无公害污染，劳动条件好。

2. 利用辉光放电

通常气体是不导电的良好绝缘体，但在受到外界因素作用时，如受热能（几十万摄氏度高温）、电能、磁能、光能等的作用，也可离解为组成它的带电粒子，即离子和电子，称之为物质

第四态的等离子体，这种状态具有极大的化学活性。利用辉光放电，便易得到等离子体。

原来在上述充有微量或稀薄气体的低真空 $1\sim 1333.2\text{Pa}$ 的容器中，由于宇宙射线的作用，经常会有极少量气体被游离的带电粒子（电子、正离子），当无电场存在时，它们在密封容器中做无定向的运动。当有电场存在时，则在电场作用下做定向运动，电子奔向阳极，正离子奔向阴极，形成了电流（见图 1-2）。当增大极间电压时，带电粒子的运动速度加大，必然与容器中的中性粒子相碰撞，其中能量高者，便可使气体分子或原子被激发和电离。

所谓原子被激发，即正常原子受到高速电子碰撞时，其中某些处于低能级的电子获得能量后活跃升高到较高能级的现象。但是，受激原子是不稳定的，一般在 10^{-7}s 内又返回基态，也就是电子又由较高能级回到原来的较低能级，多余的能量就以光量子形态放出。

这一过程中，当具有更高能量的高速带电粒子（通常主要是电子）与气体原子和分子碰撞时，如原子中某一电子获得了足以脱离原子核约束的能量，便成为自由电子，而使原子成为正离子，或使分子成为带电荷的分子离子，这就是所谓的电离或游离。但伴随着电离过程，同时也会出现带异性电荷粒子的彼此结合而变成中性粒子，称为“复合”。复合时的能量交换，也以光量子形态释出。

因此，所谓辉光放电，正是在上述条件下在表面伴随出现一种非常柔和悦目的辉光“连续放电”或“自持放电”现象，辉光颜色因气体成分的不同而不同，如空气为紫红色，氨气为紫蓝色，氢气为淡蓝色等等。总之，它是通过激发和电离低真空电场内气体原子和分子，当受激原子返回基态和带异性电荷粒子复合过程中释放出光量子而产生的。

使气体放电出现辉光的电压称为点燃电压或着火电压，此时意味着空间存在着大量的电子和正离子，电子在高速奔向阳极的

过程中，使真空容器中的气体分子持续不断地被激发和电离，正离子在电场的加速下奔向阴极，但因其质量大，不能很快到达阴极，因此使在阴极附近的电场强度增大，导致正离子与在阴极位降区内多次和中性气体碰撞，使中性粒子具有了与正离子相近的能量，两者同时轰击作为阴极的金属工件表面。在此轰击过程中，一部分动能变成了热能，使工件得到加热并达到参数所需的温度；另一部分动能则转化为使表面金属原子（Fe、Cr、Ni、Mo、Al、W、Ti、Cu等）及表面的其它原子（C、O、N等）逸出的功，使这些原子脱离阴极金属的表面而进入等离子区，此即所谓溅射（Sputtering）或阴极溅射（Cathode Sputtering）现象。在此过程中，根据工作电压和存在的高能粒子数量，可以产生几个到几百个电子伏特的动能，其值相当于以万度计的等离子温度，因此溅射被看作是机械轰击和蒸发的综合原因造成。但由于只局限在极微小的表面积内，虽然在该部位的温度极高，却并非全表面的平均温度，故不致损伤宏观试样。

若以 E_i 和 E_p 分别代表正离子和中性粒子的能量，以 W 表示使原子和电子逸出金属表面所需要的逸出功，以 E_k 表示逸出粒子的动能，以 Q 表示热能，则可将上述加热和溅射两个过程能量的平衡合并表示为：

$$E_i + E_p \longrightarrow W + E_k + Q$$

综上所述，辉光放电有以下优点：

1) 渗速特快：由于阴极溅射效应为渗剂原子和离子的吸附与渗入创造了一个高度活化的表面，又由于高能粒子的轰击，使金属表面出现高密度位错区，导致渗剂原子既沿晶界也向晶内扩散，特别是沿位错沟扩散，故大大地有助于渗入物质的扩散；也由于等离子体可以向工件表面提供和维持渗剂元素的很高的表面浓度及其梯度，因而有比其它渗扩工艺快的渗速。例如同为氮化钢，当温度相同和要求渗层深度在0.5mm以内时，离子渗氮所需时间比气体渗氮缩短1倍，低温离子氮碳共渗又称离子软氮化比气体渗氮所需时间将缩短2倍以上，高温离子渗碳1h可达1mm，