

电火花表面强化工艺

陈 钟 燮 主 编

机械工业出版社

电火花表面强化工艺

陈钟燮 主编

陈钟燮 郑良桂 彭其凤 苏廷礼 编



机械工业出版社

电火花表面强化工艺是对金属工件进行表面处理的特种工艺，用于提高模具、刀具和精密零件的使用寿命。本书着重从应用的角度论述该工艺的原理和特点。主要的内容包括：工艺的原理、规律、设备、使用方法和应用实例及其效果，以及国外的发展概况。

本书主要供从事机械制造的技术人员和工人参考，也可供从事表面处理、特种加工的教师和研究人員参考。

电火花表面强化工艺

陈钟燮 主编

陈钟燮 郑良桂 彭其凤 苏廷礼 编

责任编辑：熊万武

封面设计：方芬

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

铁道出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32 印张 8 · 字数 175千字

1987年8月北京第一版·1987年8月北京第一次印刷

印数0,001—7,230 定价：1.95元

统一书号：15033·6589

前 言

近几年来，电火花表面强化工艺在我国有了较快的发展，其主要标志是：基础理论研究逐步深入，研制了多种功率和型号的电火花强化机，在模具、刀具和机器零件强化，以及零件修复等方面取得了良好的技术经济效果，应用的范围不断扩大，并积累了较丰富的使用经验。一九八三年该工艺被国家经济委员会列为全国重点推广的新工艺之一。

电火花强化工艺是直接利用电能的金属表面处理工艺，属于特种加工的范畴。至今国内还没有系统地介绍该工艺的专著。编写本书的目的是，总结几年来我国在电火花强化工艺领域的研究成果和应用经验，较系统地向读者介绍工艺的原理、特点及其应用。希望本书对促进表面强化工艺的推广和特种加工专业的教学、研究有所裨益。

本书由机械工业部苏州电加工机床研究所陈钟燮同志主编（并编写了概述、第一、二、四、五、六和十二章）。参加编写的有浙江大学郑良桂（编写第三、十和十一章）、山东工业大学彭其凤（编写第七章）和天津机床研究所苏廷礼（编写第八、九章）等同志。

哈尔滨工业大学刘晋春教授和陆纪培副教授审阅了全稿，在编写过程中得到了同行们的热心支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

由于表面强化工艺的应用涉及电机、电器、机械、轻工

等许多行业，限于编者的知识水平，错误在所难免，恳切希望读者不吝赐教。

编者

一九八五年六月

目 录

前言

概述	1
第一章 电火花表面强化原理	6
一、 强化原理和特点	6
二、 强化过程	12
三、 强化过程的物理模型	19
第二章 强化层形成规律	22
一、 电蚀量和迁移系数	22
二、 强化点的形成规律	24
三、 强化层的形成规律	26
四、 限制强化层增厚的原因	33
第三章 强化层的特性	37
一、 强化表面的形貌	37
二、 强化层的金相组织	40
三、 强化层的厚度	41
四、 强化层中化学元素的分布	42
五、 强化层的结构	46
六、 强化层的显微硬度和红硬性	49
七、 强化层的耐磨损性	52
八、 强化层的耐腐蚀性	59
九、 强化层的残余应力状态	63
第四章 影响强化层厚度的诸因素	65
一、 试验条件和计量方法	65
二、 强化层厚度与电压的关系	66

三、	强化层厚度与电容量的关系	66
四、	强化层厚度与放电能量的关系	72
五、	强化层厚度与比强化时间的关系	73
六、	强化层厚度与短路电流的关系	76
七、	放电回路阻抗的影响	77
八、	电极材料对的影响	78
九、	振动器性能的影响	81
十、	放电频率的影响	83
十一、	其他方面的影响	83
第五章	强化机的结构	84
一、	脉冲电源	84
二、	振动器	108
三、	附件	110
第六章	强化工艺方法	113
一、	应用范围	113
二、	工艺方法	114
第七章	模具强化及其应用	126
一、	模具强化工艺	127
二、	模具强化后的处理	132
三、	模具强化实例	133
第八章	刀具强化及其应用	147
一、	刀具强化原理	147
二、	刀具强化工艺	151
三、	刀具强化实例	174
第九章	机器零件强化及其应用	186
一、	机器零件强化的特点	186
二、	机器零件强化实例	188
三、	零件强化的机械化和自动化	194
四、	零件电火花强化工艺的发展	201

V

第十章	磨损表面的修复	205
一、	磨损表面修复的操作规范及注意事项	205
二、	模具磨损表面的修复	206
三、	量具磨损表面的修复	212
四、	机器零件磨损表面的修复	213
第十一章	电火花强化机的其他应用	216
一、	穿孔加工	216
二、	零件表面的打毛	220
三、	刻字和打标志	223
第十二章	国外电火花强化工艺概况	226
一、	设备和应用	226
二、	实验和研究	237
参考文献		247

概 述

在现代工业生产中，切削刀具和模具是普遍采用的重要生产工具。随着科学技术的发展和生产技术的进步，加工设备的运转速度、加工能量、生产效率和自动化水平日益提高，产品的精度要求也越来越严格。为了延长产品的使用寿命，新的高硬度、耐高温、高韧性等难加工材料不断涌现。因此，对切削刀具和模具的耐用度也相应地提出了更高的要求。

众所周知，车刀、刨刀、铣刀等刀具在切削过程中刃口会逐渐被磨损，切削效率随之而降低，产品的精度受到影响。当刀具磨损到一定程度之后，就要停机卸下刀具进行刃磨。如果刀具的耐磨性差，停机的次数就多，这不仅影响到工件的质量，而且使生产效率降低。在一些难加工材料的切削或深孔钻削加工中，还往往由于刀具的耐高温性能差而出现刃口退火，甚至于卷刃，直接妨碍了加工的正常进行。

模具在使用中同样也会被磨损。比如，冷冲模在磨损之后刃口变钝，模具配合间隙扩大，使冲件毛刺增加，必须卸模进行刃磨。一副模具的刃磨次数是有限的。两次刃磨之间的冲件数量越多，说明这副模具的使用寿命越长。热锻模、压铸模等模具则是工作在较高的温度下，而冷冲模具在使用中，局部也会产生高温，因此模具同样希望具有耐高温的性能。

除了刀具和模具之外，对于一些易磨损的机器零件也要

求提高它的耐磨性和使用寿命，因为一台机器往往就因为某个或某几个零件磨损而停止运转。所以，提高易磨损件的耐磨性是提高设备质量的重要方面。比如，拖拉机快档拨叉的早期磨损就是影响拖拉机质量的关键之一。提高拨叉的耐磨性，解决其早期磨损的缺陷，就能使拖拉机正常使用，大大减少制造厂的返修工作量。

为了提高刀具、模具和机器零件的耐磨性和耐热性，人们已经从各个方面进行了研究，并采取了许多有效的措施，其中包括研制新颖的合金材料，改进刀具和模具的设计、改善润滑和冷却条件、规定合理的工艺规范等等。而多种多样的表面处理工艺对提高耐磨性起了重要的作用，这些工艺包括常规的热处理、表面渗碳、碳氮共渗、软氮化、镀铬、离子镀、等离子喷镀、气相沉积、高频表面淬火、电接触淬火、激光热处理等等。电火花表面强化工艺就是其中的一项经济、简便而有效的工艺方法。

电火花表面强化是直接利用电能的高能量密度对表面进行强化处理的工艺，它是通过火花放电的作用，把作为电极的导电材料熔渗进金属工件的表层，从而形成合金化的表面强化层，使工件表面的物理、化学性能和机械特性得到改善。例如，采用WC、TiC等硬质合金电极材料强化高速钢或合金工具钢材料的工件，强化表面能形成显微硬度HM1100以上的耐磨、耐蚀和具有红硬性的强化层，使工件的使用寿命明显地得到提高。

正因为电火花强化能提高工件的耐磨性和使用寿命，自该工艺被发现以来，国内外许多学者对它进行了深入的研究，并设计制造了多种型式的强化设备，在工业生产获得了应用。

我国应用电火花强化工艺始于五十年代。由于当时在基础理论和应用技术等方面缺乏研究，强化设备本身也存在某些缺点，因此未能得到推广。在七十年代，这项被遗忘的工艺因在刀具、模具上运用所取得的明显效果而重新引起人们的重视。国内一些厂家也先后仿制或自制了强化设备用于汽轮机叶片、冷冲模具和刀具的强化。为了推广应用这项工艺，机械工业部苏州电加工机床研究所从一九七七年开始对强化工艺和设备进行较系统的分析和研究，先后设计了D9105、D9105A、D9110、D9110A、D9110B和D9130型电火花强化机系列产品。D91系列的强化机除了用于模具、刀具和机器零件强化之外，还被大量地用于已磨损的模具、量具和机器零件的微量修补及淬火工件上打孔、去除折断的工具。该系列强化机已由江苏省泰州海陵电器厂和苏州无线电元件三厂批量生产，用户遍及全国二十多个省市，取得了良好的经济效益。

近年来，机械工业部第八设计院、浙江大学、山东工业大学、天津机床研究所等研究部门和高等院校，在电火花强化机理研究和推广应用方面也做了大量工作，对促进强化工艺的推广使用起了有益的作用。

特别是机械工业部对电火花强化技术甚为重视和支持。一九七八年九月在江苏泰州召开了“一机系统电火花强化机现场经验交流会”。一九八一年召开了“电火花强化机应用技术交流会”，并将电火花表面强化工艺列为机械工业部新工艺推广项目。一九八三年国家经济委员会将该工艺列为“六五”期间国家重点推广的新工艺之一。去年（一九八四年），机械工业部在苏州再次召开了技术交流会，总结了几年来研究和应用的新成果。

至今，电火花表面强化工艺已经在机械制造、电机、电器、轻工、化工、纺织、农业机械、交通和钢铁工业等许多部门得到了应用。使用的对象有车刀、刨刀、铣刀、钻头、铰刀、丝锥、拉刀和某些齿轮刀具等刀具，冲裁、压弯、压延、挤压、压铸和某些热锻模具，拨叉、夹具、凸轮、导向块和机床导轨等机器零件，并用于修复模具、量具、电机主轴、曲轴等工件。可以说此项工艺在四化建设中有着广阔的应用前景。目前国内从事的主要工作是：继续深入研究强化的机理，提高强化层的质量和强化效率；研究不同电极材料的强化层形成规律和特性；试验研究不同材料和工件的强化工艺参数；选择和控制放电脉冲参数；提高现有设备的使用效果，扩大应用领域；研制机械化和自动化的强化设备。这些研究工作的目的是在现有的基础上进一步提高强化工艺的稳定性、可靠性和生产效率，并适应更多零件的强化要求。

虽然在近年来电火花强化设备和工艺水平有了很大的提高，大量的应用实例也充分证明了它的科学性和实用意义，在工业生产中获得了较好的技术经济效益，但是，任何一项工艺都有它的局限性，电火花强化工艺也不例外。就其工艺本身来说，还存在着强化表面粗糙度较粗、强化层厚度较薄、效率较低等缺陷；目前的设备因手工操作，难以保证强化层的均匀性；最佳工艺参数和电极材料的选择等问题也尚待研究改进。因此，在实际应用中，由于不了解电火花强化工艺的特点和应用范围，致使强化无效或适得其反的情况也时有发生。我们编写本书的目的就在于：向读者介绍电火花强化的原理、性能、设备结构、使用方法、应用范围及其效果，以便使用者正确地采用该工艺，有效地解决生产中的实际问题。

此外，电火花强化工艺已被一些高等院校列入教学的内容，一些研究单位和用户正在着手进行大厚度、细粗糙度和机械化、自动化的强化机研制，现有设备也在扩大应用范围，为此，本书还以适当的篇幅介绍国外电火花强化工艺的情况，以便读者对国外的研究和应用情况有所了解和借鉴。

第一章 电火花表面强化原理

一、强化原理和特点

不论是哪一种表面强化工艺,为了使工件表面的性质发生改变,就必须以某种方式向被强化表面提供特定形式的能量。电火花强化就是以直接放电的方式向工件表面提供电能,并使它转化为热能和其它形式的能量,达到改变表层的元素成分和金相结构的目的,从而使表面性能得到改善。

为了了解电火花强化的原理,首先观察一下电火花强化设备是怎样工作的。

组成电火花强化设备的最基本部件是脉冲电源和振动器,前者供给瞬时放电能量,后者使电极振动并周期地接触工件。它的原理结构如图1-1所示。图中的脉冲电源是一个简单的 RC 弛张式

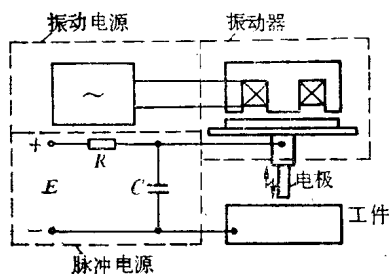


图1-1 设备原理结构

脉冲发生器,其中直流电源 E 、限流电阻 R 和储能电容器 C 三者组成充电回路;而电容器 C 、电极、工件及其引线组成了放电回路。通常电极接电源正极,而工件接

负极。电极与振动器的运动部分相连接,振动的频率由振动

器的振动电源频率来决定。振动电源和脉冲电源组成一体而成为设备的电源部分。

在工作时，电极随振动器作上下振动。当电极还没有接触到工件的时候，电源 E 通过限流电阻 R 向电容器 C 充电，电极与工件之间的状态如图1-2a所示，其中箭头表示该时刻电极振动的方向。接着因为电极向工件运动而无限接近工件，使放电回路形成通路，在火花放电通路和相互接触的微小区域内将瞬时地流过放电电流，电流密度可达到 $10^5 \sim 10^6$ A/cm²，而放电时间仅几 μ s至几ms。由于放电能量在时间上和空间上的高度集中，在放电微小区域内产生了约5000~10000℃的高温，使该区域的局部材料熔化甚至气化。并且放电时产生的压力使部分材料抛离工件或电极的基体，向周围介质中溅射。这种情况如图1-2b所示。此时电极继续向下运动，使电极和工件上熔化了的材料挤压在一起，如图1-2c所示。由于接触面积扩大和放电电流减小，使接触区域的电流密度急剧下降，同时接触电阻也明显减小，因此电能不再使接触部分发热。相反，由于空气介质和金属工件基体的冷却作用，熔融的材料被迅速冷却而凝固。接着，振动器带动电极向上运动而离开工件，如图1-2d所示。冷凝的材料脱离电极而粘结在工件上，成为工件表面上的强化点。同时，因放电回路被断开，电源重新对电容器 C 充电。这就是电火花强化设备的一次充放电的过程。重复这个充放电过程并移动电极的位置，强化点就相互重叠和融合，在工件表面形成一层强化层。

电火花强化工艺之所以能提高工件表面的性能，不仅仅是由于能够形成强化层，而更重要的是所形成的强化层具有的特性。采用电子显微镜、X射线衍射仪等现代科学仪器对

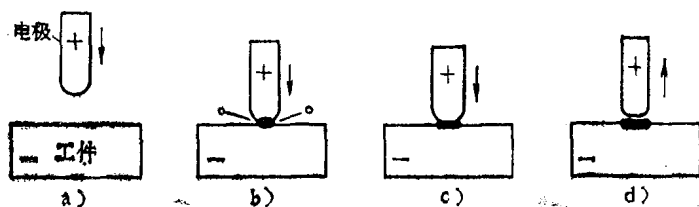


图1-2 强化过程中的电极状态

强化层进行分析的结果表明：当使用WC硬质合金材料作电极强化合金工具钢时，强化层是由电极和工件材料形成的具有特殊结构的新合金层，它的显微硬度高达HM1100以上；在700~800℃的高温下，强化层仍然具有高的硬度，耐磨性也得到明显提高。

因此，电火花强化的原理，简单地来说，就是：直接利用火花放电的能量，使电极材料在工件表面形成特殊性质的合金层。

当然，除了形成合金层之外，电火花强化改善工件表面性能还有另外一些原因，比如，火花放电的骤热骤冷作用具有表面淬火的效果，用石墨电极强化则有表面渗碳的效果等。

根据这种强化原理可以设计出多种形式的电火花强化设备。脉冲电源可以采用电阻、电容、电感组成的RC、RLC、LC或CC等储能方式的电气线路，也可以采用可控硅、晶体管等元件组成的开关线路。振动器可以是电磁振动方式，也可以是旋转方式。电极相对工件的运动可以有各种各样的选择，图1-3所示的就是其中的几种运动形式。

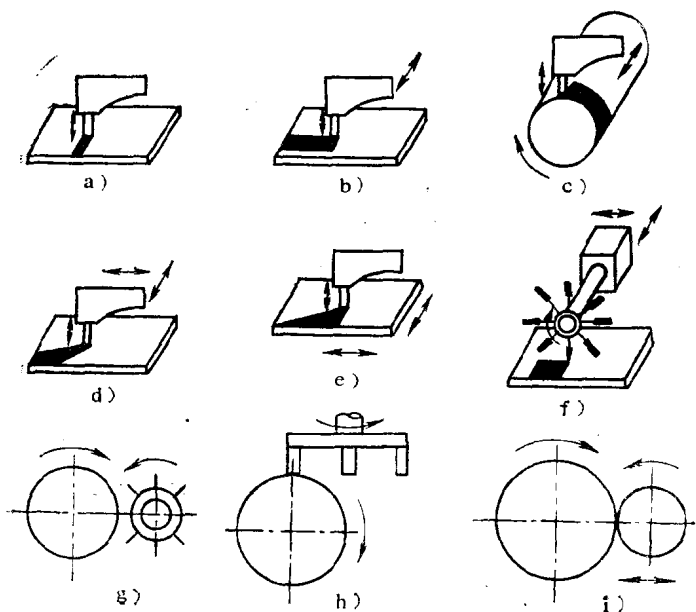


图1-3 电极运动的形式

我国目前的电火花强化机都是手工操作的小功率设备，操作时人工握持振动器，使电极沿需要强化的表面移动进行强化，如图1-3a所示。这种形式的优点是比较灵活，能适应多数不同形状的刀具、模具和机器零件的强化。但是效率较低，强化层的均匀性受操作者的熟练程度影响，操作者容易疲劳。为此试制了可以小面积自动强化的附件，其工作方式如图1-3b所示，除了电极轴向振动之外，振动器可以在小距离内横向自动往复运动。如果将它安装在普通车床的刀架上，使工件慢速旋转，则可自动强化轴类零件的外圆面，如图1-3c所示，