

电 接 触 强 化

B. K. 亚罗舍维奇

[苏] Я. С. 亨 金 著

B. A. 韦列夏金

王雪芬 译

68

国防工业出版社

电 接 触 强 化

B. K. 亚罗舍维奇

〔苏〕Я. С. 亨 金 著

B. A. 韦列金

王雪芬 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书研究了用电接触加热使粉末或致密材料和金属表面结合形成涂层的方法。研究了电接触加热的主要发热源及电接触强化时粉末的加热及烧结问题；特别注意了对长尺寸平面粉末涂层的温度场计算；论述了用烧结及触热焊规范获得涂层的方法；介绍了强化零件的物理机械性能的研究成果和用电接触焊提高接头强度的方法。

本书可供从事提高机械零件可靠性和使用寿命的工程技术人员使用。对相应专业的研究生和大学生也是一本有益的参考书。

ЭЛЕКТРО-КОНТАКТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ

В. К. Ярошевич

Я. С. Генкин

В. А. Верещагин

МИНСК «НАУКА И ТЕХНИКА» 1982

电 接 触 强 化

В. К. 亚罗舍维奇

〔苏〕 Я. С. 亨 金 著

В. А. 韦列夏金

王雪芬 译

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168¹/₃₂ 印张 6³/₄ 176千字

1986年1月第一版 1986年1月第一次印刷 印数：0,001—1,820册

统一书号：15034·2964 定价：1.55元

中译本序

《电接触强化》是苏联明斯克科学技术出版社出版的一本专著。

现代的机械制造业都致力于提高零件的可靠性和使用寿命，以改进产品的质量和增加经济效益。但一些传统的老工艺常常达不到预期的要求，这就促使人们去探索新的途径。应用表面强化技术来提高零件的可靠性和使用寿命就是其中之一。表面强化技术的方法是多种多样的。喷丸强化、化学热处理、喷涂各种涂层等都是现在广泛应用的表面强化技术。它们可以大大提高产品的使用寿命，又能大大减少贵重材料的消耗，从而降低产品的成本。

本书介绍的电接触强化和上述表面强化技术有所不同，它是用电接触触热焊的方法使粉末材料或致密材料在基体金属(零件)上形成牢固的耐磨、耐热或耐蚀涂层。特点是生产率高、劳动条件好。电流对零件的热影响区比电弧焊小得多。由于零件基体可以使用比较廉价的材料，因而可以降低成本。

电接触强化对于平面形状的零件，尤其是长尺寸平面零件的强化特别有利。

为了向国内从事提高机械零件可靠性和使用寿命的科技人员介绍电接触强化这一新工艺，我们组织翻译了这本专著供大家参考。

原编者的话

本书论述了电接触加热的两个应用领域：1) 用于建立永久性接头，即焊接；2) 在零件表面上获得具有高的结合强度及高耐磨性的金属粉末涂层。

在研究低电压大电流工艺的应用时，一般要研究金属内部及接触表面发生的物理现象。其区别在于，在第一种情况下，是研究致密零件的结合；而第二种情况是研究粉末层（或粉末体）在致密零件表面上的结合。因此，我们最感兴趣的是书中各章中所研究的铸核形成的现象、焊接时锻造力的影响、残余应力的存在和特性、温度场的行为特点和电气及机械参数的关系等。致密和多孔性介质的分析对比使我们可以评价和预测结果，同样也是建立新的强化工艺过程及扩大其应用范围的前提。

本书称为《电接触强化》应理解是有条件的，因为在两种电接触加热方案中，所说的或者是焊接强化，或者是用高硬度、高耐磨的粉末层涂敷零件表面的强化。

白俄罗斯科学院机械寿命和可靠性研究所进行的研究工作证明，用烧结和触热焊规范得到的粉末材料涂层具有最高的耐磨性。以该研究所耐磨涂层实验室的理论和工艺研究为基础，在苏联出现了新的工艺——触热焊。触热焊的工序包含：在零件表面涂上粉末模型或粉末层，然后加热到保证粉末材料烧结的温度。与零件形成牢固的扩散连结，以得到双层材料。

根据所用的工艺规程及设备的不同，触热焊工序方案也可能不同。

本书用很大的注意力描述了在电接触焊缝焊机上用金属粉末获得的涂层。电接触触热焊工艺有它自己的特点，作者在本书中详尽的论述了这些特点。

H. H. 多罗日金

目 录

第一章 电接触加热在金属焊接及致密和粉末材料涂层中的应用	1
1.1 电接触焊及强化过程的特点	1
1.2 关于接触焊机的基本知识	10
1.3 金属涂层焊机的其他设备	17
第二章 电接触加热中主要热源发热量的分析	23
2.1 电接触加热时零件内电场的结构	23
2.2 焊接时的电阻	30
2.3 金属粉末在电接触触热焊时初始电阻组成的特点	39
2.4 电接触触热焊粉末涂层的粉末粒度大小最佳比例的选定	44
第三章 电接触点焊时的热过程	51
3.1 热过程研究的现状	51
3.2 热传导方程及解	54
3.3 焊接接头冷却时的热传导方程式	79
3.4 热传导方程的分析	84
第四章 电接触强化时涂层的加热和烧结	98
4.1 电接触粉末触热焊过程的压力和加热速度对粉末层烧结动力学的影响	98
4.2 在轧制情况下粉末涂层的变形(应变)及烧结的特点	104
4.3 电接触强化时温度场的研究	112
4.4 致密材料在电接触熔焊时金属的加热和变形的某些特点	127
第五章 提高点接触焊接头工作性能的途径	132
5.1 由温度场的变化说明焊接过程飞溅的产生	132
5.2 焊件中的应力和变形	134
5.3 点焊过程的控制 焊接规范的计算	142
5.4 焊机的调整和焊接接头质量的检查	145
第六章 电接触强化工艺涂层的物理-机械和使用性能	152

6.1 机械零件电接触强化的工艺方案	152
6.2 电接触粉末触热焊时活化压力值的选择	163
6.3 快速磨损零件电接触强化用粉末材料	165
6.4 涂层的物理-机械性能	169
第七章 电接触焊接的应用及农业机械零件 制造中的强化	191
7.1 拖拉机拖车车台构架的点焊	191
7.2 提高联合收割机KCK-100粉碎筒抗切削梁的耐磨性	193
参考文献	197

第一章 电接触加热在金属焊接及 致密和粉末材料涂层中的应用

1.1 电接触焊及强化过程的特点

1.1.1 关于接触焊的新概念

压力焊接形式之一的接触焊，是金属结合最有成效和最经济的方法。在焊接时，永久性接头的形成是零件间相互熔化和结晶的结果。现代接触焊的特点是生产率高、金属接头的质量稳定，并能进行文明生产。它常用于汽车制造、航空、电子工业及冶金加工、管路安装、铁路铺设以及其他工业中。其中点接触焊的应用最为广泛。

焊接的质量，是靠完成完整的工艺过程来保证的，而完整的工艺过程是由各个单独的工序组成的，这些工序包括：用焊机电极对焊件进行预压；加热金属使之形成熔融区；断开焊接电流后对焊接处锻压及焊接后接头的冷却。

预压：被焊件必须进行预压以保证结合零件之间的电接触和形成保存液态熔核的密实的环形圈。A. C. 格里曼 (A. C. Гельман) 认为，电极所加的压力是点焊的基本参数 [33]。

在薄零件焊接时，由于电极加压的结果，零件在边缘和各显微凸点发生接触，电流通过边缘和凸点时，引起熔化而导致飞溅，并破坏焊接过程。Г. А. 米尔林 (Г. А. Мирлин)、В. С. 沙夫琴科 (В. С. Савченко) 及 В. С. 谢德罗夫 (В. С. Шедров) 指出，电极极间区的塑性变形应尽量加快，以防止形成初始飞溅 [113]。厚的高硬度零件焊接时，将出现另一种情况。由焊接规范规定的电极压力，通常不足以保证零件之间的紧密接触，所以在接通焊接电流之后要在焊缝区附近进行塑性变形。由于电极周围区的金

属加热不均匀, 容易形成程度不同的再结晶区。在塑性变形及再结晶过程中, 可能出现以晶粒线性生长为特征的潜伏期〔169〕, 从某一温度开始形成加速再结晶过程的核心。这时, 金属的塑性和工艺过程的温度存在复杂的关系。焊缝附近区加热不均匀及在电极压力作用下的塑性变形, 容易导致裂纹和裂口的产生〔34、47、121〕。Б. Ф. 雅库森 (Б. Ф. Якушин)〔196〕证明, 这些裂纹是在脆性温度区和变形速度大于临界变形速度时发生的。点焊时, 加在电极上的部分压力将消耗在焊接区零件的塑性变形上, 因此, 焊接规范还应考虑焊接零件的强度性能〔35、190〕。

铸造区的形成: 点焊获得的接头质量, 取决于焊接接头的静态强度, 而该强度又取决于焊点铸核的尺寸。由于缺少有根据的铸核尺寸的计算。为了获得理想的结合强度, 点焊参数是根据和零件厚度有关的经验公式进行选择的。

目前, 焊接规范是用电流值、电极间的压力、电极接触表面的尺寸和形状来确定的, 在这种情况下, 电流和压力是时间的函数〔63〕。А. С. 格里曼〔33、34〕提出了点焊焊接电流的计算公式, 但用这些公式完成的计算工作量很大, 而且包括许多没有考虑实际焊接条件的假设。Б. Е. 帕通 (Б. Е. Патон) 和 В. К. 烈别捷夫 (В. К. Лебедев)〔127〕为了确定焊接规范, 提出应用相似原理进行计算, 但这种方法要求用实验证明焊接规范参数的应用范围〔76、109〕。

为了保证规定的焊核尺寸, 使用红外线检测法研究了焊接过程〔50、141〕。正如 Б. Д. 奥尔罗夫 (Б. Д. Орлов) 所指出的〔124〕, 被焊零件表面加热的程度, 只是间接地和焊接点内部的熔化温度有关。例如, 当零件表面被污染时, 此种关系即被破坏。

可以采用多因素回归分析法选择理想的焊接规范〔126、132〕。焊接时间、焊接电流、电极压力可作为选择规范基本参数的变通因素。

许多研究工作〔124、125、140〕阐明了用电极位移量检测焊接

过程的方法保证熔化深度（熔核高度）的问题。正如著作〔186〕指出的，以焊接金属的热膨胀为基础制出的检测仪器不能得出正确结果。因为除热膨胀以外还必须和焊接规范的参数进行比较。

Н. В. 波多拉 (Н. В. Подола) 等人〔132〕对焊接电流、焊接时间、电极压力、电极直径尺寸对熔化深度和大小影响作了统计估算。这些数据可借助电子计算机用于焊接规范的计算。

接触点焊规范，分为硬性和软性两类，作者〔37、104〕提出了用傅里叶判据的倒数值作为硬性规范的指标。该判据能估算出同一厚度不同材料零件的焊接规范。硬性规范应用愈多，得到的焊核尺寸稳定性就愈小〔169、191〕。

锻压：在接通焊接电流之后，熔化金属进行结晶。结晶的性质取决于电极和焊件的传热情况。由于焊缝的非自由收缩，金属核处于正在产生和发展着的拉应力作用之下。金属的收缩可能使金属焊核出现缺陷：气孔和裂纹〔77〕。焊核中金属的密实性靠锻压来保证。

某些研究〔163、164、234〕指出，合金在点焊时，随着电极压力的增加，在焊点处出现裂纹的或然率减少。Б. Б. 佐洛托烈夫 (Б. Б. Золотарев) 和 В. М. 沙加烈维奇 (В. М. Сагалеви) 〔67〕深入研究了在锻压时弹性和塑性变形的计算方法。进行计算时，要求知道电极区金属的机械性能和温度场状态的关系。这种计算考虑了有关电极和零件的接触平面的文献中引用的温度。

在焊核中，裂纹的产生取决于三种特性：脆性温度区；在该温度区的金属塑性及弹-塑性变形的增长速率随温度下降〔67、121、196〕；随着接头形状、尺寸、结合硬度、焊接规范及工艺的不同，到结晶过程终了时，金属的变形可能呈现出小的、中等小或极小的塑性。在后两种情况下，出现热裂纹是难免的。В. М. 沙加烈维奇〔150〕指出，残余变形可以用锻压来消除，而且，锻压电极的力量可以改变残余应力的符号。锻压能大大提高疲劳应力条件下的接头强度。在焊接时，锻压的开始时刻很重要。在焊接电流脉冲截止的时刻开始锻压，可以最大限度地改变残余应力

的数值〔43、123〕。

在碳素钢焊接处的铸核中，不希望存在内部宏观缺陷。由于在电极和焊接零件中强烈的热传导，使焊核点发生淬火。焊核的低塑性使宏观缺陷影响加剧。这些宏观缺陷，由于温度的变化及机械负荷等原因，可能成为裂纹发展中心。提高铸核质量的方法之一是采用超声波焊接〔129、130〕。

焊接接头的冷却：碳素钢点焊时，在金属中可以看到金相组织的变化及局部塑性变形和应力的发展。焊接接头的性质同加热及冷却条件有关。焊点冷却的速度，可达很高的数值 $(0.6\sim 12.5)\cdot 10^3\text{K/s}$ 〔63〕。因此，甚至连08号钢用硬性规范焊接时，所形成的焊核也具有很高的硬度。在焊缝附近区的金属，基体是铁素体。在紧靠交错结晶区，则产生魏氏组织结构。在这种情况下，塑性下降〔4〕。在热影响区，08号钢开始生长一些长形晶粒，并沿着导热最快的方向进行定向生长〔53〕。

在焊接含碳量超过0.2%的钢材时，可能形成应力不平衡的淬火组织，这时焊接处的塑性降低，但焊接结构在使用中基本上是可靠的〔109〕。

高的结晶速度会导致形成降低金属机械性能的柱状晶体〔68〕。结晶方式对焊缝及脆性温度区内金属的应变集中和焊接接头的塑性及化学不均匀性有很大影响。

在10号钢快速冷却时，焊点处产生化学成分很不均匀的奥氏体，焊缝及其过渡区的相对延伸率均比基体金属低〔199〕。

在电极受压时调整冷却过程是比较合理的。焊接周期之后的冷却时间应足以使整个金属体积中得到完全的马氏体转变。决定焊接区最终组织的焊接规范参数，通常是用实验研究方法进行选择。如焊接厚1.5mm的30CrMnSiA钢材时，必须跟着接通第二脉冲电流对焊点进行热处理，第二脉冲的电流平均值低于焊接脉冲的36%，持续时间高于焊接脉冲的20%〔109〕。

在著作〔208〕中，确定了最适宜的回火温度范围为770~820K，回火规范加热的最适宜电流和焊件厚度、电极直径等因素有

关。电流和加热时间的关系可由下式决定：

$$i_a^{0.5} K_t = 0.52$$

式中 i_a ——回火电流和焊接电流之比；

K_t ——回火加热时间和接通焊接脉冲时间之比。

在电极脱离金属结构后，对上述的瞬时标准圆形热源型式的热过程有影响〔91、142〕。

1.1.2 电接触加热在粉末烧结及致密和粉末材料涂层中的应用

电脉冲烧结是热压制过程的一种形式〔18、233〕。它和通常的粉末冶金工艺的区别，在于电流直接通过接触电阻来激化并加速决定烧结金属性能的热压过程的进程，在电热作用下，粉末在短时间内就变成可塑性的金属因而易于变形。不论是在热压制还是在压力焊接中，所发生的工艺过程都是电脉冲烧结占优势。每个过程所分摊的比率则随温度、压力、时间、材料型号的不同而不同。应注意的是，在所研究的工艺中，虽然应用的压力相同，但烧结时间比热压制的时间要短得多〔2、220、231〕。

用直接通过电流进行金属粉末烧结的方法，是泰劳勒 (Те-йлором) 于1933年最早取得专利权的。泰劳勒的装置是由绝缘材料制作的填充金属粉末的管子及两个柱塞状电极组成的〔232〕。

在这之后，约翰逊 (Джонс)〔213〕研究了电阻烧结工艺，并建议采用压力焊接装置。

克雷默尔 (Кремер) 于1944年介绍了应用电接触焊接装置在压力作用下的电脉冲粉末烧结法〔229〕。克雷默尔在实验中主要使用了非铁磁性粉末，如铜、青铜、铝。

1945年，罗梭 (Россом) 应用交流电和变参数增压的电脉冲烧结方法取得了专利权。

列涅罗夫 (Ленелом)〔220〕研究了在压力作用下电脉冲烧结的基础理论和工艺问题，并编写出对电脉冲烧结装置的技术要求。

必须指出，舍帕尔德 (Шепард) 和克罗弗特 (Крофт)

〔231〕做了大量的工作，例如以钛、碳化硼、碳化矽、硼化钛、矽氧化铝为基体的硬质合金粉末炉料烧结时，采用电脉冲烧结工艺表现出较高的效率。已经查明，该过程的主要优点是生产率高、能量消耗低，能获得气孔率不大及微小弥散组织的试件。但舍帕尔德和克罗弗特对用电脉冲烧结工艺获得大尺寸工件的可能性却持否定意见。

除了用纯金属粉末和硬质合金化合物烧结试件外，电脉冲压力烧结也用来生产耐磨金属。在著作〔217〕中，记述了用锡青铜（CuSn10）制做零件的方法，其特点是使用密度不大于 $70\text{A}/\text{mm}^2$ 的电流及相当长的加热时间（达45min）。

И. Д. 拉多梅谢利斯基（И. Д. Радомысельским）和Е. В. 雷莫罗夫（Е. В. Рыморовым）〔137、146~148〕研究并论证了粉末冶金法和电接触焊接相结合的可能性和前景，以建立得到双金属零件的高生产率的工艺过程。

电火花（放电）烧结是一种特殊的电脉冲金属粉末烧结。这种工艺方法是日本首先研究成功的。后来在美国得到发展〔214〕。在苏联，А. И. 拉琴科（А. И. Райченко）、Г. Л. 布列科夫（Г. Л. Буренковым），等研究了电火花烧结工艺〔224〕。电火花烧结的特点是利用直流和高频交流电流叠加。在这种情况下，粉末一方面靠焦耳热加热，另一方面靠显微接触时不断发生的放电加热。在电火花烧结时，粉末用不大的压力（ $0.05\sim 1.0\text{MPa}$ ）进行压缩，然后逐渐提高压力。交流电的频率在 $200\sim 2000/\text{s}$ 之间。

在著作〔148〕中指出，电脉冲烧结过程的特点是连续经过几个阶段（图1.1）。开始阶段（AB段）是进行粉末

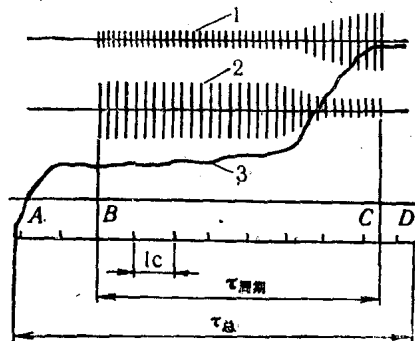


图1.1 压力作用下电脉冲烧结的阶段
1—二次电流示波曲线；2—二次电压示波曲线；
3—粉末层致密动态曲线。

预压(冷压制),从而使电阻层稳定。下一阶段(BC段)是使电流流经压实的粉末层,让接触电阻产生热量,电阻值迅速下降,因为粉末粒子在微观接触时材料达到塑性状态,再加上压缩力就增加了材料的密度。这时,处于显微接触中的固相和液相积极地进行结晶、凝结、烧结、焊接等过程。这些过程联合进行的结果,可使材料的密度增加到接近100%。冷却阶段(CD段)决定以后材料热处理的条件。

电接触涂层:为了获得粉末和致密材料的涂层可应用电接触加热。

根据金属粉末电接触加热可以达到熔化温度的事实,А.Н.里亚古佐夫(А.Н.Рягузовым)[8]于1939年首先提出了在零件表面上采用金属粉末熔接的方法。之后,И.С.佩克尔(И.С.Пеккер)研究了在圆盘状零件上用硬质合金粉末获得涂层的方法[9]。他在工艺中使用了两个辊式电极和保护气体,并用冷却液对加热部位进行连续淬火。

在著作[154、165]中探讨了几种用辊式电极在金属零件上通电流获得粉末涂层的工艺方法,指出交流电流难以应用铁磁性金属粉末。但如果用直流电或将粉末预热到居里(Кюри)温度点就可以消除这一缺点[13]。著作[11、12、147]的作者报道了硬质合金粉末和以硬质合金为基的配料得到电接触涂层的消息。指出应用铬铁、锰铁、钛铁做为粉末混合物的强化成分熔化在快速磨损的零件表面上的可能性。

业已证明,用电接触方法得到的粉末涂层具有高的物理机械性能(烧结强度150~300MPa,孔隙率不大于10%)[148、165]。必须指出,在电接触熔接及触热焊时存在的氧化膜实际上并不降低结合强度,这是因为氧化膜具有很高的电阻值,因而受到脉冲电流最强烈的加热后随即被排除出结合区。例如按Ю.В.克利缅科(Ю.В.Клименко)[78]的资料,在第二次强烈氧化层上的熔化层的结合强度并不低于在清整工件表面上和第一次相同的熔化层的结合强度。表面层的耐磨性可达到用电弧熔接的高铬铁合

金的水平，并大大优于热处理的碳素钢和低合金钢。

电接触加热能得到机械性能沿深度而变化的涂层〔149〕，也就是用粉末配料和膏剂合金一起涂敷。研究证明，可以用耐磨粉末获得沿深度方向有两层、三层和更多连续层的涂层。

目前，电接触粉末涂层被用于建筑、筑路机械零件的强化〔176、119〕；用于提高端面密封装置及石油设备的滑动轴承的使用寿命〔64〕；也用于修复机械零件的磨损表面〔165〕和制造液压传动闸的某些零件〔235〕。

除了采用粉末混合物涂层的工艺过程外，还有用电接触熔接致密金属如金属丝、金属带的工艺过程。这种工艺在内燃机零部件的修理（汽缸体、曲轴）〔78、114〕、高强度铸铁零件的修理中都得到了应用〔198〕。

电接触涂敷涂层过程的特点是使用15~30kA的强电流，二次电压为1~6V，压力在100MPa以内。强化区表现出高的加热速度。按著作〔80〕的资料，在0.9~1.2kA/mm²的电流密度下，用电阻法加热金属丝的速度可达50000K/s。

电接触强化过程具有以下主要优点〔78、148〕：高的生产率和涂层过程能耗低；由于用短时间的脉冲加热，电流对零件的热影响区域最小；由于对涂层材料热作用时间较短，不需要用保护气氛，也不存在闪光及气体逸出。

上述分析表明，电接触加热是用来获得快速磨损机械零件表面耐磨涂层最有前途的方法之一，其中值得着重提出的是用烧结及触热规范得到涂层的方法，因为在此情况下，在涂层中确保了原来粉末系统固有的基本功能（保持遗传组织）。在涂敷涂层时强化区不存在液相，这就大大扩大了这种强化过程的可能性（可以增加耐磨层厚度至3~6倍，提高电极的使用寿命，降低涂层材料的损失，促使强化层长度方向上的物理机械性能分布更为均匀。

但是，由于缺少系统的研究和缺少有关工艺过程及其研究的介绍，还不可能广泛采用上述方法来强化易磨损的表面。因此首

先要研究粉末层的加热并使其变致密的工艺和电接触加热的最佳工艺参数选择方法。

1.1.3 电接触涂层方法的分类

根据涂层材料类型的不同,可分为(图1.2)电接触熔焊和粒状粉末及致密材料的触热焊。粉末涂层的涂敷可以在熔化状态也可以在烧结和触热状态进行。金属粉末的触热和熔焊可以用预形成粉末层或在自由填充状态下进行。预形成层用粉末喷涂法生产,在配料中加入增塑剂,用厚为0.1~0.2mm的铜或黄铜箔预

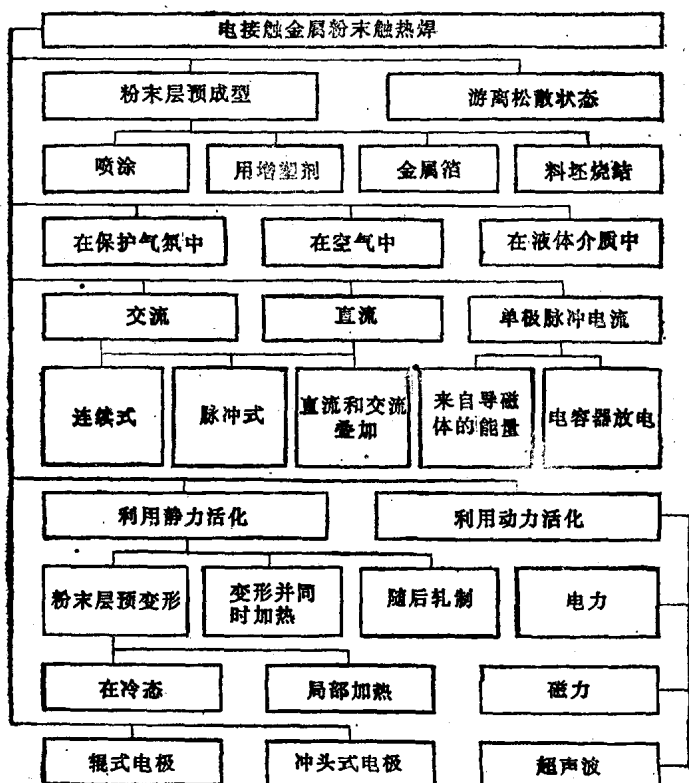


图1.2 金属粉末电接触触热焊方法的分类

烧成粉末块。

电接触熔焊和触热焊，可分别在保护气氛、煤气、输送气氛、空气及液体介质中进行。强化时，可以分别用交流、直流和单脉冲（导磁体能量、电容器放电）等各种电源电流进行熔焊和触热焊接。电流通过涂层材料和强化零件的规范，可以是连续的，也可以是脉冲的。应用叠加的直流和交变高频脉冲电流（电火花烧结和触热焊接）可以使合金涂层的形成过程大大加速。

电接触强化方法随力的活化形式不同而不同。有静力活化和动力活化的工艺方案。静力活化采用冷态预变形或局部加热后进行滚压。

动力活化可以分为电力活化、磁力和超声波活化。

随着具体的工艺问题的不同，机械零件的强化可以用辊式电极或柱塞式电极及倾斜式电极。

1.2 关于接触焊机的基本知识

接触点焊机是一种复杂的电机设备，这种设备用电极对零件加压，然后按焊接脉冲电流的接通时间严格分成服量加热零件。

电焊机按如下特征分类〔6、70、87、191〕：

- 1) 按用途分——通用的、专业的、专用的；
- 2) 按工作条件分——固定式、有搬运工作机构的移动式；
- 3) 按能源形式分——直接由电网供电、电容式、电磁式、蓄电池式、用飞轮蓄能的电动机-发电机系统；
- 4) 按焊接电流的供给形式分——单向的、双向的；
- 5) 按电流种类分——工业低频电流、整流电流、直流电流；
- 6) 按脉冲电流形式分——连续的、调制的、脉动的、用脉冲加热和回火的；
- 7) 按同时焊接的焊点的数量分——单点的、两点的、多点的；
- 8) 按电极位移的特点分——具有直线行程的；
- 9) 按电极加压传动机械的型式分——踏板式、气动式、液