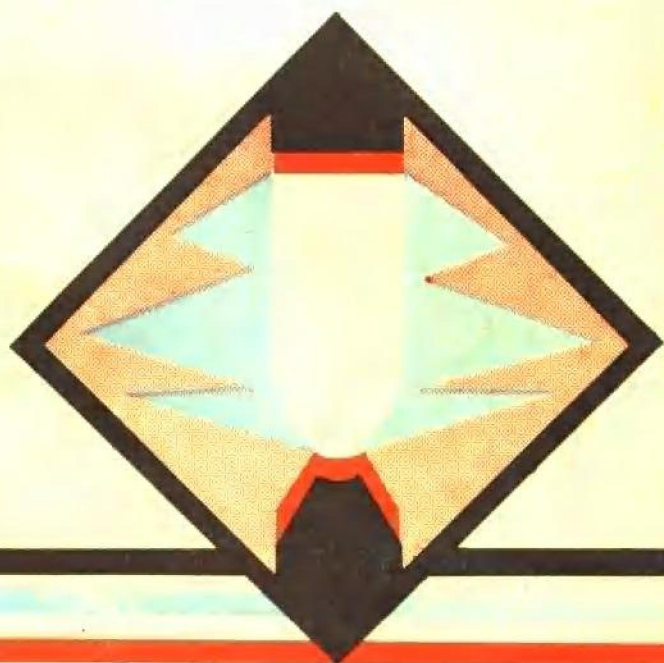


强电流电接点和 电极的电侵蚀

〔苏〕Г.В.布特克维奇等著



机械工业出版社

译者序

电接点是电机、电器产品中的易损元件，长期以来成了影响这些产品的质量和使用寿命的关键问题之一。强电流电接点的损坏主要是电接点在接通和断开时产生电弧引起电侵蚀而造成的。但是，电接点的电侵蚀过程很复杂，和许多因素（如电压和电流的大小与极性、接点断开或接通的速度、接点材料的性能、接点的形状等等）有关。研究电侵蚀过程的机理以及寻找决定侵蚀过程的主要因素，对电机电器产品的设计有很大的实际意义，它不仅可以为合理选择接点材料和形状提供依据，达到提高电接点的使用寿命和可靠性的目的，还可以为发展新的接点材料提供线索。

本书在大量实验数据和资料的基础上，对强电流电接点的电侵蚀过程的本质和机理进行了详细讨论，对电接点在不同工作条件下的电侵蚀过程进行了较系统的分析，并介绍了强电流接点的侵蚀计算方法。这些对从事电机电器设计工作和电接点材料研究工作的工程技术人员都是有一定参考价值的。

本书翻译中的不妥和错误之处，欢迎读者批评指正。

目 录

译者序

第一章	强电流设备断开接点的材料、类型和工作条件···	1
1-1	电转换设备接点中的电弧·····	1
1-2	断开接点的类型及其工作条件·····	4
1-3	强电流断开接点材料·····	8
1-4	接点的侵蚀和决定侵蚀的因素·····	13
第二章	电侵蚀过程的现象理论特性·····	29
2-1	电侵蚀的本质、电侵蚀时的基本物理现象·····	29
2-2	近电极的电压降·····	33
2-3	电流和热流沿电极表面的分布·····	38
2-4	在不同条件下侵蚀产物的相成份·····	46
2-5	放电条件对接点(电极)侵蚀率的影响·····	50
2-6	在真空中电接点和电极的电侵蚀·····	60
第三章	通电时电极表面的能量平衡与热流·····	66
3-1	阴极和阳极的能量平衡·····	66
3-2	等效近电极电压降的估计·····	74
3-3	强电流放电时电极上的热流·····	83
3-4	在真空中接点烧损痕迹的面积和形成阳极斑的电流·····	88
第四章	在不动或有限运动的电弧下接点材料的侵蚀研究·····	97
4-1	在大的断开电流下固定接点(电极)的侵蚀·····	97
4-2	断开速度对接点侵蚀的影响·····	109
4-3	等离子流和它在侵蚀过程中的作用·····	112
4-4	在几千安电流下金属陶瓷接点的侵蚀研究·····	131

IV

4-5	在不同介质中金属陶瓷接点的侵蚀机理	143
第五章	运动电弧的侵蚀研究	148
5-1	接点的间隙、材料和表面状态对电弧迁移速度的影响	148
5-2	断开电弧开始发展阶段及其估计标准	154
5-3	断开电弧开始发展阶段的侵蚀	156
5-4	在断开电弧开始发展阶段电极破坏的机理	158
5-5	各种因素对断开电弧开始阶段侵蚀的影响程度的估计	162
5-6	设备的结构特点对侵蚀的影响	171
第六章	电极中的热过程和金属喷溅的规律性	176
6-1	描述脉冲作用下侵蚀的方程式	176
6-2	在将热流平均的条件下温度分布和电极侵蚀的计算	183
6-3	在任意的热流和时间的关系下热过程的计算	193
6-4	金属陶瓷材料的电侵蚀特性	206
6-5	强电流接点和电极的金属喷溅系数的估算	218
第七章	强电流接点和电极的侵蚀计算方法	225
7-1	耐侵蚀稳定性的标准, 侵蚀序列	225
7-2	强电流接点和电极的侵蚀计算结果和实验数据的比较	228
7-3	强电流接点的侵蚀计算实例	231
结束语		238
附录		239
1	某些材料的热物理参数	239
2	某些金属的表面张力	239
3	某些金属的蒸发速度	239
参考文献		240

第一章 强电流设备断开接点的材料、类型和工作条件

1-1 电转换设备接点中的电弧

当电路断开时，如果供电电源电压和电流超过规定的临界值，在设备断开的接点上将发生稳定的电弧放电。根据材料与负载的不同，在接点中发生电弧的起码条件是：电流大约为 0.5 安，电压约为 15~20 伏。

电弧放电的特点（在气体介质的压力足够高时）是：在弧柱中有高的电流密度和明亮的电弧放电轮廓边界；在电弧通路内部的高温可达 5000 K，而在强烈的消电离条件下甚至可达 12000~15000 K 或更高；在电极上有高的电流密度和很小的电压降。

接点间形成电弧放电预定出现电压（图 1-1）

$$U_{\text{д}} = U_{\text{к}} + U_{\text{а}} + U_{\text{сг}} \quad (1-1)$$

式中 $U_{\text{к}}$ ——阴极电压降；

$U_{\text{а}}$ ——阳极电压降；

$U_{\text{сг}}$ ——弧柱中的电压降。

最后一项可用电场强度 E 和电弧长度 l 的乘积表示，即

$$U_{\text{сг}} = El$$

阴极电压降说明能量过程的性质，此过程与正离子轰击阴极有关，也和形成加热到高温的原始的阴极斑及电子发射有关。而阳极电压降则是由过剩的空间负电荷所决定。阳极

被具有很大动能的电子轰击，因此热能从弧柱直接传递至阳极，引起阳极加热。

当电极间的空隙足够大时，在阳极和阴极之间的电压降区域是由电离了的气体介质和接点的金属蒸气组成的弧柱。在此气体介质中燃烧着电弧。气体的电离是由于电子和气体及接点的金属蒸气粒子的非弹性碰撞而发生的。电子在弧柱的高温作用下从混乱的热运动中获得足以使气体电离的能量。

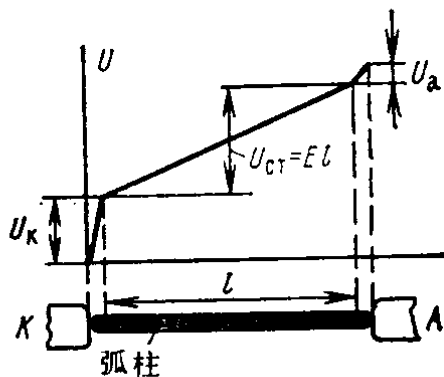


图1-1 沿电极之间的
热弧的电压分布

断开高压电路的电转换设备的电弧特征是长弧的，而低压电转换设备则是短弧的。

当电转换设备的接点断开时，发生的电弧除了起明显可见的有害作用外（使接点及熄弧室壁和绝缘体明显破坏），也起着降低电路断开过程中（特别是在有大的电感时）发生的过电压的有益作用。

如果看一下直流等效电路（图1-2），并假定在断电时没有发生电弧，那么储存在电感中所有的电磁能就会转变成静电场能量，也就是说产生过电压：

$$LI^2/2 = CU^2/2$$

从此可得

$$U = I \sqrt{L/C} \quad (1-2)$$

式中 L ——被断电的电感；

C ——电路的折合电容。

由于储存在电感中的能量可能很大，而电容 C 却不大，

所以在断开直流电路而不产生电弧时，过电压可能超过工作电压许多倍，这种过电压就会引起电缆绝缘和设备的破坏。

在断开直流电路并产生电弧放电的情况下，在接点间隙中的电压按动态伏安特性曲线增加，而当断开电路的电感值相当大时，动态伏安特性曲线则接近于静态伏安特性曲线（图 1-3）。这种形式的直流电弧伏安特性曲线是一种很好的性能。的确，如果再看一下图 1-2 就可以发现，在开关的接点上直流电弧的稳定燃烧条件是：

$$U = IR + U_a \quad (1-3)$$

当电压降的平衡由于电弧上的电压增加 $U < IR + U_a$ 而破坏时，电弧的伏安特性曲线的位置将高于变电阻特性 $U_a > U - IR$ ，电路中的电流将减小，按照电弧的伏安特性曲线，应该激起更高的电弧电压等等，一直到电弧最后熄灭时为止。

在接点断开并得到负的电压降平衡以后，为了提高电弧电压，断开设备装有熄（灭）弧装置。熄弧装置的作用在于提高公式（1-1）中电压降的各个组份，即 $U_k + U_a$ 、 l 、 E ，这种作用是依靠把长弧分割成一系列短弧（这些短弧互相串联并存在于消电离栅的薄片电极上）和增加弧柱的长度及电

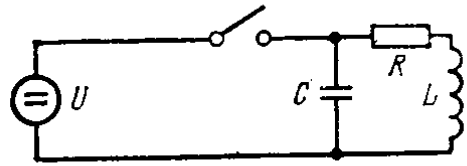


图1-2 在断开电感时不产生电弧的等效线路图

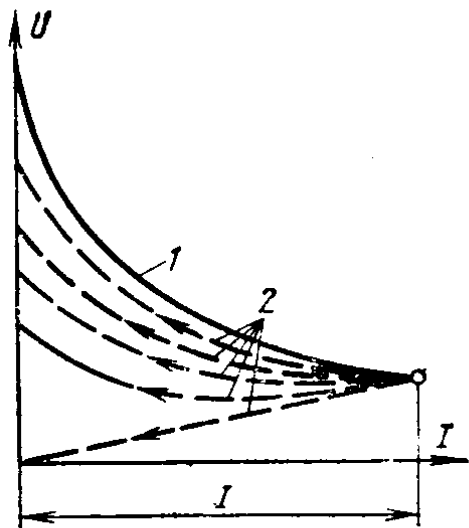


图1-3 在电流以不同速度减小时，直流电长弧的静态（1）和一组动态（2）伏安特性曲线

弧的强力冷却（当它在熄弧装置的窄缝中运动时）来实现的。

当断开交流电路时，在电流的每一个零位处造成熄弧条件。如果间隙的绝缘度高于接点上恢复电压的水平，那么电弧将最终熄灭。在短的断开间隙中，绝缘强度的恢复过程主要取决于接点或电极上的物理过程，而且明显取决于接点材料。在可作为高压设备特征的长的断开间隙中，绝缘强度的恢复取决于弧柱的消电离过程。此过程基于变压器油或固体熄弧材料、压缩空气、绝缘气体的分解所产生的气流对弧柱的作用，以及弧柱和熄弧室的颗粒状填料或冷壁的接触。

真空电弧是一种特殊情况，这种电弧是在电极或接点金属的蒸气中燃烧。

1-2 断开接点的类型及其工作条件

对于大多数高压设备来说，有代表性的接点形状示于图1-4。这些接点的特点通常是：由于接点表面的面积不大，并且没有使弧根便于有机地移动的专门机构，所以弧根的可移动性相对不大。仅仅在个别相当复杂的接触系统的结构中，依靠自身的磁场（真空断路器）或外部磁场（绝缘气体断路器）来吹动弧根并使弧柱沿接点表面作旋转运动（图1-5）。

对于低压直流或交流电转换设备（接触器、自动断路器-起动器）以及某些高压设备结构（电磁断路器）来说，有代表性的接触系统如图1-6所示。在这些设备中，电弧的拉长和它们的移动是靠导电部件和接点系统本身或专门的吹弧装置所造成的电磁力来实现的。

直接或间接反映在ГОСТ和ТУ中的对强电流转换设备

的接点系统的要求有：

1) 设备的名义电流长期通过接触点时，温度的升高不超过在 ГОСТ8024-69 中指定的温度；

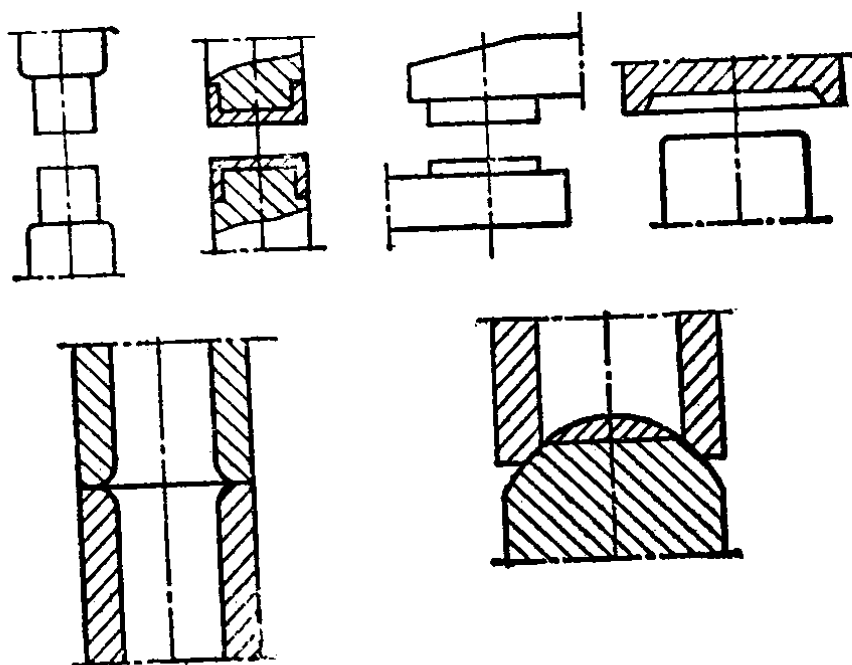


图1-4 高压断路器的端面接点

2) 在短路电流通过闭合接点以及在短路接通过程中不会熔焊在一起；

3) 最长的接触寿命，在断开电流达几百安的现代化电转换设备的结构中，这种寿命估计达数十万次动作，而对于断开最大短路电流的高压断路器，这种寿命取决于两次自动重复接通以后进行检查的可能性(ГОСТ687-

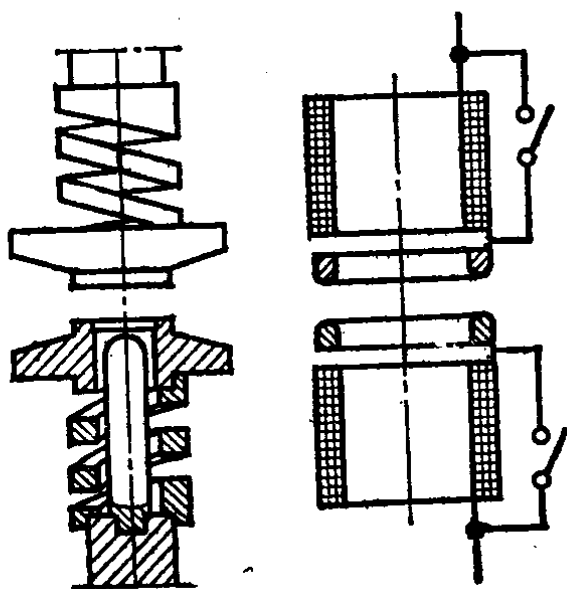


图1-5 带电弧旋转的端面接点

70)，即三次断开和两次接通电流（对于线性断路器达 60 千安，而对于发电机断路器为 100 千安或更高）以后进行检查的可能性。

提高接点系统的使用寿命和延长维修周期的愿望迫使人们最大限度地利用能减轻转换工作条件的各种结构手段。广泛采用主接点和熄弧接点分开的方法或在同一个接点表面划分成主接触部分和熄弧部分的方法就是其中之实例(图 1-7a

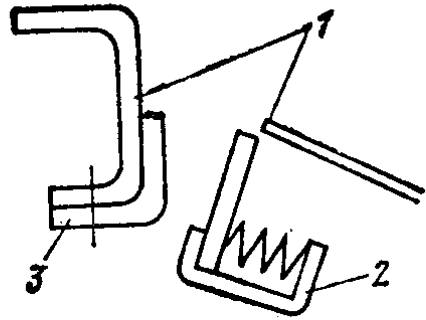


图1-6 触片式接点

1—熄弧角 2—动接点 3—静接点

~e)。主接点 1 负责长期通过设备的名义电流，为了使接触部位的温度不超过允许的温度 $75 \sim 120^{\circ}\text{C}$ （根据接点材料的不同而定），它的接触电阻应该小而稳定。

熄弧接点 2 和主接点并联，用于带着电弧情况下切断电路，并考虑到能短时间通过名义电流或短路电流，即在切断电路过程中的瞬间把电流从主要导流电路转到熄弧电路。在接通状态下（图 1-7 a），只是一小部分电流通过熄弧接点，因为熄弧接点或熄弧电路的电阻比主接点或主要导流电路的电阻大得多。主接点最先断开，但在接通电路时比熄弧接点要迟一些合拢。在断开主接点时，对于导流电路是分开的情况，可能由于主电路和熄弧电路中电流的重新分配而引起持续时间很短的电弧（图 1-7 b）。

在不可能把接触表面分成主表面和熄弧表面的情况下（图 1-7 e），接点材料应采用耐弧的材料，而必要的接触电阻依靠加大接触压力来保证。

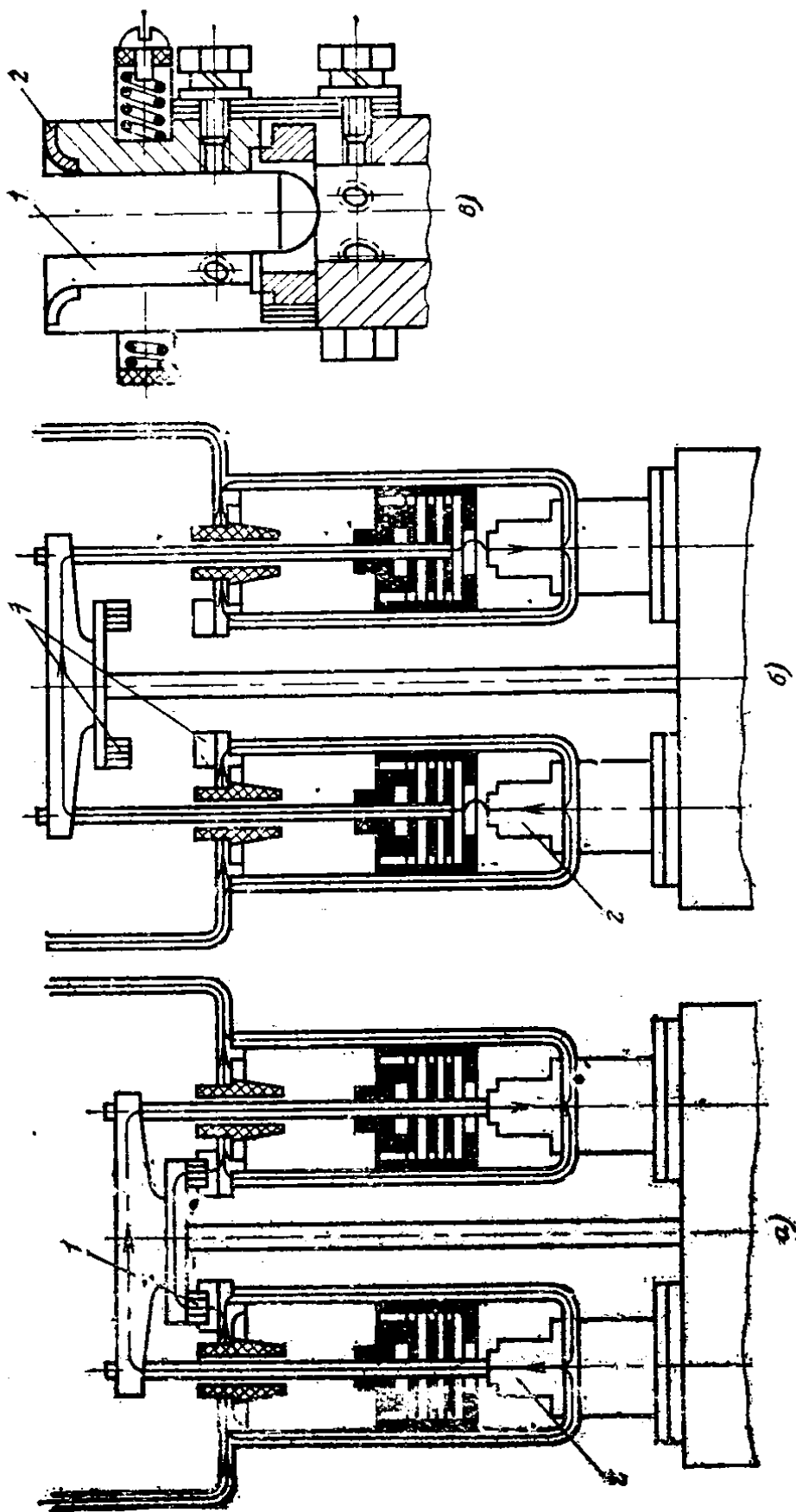


图1-7 接触系统 (a, b) 和表面分成主要部分和电弧部分的接点 (c)

1-3 强电流断开接点材料

对强电流接点的多种多样的要求都具体地反映在对电接点材料的要求上。它们对导致接点表面磨损和变形的电侵蚀应该是坚固耐久的；对导致设备不能正常工作的熔焊应有良好的抵抗能力；在工作过程中应该具有低而稳定的过渡电阻；具有高的导热性和导电性，高的热容、熔化潜热及高的抗机械磨损性；同时要具有容易加工的特点和尽可能低的成本。根据工作条件的不同，这种或那种要求就具有头等的意义。对真空熄弧装置的材料提出特别苛刻的要求。在这种装置中，空隙的绝缘强度、断开特性、接点的熔焊和会引起很高的过电压（它危害绝缘）的电流《切断》能力都取决于接点材料。同时满足所有的要求是设计这种设备的一个艰巨任务。

强电流断开接点广泛使用 Ag 和 Cu，以及添加少量其他元素的 Ag 合金和 Cu 合金（含 Cu、Cd 的 Ag 合金，Cu Cd 合金等）。在断路器的熄弧接点中也有用黄铜的。但是，在绝大多数的设备中，恶劣的工作条件会引起单一材料及其合金制成的接点的熔化、熔焊或急剧磨损，而用金属陶瓷复合材料则可得到更好的结果。

金属陶瓷复合接点的显微组织通常是细致而均匀的两相或多相混合物。在这些相中，其中一相比另一相要难熔得多，例如 Cu-W。在这种不均一的组织中，当其中一个相转变为液态时，由于毛细管力的作用而保持在难熔相的孔隙中。

在选择复合接点材料时应遵守下述原则：即其中一种成份应具有高的导电性，而第二种成份应具有高的机械强度，

并比第一种成份难熔得多，而导电性只起次要作用。难熔和易熔相在电弧加热接点表面的温度范围内，实际上不应该互相熔成合金，而应是一种成份能湿润另一种成份。

复合材料电接点照例采用粉末冶金法制备（金属陶瓷）。这种方法同样用于制造难熔纯金属接点（如 W、Mo 等）。

制造金属陶瓷接点最普遍的方法是将规定成份的粉末混合物压制成成品的形状并随后烧结。粉末在专门的混合器中混合，混合器型号的选择取决于原始粉末的性能和所规定的生产率。烧结温度的下限应高于再结晶温度，而上限应低于压制件全部或大部分组元的熔点。当易熔组元少于 50% 体积时，烧结可以在有液相存在的情况下进行。

金属陶瓷零件的特点之一是有孔隙度，这种孔隙度可以在很大范围内调整。在电接点中不希望有孔隙度，并力求使接点材料做得最致密，因为孔隙会降低接点的质量，减少导电性、导热性、硬度和机械强度。

为了减少烧结了的接点的孔隙度，一般要进行再次压制（补充压制）。有时接点还要烧结和补充压制两次。这种方法在制造 Ag-CdO、Ag-Ni、Ag-石墨、Ag-PbO 和其他复合接点时采用。

有一种这样的工艺，按这种工艺，金属陶瓷复合材料被压制并烧结成不大的毛坯形式，然后辗压成条带或拉伸成棒材。用条带冲压成接点，而用棒材切削或墩成接点。这种接点具有比较均匀而弥散的组织且不含孔隙。这种工艺适合于用塑性复合材料生产接点，如 Ag-Ni、Ag-CdO、Ag-PbO、Cu-W 等，并特别便于制造小接点。

对于主要含难熔金属或化合物的接点（W、Mo、碳化钨），可采用下述工艺：先将难熔金属粉末压成有相当孔隙

的接点毛坯（《骨架》），孔隙的计算体积相当于易熔金属组元的体积。这种半成品用有机粘结剂压制，或者用难熔金属粉末和部分起粘结剂作用的比较易熔的金属粉末混合物一起压制。然后将毛坯用其余部分的易熔化组元（Cu 或 Ag）浸透。在这种情况下产生骨架烧结并用液体金属填充骨架中的孔隙。有时，骨架烧结工序和它的浸透工序分开进行。

用浸润方法获得的 W-Ag、W-Cu、Mo-Ag 等接点具有高的强度，并且在实际上没有孔隙。

曾报导过一系列的金属陶瓷接点的制造方法，主要目的是追求特别细致的弥散组织。例如，Ag-Ni 复合接点可用银的碳酸盐或氧化物与镍粉的混合物在氢气中烧结的方法制得。用于制造 W-Ag 接点的特别细致的混合物，可用还原预先沉淀的钨酸银的方法得到。在氧气中用扩散氧化 Ag-Cd[⊖] 合金的方法制成 Ag-CdO 接点比用一般的粉末冶金方法制造的接点具有更细致弥散的组织。

在真空断路器中工作的接点同样可以用粉末冶金方法制造。但是要在真空处理过程中仔细除气。

断开接点最普遍使用的金属陶瓷复合材料是：Ag-W、Ag-Mo、Ag-碳化钨、Ag-CdO、Ag-Ni、Ag-石墨、Ag-PbO、Cu-W、Cu-Mo、Cu-石墨。含石墨的复合接点主要用作滑动接点材料（电流引出件）。

Ag-W 在这种接点中 W 的含量在 15~85% 之间。Ag-W 复合接点对熔化有高的稳定性，好的抗磨性和抗熔焊性能。随 W 的含量增加，过渡电阻、电阻率、硬度、密度和抗压强度也增加，但导热性下降。

制造 Ag-W 接点的方法，主要取决于 W 的含量。压制和

⊖ 原文误为 Ag-CdO——译者注。

烧结粉末混合物的方法可用于制造任何成份的接点。W的含量大约到50%，材料是塑性的并可进行压力加工。W的含量高于50%时压力加工困难。在这种情况下，一般用金属 Ag 浸润多孔的半成品的方法制造接点。这种多孔的半成品用粉末 W 或 Ag 与 W 的混合粉末压制而成。

Ag-Mo Ag-Mo 接点类似 Ag-W 接点，Mo 在接点中的含量在 30~80% 的范围内。和 Ag-W 接点比较，Ag-Mo 接点具有更低更稳定的过渡电阻和更低的电阻率。在大载荷下的抗磨稳定性以及抗电弧侵蚀性及抗熔焊性稍有减小。含 Mo 高于 50% 的材料没有塑性，但可以切削加工。随 Mo 的含量增加，材料的硬度和强度增加，导热性则降低。Ag-Mo 接点和 Ag-W 接点的加工工艺和规范在一般情况下是相同的。但是，Ag-Mo 接点用浸润方法制造时，要求一系列的补充工序，如需要用 Ni 或 Cu 包覆 Mo 粉颗粒，以改善 Ag 对 Mo 的浸润性能。

Ag-碳化钨 这种接点具有高的抗电弧侵蚀性和抗熔焊性，并且能在大载荷下工作。它们的特点是比含 W 和含 Mo 的接点有更稳定的过渡电阻。实际应用中有含碳化钨为 50% 和 65% 的接点。碳化物接点的强度和硬度比只含 W 的接点高，但它的塑性较差。

Ag-碳化钨接点比含金属 W 的接点的抗机械磨损性能要好并允许采用更低的接触压力。含碳化钨的接点既可以用浸润的方法制造，也可以用粉末混合物压制的方法制造。它的制造工艺和含 W 的接点相同。

Cu-W Cu-W 接点一般含有 20~85% 的 W，它的使用寿命比纯 Cu 接点要高得多。和类似的 Ag-W 接点比较，Cu-W 接点具有更高的抗磨性、在大电流下的抗熔焊性和抗

熔化能力。Cu-W 接点的电阻率、过渡电阻，硬度、机械强度也是较高的。以W为基的含Cu接点材料的抗电弧稳定性超过类似成份的W-Ag接点，并在高压断路器中得到最广泛的应用，在熄弧接点（类别）中占有主要地位。

Cu-W 接点的制造工艺类似 Ag-W 接点的工艺。制造方法取决于接点的成份。含W少于40%的接点用压制或轧制方法制造。含W高于40%的接点既可用压制和烧结方法生产，也可以用熔化的Cu浸透W的“骨架”的方法生产。当W的含量在60%以下时，可以轧制和拉制，而接点可由条带或棒材上切割，所有成份的材料都可以进行切削加工。

为了使接点和接点支架易于焊接，含W高的接点制成带有铜的底层。有时，在含难熔相比较多的接点中可用碳化钨代替W。这种接点的强度较大并有很高的硬度。在有些情况下，可用Mo代替W，Cu-Mo接点的耐弧性能要稍许低些。

Ag-CdO 最近以来，含CdO由6%至15%的这种材料，开始广泛地用于接点制造。材料或者用烧结粉末混合物的方法获得，或者用所谓内氧化的方法获得。在用内氧化方法时，首先按需要的比例获得Ag-Cd合金，这种合金长时间在800°C的空气或氧气中加热。在加热过程中Cd与氧化合，在固体材料中形成均匀分布的CdO颗粒。这种方法的缺点是不可能得到含Cd大于12%的材料，且样品的厚度不能大于6毫米。Ag-CdO接点的接触电阻和Ag几乎一样，但硬度要高得多。这种材料具有良好的热学性能。材料的耐弧稳定性取决于材料的组织：粗颗粒组织的耐弧能力低于细颗粒组织。这种材料的接点中的电弧比在Ag接点中的电弧容易熄灭。这是由于在大约1000°C时CdO雾化而形成气体，并对电弧产生熄弧作用。Ag-CdO材料比Ag具有更高的抗

熔焊性能。

为使接点适应在真空中工作，曾探索了可以同时保证高的断开能力、抗熔焊稳定性、最小切断电流特性和接点之间间隙的绝缘特性的材料。

由于不可能令人满意地解决这个问题，真空断路器接点在目前做成综合式的，即在结构上做成主接点表面和熄弧表面，并附加磁性吹弧系统，迫使电弧沿这种接点的表面移动。作为主接点材料可以采用 Cu 和铍的合金〔2〕。这种合金具有比其他材料小得多的熔焊倾向，这可以作这样的解释，即在冷却过程中晶粒变成拉长了的，并且由于结晶温度的不同组元发生局部分离。存在分离表面看来可以解释焊合部位脆弱的原因。断裂的表面是干净的，没有明显的突起，这从真空间隙的绝缘特性的观点来看，是特别重要的。

作为熄弧接点的材料，可以采用 Fe 基、W 基、Ni 基金属陶瓷材料。

在电极上的过程和在接点上的过程很类似，因此，对制造电极的材料，即铜、黄铜、不锈钢、金属陶瓷成分等的腐蚀特性应加以重视。

1-4 接点的侵蚀和决定侵蚀的因素

在大电流下的接点侵蚀无疑比任何其他接点损坏形式更突出。在切断电路时接点断开形成的电弧和在短路电流通过的瞬间由于电磁力的作用而断开时形成的电弧，以及在正在闭合的接点的间隙被击穿时或在接点闭合时由于振动过程中形成的电弧，都会引起接点材料的熔化或汽化，并把它从接点间隙之间喷溅出来或从一个接点转移到另一个接点上面。

有大量的著作研究过接点的侵蚀过程（约 2 千种），但