

# 国际电加工新技术 ISEM—9论文选编

北京市电加工研究所 编译



北京科学技术出版社

# 国际电加工新技术

——ISEM-9论文选编

\*

北京科学技术出版社出版

(北京西直门南顺城街12号)

---

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

三河科教印刷厂印刷

\*

787×1082毫米 16开本 26.75印张 668千字

1991年5月第一版 1991年5月第一次印刷

印数1—3000册

---

ISBN7-5304-0864-X/T·174 定价: 14.00元

# 《国际电加工新技术》

## 编 委 会

主 任：曹凤国

副主任：于家珊 王建拓

委 员：郑梅芬 张 帆 翟力军 奚绍申

于学文 陈德忠

责任编辑：郑梅芬

# 前 言

国际电加工学术会议(International Symposium for Electro-Machining)是国际电加工界最权威的学术会议,会议宣读的论文反映了世界电加工技术最新的发展水平和动向,会议每三年举行一次。

第九届国际电加工学术会议(ISEM-9)于1989年4月在日本名古屋召开。参加这次会议的有日本、中国、苏联、瑞士、波兰、英国、美国等21个国家、226名代表,会议宣读文章84篇(有文章摘要的共118篇)。这是国际电加工学术界规模最大的一次盛会。出席这次会议的中国代表共14人(含台湾省3人),在会有9人宣读12篇学术论文,引起世界各国的重视。

在这次会议上宣读的84篇论文中,关于放电加工(EDM)方面有34篇;电火花线切割加工(WEDM)方面有12篇;电化学加工(ECM)方面有12篇;复合加工方面有9篇;激光加工方面有9篇;其它方面有8篇。

为向我国电加工界介绍国际电加工新技术、新动向,本书在ISEM-9会议宣读的论文中,选译了70篇,并分为放电加工(EDM)、电火花线切割加工(WEDM)和复合加工、计算机应用三个部分。限于篇幅,本书未收入电化学加工和其它加工方面的内容。

本书的译文均由北京市电加工研究所特殊材料加工研究部科技人员利用业余时间翻译的,在编辑过程中得到中国机械工程学会电加工学会和许多单位的大力支持,特别是南京航空学院余承业教授、上海交通大学奚绍申教授、中国科学院电工研究所于学文副研究员、机电部苏州电加工机床研究所陈德忠高级工程师等同志还参加了部分工作,在此表示衷心感谢。

《国际电加工新技术》

编 委 会

1991.1

# 目 录

---

|           |                              |         |
|-----------|------------------------------|---------|
| 第 一 部 分   | 放电加工                         | ( 1 )   |
| 第 一 篇     | 用放电加工技术连接金属—陶瓷的一种新方法         | ( 3 )   |
| 第 二 篇     | 采用粉末悬浮工作液的放电加工               | ( 10 )  |
| 第 三 篇     | 放电加工用碳氢化合物工作液的正确选择及综合比较      | ( 17 )  |
| 第 四 篇     | 作为表面精加工方法的放电抛光               | ( 24 )  |
| 第 五 篇     | 金属结合剂金刚石砂轮的电火花成型修整           | ( 32 )  |
| 第 六 篇     | 用双电极系统对金属粘结剂金刚石砂轮的接触放电修整     | ( 38 )  |
| 第 七 篇     | 微细放电加工                       | ( 45 )  |
| 第 八 篇     | 射频控制和轨迹运动对放电加工特性的作用          | ( 52 )  |
| 第 九 篇     | 成型模具数控放电加工中多级轨迹加工参数的最佳化      | ( 59 )  |
| 第 十 篇     | 在加工中心进行放电加工的尝试               | ( 66 )  |
| 第 十 一 篇   | 用变量系统研究放电成型加工及用试样进行材料测试      | ( 74 )  |
| 第 十 二 篇   | 放电成型加工向计算机集成技术方向发展           | ( 80 )  |
| 第 十 三 篇   | 圆柱电极三轴数控仿形放电加工的改善            | ( 86 )  |
| 第 十 四 篇   | 用材料加工中心制造模具                  | ( 93 )  |
| 第 十 五 篇   | 数字仿形控制放电加工(NCC—EDM)的开发       | ( 100 ) |
| 第 十 六 篇   | 放电加工的高精度化                    | ( 108 ) |
| 第 十 七 篇   | 关于放电加工机床伺服系统的优化控制问题          | ( 114 ) |
| 第 十 八 篇   | 节能式电火花加工脉冲电源的研究              | ( 118 ) |
| 第 十 九 篇   | 工具电极的轨迹运动对三维表面放电加工金属蚀除速度的影响  | ( 123 ) |
| 第 二 十 篇   | 放电加工引起的工具钢表面缺陷               | ( 127 ) |
| 第 二 十 一 篇 | 电火花加工中的叠加效应及其在硬质合金裂纹特性研究中的应用 | ( 134 ) |
| 第 二 十 二 篇 | 放电加工中导电结构陶瓷的表面损伤             | ( 139 ) |
| 第 二 十 三 篇 | 放电加工硬质合金疲劳强度的研究              | ( 147 ) |
| 第 二 十 四 篇 | 液体介质中金属平板电极表面上多电弧点的存在        | ( 154 ) |
| 第 二 十 五 篇 | 通过高速摄影研究水中放电所引起的冲击波          | ( 160 ) |
| 第 二 十 六 篇 | 绝缘液体里窄间隙中单脉冲放电时盘状气泡的运动及其击穿特性 | ( 167 ) |
| 第 二 十 七 篇 | 放电加工火花位置探测的一种方法              | ( 174 ) |
| 第 二 十 八 篇 | 借助声发射观察电火花加工过程和监测放电点之研究      | ( 180 ) |
| 第 二 十 九 篇 | 用于电火花加工的射频辐射检测仪              | ( 188 ) |
| 第 三 十 篇   | 增加放电爆炸力高速加工聚晶金刚石的新方法         | ( 193 ) |
| 第 三 十 一 篇 | 雾状工作介质中进行放电加工的进展             | ( 197 ) |
| 第 三 十 二 篇 | 摇动放电加工综合最优化战略                | ( 204 ) |
| 第 三 十 三 篇 | 放电加工中电极增长现象的试验研究             | ( 210 ) |

|             |                                   |                |
|-------------|-----------------------------------|----------------|
| 第三十四篇       | 低温冷却电极放电加工.....                   | ( 217 )        |
| 第三十五篇       | 电极表面应力状态对电火花放电腐蚀的影响.....          | ( 222 )        |
| 第三十六篇       | 液体中脉冲放电的动态特性.....                 | ( 226 )        |
| 第三十七篇       | 减少电火花成型加工时间的方法.....               | ( 230 )        |
| 第三十八篇       | 放电加工中工件和电极材料蚀除特征参数的定义和计算新概念.....  | ( 233 )        |
| 第三十九篇       | 电火花加工放电过程的研究.....                 | ( 240 )        |
| 第四十篇        | 放电过程中的微短路和微电弧现象.....              | ( 245 )        |
| <b>第二部分</b> | <b>电火花线切割加工.....</b>              | <b>( 251 )</b> |
| 第四十一篇       | 通过参数设计对电火花线切割加工特性进行评估.....        | ( 253 )        |
| 第四十二篇       | 用于无电解作用电火花线切割加工的变压器耦合电路.....      | ( 261 )        |
| 第四十三篇       | 用高频交流电源进行电火花线切割微精加工.....          | ( 268 )        |
| 第四十四篇       | 电火花线切割加工中表面粗糙度的改善.....            | ( 274 )        |
| 第四十五篇       | 用两轴控制的线切割机床加工三维模具.....            | ( 280 )        |
| 第四十六篇       | 应用线电极电火花磨削和电火花加工的微冲系统.....        | ( 283 )        |
| 第四十七篇       | 通过振动分析和控制改善电火花线切割的切割精度.....       | ( 289 )        |
| 第四十八篇       | 电极丝材料对电火花线切割加工特性的影响.....          | ( 297 )        |
| 第四十九篇       | 快速走丝线切割断丝先兆的研究.....               | ( 304 )        |
| 第五十篇        | 线切割加工的几何精度.....                   | ( 308 )        |
| 第五十一篇       | 磁钢电火花线切割过程的研究.....                | ( 316 )        |
| 第五十二篇       | 电火花线切割自适应进给调节器的合成.....            | ( 321 )        |
| 第五十三篇       | 高效线切割放电加工状态分析.....                | ( 325 )        |
| 第五十四篇       | “约束型”自适应控制在线切割加工中的应用.....         | ( 329 )        |
| <b>第三部分</b> | <b>复合加工、计算机应用.....</b>            | <b>( 333 )</b> |
| 第五十五篇       | 非导电材料的电化学放电加工和其它加工过程的某些实验研究.....  | ( 335 )        |
| 第五十六篇       | 导电陶瓷材料电火花超声复合抛光技术的研究.....         | ( 341 )        |
| 第五十七篇       | 电化学电弧切割加工的状况.....                 | ( 345 )        |
| 第五十八篇       | 应用电化学电弧和电化学加工产生完美的成型模具.....       | ( 351 )        |
| 第五十九篇       | 用电解研磨复合法对钛作镜面加工的研究.....           | ( 356 )        |
| 第六十篇        | 高精度成型电解研磨镜面抛光的研究.....             | ( 361 )        |
| 第六十一篇       | 复合能量加工效果的理论分析——圆柱插入磨削的精度和生产率..... | ( 366 )        |
| 第六十二篇       | 放电加工在金属粘结剂超级磨轮的整形/修整方面的应用.....    | ( 373 )        |
| 第六十三篇       | 放电加工的模糊控制器.....                   | ( 381 )        |
| 第六十四篇       | 计算机辅助工具设计在电化学精密加工中的应用.....        | ( 389 )        |
| 第六十五篇       | 一个实用的冷冲模 CAD/CAM 系统.....          | ( 396 )        |
| 第六十六篇       | 从工艺、经济角度选择金属薄板零件的最佳加工方法.....      | ( 400 )        |
| 第六十七篇       | 世界放电加工研究的里程碑.....                 | ( 404 )        |
| 第六十八篇       | 复合加工方法的设计原理及其工业应用.....            | ( 411 )        |
| 第六十九篇       | 电加工柔性加工系统的发展.....                 | ( 415 )        |
| 第七十篇        | EROSICAP 放电成型加工技术计算机辅助设计专家系统..... | ( 419 )        |

# 第 一 部 分

## 放 电 加 工

---



# 第一篇 用放电加工技术连接金属 ——陶瓷的一种新方法

Y. Fukuzawa\*, Y. Aono\*\*, N. Mohri\*\*\*, N. Saito\*\*\*,

Y. Iino\*\*\*, A. Miyamoto\*\*\*\* and A. Fukuda\*

\* Nagaoka University of Technology, Nagaoka/Japan

\*\* Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University,  
Kasuga/Japan

\*\*\* Toyota Technological Institute, Nagoya/Japan

\*\*\*\* Advanced Technology Research Center Nippon Koukan K.K.,  
Kawasaki/Japan

## 摘 要

为了获得金属——陶瓷复合材料的柔韧性结合界面,用放电加工技术实现了一种新的连接方法。用于这种连接技术的材料是导电陶瓷( $ZrB_2$ 、 $TiB_2$ 、 $\alpha$ -Sialon)和SUS-304不锈钢、钛Ti、铜Cu、镍Ni。在表面预加工后,将该材料放入真空炉内在高温下热压。其连接强度可通过拉力试验来估算,并随加工条件和连接条件而变化。

## 引 言

近代许多实验已能试制出韧性的金属——陶瓷连接材料,如直接扩散固态结合法<sup>[1]</sup>、嵌入金属方法<sup>[2]</sup>、高活化性焊料方法<sup>[3]</sup>、表面改进方法<sup>[4]</sup>、超声波振动方法<sup>[5]</sup>和金属处理方法<sup>[6]</sup>。在这些连接技术中,某些方法可以得到良好的界面强度,但在实际上它们却不实用于不平表面的连接。

本文介绍了为获得韧性金属——陶瓷复合材料的结合界面,实现的一种用放电加工技术连接的新方法。

用于这种连接技术的材料是导电陶瓷( $ZrB_2$ 、 $TiB_2$ 、 $\alpha$ -Sialon)和不锈钢(SUS-304)、钛Ti、铜Cu、镍Ni。其连接过程如下:

1. 金属电极通过机械加工达到尺寸要求。
2. 陶瓷表面通过放电加工用以上金属电极研出。
3. 经表面预加工后,将一组材料(陶瓷和金属)放入真空炉中在高温下热压。

连接强度通过拉力试验计算。试验结果表明,连接界面的连接强度取决于残余应力和影响层。

## 试 验

1. 材料 这项工作中所研究的材料是:

(1) 陶瓷材料: 热压(HP)  $\text{TiB}_2$ 、热压(HP)  $\text{ZrB}_2$  和导电 Sialon。

(2) 金属材料: 不锈钢 SUS-304 (市售), Ti-15V-3Al-3Sn-3Cr 合金, 铜 Cu (市售) 和 镍 Ni (99.7w/o)。

2. 连接过程 用铜的圆柱管将陶瓷材料切割成  $\phi 20\text{mm}$ 、厚 5mm 的圆片, 并且用金属电极通过相互放电加工出  $\phi 10\text{mm}$  的连接表面。用高速精密锯将用于该圆柱电极的连接金属切割成 30mm 长。放电加工的条件为: 金属电极为正极, 工作电流为 1A, 脉冲宽度为  $16\mu\text{s}$ , 脉冲间隔为  $260\mu\text{s}$ , 加工时间大约 3 小时。表面准备好后, 将材料放在真空度  $8 \times 10^{-5}$  大气压炉内连接。在 (1273—1373K) 高温、轴向 (4—10MPa) 结合压力下 1 小时, 并在炉内冷却。

3. 界面特性 连接强度由拉力试验估算, 其试样的几何图形如图 1-1 所示。该试验在一滑块 (横梁) 速度为 0.5mm/min 的 Instron 型试验机上, 并在室温条件下进行。在其连接部件断面和抛光的结合界面部位, 用电子扫描显微镜 (SEM) 检查并用电子探针微量分析 (EPMA)。

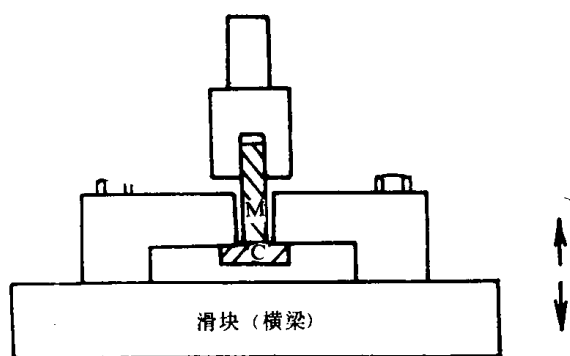


图1-1 拉力试验图解  
M金属部分C陶瓷部分

## 结果和讨论

1. 放电加工表面 Mohri et.al 报告, 电极的元素在放电加工时被转移到被加工工件的表面。图 1-2 所示被加工的  $\text{TiB}_2$  陶瓷表面电子探针 (EPMA) 的结果。其中 (a) 为  $\text{TiB}_2$ -Cu, (b) 为  $\text{TiB}_2$ -Ni, (c) 为  $\text{TiB}_2$ -Cu + Ni (先用 Cu 电极粗加工, 再用 Ni 电极精加工)。在 (a) 情况下, Cu 元素被转移到  $\text{TiB}_2$  直至数微米深。在 (b) 和 (c) 情况下, Ni 元素在加工表面深至 150 微米处被探测到, 但是 Cu 元素在 (c) 情况的表面不能观测到。

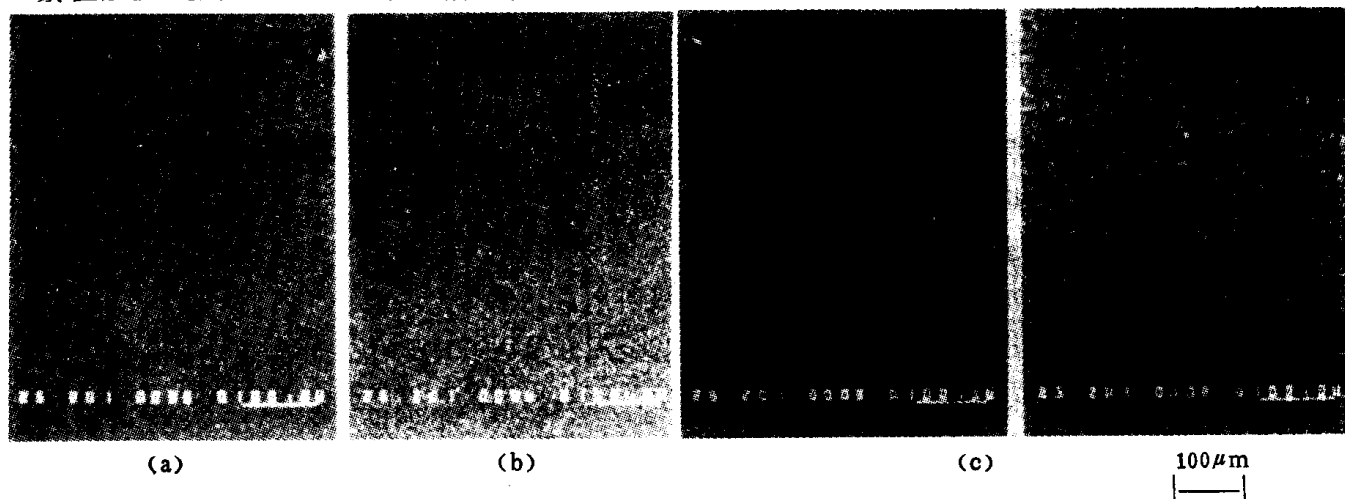


图1-2 放电加工表面的EPMA微观照片  
(a) Cu 电极, (b) Ni 电极, (c) Cu + Ni 电极

假定其表面状况用可润性和陶瓷与金属之间相互反应特性来解释, 这为阐明放电加工表面的差别提供了一条思路。为此, 我们研究了可润性和两种材料相互反应情况, 试验数据如下:

可润性 (接触角度)

$\text{TiB}_2$ —Cu  $140^\circ$

$\text{TiB}_2$ —Ni  $0-60^\circ$  [8]

反应 (沉淀)

$\text{TiB}_2$ —Ni  $\text{Ni}_3\text{B}$   $1273\text{K}$  [9]

即当用Cu电极加工表面时, 由于低的可润性和沉淀, Cu元素不能良好地附着在陶瓷表面上, 又由于相互反应它也不能提供给陶瓷表面的内侧。另一种用Ni电极的情况中, 由于良好的可润性和反应, Ni元素容易转移并且某些沉淀物还可提供于陶瓷内侧。

## 2. 连接界面的特性

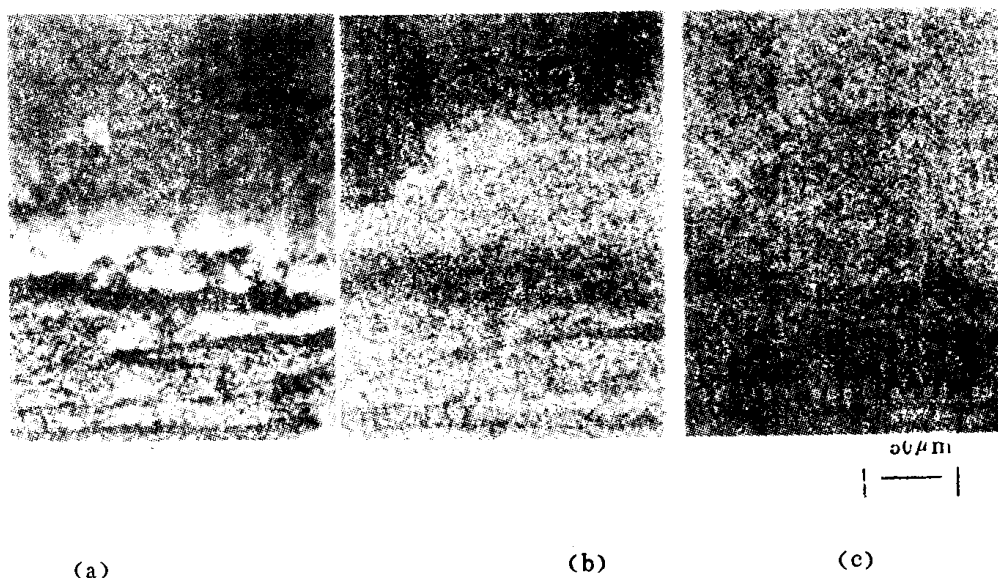


图1-3  $\text{ZrB}_2$ —SUS304连接界面SEM和EPMA显微照片  
(a)剖面 (b)Zr (c)Fe

### (1) $\text{ZrB}_2$ 与金属的连接

为了获取高温连接材料, 实现了与不锈钢SUS304和Ni的连接。图1-3所示为用EPMA观察SUS304连接平面的结果。Fe元素被转移进  $\text{ZrB}_2$ 表面100微米深。这一转移深度如此之大, 但是在此部位探测出某些显微裂纹。这样的连接材料在该断裂部位用很小的压力, 在抗拉试验之前就可被破坏。由于残余热应力出现在陶瓷侧面, 在连接处理期间因热膨胀在连接材料之间发生错位(不重合), 从而在陶瓷材料中产生许多裂纹。其连接强度因裂纹的存在而降低。类似现象也发生在Ni连接的结合中。

### (2) Sialon与金属的连接

陶瓷Sialon与SUS304和Ni实现了连接, 然而它们以上述方法连接处理, 在拉力试验之前就在陶瓷、(SUS304)或连接界面(Ni)处破裂。在Ni的情况中, 在界面和被附着在界面陶瓷侧的Ni, 它们是失效的, 且起作用部分少于50%。如此低的连接强度是由于放电加工表

面粗糙度引起的。因为放电加工表面远比金刚石抛光的平滑表面粗糙。另一方面，在 SUS304 情况中，陶瓷部位的界面强度因残余应力的增加而减小了。

### (3) $\text{TiB}_2$ 与金属的连接

在这种连接情况中，采用了不锈钢 SUS304、Cu、Ti 合金及 Ni。当试图用这些材料不通过放电加工而直接连接处理时，我们不能得到连接好的物体。

在放电加工后的材料中，在陶瓷部位 (SUS304、Ti 合金、Ni) 和界面 (Cu、Ni)，被连接表面破裂情况见图1-4。在 SUS304、Ti 合金和 Ni 情况中，其连接强度很低，并且它们在拉力试验前就失效了。在 Ni 情况中，由于其连接条件，从陶瓷部分到界面断裂位置是各种各样的。

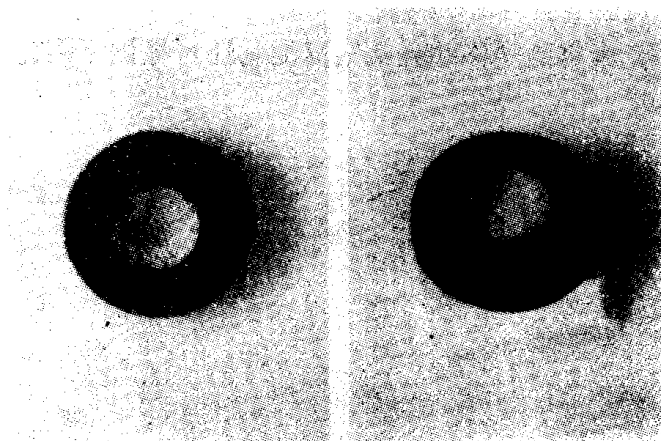


图1-4  $\text{TiB}_2$ —Ni陶瓷缺陷表面光学显微照片

该连接条件见表 1。

表 1 连接条件 ( $\text{TiB}_2$ —Ni)

|     |                          |
|-----|--------------------------|
| 温 度 | 1273K, 1373K             |
| 时 间 | 1 小时                     |
| 压 力 | 4, 7 MPa                 |
| 气 压 | 高真空 $8 \times 10^{-5}$ 托 |
| 冷 却 | 炉内冷却                     |

$\text{TiB}_2$ —Ni连接条件的抗拉试验结论见图1-5。该结论表明，其连接强度变化因素如下：

①连接温度②加工条件③连接表面的几何形状。

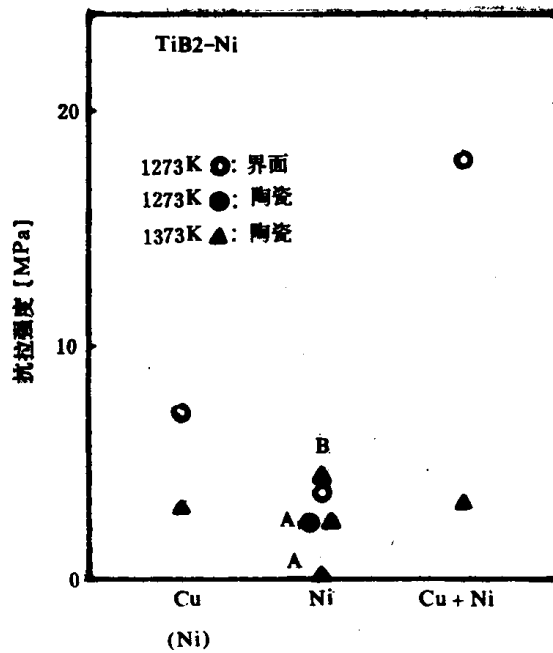


图1-5  $\text{TiB}_2$ -Ni连接条件与连接强度的相关性  
放电加工后陶瓷表面  
(A)——加工为凸面 (B)——加工为凹面 其它——平面

#### a. 连接温度的影响

在连接材料界面区域温度达1273K,但在陶瓷内部温度达1373K情况下连接的实例是失败的。因此当裂痕从界面裂到陶瓷时,其连接强度减小,见图1-5。当冷却时,残余应力的增加可能被判断为这种倾向,但用这些实验结论不能估算实际的界面连接强度。

这些破裂的材料在陶瓷表面由于粘性被连结,由再一次拉力试验获得实际的界面强度。在同样粘结位置它们破裂,但届时拉力强度几乎都是15MPa相等的数值,并且该值大于放电加工后的连接材料。这个结论表明,在1373K温度下连接的实际界面强度最低限度大于15MPa。由此判定,界面强度由于连接温度的增加而增加,见图1-5中唯一用Ni电极的点。由图可知,界面连结反应状态取决于连接温度。

#### b. 加工条件

为评价表面层效果,在连接前实现了下述三种类型放电加工处理:

- (a)用Cu电极放电加工后和Ni平面的连接;
- (b)用Ni电极放电加工后和同样放电加工后的Ni连接;
- (c)在第一阶段用Cu电极放电加工后,进一步用Ni电极放电加工和同样放电加工后的Ni连接。

当在1273K温度下连接时,连接材料全部在界面处破裂。这样,连接强度判断为只有一种情况。在图1-5中连接强度按拉力强度增加的次序为Ⅱ、I、Ⅲ排列。这一结论表明,Cu的粘性表面常用于增加连接强度,并且Cu和Ni的表面变化层可作为好的连接界面。图1-6所示为陶瓷一侧典型界面和在(c)情况下Ni元素EPMA结论。在(c)情况下,陶瓷界面上Ni

元素附着良好；但在(b)情况下，Ni弥散在整个界面，它类似于仅仅放电加工后的表面。这证明Cu元素促使TiB<sub>2</sub>和Ni连接反应。

c. 连接表面的几何形状

在该段落，我们研究连接表面几何形状和表面粗糙度的影响。

两种放电加工制造的形式：

(a)陶瓷表面放电加工成凸面

(b)陶瓷表面放电加工成凹面

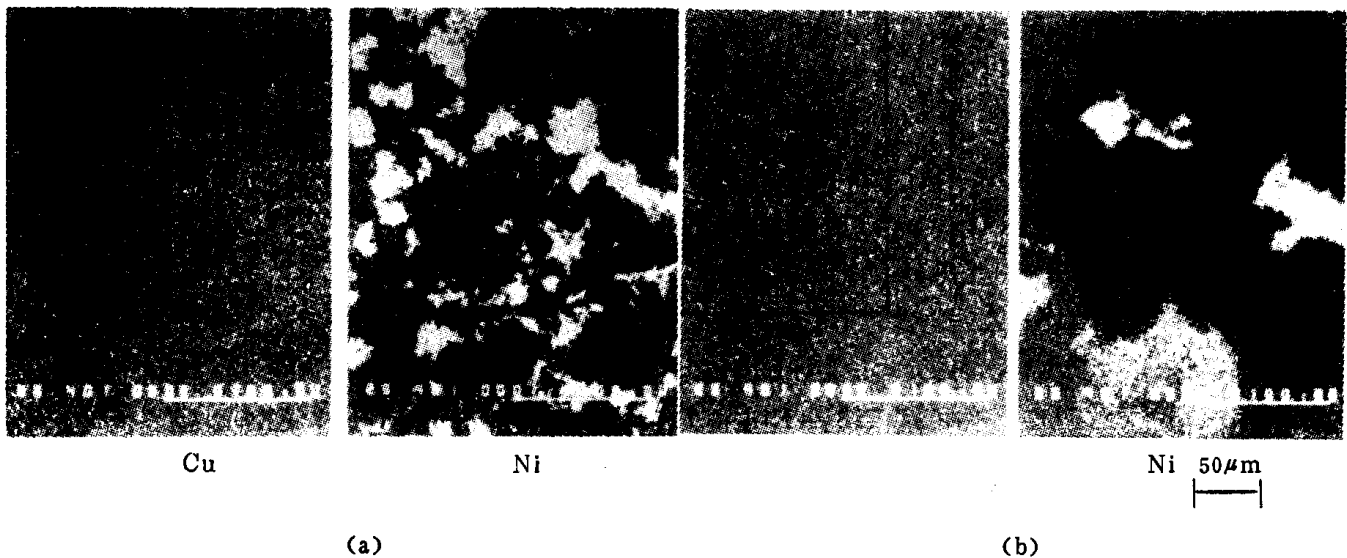


图1-6 TiB<sub>2</sub>—Ni连接失效界面(陶瓷侧)的EPMA显微照片

它们均只用Ni电极放电加工后，在1273K和1373K温度下连接，并且完成拉力试验。

连接材料全部在陶瓷部分破碎，并且在温度1373K条件下连接，连接强度按凸、平、凹面的次序增加，见图1-5。它们在陶瓷部分的失败，可设想在其冷却时由于残余应力损伤了

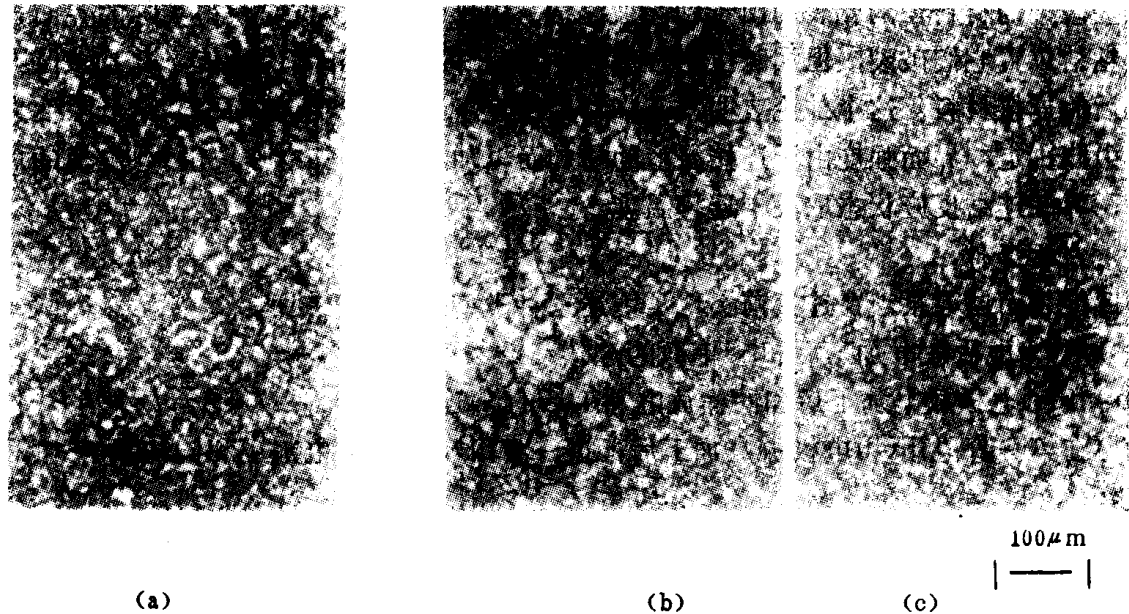


图1-7 TiB<sub>2</sub>—Ni连接失效界面(金属侧)的光学显微照片

(a)Cu电极 (b)Ni电极 (c)Cu + Ni电极

连接区域。如此我们得出结论, 控制连接表面的几何形状能减少残余应力。

连接界面金属侧的显微结构见图1-7。图1-7(a)是Cu电极类型, 图1-7(b)是Ni电极类型, 图1-7(c)是Cu + Ni类型。在其表面可观察到如此多未连接的区域, 被加工的两个表面很粗糙, 似乎相互不松散组合在一起。

## 结 论

概述我们对结果的分析, 能够说明用放电加工技术连接陶瓷和金属的方法。

下列因素对连接强度有重要影响:

1. 连接温度
2. 放电加工表面变化层
3. 冷却期间产生的残余应力
4. 连接表面的几何形状

当连接表面适当地放电加工时, 其残余应力减少。

如果适宜地选好放电加工和连接条件, 我们将容易地从该连接技术中, 不用复杂的程序就可得到很强的连接材料。

## 参 考 文 献

- [1] R.F.Pabst and G.Elssner, J.Mat.Sci., 15 (1980) 188
- [2] Y.Fukuzawa, G.Elssner, G.Petzow and Y.Aono, Proc.Int.Symp. on Advanced Materials, ed. by M.Doyama and S.Somiya, Materials Research Society, Tokyo, (1988) in press.
- [3] S.Tanaka, Proc.Int.Symp. on Advanced Materials, ed. by M.Doyama and S.Somiya, Materials Research Society, Tokyo, (1988) in press.
- [4] Y.Aono, E.Kuramoto and Y.Fukuzawa, Proc.Int.Symp. on Advanced Materials, ed. by M.Doyama and S. Somiya, Materials Research Society, Tokyo, (1988) in press.
- [5] K.Miyazawa, S.Matsuoka, T.Fujii and T.Suga, Proc.Int.Symp. on Advanced Materials, ed. by M.Doyama and S. Somiya, Materials Research Society, Tokyo, (1988) in Press.
- [6] Y.Ito, H.Oba and Kanno, Proc.Int.Symp. on Advanced Materials, ed. by M.Doyama and S.Somiya, Materials Research Society, Tokyo, (1988) in press.
- [7] M.Suzuki, N.Mohri and N.Saito, J.Japan Soc.Precision Engng, 53 (1987), 51
- [8] Самсонов Г.В., Зник А.П. Тугоплавкие покрытия. М., Металлургия, (1973), 399 с. с ил.
- [9] Функе В.Ф., Юлковский С.И. В кн., Исследования сталей и сплавов, М., Наука, (1964), 108-113

## 第二篇 采用粉末悬浮工作液的放电加工

H. Narumiya\*, N. Mohri\*, N. Saito\*, H. Ootake\*, Y. Tsunekawa\*,  
T. Takawashi\*\*and K. Kobayashi\*\*

\* Toyota Technological Institute, Nagoya/Japan

\*\* Mitsubishi Electric Corporation, Nagoya/Japan

### 摘 要

本文得出了在放电加工精加工中采用粉末悬浮工作液的几点结论。文中指出,使用适当的粉末可以在 $25\text{cm}^2$ 上得到 $R_{\max} = 0.8\mu\text{m}$ 的精加工表面,同时可以大大地缩短精加工时间。一些实验证明,粉末悬浮在工作液中,由于加大间隙和放电电流良好的分散,甚至在微精加工规准的条件下,也能得到稳定的放电加工。

### 引 言

采用放电加工在电极端面面积较大时,不易得到好的加工表面,这是由于在电极和工件表面之间存在着巨大的静电电容。人们已经发现,使用硅(Si)作电极对克服这个问题是有效的<sup>[1] [2]</sup>,这种方法使加工表面变好,且极耐腐蚀和耗损<sup>[2] [3]</sup>。

然而,象Si这样的材料很硬很脆,不易加工成型电极。由于在加工间隙区域存在着大量的从电极上蚀除的Si粉末,因此, Si粉末被悬浮在工作液中,即使在使用铜电极时, Si粉末对精加工也是有效的<sup>[3]</sup>。

在这篇论文中,论述了在工作液中悬浮着几种不同的粉末对放电加工精加工的影响,例如:硅(Si), 铝(Al)和石墨(Gr)粉末。通过实验已经发现,在碳氢化合物油中的这些粉末对于得到精加工表面和缩短精加工时间是很有效的,甚至在使用铜电极时加工表面都得到显著的改善。而且,放电电流分散于整个电极的表面进一步说明了粉末悬浮的作用。放电加工采用导电电极和在工作液中加入粉末在工业生产中非常实际,它将在更广泛的领域里被应用。

### 放电加工采用粉末悬浮工作液的效果

1. 表面粗糙度 由于采用Si粉末悬浮工作液能得到好的加工表面,人们也期望着在工作液中加入其它的粉末材料用于放电精加工。

图2-1给出了在精加工条件下,用几种不同的粉末放电加工得到的加工表面照片和粗糙度轮廓图。

如图2-1(a)所示:不采用加粉末的工作液精加工时,经常出现不规则表面。

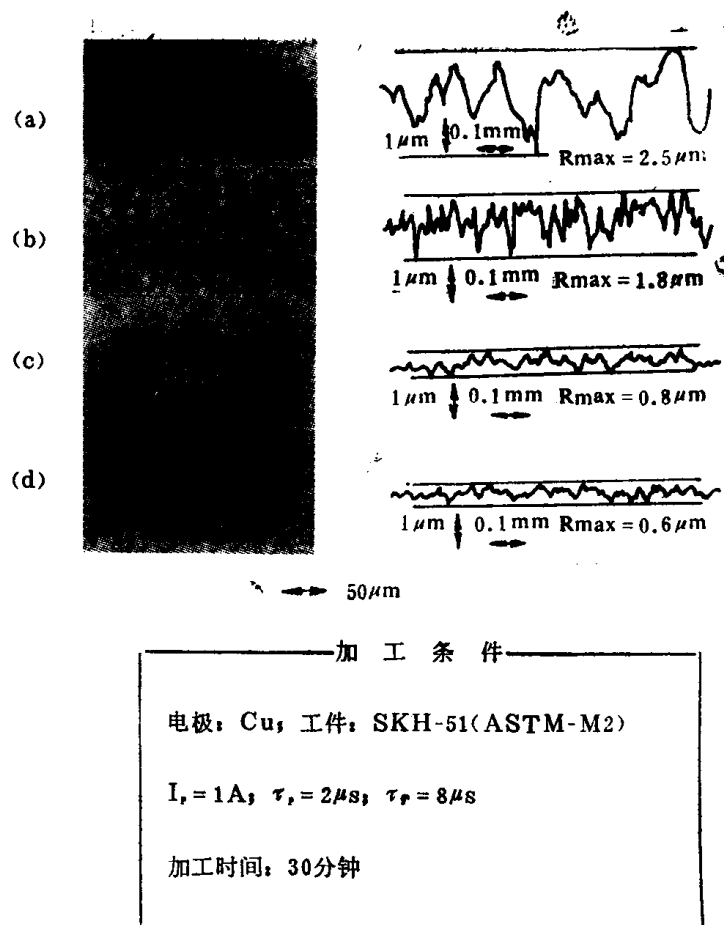


图2-1 精加工表面照片与粗糙度轮廓图

(a)不加粉末 (b)加Si粉末 (c)加Gr粉末 (d)加Al粉末

图2-1(b)~(d)所示: 在工作液中加入粉末悬浮物, 改善了不规则加工表面。在同样的加工条件下, Al(铝)和Gr(石墨)粉末比Si(硅)粉末能得到更均匀的加工表面。

图2-2给出了在工作液中加入Al粉末, 放电精加工面积 $25\text{cm}^2$ 的加工表面照片, 由图可以看出: 整个加工表面是均匀的, 如镜面一样,  $R_{\text{max}}$ 只有 $0.8\mu\text{m}$ 。

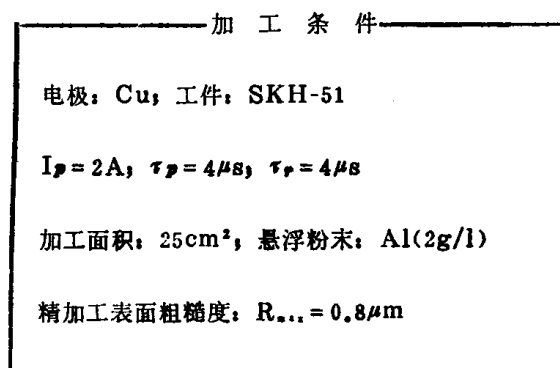
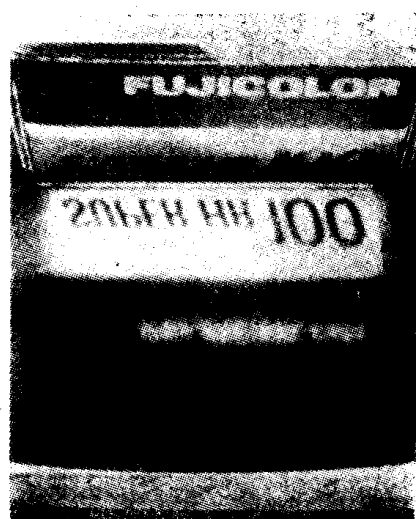


图2-2 用粉末悬浮工作液的放电加工表面