

# 功率超声在金属丝材加工中的应用

凌尔昌

(上海有色金属研究所)

本文叙述了功率超声应用于金属丝材拉拔加工方面的研究结果。试验研究表明,超声波拉丝技术比普通的常规拉丝有许多优点,有明显的技术经济效果,因而具有使用前景。文章介绍了超声波拉丝方法,并就功率超声对金属拉伸变形的作用也作了基本介绍。

## 一、前言

超声波技术应用于金属丝材拉拔工艺的研究,开始于50年代。当时由奥地利维也纳大学的 Blaha 和 Langencker 二人对锌单晶进行了拉拔试验。当在拉伸方向施加 800 千赫超声波振动时,发现拉应力突然下降。继而他们对锌、铝、钨、不锈钢等多晶金属进行了超声波拉伸试验,超声波振动频率在 15—20 千赫之间,也同样发现了拉应力下降的效果。在实验中还确定了拉应力下降只与振幅有关,而与频率无关。

美国的 Robinson、Fitzgerald、Nevill 等作了大量的基础研究工作。Robinson 等人的实验表明,采用超声波拉丝时,拉力可下降 50% 之多。并发现了只有当拉丝模和收丝滚筒之间的距离为某一定值时,才能获得最佳超声波效果。Nevill 等人在拉丝试验中亦获得了与 Langencker 同样的效果。

我们研制成了超声波单模拉丝机、超声波多模水箱拉丝机、超声波微型水箱拉丝机和超声波微细丝单模拉丝机,并对多种超导丝材、多种弹簧钢丝、多种镍铬基合金丝材、纯钛丝、纯钒丝、钨、钼丝等进行了超声波拉丝工艺的试验,都取得了较为明显的效果。

## 二、超声波对金属拉丝的作用

在超声波拉丝过程中有两种作用力施加于变形丝材中,一种是正常的拉伸变形力;另一种是超声波激励拉丝模,而通过拉丝模传输给丝材以振动力。

金属在外力作用下被拉伸变形的典型例子就是拉拔金属丝材的情况。拉拔时作用的外力,可以分为正作用力、反作用力及接触摩擦力,如图 1 所示。

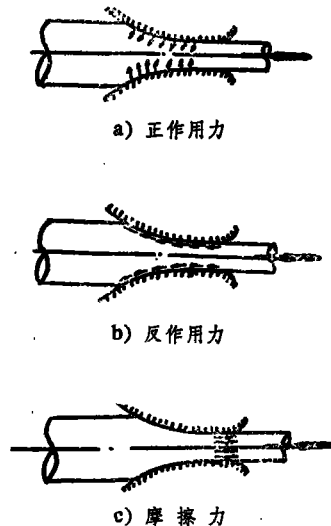


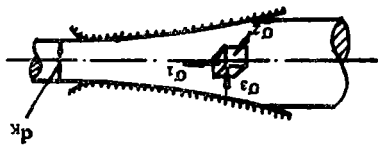
图 1 拉伸时的外力作用示意图

正作用力(图 1a)是由加在拉拔金属出端的拉力而发生的,它在变形金属中引起主拉应力。

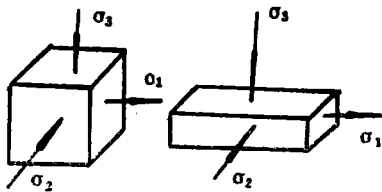
反作用力(图 1b)是由于模孔壁阻抗受正作用力作用的金属流动而发生的,因此反作用力的方向垂直于金属受压缩的变形区的表面。这些力在变形金属中造成主压应力。

拉丝时,由于正作用力及反作用力的作用,在拉拔金属中发生三向应力状态(图 2a), $\sigma_1$ 表示轴向主拉应力, $\sigma_2$ 及 $\sigma_3$ 表示在切向与径向的二个主压应力。 $\sigma_2 = \sigma_3$ 。

主应力在变形金属中引起相应的主变形,主变形图示如图 2b。该图表示拉丝时,在切向与径向同时压缩,在轴向延伸的三向变形。



a) 三向应力状态图示



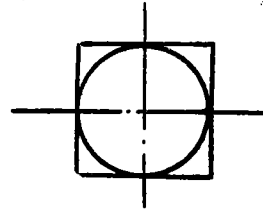
b) 主变形图示

图 2 拉丝时的三向应力状态图示及主变形图示

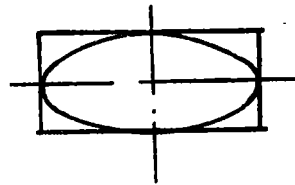
用所谓变形椭圆的方法可以取得主变形作用的定性概念。这个方法把各晶粒的塑性变形看作是内切于立方格圆球的变形(图 3a),变形前内切于立方格子的圆球以正确的行列占满了将受拉拔的金属的全部体积(图 3d)。变形后,每个单位立方格子由于主应力的作用变成正平行四边形,而其内切圆球变成椭圆体,它的主轴与拉拔方向一致(图 3b、d)。

拉拔时除了正作用力与反作用力外,同样在变形区的定径带的接触面上作用着外摩擦力(图 1c),摩擦力的方向在金属与模子接触面的切线方向上。外摩擦力在变形物体中引起附加剪应力,在其作用下,晶粒中发生附加剪变形。

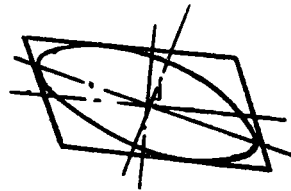
立方格子变成斜平行四边形,而其内切圆球变成斜椭圆体,其轴与拉拔方向成一定的角度(图 3c)。拉伸后的变形椭圆(图 3e),表明外层晶粒受的歪曲最大,同时轴心部分的晶粒几乎不发生歪曲。因此拉拔时外层金属落后于内层金属,所以垂直于拉拔方向的平面在变形后变成随拉拔方向凸出的曲面。



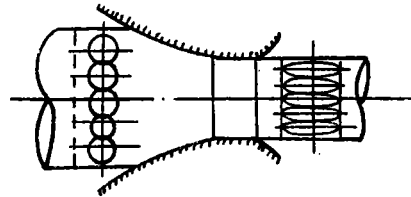
a) 内切于立方格子的原始圆球



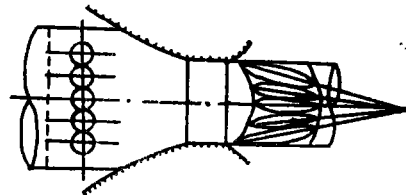
b) 没有切变形的情况下圆球变成正椭圆体



c) 有切变形的情况下圆球变成斜椭圆体



d) 没有切变形的情况下拉丝后的许多椭圆体



e) 有切变形的情况下拉丝后的许多椭圆体

图 3 拉丝时变形的示意图

### 三、超声波拉丝技术的经济效果

#### 1. 降低拉伸力

当线材通过拉丝模孔拉拔变形时，存在着正作用力、反作用力和摩擦力。正作用力等于反作用力和摩擦力之和，即拉伸力。我们可用人力拉拔线材作感觉试验，在不发射超声波时，甚感费力，当突然供给超声振动时，我们就会立刻有明显的省力感，这就是超声波降低拉伸力的现象。我们将超声波对纯镍和铁铬铝合金丝的拉伸力的影响列于表 1。

在这里，省力系数的大小就是超声波降低拉伸力的效果。在拉拔纯镍丝时，压缩率由

18% 提高到 45%，省力系数均在 30% 左右，相当稳定，可见与压缩率的大小无关。而拉拔铁铬铝合金丝时，尽管压缩率在 15% 左右，但省力系数却变化甚大，其原因可能是由于铁铬铝丝经酸洗后表面粗糙——当用肥皂做润滑剂时，其润滑效果较差——而导致省力系数的不稳定。我们在试验中配以相应的润滑剂，可以使省力系数稳定在 30% 左右。

#### 2. 提高拉伸速度

由于超声波能降低拉伸力，减少摩擦力，使金属丝材径向变形均匀等，这些因素都有助于拉拔速度的提高。在表 2 中，我们列举了几种拉伸速度提高的例子。

表 1 超声波对纯镍和铁铬铝合金线材拉伸力的影响

| 材 料                   | 进 线 直 径<br>(毫米) | 出 线 直 径<br>(毫米) | 截 面 压 缩 率<br>(%) | 省 力 系 数<br>$\mu$ (%) |
|-----------------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------------|
| 铁<br>铬<br>铝<br>合<br>金 | 1.20            | 1.08            | 18.8             | 18.9                 |
|                       | 1.08            | 0.97            | 19.6             | 36.7                 |
|                       | 0.97            | 0.91            | 11.6             | 31.6                 |
|                       | 0.91            | 0.82            | 19.2             | 22.8                 |
|                       | 0.82            | 0.75            | 16.4             | 33.3                 |
|                       | 0.75            | 0.66            | 21.4             | 35.7                 |
|                       | 0.66            | 0.60            | 18.1             | 25.0                 |
|                       | 0.60            | 0.55            | 16.7             | 25.0                 |
| 纯<br>镍                | 2.00            | 1.81            | 18               | 32.7                 |
|                       | 2.00            | 1.61            | 36               | 29.8                 |
|                       | 2.00            | 1.48            | 45               | 29.5                 |

表 2 超声波对材料拉伸速度的影响

| 材 料   | 进线直径/出线直径<br>(毫米)     | 润 滑 剂                 | 无超声时拉伸速度<br>(米/分) | 有超声时拉伸速度<br>(米/分) | 提 高 拉 伸<br>速 度 倍 数 |
|-------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 不锈弹簧钢 | $\phi 0.63/\phi 0.56$ | 氯化石蜡                  | 4                 | 80                | 20                 |
| 伊文丝   | $\phi 0.83/\phi 0.69$ | 石灰、圆明粉、二硫化钼、皂片、混合固体涂料 | 20                | 80                | 4                  |
| 铌钛超导线 | $\phi 0.75/\phi 0.66$ | 菜 油                   | 10—20             | 80                | 4—8                |
| 钨三镍   | $\phi 1.00/\phi 0.67$ | 菜 油                   | 20                | 80                | 4                  |

**表 3 超声波对材料拉伸时截面压缩率的影响**

| 材 料   | 无 超 声 波 时    |              |              | 有 超 声 波 时    |              |              | 提高百分比<br>(%) |
|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|       | 进线直径<br>(毫米) | 出线直径<br>(毫米) | 截面压缩率<br>(%) | 进线直径<br>(毫米) | 出线直径<br>(毫米) | 截面压缩率<br>(%) |              |
| 纯软超导丝 | 0.75         | 0.71         | 10           | 0.75         | 0.66         | 23           | 130          |
|       | 0.66         | 0.62         | 12           | 0.66         | 0.58         | 23           | 92           |
| 纯 镍   | 2.00         | 1.48         | 45           | 2.00         | 1.21         | 64           | 42           |

**表 4 超声波对材料拉伸时总截面压缩率的影响**

| 材 料         | 无 超 声 波 时    |              |               |            | 有 超 声 波 时    |              |               |            |
|-------------|--------------|--------------|---------------|------------|--------------|--------------|---------------|------------|
|             | 进线直径<br>(毫米) | 出线直径<br>(毫米) | 总截面压缩率<br>(%) | 中间退火<br>次数 | 进线直径<br>(毫米) | 出线直径<br>(毫米) | 总截面压缩率<br>(%) | 中间退火<br>次数 |
| 韧性三<br>场超导丝 | 0.55         | 0.10         | 45            | 5          | 0.55         | 0.1          | 96.7          | 0          |
| 纯软超导丝       | 2.00         | 0.3          | 50            | 1          | 2.00         | 0.2          | 99            | 0          |

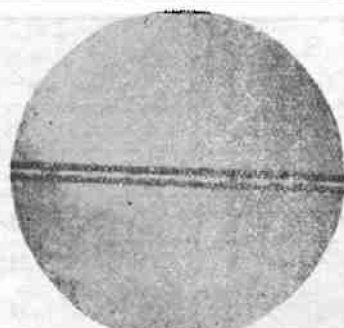


图 4 普通拉伸的纯软丝

实验条件:

- (1) 由  $\phi 0.84$  毫米拉到  $\phi 0.75$  毫米;
- (2) 用肥皂做润滑剂;
- (3) 拉伸速度 15 米/分

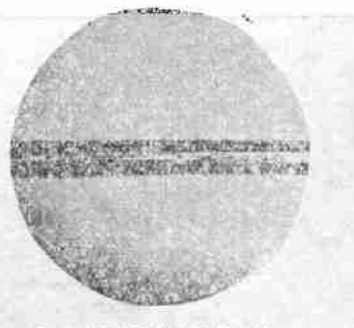


图 6 普通拉伸的铁铬铝丝

实验条件:

- (1) 由  $\phi 1.08$  毫米拉到  $\phi 0.97$  毫米;
- (2) 用肥皂做润滑剂;
- (3) 拉伸速度 20 米/分

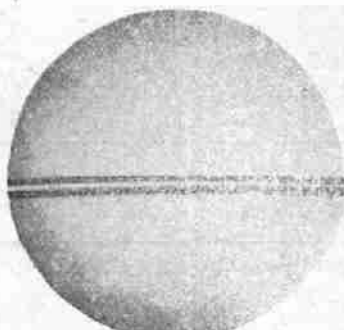


图 5 采用超声波拉伸的纯软丝

实验条件:

- (1) 由  $\phi 0.84$  毫米拉到  $\phi 0.75$  毫米;
- (2) 用肥皂做润滑剂;
- (3) 拉伸速度 15 米/分;
- (4) 超声波  $W=200$  瓦,  $f=20$  千赫

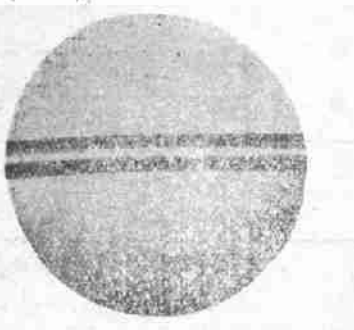


图 7 采用超声波拉伸的铁铬铝丝

实验条件:

- (1) 由  $\phi 1.08$  毫米拉到  $\phi 0.97$  毫米;
- (2) 用肥皂做润滑剂;
- (3) 拉伸速度 20 米/分;
- (4) 超声波  $W=200$  瓦,  $f=20$  千赫

**表 5 超声波对工业纯钛和铁铬铝合金丝材拉伸效果的影响**

| 材 料                   | 原 始 状 态            | 进线直径/出报直径<br>(毫米) | 润 滑 剂   | 拉伸速度<br>(米/分) | 无超声波时 |     | 有超声波时 |     |
|-----------------------|--------------------|-------------------|---------|---------------|-------|-----|-------|-----|
|                       |                    |                   |         |               | 表 面   | 断 线 | 表 面   | 断 线 |
| 工<br>业<br>纯<br>钛      | 硬 态<br>(有氧化层和残留涂料) | 1.00/0.94         | 肥 皂     | 20            | B     | A   | A     | A   |
|                       |                    | 0.94/0.90         | 肥 皂     | 20            | B     | A   | A     | A   |
|                       |                    | 0.90/0.84         | 肥 皂     | 20            | C     | B   | A     | A   |
|                       |                    | 0.84/0.75         | 肥 皂     | 20            | C     | C   | A     | A   |
|                       | 硬 态<br>(酸洗后)       | 0.92/0.84         | 固体涂料+肥皂 | 15            | C     | C   | B     | B   |
|                       |                    | 0.84/0.75         | 固体涂料+肥皂 | 15            | C     | C   | B     | A   |
|                       |                    | 0.75/0.66         | 固体涂料+肥皂 | 15            | C     | C   | A     | A   |
|                       |                    | 0.66/0.60         | 固体涂料+肥皂 | 15            | C     | C   | A     | A   |
|                       |                    | 0.60/0.56         | 固体涂料+肥皂 | 15            | C     | C   | A     | A   |
|                       |                    | 0.56/0.51         | 固体涂料+肥皂 | 15            | C     | C   | A     | A   |
| 硬态(酸洗后)               | 0.92/0.84          | 肥 皂               | 15      | C             | C     | C   | B     |     |
| 铁<br>铬<br>铝<br>合<br>金 | 半 硬<br>(酸洗后)       | 1.20/1.08         | 肥 皂     | 20            | B     | B   | A     | A   |
|                       |                    | 1.08/0.97         | 肥 皂     | 20            | B     | B   | A     | A   |
|                       |                    | 0.97/0.91         | 肥 皂     | 20            | B     | B   | A     | A   |
|                       |                    | 0.91/0.82         | 肥 皂     | 20            | B     | B   | A     | A   |
|                       |                    | 0.82/0.75         | 肥 皂     | 20            | B     | B   | A     | A   |
|                       |                    | 0.75/0.66         | 肥 皂     | 20            | B     | B   | A     | A   |
|                       |                    | 0.66/0.60         | 肥 皂     | 20            | B     | B   | A     | A   |
|                       |                    | 0.60/0.56         | 肥 皂     | 20            | B     | A   | A     | A   |
|                       |                    | 0.56/0.51         | 肥 皂     | 20            | B     | A   | A     | A   |

注：1. A——表面不发毛，拉伸时不断线。

B——表面发毛，拉伸时经常断线。

C——表面严重毛疵，拉伸时频繁断线，甚至无法进行拉伸。

2. 固体涂料：石灰 5 公斤，圆明粉 4 公斤，二硫化钨 0.5 公斤，水适量。

### 3. 增加截面压缩率

由于超声波能使金属丝材在拉伸变形时产生径向均匀变形，便可得到增加压缩率的效果。超声波拉丝不但能增加一次截面压缩率，也能减少中间退火次数，增加二次中间软化退火的总加工效果，见表 3 和表 4 所示。

### 4. 改善丝材质量

金属丝材的质量分内在质量和外表质量两部分。外表质量依赖于材料性质，原始表面质量，也受到模具内孔光洁度、润滑剂、绕线滚筒表面光洁度及操作技术等因素的影响。我们尽

可能使其他因素固定不变，只探讨一下超声波的作用。表 5 为超声波对纯钛和铁铬铝合金丝表面质量的影响。图 4、图 6 分别为无超声波拉伸的纯钛和铁铬铝合金丝的外观照片。图 5、图 7 分别为相同条件下采用超声波拉制的纯钛和铁铬铝合金丝的外观照片。很明显，超声波拉伸的丝材表面质量比不采用超声波拉伸的丝材表面质量要好得多。

此外，还对这些丝材进行了金相观察，所得的结果，在“金属在超声波作用下拉拔变形后的金相观察”一文中予以报导，本文不再赘述。

超声波拉丝还能消除“咬模”现象，降低断线率。在一定程度上，超声波振动起到了润滑膜的作用。采用了超声波拉丝新工艺，我所获得了第一根长5千多米的164芯铌钛超导长线，重为15公斤；也首次制得了5995芯的铌钛超导长线。

丝材的扭转试验表明，超声波拉丝能使丝材的扭转次数有显著的增加。表6列出了超声

**表 6 超声波对各种材料扭转试验的影响**

| 材 料      |      | 纯 镍  | 铁铬铝  | 康 铜  |
|----------|------|------|------|------|
| 线 径 (毫米) |      | 1.48 | 1.08 | 0.51 |
| 扭 转 次 数  | 无超声波 | 134  | 3    | 116  |
|          | 有超声波 | 248  | 35   | 152  |

**表 7 超声波拉丝所能减少的中间拉丝模数量**

| 材 料   | (进线/出线)直径<br>(毫米)     | 压 缩 率<br>(%) | 超声波拉丝模数量<br>(只) | 无超声波拉丝模数量<br>(只) | 减少数量<br>(只) | 省模率<br>(%) |
|-------|-----------------------|--------------|-----------------|------------------|-------------|------------|
| 康 铜 丝 | $\phi 0.25/\phi 0.06$ | 94           | 10              | 17               | 7           | 41         |
| 伊 文 丝 | $\phi 0.65/\phi 0.13$ | 96           | 11              | 17               | 6           | 35         |
|       | $\phi 0.05/\phi 0.02$ | 82           | 8               | 14               | 6           | 42         |
| 纯 镍 丝 | $\phi 0.07/\phi 0.02$ | 92           | 13              | 28               | 15          | 53         |

## 四、结 束 语

我们自1973年起研究超声波拉丝装置和拉丝工艺，从1976年起试用于我所第二研究室、三车间等部门，初步控制成功了铌钛多芯超导长线，韧性钒三铍超导线材等；还协助中国科学院上海冶金研究所控制成功了钒三铍2000芯复合超导导线。

采用常规工艺拉拔伊文丝，铁铬铝合金丝、纯钛丝和不锈钢弹簧钢丝是比较困难的，而采用超声波拉丝工艺，可以将这类丝材的拉拔生产率提高到普通碳钢和铜合金的水平。

对于纯镍、康铜、磷铜等生产工艺已很成熟的中细丝材，超声波拉丝则并未显示特别的优越性。从目前来看，此项技术比较适用于难拉拔金属丝材的加工方面。今后，可望向纯铜、纯镍、纯金等微细丝加工方面发展。

波对丝材扭转试验的影响。

从试验中得到，超声波对提高丝材的抗拉强度、延伸率和弯曲性能等，亦有一定良好的影响。

### 5. 可节省拉丝模

由于超声波拉丝能减少摩擦，防止“咬模”，这样可以减少拉丝模的磨损，从而延长了拉丝模的使用寿命。此外，超声波拉丝可以增加道次压缩率，从而可减少中间拉丝模的数量，大大节约了拉丝模。在伊文丝的试验中，拉丝模的寿命可延长4—10倍左右。在多模水箱拉丝试验中，省模率可达50%，这样就可大量节约昂贵的钻石拉丝模。表7是超声波拉丝减少中间拉丝模的情况。

最近我们还解决了光亮钼丝冷拉工艺和钨丝细丝的冷拉工艺技术，这是钨钼丝技术中的一项重要进展。

超声波在金属拉伸变形中的作用机理，尚在探讨之中。通过试验，我们初步获得了一些超声波对变形金属组织影响的数据，它有利于对超声波拉丝效果作直观的解释。

由于条件的限制，目前我们仅对 $\phi 2$ 毫米以下的丝材加工工艺进行了较系统的研究。但作为丝材加工的范围可达到8毫米线径，故必须进一步开展对线径为2—8毫米间的丝材加工工艺的研究。

超声波拉丝只是超声波技术应用于金属塑性加工工艺中的一个分支。超声波技术还可以应用于其他金属塑性加工，例如：拉管、轧管工艺、轧制工艺、深冲工艺、锻造工艺等多种金属塑性加工工艺。它们都各有特点，今后也将准备进行这些方面的研究。