

# 基于电磁发射技术的电脉冲铆接设备研制与工艺研究

曹冠宇<sup>①</sup> 秦玉波<sup>①</sup> 薛俊<sup>①</sup> 姚艳彬<sup>②</sup> 刘李明<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>中国航空制造技术研究院, 北京 100024; <sup>②</sup>数字化制造技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

**摘要:** 针对电磁铆接中设备结构体积大、能量转换效率较低等问题, 提出了一种电脉冲铆接方法。首先, 通过分析电脉冲铆接机理, 推导了电能-电磁能-机械能的能量转换过程, 并采用有限元建模仿真方法对铆钉电脉冲铆接成形进行了模拟试验, 为电脉冲铆接成形的原理分析、设备参数的选择提供依据。然后, 设计并研制了一种电脉冲铆接设备, 通过仿真方式确定了样机关键参数, 并在电路设计基础上实现了脉冲电源与铆枪研制。最后, 以充电电压为变量进行了 28 次电脉冲铆接试验, 完成了电脉冲铆接的工艺研究, 结果表明, 各试验中铆头的高度和直径合格率为 100%, 电脉冲铆接设备的能量利用率较高。

**关键词:** 电脉冲铆接原理; 有限元分析; 电磁发射技术; 设备研制; 工艺研究

**中图分类号:** V262 **文献标识码:** A

**DOI:** 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2024.11.014

## Development and process research of electric pulse riveting equipment based on electromagnetic emission technology

CAO Guanyu<sup>①</sup>, QIN Yubo<sup>①</sup>, XUE Jun<sup>①</sup>, YAO Yanbin<sup>②</sup>, LIU Liming<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, CHN; <sup>②</sup>Aeronautical Key Laboratory for Digital Manufacturing Technologies, Beijing 100024, CHN)

**Abstract:** An electric pulse riveting method was proposed aiming at the problems of large structure and low energy conversion efficiency in electromagnetic riveting. Firstly, the energy conversion process of electric-electromagnetic energy-mechanical energy was deduced through the analysis of the principle of electric pulse riveting, and the finite element modeling and simulation method was used to simulate the electric pulse riveting forming of rivet, which provided the basis for the principle analysis of electric pulse riveting forming and the selection of equipment parameters. Secondly, electric pulse riveting equipment is designed and developed. The key parameters of the prototype are determined by simulation. On the basis of circuit design, the pulse power supply and riveting gun are developed. Finally, 28 electric pulse riveting tests were carried out with charging voltage as a variable to complete the research of electric pulse riveting technology. The results show that the qualified rate of the height and diameter of the rivet tail in each test is 100%, and the energy utilization rate of electric pulse riveting equipment is higher.

**Keywords:** electric pulse riveting principle; finite element analysis; electromagnetic launch technology; equipment development; process research

铆接是飞机制造装配过程中一种重要的机械连接技术, 铆接效率的高低、质量的好坏直接影响飞机的制造周期和使用寿命<sup>[1]</sup>。电磁铆接将电能转化为磁场能再转化为机械能, 电磁铆接的加载速率极高, 可使铆钉在几百微秒到一毫秒的瞬间完成铆头

的成形。在一次电磁铆接过程中, 钉杆膨胀和铆头的成形几乎同时完成, 因而在钉杆和钉孔间形成了较为均匀的干涉量, 当钉孔间隙较大或夹层厚度较大时仍能实现干涉配合, 提高了接头寿命<sup>[2]</sup>。

电磁铆接始于 20 世纪 70 年代, 至今经历了从

高压到低压的发展，即从原来的 6 000~10 000 V 降低到 500~1 000 V<sup>[3]</sup>。美国的 Electroimpact 公司在 20 世纪 80 年代中期研制了手提式电磁铆接设备，20 世纪 80 年代末期研制了低电压电磁铆接设备，还通过技术攻关将电磁铆接技术应用于复合材料结构上铆接型钛环槽钉的安装，并应用于在日本生产的波音 787 复合材料机身的自动化装配。随着时间的推移，对减振技术的深入研究，铆枪的重量越来越轻；同等重量的铆枪，铆接能力也越来越强。从产品型号来看，目前铆接较大直径铆钉的最好型号是 HH503 型电磁铆接设备，其铆枪重 21 kg，峰值铆接力有 180 kN，可以完成 9.5 mm 高强度铆钉的铆接。铆接小型号铆钉的 HH54，铆枪重量仅有 3.6 kg，最大铆接力为 36 kN，可以完成  $\phi 4.6$  mm 高强度铝铆钉的铆接。HH300 和 HH400 型号电磁铆接设备，由于国外技术的封锁，没有铆接力方面的信息，不过从铆接能力可以推测出，其最大铆接力约为 65 kN。俄罗斯先后开发和生产了 YMK-6AM、YMK-8、YMKKC、MMK-6 等型号的 50 余台低电压（铆枪工作电压不超过 380 V）电磁铆接设备<sup>[4-6]</sup>，其最大可铆铝合金铆钉  $\phi 5$  mm，可用于手工长寿命铆接和干涉螺栓安装，但尚未应用到生产实践。西北工业大学研制了手提式电磁铆接设备<sup>[7]</sup>、低压电磁铆接设备<sup>[8-9]</sup>等多款电磁铆接设备，并在复合材料的电磁铆接工艺领域中获得多项突破<sup>[10-11]</sup>。哈尔滨工业大学研制的低电压电磁铆接设备，工作电压约 380 V，可对  $\phi 6$  mm 高强铝合金铆钉进行铆接<sup>[12-15]</sup>。武汉理工大学近年也开展了低电压电磁铆接技术的研究，已经研制出手持式电磁铆接设备<sup>[16-18]</sup>。中国航空制造技术研究院研制出了 BEI-100 型低电压电磁铆接设备，可实现最大  $\phi 6$  mm 铝合金铆钉、 $\phi 4$  mm 钛合金铆钉的铆接，重量仅为 4.5 kg，后坐力小，适合手持操作<sup>[19]</sup>。

通过对现有电磁铆接设备的原理分析得出，电磁铆接设备放电时的电流一般都在十千安级，并且电容器的充电电压一般在 1 000 V。大电流、高电压会导致设备电源内部的控制器件、储能元件、变压器等的体积和重量比较大。此外，依靠涡流斥力完成铆接，能量转换效率较低，且连续工作会严重发热。因此，基于原有电磁铆接技术，本文提出了一种电脉冲铆接方法，通过推导能量转换过程和构建有限元模型完成了电脉冲铆接原理研究，以模拟仿真的方式，确定了电脉冲铆接设备的关键参数，

并在电路设计的基础上完成了设备研制，通过多次电脉冲铆接试验和分析，为电脉冲铆接设备的工程应用提供工艺指导。

## 1 电脉冲铆接原理研究

### 1.1 电脉冲铆接机理分析

电脉冲铆装的原理：基于电磁发射技术中的线圈式发射技术，由电容的放电产生脉冲电流；当脉冲电流通过铆枪内部驱动线圈产生一个轴向强磁场，而轴向强磁场的磁场强度在线圈的分布是中间强两端弱，使得铁磁性发射物在磁场的作用下受到电磁力驱动，并沿着磁场增强的方向加速运动，达到一定的速度后撞击铆模，铆模作用于铆钉完成铆接，如图 1 所示。在铆接过程中，动子与线圈组成了一个随动子轴向距离变化的电感，通过计算电感，推导出线圈施加给动子的电磁力，并以此为依据完成能量转换过程分析。

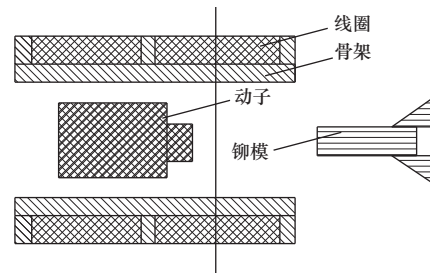


图 1 电脉冲铆接基本结构

#### 1.1.1 电感的计算

动子的材料为铁磁性材料，因此在计算电感时需考虑铁磁材料的磁导率随磁场强度变化的曲线，即铁磁材料的磁化曲线。通过分析，硬磁性材料剩磁、矫顽力以及磁滞回线包围的面积较软磁性材料大，所以硬磁性材料在外磁场中充磁后，仍能保留较强的磁性，且这种剩余磁性不易消除，而电脉冲铆接中动子需反复磁化并且磁化方向与电流方向有关，因此，为保证每次铆接的质量都近似相同，动子的材料需选取对磁性记忆较小的软磁性材料。软磁性材料的居里温度（铁磁性物质的磁化强度随温度升高而下降，达到某一温度时，自发磁化消失，转变为顺磁性，该临界温度称为居里温度）一般为几百摄氏度<sup>[20]</sup>，与室温相差较大，所以温度对动子磁化性能的影响可以暂不考虑。

磁场强度的计算主要是依据毕奥-萨伐尔定律<sup>[21]</sup>。首先对单层线圈的轴线上磁场强度进行计算，如

图2所示,其中 $l$ 为线圈的长度, $l_1$ 为动子在线圈中的长度, $l_2$ 为线圈总长度减去动子在线圈中的长度, $z$ 为线圈轴线中心距轴线上某一点的距离, $r$ 为线圈的半径, $s$ 为磁感线垂直穿过的面积。

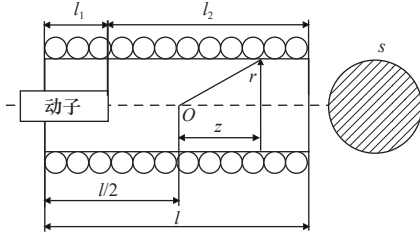


图2 单层线圈

在轴线上的任意一点的轴向磁感应强度 $B$ 为

$$B = \frac{1}{2}\mu_0 ni \left[ \frac{\frac{1}{2}l+z}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{2}l+z\right)^2}} + \frac{\frac{1}{2}l-z}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{2}l-z\right)^2}} \right] \quad (1)$$

式中: $\mu_0$ 为真空中磁导率; $n$ 为单位长度上的线圈匝数; $i$ 为线圈的电流; $r$ 为线圈的半径,而多层线圈可以看成单层线圈的叠加。

当 $l \gg r$ 时,可以看成无限长的螺线管线圈。由式(1)可知,此时的轴线上的轴向磁感应强度 $B$ 为

$$B = \mu_0 ni \quad (2)$$

由电感的定义及磁通量 $\Phi$ 可计算电感 $L$ 为

$$L = \frac{n l B s}{i} \quad (3)$$

将式(2)与动子在线圈中所处位置导入式(3)可得

$$L = \mu_0 n^2 \frac{s}{l_1} (l_1 - l_2 + \mu_r l_2) \quad (4)$$

式中: $\mu_r$ 为相对磁导率。

### 1.1.2 电磁力的计算

在动子被磁化后,假想这个磁场也是由环形电流产生的,就可以根据磁化后的磁场强度来计算电流的强度。当把动子磁化后的磁场看成是一个长度远大于半径的线圈产生的磁场时,此时的电流强度 $i$ 为

$$i = \frac{B}{n\mu_0(\mu_r - 1)} \quad (5)$$

通过计算得出的电流强度,根据安培公式来计算电磁力的大小。

任意两个回路之间的电磁力 $F_1$ 为

$$F_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{l'} \int_l \frac{Idl(I'dl' \times e_R)}{R^2} \quad (6)$$

式中: $I$ 为第一个线圈回路的电流; $I'$ 为第二个回路的电流; $l$ 为第一个线圈回路位置; $l'$ 为第二个线圈回路位置; $e_R$ 为 $dl'$ 指向 $dl$ 的单位向量; $R$ 为 $dl'$ 到 $dl$ 的距离。

依据2个回路之间电磁力的计算,基于分子环流假设,求解整个回路之间的力的计算,整个回路之间的电磁力 $F_2$ 为

$$F_2 = \int_0^{L_1} \int_{L_3-L_2}^{L_3} \frac{\mu_0 i_1 i_2 r (x_1 - x_2)}{(x_1 - x_2)^2 + d^2} dx_2 dx_1 \quad (7)$$

式中: $L_1$ 为线圈长度; $L_2$ 为动子长度; $L_3$ 为动子在线圈中的长度; $x_1$ 为 $0 \sim L_1$ 空间位置; $x_2$ 为 $(L_3 - L_2) \sim L_3$ 空间位置; $i_1$ 为线圈等效电流密度; $i_2$ 为铁芯等效电流密度; $d$ 为两等效线圈的间隙。

### 1.1.3 能量转换分析

系统的总能量为电容器储存的总能量 $W_C$ 为

$$W_C = \frac{1}{2} C U_c^2 \quad (8)$$

式中: $C$ 为电容器电容; $U_c$ 为电容电压。

在铆接过程中,动子与线圈组成一个随动子轴向距离变化的电感,而电感的储能 $W_L$ 为

$$W_L = \frac{1}{2} L I^2 \quad (9)$$

由1.1.2节的分析可以得到动子的磁感应强度大小,这样动子储存的电磁能 $W_E$ 为

$$W_E = \iiint_v \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_r \mu_0} \quad (10)$$

式中: $v$ 为动子体积。

通过虚位移法即可得出动子受到的电磁力 $F_3$ 为

$$F_3 = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (11)$$

式中: $w$ 为电感的储能。

通过放电电路模型的分析可得

$$U_c = U_{c0} - \frac{\int idt}{C} = iR + L \frac{di}{dt} \quad (12)$$

式中: $U_{c0}$ 为充电电压。

即可得到电流与时间和电感的关式。另外,动子在线圈中的长度 $l_2$ 在受力后也会随时间变化。因此,电感和电流都是与时间、距离相关的量。电容器储存的能量随着时间和动子在线圈中距离的变化传递给线圈和动子,使动子受到电磁力的作用。

由式(11)得到动子受到的电磁力 $F_3$ ,随着时间的变化,动子在线圈中的速度在电磁力的作用下不断改变,即把电磁能转换成了机械能。这种方法仅能用来分析,实际求解时会遇到动态电感的计算、

不同动子材料的磁导率非线性、线圈中的放电电流的求解、动子受到的电磁力的大小等问题。

### 1.2 铆钉电脉冲铆接变形分析

电脉冲铆接在动态局部加载条件下采用高速击打的方法实现动态冲击加载，其变形机理复杂，属于动态塑性变形，且铆钉墩头变形大，金属流动不确定性很大，所以单纯采用主应力法等解析法求解变形力只是一种近似解析法，即通过对物体应力状态做一些简化假设得到的解析方程存在一定的局限性，且不能把应变率对变形力的影响（即铆模的高速击打的复杂因素）考虑全面。因此，为解决以上问题，有必要建立铆钉电脉冲铆接有限元模型。

铆钉电脉冲铆接变形分析主要是针对铆接过程中的铆钉变形。通过设置铆模的初始速度等条件，同时结合材料的属性参数进行铆钉变形仿真。

#### 1.2.1 有限元仿真参数

仿真所用的试验件材料为 LY12CZ，铆钉材料是 LY10，铆钉直径 5 mm，铆模的材料为钢，材料特性参数设置见表 1。

表 1 材料参数表

材料	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	杨氏模量/ Pa	泊松比	体积模量/ Pa	剪切模量/ Pa
铝	2 770	7.1×10 <sup>10</sup>	0.33	6.960 8×10 <sup>10</sup>	2.669 2×10 <sup>10</sup>
钢	7 850	2×10 <sup>11</sup>	0.30	1.666 7×10 <sup>11</sup>	7.692 3×10 <sup>10</sup>

#### 1.2.2 有限元仿真方案

铆接物理模型示意图如图 3 所示。

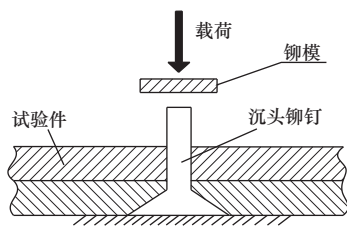


图 3 电脉冲铆接物理模型示意图

铆模随着位移的逐渐增加，铆钉所受应力逐渐增强，铆钉也发生塑性变形，至墩头完全成型，铆模位移停止。通过对整个铆钉受力变形过程的分析，可将施铆过程划分为 4 个阶段。

阶段一：铆钉钉杆整体墩粗阶段。此阶段以铆模接触铆钉开始，随着位移的增加，铆钉钉杆受力发生整体自由墩粗，直到钉杆接触到试验件孔壁时结束。

阶段二：铆钉钉杆初步接触试验件。此阶段以

铆钉钉杆接触试验件孔壁开始，随着铆模位移的增加，铆钉钉杆与连接孔内壁接触区域开始变大，直到应力在试验件厚度上均匀分布。

阶段三：墩头成型阶段。随着铆模位移的增加，钉杆头部开始局部墩粗，形成墩头，接触到试验件的表面。铆钉墩头与试验件之间的接触区域的摩擦力使得金属流动发生改变。同时，试验件因为受到墩头的压力开始变形。当墩头达到目标尺寸后，铆模停止移动。

阶段四：随着铆模动能的消耗，载荷降低，当载荷低于铆钉的屈服强度时，铆钉发生弹性回复，但此阶段铆钉墩头仍与铆模相接触。

#### 1.2.3 有限元仿真结果

通过预设铆模初始速度，经过有限元仿真后，可以发现在铆接成形过程中，接触面在不断变化，接触面上的正应力分布及各时刻最大值均不断改变，各时刻正应力相对较大的值集中在铆钉墩头，并且随着铆模与铆钉接触位置的变化而变动，如图 4 所示。

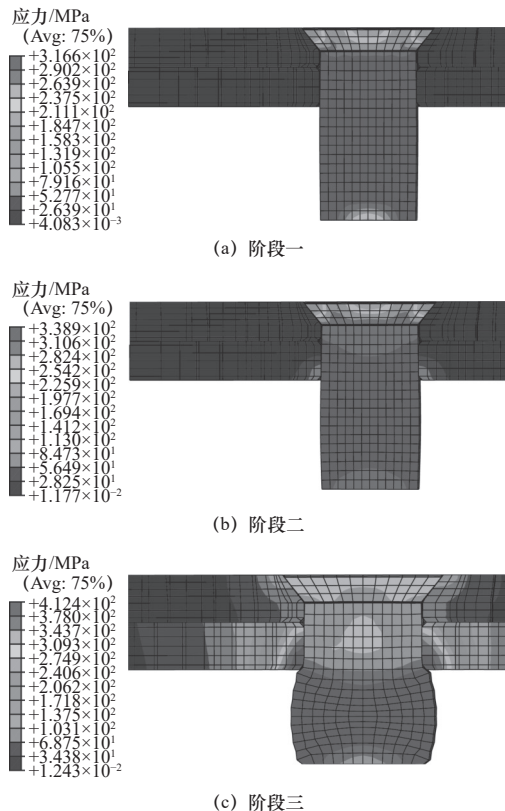


图 4 有限元仿真模型过程模拟

本次仿真共设置 5 组速度参数：10、15、20、25、30 m/s，仿真结果以铆钉变形程度作为结果记录，结果见表 2。

表 2 仿真结果 mm

镦头尺寸	10 m/s	15 m/s	20 m/s	25 m/s	30 m/s
镦头高度	3.82	3.35	2.93	2.67	2.48
镦头直径	6.72	7.25	7.56	7.79	7.98

由表 2 可以看出，当铆模速度为 10 m/s 时，铝铆钉变形后镦头的直径达到 6.72 mm，已接近镦头直径要求下限。当铆模速度为 15 m/s 时，铝铆钉的镦头变形量已完全满足铆接要求，铆钉的变形效果如图 5 所示。当铆模速度为 30 m/s 时，铝铆钉的镦头变形量已达到铆接要求的上限。

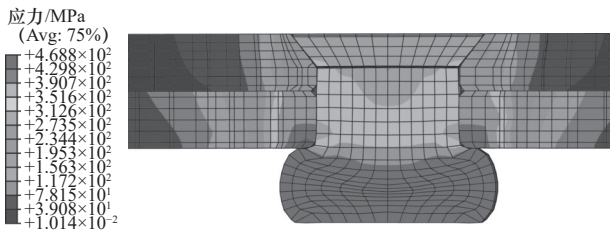


图 5 铆钉最终成形结果

## 2 电脉冲铆接设备研究

### 2.1 电脉冲铆接设备结构及功能规划

电脉冲铆接设备由脉冲电源和铆枪 2 部分组成，具体结构如图 6 所示。脉冲电源实现电容的充、放电控制，铆枪部分将电容放电到线圈的电能转换机械能，实现铆钉铆接成形。脉冲电源分为充电电源和放电电源 2 部分，充电电源为电容充电，放电电源控制电容对线圈放电。铆枪包括线圈、动力头和铆模 3 部分。

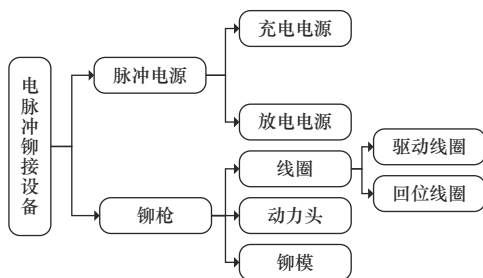


图 6 电脉冲铆接设备结构图

根据原理分析，当动子运动到动子中心与驱动线圈中心重合的位置时，受到的电磁力即为零，再继续向前运动就会受到电磁阻力。基于此，动子在驱动线圈的行程应保证动子在不受到阻力时就已经撞上铆模，避免能量浪费。在完成铆接后，为使动子返回初始位置，在驱动线圈后方设置回位线圈。电脉冲铆接设备电路模型如图 7 所示。

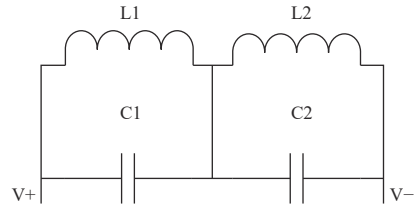


图 7 电脉冲铆接设备电路模型图

### 2.2 电脉冲铆接运动仿真分析

根据电脉冲铆接铆钉变形有限元建模分析，以铆模初始速度为输入条件，对电脉冲铆接设备进行运动学仿真。以电脉冲铆接机理为基础构建模型进行仿真，可以确定放电电源的参数，帮助选定电源的元件，指导电源设计；通过对不同几何参数的线圈进行仿真，最终选取最优参数的结构进行设备制造。

#### 2.2.1 仿真模型建立

电脉冲铆接的运动学仿真主要是针对动子在线圈中的运动过程进行仿真，模型分为电路模型和几何模型。电路模型中，动子的电感参数会随着动子在驱动线圈的位移发生改变，表现为非线性关系；几何模型中，动子在驱动线圈中的位置随时间不断改变，通过仿真软件将这两部分模型以相同的时间基准进行联合仿真。

电路模型主要是脉冲电源中放电电路部分，基于电脉冲铆接原理，放电电路可以简化为一个理想的电容器对一个理想的线圈和电阻进行放电。

几何模型主要是把铆枪外壳、骨架、驱动线圈和动子进行建模，如图 8 所示。铆枪为轴对称结构，驱动线圈产生的磁场也为轴对称形式，因此，为节约计算资源，以其轴向截面的二分之一构建二维模型，如图 9 所示。

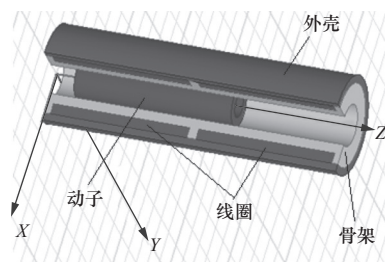


图 8 电脉冲铆枪三维模型

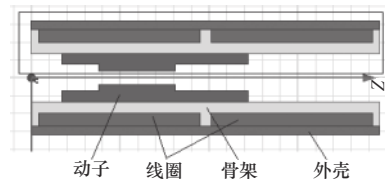


图 9 电脉冲铆枪二维模型

### 2.2.2 特征仿真参数设定

在进行运动学仿真时，电路模型初始参数为电容容量 10 000  $\mu\text{F}$ 、电阻 500  $\text{m}\Omega$ 、电感 1.6  $\text{mH}$ 。通过改变模型中电容容量、初始电压、线圈匝数、骨架材料等参数数值进行仿真，并进行动子运动情况对比，以确定设备元件参数。

### 2.2.3 仿真结果分析

通过改变电容值，由图 10 可以看出，随着电容容量增加，动子移动速度增加但加速度减小，因此，在电源制造时应选取比较大的电容，同时结合成本，合理地选取电容的容量。

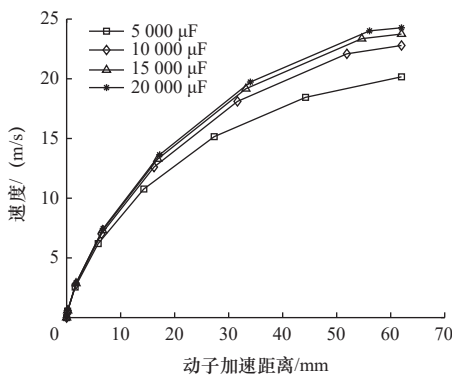


图 10 不同电容容量下的仿真结果

考虑到设计指标低电压的要求，电容器的初始电压不宜过高，故主要针对 200~500 V 的电压进行动态仿真。由图 11 可以看出，随着电容器电压升高，动子移动速度不断提高，动子加速度随电压升高增长变慢；动子加速度与电压呈非线性关系。

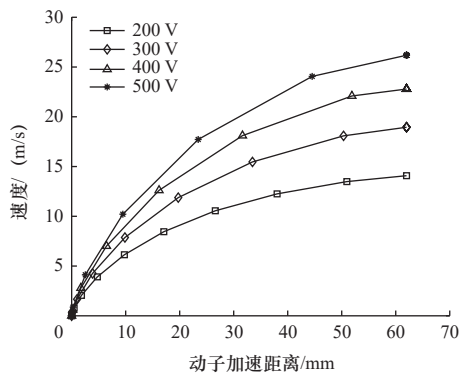


图 11 不同初始电压下的仿真结果

通过对电脉冲铆接机理分析，驱动线圈的匝数对动子的受力影响较大。选取了 200~500 匝的线圈进行了动态仿真。如图 12 所示，动子在 300 匝左右时运动速度最大，且动子最终出口速度与线圈匝数呈非线性关系。

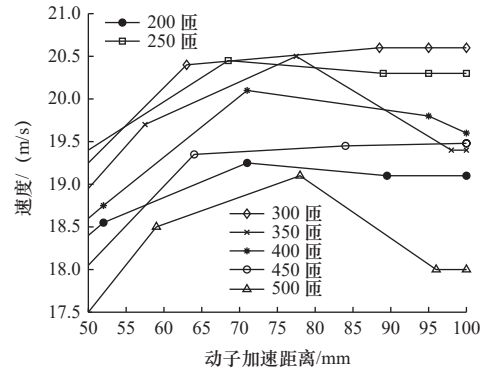


图 12 不同线圈匝数下的仿真结果

骨架材料可选尼龙或铝合金。两种材料相比，尼龙密度低，而铝合金耐磨性好，因此，针对这两种骨架材料进行仿真。由图 13 可以看出，由于铝合金材料中存在涡流，导致其在相同的条件下表现不如尼龙，因此，在铆枪设计应优先采用尼龙材料。

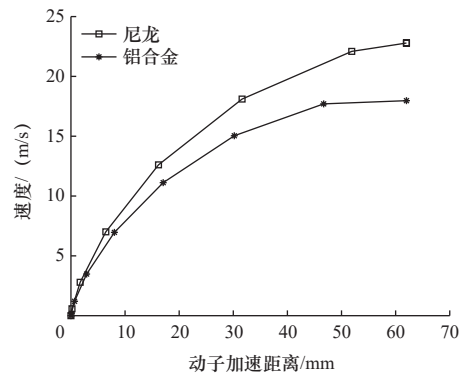


图 13 不同骨架材料的仿真结果

经仿真结果对比分析，确定样机的铆枪参数：主线圈匝数 300 匝，骨架材料为尼龙，动子材料为纯铁；电源参数的电容器容量为 18 800  $\mu\text{F}$ ，电容可充电电压不超过 500 V。

## 2.3 电脉冲铆接设备研制

### 2.3.1 脉冲电源

电脉冲铆接电源动力主电路采用变压器配合小型大容量电容器的设计，既减少了电源充电回路中的充电电压，又保证了在铆枪上的电压较低，减小设备和铆枪体积，提高能量利用率，有利于电磁铆接的自动化。在充压回路中，电网电压经过一次升压，给储能电容充电，达到要求的充电电压后进行放电控制，输出电压控制在 200~500 V。

充电电源设计主要包括选定充电功率和保证充电电压精度。功率的计算主要考虑到铆枪的工作频

率,按照每分钟完成10次施铆,充电时间 $T$ 应在3s以内。充电电压应优于 $\pm 5\%$ ,减小每次铆接时的初始能量偏差,以保证设备能量输出稳定性。

按照充电电容量最多4个 $4\ 700\times 10^{-6}\text{ F}$ 、电压最高500V时设计,电容器总的储存能量(单位:J)为

$$W_C = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2} \times (4700 \times 10^{-6} \times 4) \times 500^2 = 2350 \quad (13)$$

由于充电时间应不大于3s,因此,充电电源的总功率 $P_C$ 不少于783.3W,即

$$P_C = \frac{W_C}{T} = \frac{2350}{3} \approx 783.3 \quad (14)$$

充电电压精度要求优于 $\pm 5\%$ ,电压反馈环节取样精度就要优于 $\pm 5\%$ ,因此,采用开关电源充电模式,充电电源的拓扑结构采用串联谐振软开关方案。串联谐振开关在充电过程中类似恒流充电,电路的抗短路能力很强,适用于电容器充、放电。开关采用20kHz频率可以减小充电升压变压器的体积,有利于减小整机的结构尺寸。充电电路图如图14所示。

驱动线圈放电回路设计如图15所示,由于驱动线圈的放电回路要同时控制放电的时间和放电的脉宽,放电电源必须采用可关断开关器件。放电电源的控制开关选用半导体开关器件IGBT,规格为关断电压1700V,额定电流400A。图15中D5是钳位二极管,驱动线圈电场产生的反向电压由D5的正向压降钳位,这样,D5就会通过很大的瞬时

负载电流,因此,D5应选择耐压1200V、额定电流50A以上(半周期电流大于500A)的二极管。IGBT开关应有阻容吸收网络,吸收关断时产生的瞬态高压。电容C1~C4在放电过程中产生的反压由VD1~VD4钳位,因此,整流二极管VD1~VD4就选用额定电流20A以上的整流二极管。

回位线圈的放电电路设计如图16所示,回位线圈的放电时序要求相对较低,可采用参数为1200V/150A可控硅控制放电。

依据脉冲电源设计准则和参数设置,开展样机制造。图17所示为电源样机的内部结构图。脉冲电源主要实现:电容容量可以在1~4个电容之间随意选取;电容充电到指定电压功能;电位器调节充电速率功能;驱动线圈放电和放电脉宽控制功能;回位线圈的充放电功能。

### 2.3.2 铆枪设计及材料选择

在满足参数指标要求的情况下使铆枪应符合轻量化和安全可靠的原则。铆枪的轻量化主要结合采用轻质材料、组件结构整体设计和结构优化、增强铆接缓冲性能等途径实现。在铆枪设计中根据不同零组件的强度和绝缘等要求,分别采用了钛合金、铝合金和塑料等轻质材料。主承力件铆枪外壳与前外壳采用钛合金以承受在铆接过程中冲击力和后座力;回弹装置也选用钛合金材料承受铆接过程中铆模的冲击力。铆枪手柄体积比较大,并且受力主要为铆枪的后座力,选用铝合金。还有一些起减震、缓冲作用的零件(前减震垫、后减震垫),

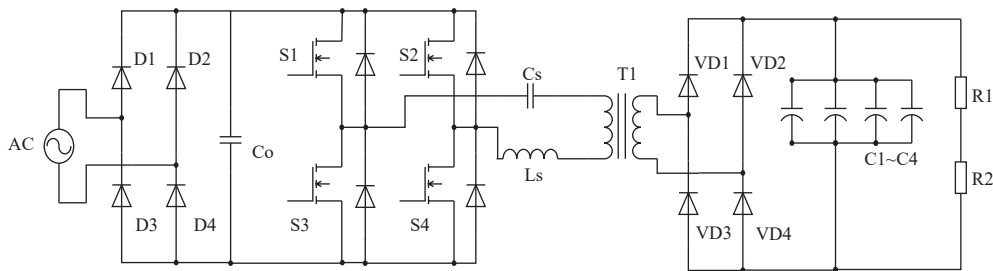


图14 充电电路

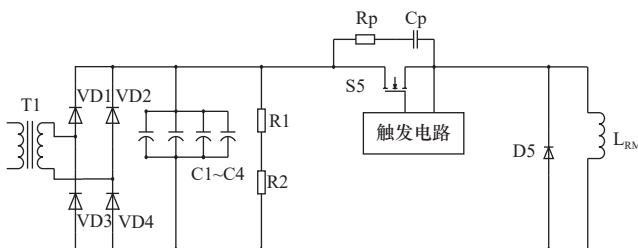


图15 驱动线圈放电电路

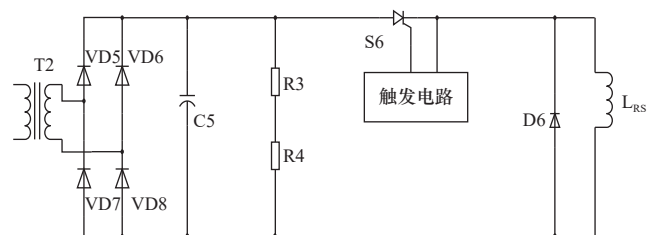


图16 回位线圈放电电路

选用聚氨酯等非金属材料。通过低密度材料的选择，降低了铆枪的重量。电脉冲铆枪的几何尺寸根据之前的仿真进行确定，通过设计和加工方案进行调整。图 18 所示为电脉冲铆枪结构设计图和样机实物图。

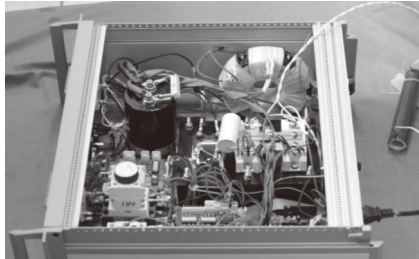


图 17 电源样机内部结构

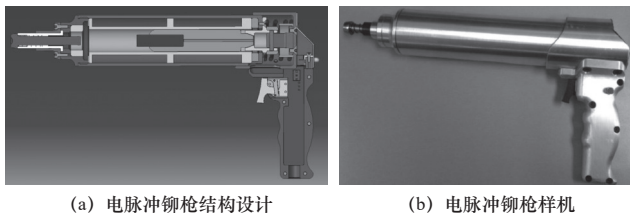


图 18 电脉冲铆枪

铆接力的缓冲对铆枪的质量和铆接操作人员所受的后坐力。在设计过程中，采用了感应器缓冲绝缘垫、后壳缓冲弹簧和导向缓冲多重缓冲。

### 3 电脉冲铆接工艺研究

采用研制的电脉冲铆接设备开展了铝合金叠层结构铆接铝合金铆钉工艺试验，试验结果见表 3。

试验共完成 28 次铝合金铆钉电脉冲铆接，充电电压范围为 320~440 V，以 20 V 为间隔，每种电压完成 4 次铆接，铆钉墩头直径及墩头高度随电压变化趋势如图 19 和图 20 所示。

由图 19 和图 20 可知，墩头直径随电压升高而增大，墩头高度随电压升高而减小。电压从 320~440 V，墩头直径和高度均满足 HB 6444 铆钉通用规范要求（墩头直径为 7.5 mm±0.5 mm，高度不小于 2.0 mm），合格率达到 100%。

由结果可知，铆接 φ5mm HB6306 铝合金铆钉，电脉冲铆接设备所需要的最低充电储能为

$$W_C = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}(4700 \times 10^{-6} \times 4) \times 320^2 = 962.56 \text{ J} \quad (15)$$

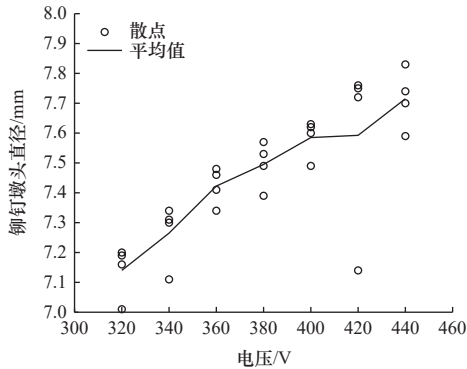
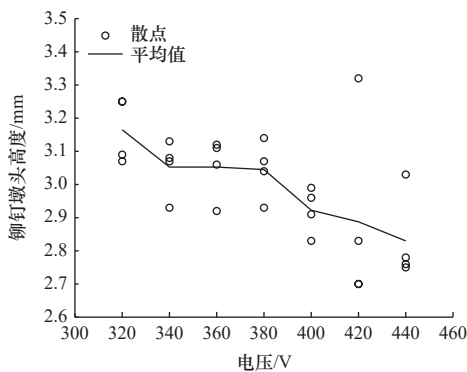
计算结果表明，研制的电脉冲铆接设备可以利用较小的电容储能满足铆接工艺需求，能量利用率较高。

表 3 电脉冲铆接试验结果

序号	标识	铆钉规格	夹层厚度/mm	充电电压/V	墩头/mm	
					直径	高度
1	J-1-1	HB 6298-5×15	7.92	320	7.16	3.07
2	J-1-2	HB 6298-5×15	7.89	320	7.19	3.25
3	J-1-3	HB 6298-5×15	7.90	320	7.01	3.25
4	J-1-4	HB 6298-5×15	7.89	320	7.20	3.09
5	J-2-1	HB 6298-5×15	7.80	340	7.31	2.93
6	J-2-2	HB 6298-5×15	7.85	340	7.34	3.08
7	J-2-3	HB 6298-5×15	7.88	340	7.30	3.13
8	J-2-4	HB 6298-5×15	7.86	340	7.11	3.07
9	J-3-1	HB 6298-5×15	7.85	360	7.34	3.06
10	J-3-2	HB 6298-5×15	7.91	360	7.46	3.12
11	J-3-3	HB 6298-5×15	7.89	360	7.41	2.92
12	J-3-4	HB 6298-5×15	7.86	360	7.48	3.11
13	J-4-1	HB 6298-5×15	7.91	380	7.49	2.93
14	J-4-2	HB 6298-5×15	7.85	380	7.57	3.04
15	J-4-3	HB 6298-5×15	7.78	380	7.53	3.07
16	J-4-4	HB 6298-5×15	7.91	380	7.39	3.14
17	J-5-1	HB 6298-5×15	7.86	400	7.49	2.91
18	J-5-2	HB 6298-5×15	7.92	400	7.60	2.99
19	J-5-3	HB 6298-5×15	7.91	400	7.62	2.83
20	J-5-4	HB 6298-5×15	7.84	400	7.63	2.96
21	J-6-1	HB 6298-5×15	7.90	420	7.72	2.70
22	J-6-2	HB 6298-5×15	7.91	420	7.75	2.83
23	J-6-3	HB 6298-5×15	7.89	420	7.76	2.70
24	J-6-4	HB 6298-5×15	7.90	420	7.14	3.32
25	J-7-1	HB 6298-5×15	7.89	440	7.83	2.75
26	J-7-2	HB 6298-5×15	7.91	440	7.70	2.76
27	J-7-3	HB 6298-5×15	7.91	440	7.59	3.03
28	J-7-4	HB 6298-5×15	7.85	440	7.74	2.78

### 4 结语

(1) 基于电磁铆接理论，开展了电脉冲铆接机理的深入研究，即用电磁发射技术加速动子撞击铆模完成铆接，并通过 Abaqus 有限元仿真建模，模拟了铆钉在电脉冲铆接过程中的变形试验。

图 19  $\phi 5$  mm 铆钉铆头直径图 20  $\phi 5$  mm 铆钉铆头高度

(2) 通过仿真软件,建立了电脉冲铆接运动仿真模型,并对电脉冲铆接设备关键参数进行了优化,初步规划了电脉冲铆接设备的结构和功能。通过在铆枪结构中加入回位线圈,保证了动子在铆接完成后返回初始位置,提高了铆接效率。

(3) 基于各项功能的具体实现方式,研制了电脉冲铆接设备,并开展了相应铝合金铆钉铆接工艺试验。通过采用电脉冲铆接技术,可以大幅度降低电容储能,同时保证了较低的电压,减小了设备和铆枪的体积重量,提高了能量利用率,有利于电脉冲铆接操作的自动化。

### 参 考 文 献

- [1] Ramamurthy T. Analysis of interference fit pin joints subjected to bearing bypass loads[J]. AIAA Journal, 2015, 28(10): 1800-1805.
- [2] 蒋浩. 碳纤维复合板: 铝合金电磁铆接工艺及多种工况下服役性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.

- [3] 黄运凯, 张旭, 李杰, 等. 电磁铆接技术国内外研究进展[J]. 精密成形工程, 2021, 13(5): 51-57.
- [4] 许国康, 高明辉, 肖庆东, 等. 电磁铆接技术的发展、设备研制及应用探讨[J]. 航空制造技术, 2010(23): 38-41.
- [5] 李家丁. 手持式电磁铆接设备研制及铆接工艺性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2020.
- [6] 曹增强. 国外电磁铆接技术发展状况[J]. 航空科学技术, 1997(4): 46-48.
- [7] 曹增强, 夏力农, 盛熙, 等. 手提式电磁铆枪减振降噪研究[J]. 振动与冲击, 1999(2): 55-57, 100.
- [8] 张俊峰. 低压电磁铆接技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2001.
- [9] 樊战亭. 低电压电磁铆接设备控制系统的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [10] 曹增强. 电磁铆接技术在大飞机制造中的应用初探[J]. 航空学报, 2008(3): 716-720.
- [11] 曹增强, 张铭豪, 谭学才, 等. 航空复合材料结构铆接技术综述[J]. 航空制造技术, 2023(增刊1): 26-37.
- [12] 徐栋. 电磁铆接过程铆钉变形分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [13] 刘磊. 复合材料: 铝合金板结构电磁铆接试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [14] 崔俊佳. 手持式电磁铆枪研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [15] 孙立强. 新型手持式电磁铆枪的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [16] 朱春东, 刘卫华, 夏志林. 低电压电磁成形铆接关键问题的探讨[J]. 锻压装备与制造技术, 2003(6): 31-33.
- [17] 杨军. 低电压电磁铆接过程数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.
- [18] 刘卫华. 低电压电磁铆接工艺参数及成形机理的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.
- [19] 高明辉, 刘华东, 许国康, 等. 基于脉冲变压器变换的自动化电磁铆接设备[J]. 航空制造技术, 2011(22): 105-107.
- [20] 纪松, 钱坤明, 谭锁奎, 等. 基于Hopkinson效应的计算机控制软磁材料居里温度测量仪的研制[J]. 磁性材料及器件, 2005(4): 34-37.
- [21] 石仁斌, 陈晓钊. 浅析毕奥-萨伐尔定律的应用[J]. 电子元器件与信息技术, 2020, 4(5): 151-152, 155.

第一作者/通信作者: 曹冠宇, 男, 1994年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为数字化柔性装配工艺技术研究。E-mail: caogy@avic.com

(编辑 曲书瑶)

(收修改稿日期: 2024-07-03)

文章编号: 20241115

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。