

自激励式电磁铆接铆钉镢头变形试验研究

马天宇, 龚成鹏, 范治松, 邓将华

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350108)

摘要: **目的** 掌握自激励式电磁铆接驱动力的作用方式, 确定合理的工艺参数, 探究铆钉变形规律。**方法** 以2A10半圆头铆钉为研究对象, 通过试验方法研究放电电压、放电电容及线圈结构对线圈放电电流和铆钉镢头变形的影响。**结果** 自激励式电磁铆接驱动力源于两放电线圈电流的相互作用, 两放电电流可分别进行独立控制。随着放电电压升高, 线圈放电电流幅值增加, 周期略有增加, 铆钉镢头的变形量增加, 相同放电能量下, 放电电容值增加使放电电流幅值降低, 周期增大, 铆钉镢头变形量存在最大值; 放电线圈匝数较多, 导线宽度较小时, 铆钉镢头变形量更大。**结论** 自激励式电磁铆接是一种动力源可控的连接方法, 为铆接驱动力的产生引入新方式, 实现了铆接驱动力的主动控制, 提高了控制的灵活性, 其能量利用率较感应式高, 为高强度大直径铆钉的成形提供一种有效的方式。铆钉变形是铆接驱动力幅值在一定时间下的作用效果, 要综合考虑放电电流幅值与作用时间的关系。

关键词: 电磁铆接; 自激励式; 铆接驱动力; 镢头变形; 工艺参数

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.03.017

中图分类号: TG391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2020)03-0137-09

Experimental Study on Deformation of Rivet Head with Self-excited Electromagnetic Riveting

MA Tian-yu, GONG Cheng-peng, FAN Zhi-song, DENG Jiang-hua

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

ABSTRACT: The paper aims to learn the action mode of the driving force of the self-excited electromagnetic riveting, determine the reasonable process parameters and explore the law of rivet deformation. With 2A10 semi-circular head rivet as the object of study, the effects of discharge voltage, discharge capacitance and coil structure on the coil discharge current and the deformation of the rivet head were studied by experimental methods. The self-excited electromagnetic riveting driving force originated from the interaction of the two discharge coil currents and the two discharge currents can be controlled independently. As the discharge voltage increased, the amplitude of the coil discharge current and the deformation of the rivet head increased, but the period increased slightly. In the same discharge energy, the increase of the discharge capacitance value reduced the amplitude of the discharge current, but the period increased. The deformation of rivet head had maximum value. The rivet head deformation was greater when the number of turns of the discharge coil was large and the wire width was small. Self-excited electromagnetic riveting is a controllable connection method of power source and introduces a new method for generating riveting driving force. It realizes active control of riveting driving force and improves control flexibility. Its energy utilization rate is higher than that of inductive electromagnetic riveting. It provides an effective way for forming high-strength large-diameter rivet. The deformation of rivet is the effect of riveting driving force amplitude at a certain

收稿日期: 2020-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(51774097, 51705081); 福建省自然科学基金(2018J05079); 福建省高校青年自然科学基金(JZ160417); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划

作者简介: 马天宇(1995—), 男, 硕士生, 主要研究方向为电磁铆接工艺。

通讯作者: 邓将华(1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁成形。

time. The relationship between the amplitude of discharge current and the action time should be considered comprehensively.

KEY WORDS: electromagnetic riveting; self-excitation; driving force of riveting; head deformation; process parameters

整体化、轻量化、高承载能力是新型航空航天飞行器发展的重要方向。由于技术条件限制，新型飞行器还难以实现完全整体化，因而不可避免地采用多种机械连接方法^[1-3]，其中，铆接是目前应用最为广泛的连接方法之一，飞行器中蒙皮与框架的连接几乎全部采用铆接方式。

为实现轻量化，高强度铝合金和钛合金已成为目前航空航天装备的首选材料。同时，为实现高承载能力，飞行器铆接部位连接强度对铆钉直径也提出了相应要求，目前越来越多地采用高强度大直径(≥6 mm)铆钉^[4-6]。铆钉成形质量是保证航空航天飞行器长寿命、稳健运行的关键，据统计，结构破坏的60%~80%发生在连接处^[7]，所以，铆接成形质量的有效控制是铆接装配技术的关键问题，因此，如何实现高强度大直径铆钉的高质量成形与铆接质量的有效控制备受航空航天领域的关注与重视。

目前，铆钉成形主要为采用液压驱动的压铆和高压气体驱动的气铆^[8]。受结构开敞性的限制，大功率压铆机在许多情况下无法工作。对于高强度铆钉，气铆存在铆接力不足、铆接后座力大、铆接噪音大和铆接质量不稳定等问题。国内外研究结果表明，采用电磁力驱动的电磁铆接能有效克服上述问题^[9-14]，但传统电磁铆接驱动力的产生本质上是基于“感应式”原理^[9]。通过线圈放电电流与驱动片感应涡流之间的相互作用产生电磁力，推动放大器使铆钉产生塑性变形，从而实现材料的连接。由于驱动片涡流源于线圈电流与驱动片的电磁感应，因而线圈放电电流与驱动片感应涡流之间不能实现完全耦合，导致设备能量利用率低、铆接驱动力偏小，难以满足高强度大直径铆钉成形的需求。针对这一问题，笔者对自激励式电磁铆接开展了初步研究，验证了其原理的可行性^[15]，但是，自激励式电磁铆接与感应式电磁铆接有显著的不同。相对于感应式电磁铆接，自激励式电磁铆接其驱动力的产生、驱动力与变形之间的耦合关系等将要更为复杂，为掌握自激励式电磁铆接驱动力的作用方式，确定合理的工艺参数，探究铆钉变形规律，文中研究了放电电压、放电电容及线圈结构对线圈放电电流和铆钉墩头变形的影响，与感应式电磁铆接进行对比，为揭示自激励式电磁铆接机理奠定基础。

1 自激励式电磁铆接原理

感应式电磁铆接原理示意图如图1所示。感应式电磁铆接在放电过程中通过线圈放电电流与驱动片

感应电流之间的相互作用产生铆接驱动力。驱动片的电流通过感应产生，其感应电流大小取决于放电线圈与驱动片之间的互感系统，属于被动控制。自激励式电磁铆接原理示意图如图2所示。与感应式电磁铆接不同，自激励式电磁铆接采用两个线圈进行同时放电，每一个线圈接入在一个独立的放电回路中，用线圈来代替感应式电磁铆接中的驱动片。线圈1与感应式原理的线圈相同，将驱动片用线圈2代替，两个线圈通过自身回路同时放电，通过两线圈上“自激励”放电电流的相互作用产生铆接驱动力。自激励式电磁铆接与传统的感应式电磁铆接有显著区别，将“感应式”变为“自激励式”，实现了铆接驱动力的主动控制，提高了控制的灵活性。自激励式电磁铆接通过主动控制两回路激励电流，可对铆接驱动力幅值及其作用时间进行独立控制，拓宽脉冲载荷幅值与作用时间的调整

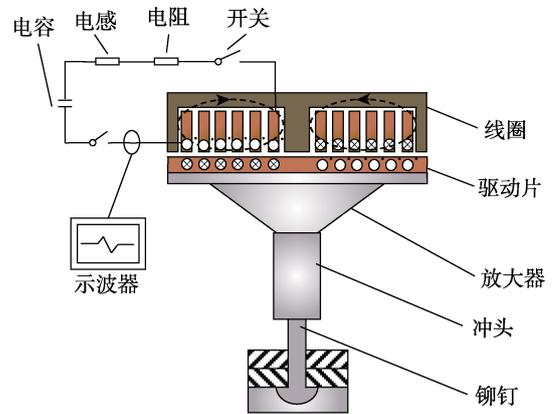


图1 感应式电磁铆接原理

Fig.1 Principle of inductive electromagnetic riveting

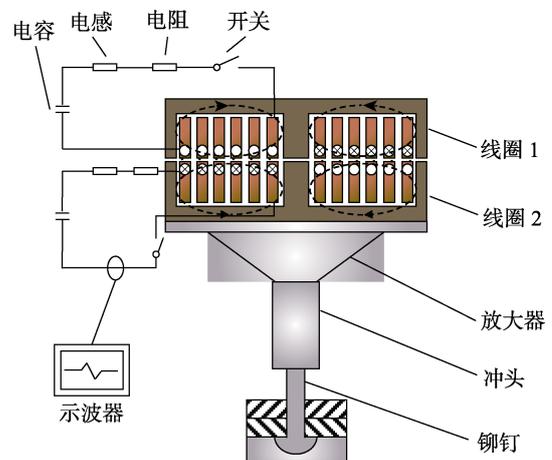


图2 自激励式电磁铆接原理

Fig.2 Principle of self-excited electromagnetic riveting

范围，可满足不同材料对铆接驱动力和加载速率的要求，相对于感应式电磁铆接具有显著优势。

2 试验

以航空航天最常采用的 2A10 半圆头铆钉为研究对象，其尺寸为 $\phi 6 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。2A10 是 Al-Cu-Mg 系硬铝合金，具有较高的剪切强度，在退火、淬火、时效和热态下均具有良好的塑性，由于其耐蚀性不强，铆钉进行 Ct-0 表面处理防止腐蚀。试验中主要研究铆钉墩头的变形规律，所以使用分瓣铆模代替被连接件，以方便取出铆钉，试验工装如图 3 所示。自激励式电磁铆接中平板线圈的具体尺寸如表 1 所示。感应式电磁铆接中线圈尺寸与自激励式相同，驱动片

为紫铜板。试验设备采用福州大学自主研制的单/双回路低电压电磁铆接设备，内径均为 40 cm，导线高度均为 10 cm，其他具体参数如表 2。试验中铆钉的外伸量均为 1.2 倍的铆钉直径，线圈放电电流可通过罗果夫斯基柔性线圈及示波器构成的测试系统测量。

表 2 电磁铆接设备技术参数

Tab.2 Technical parameters of electromagnetic riveting equipment

设备型号	最大充电电压/V	最大电容值/ μF	最大放电能量/kJ
EMR-I	400	192 000	15.36
EMR-II	400	96 000+96 000	7.68+7.68

3 结果及分析

电磁铆接放电能量是衡量设备铆接能力的最重要参数，主要由放电电压和放电电容决定，见式(1)。

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \quad (1)$$

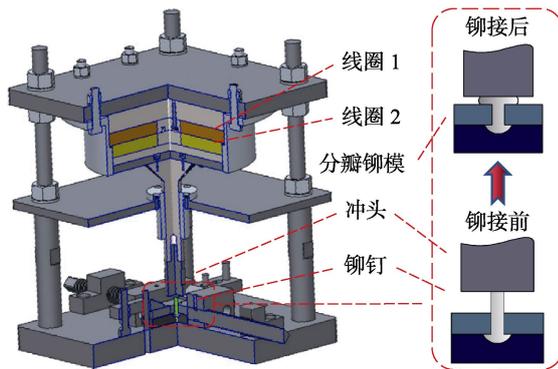
式中： E 为放电能量； C 为放电电容； U 为放电电压。

在铆钉变形的工艺研究中，最重要的就是放电电压和放电电容参数。同时，在电磁铆接中铆接驱动力来源于线圈的放电，所以线圈参数也是工艺研究的重点。线圈参数主要包括线圈匝数、导线宽度及线圈直径大小等。线圈参数影响系统的电阻和电感，所以放电电压、放电电容、系统电阻和电感是电磁铆接中最重要的几个工艺参数，而这几个参数之间又相互影响。为了确定合理的工艺参数，文中研究了各参数对铆钉变形的影响。

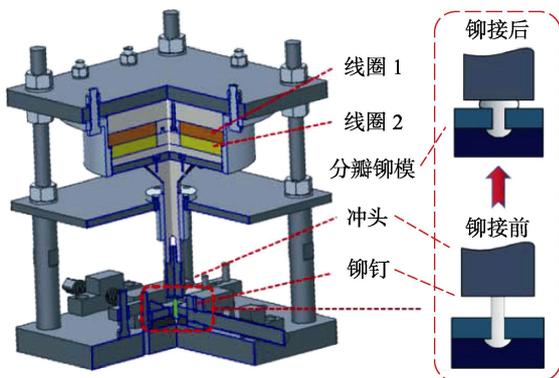
3.1 放电电压对铆钉墩头变形的影响

放电电压是电磁铆接中最重要的参数之一，放电电压影响放电电流，放电电流大小决定了铆接驱动力的大小。为了研究放电电压对铆钉墩头的变形影响，在感应式与自激励式电磁铆接中需保证相同的放电能量。由于感应式电磁铆接中电容值是自激励式单回路中电容值的 2 倍，在相同放电电压下，感应式电磁铆接中的放电能量是自激励式电磁铆接单回路中的 2 倍。自激励式电磁铆接的总能量是 2 个回路能量之和，所以在相同放电电压下，自激励式电磁铆接与感应式电磁铆接放电能量相同。

在相同放电能量下，不同放电电压成形铆钉墩头如图 4 所示。铆钉墩头的尺寸用墩头直径和墩头高度来衡量。通过测量变形后铆钉墩头尺寸，可获得墩头尺寸随放电电压的变化，其结果如图 5 所示。随着放电电压的升高，铆钉墩头高度减小，墩头直径增加。随着放电电压升高，电磁铆接放电能量增加，铆接变



a 感应式电磁铆接工装



b 自激励式电磁铆接工装

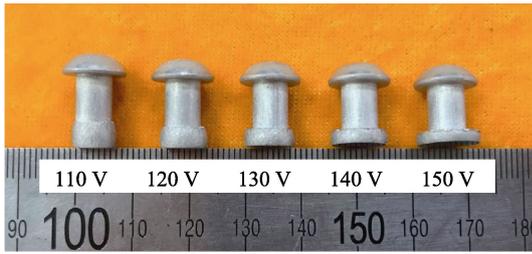
图 3 电磁铆接工装三维视图

Fig.3 3D view of electromagnetic riveting tooling

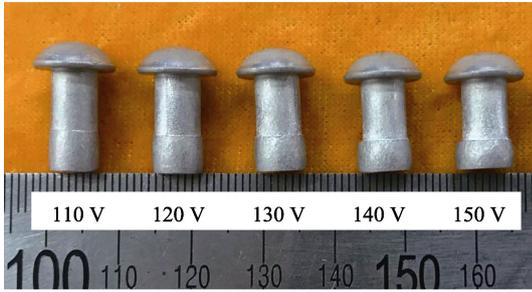
表 1 线圈结构参数

Tab.1 Structural parameters of coils

线圈类型	外径/cm	匝数	导线宽度/cm
平板线圈 (A、B)	120	18	1.5
平板线圈 (C)	120	25	1
平板线圈 (D)	120	13	2
平板线圈 (E)	120	11	2.5
平板线圈 (F)	170	32	1.5



a 自激励式电磁铆接



b 感应式电磁铆接

图4 不同电压下成形铆钉

Fig.4 Forming rivets at different voltages

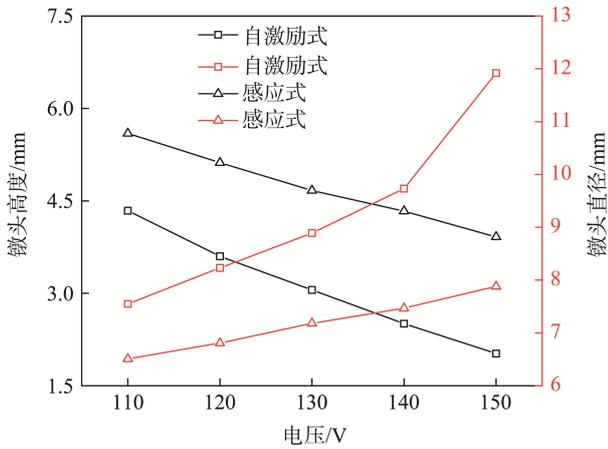
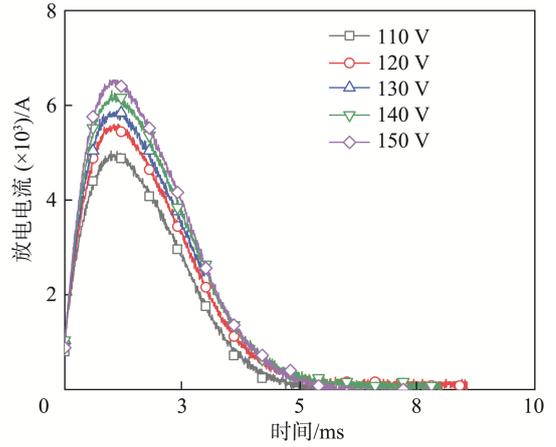


图5 不同电压下铆钉铆头的尺寸变化

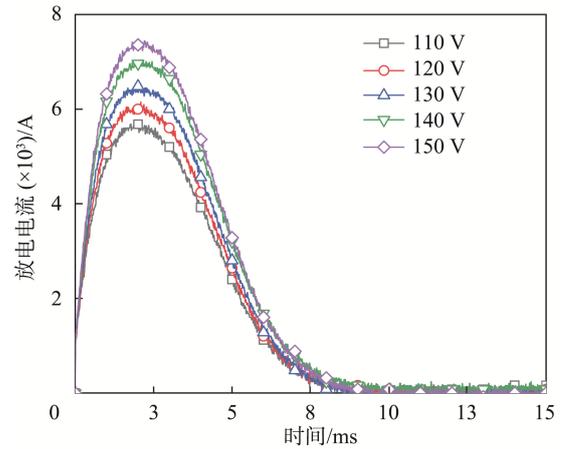
Fig.5 Variation of rivet head dimension at different voltages

形力增加, 铆钉变形量增大。改变放电电压是改变铆接驱动力的有效方式。在相同放电能量下, 自激励式电磁铆接铆钉铆头变形量要大于感应式, 且随着放电电压的升高, 两者之间的差别越大。有上述分析可知, 在相同放电能量下, 自激励式电磁铆接驱动力大于感应式, 自激励式电磁铆接的能量利用率大于感应式, 且随着能量的增加, 两者之间的差别越大。

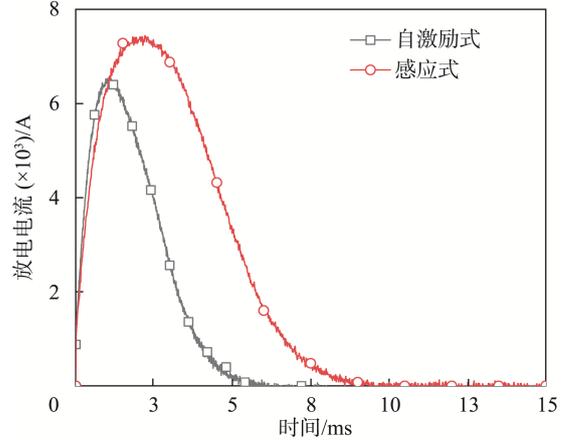
不同放电电压下, 感应式电磁铆接线圈放电电流和自激励式电磁铆接中线圈1放电电流如图6所示。对于同一种铆接形式, 随着放电电压的升高, 放电电流幅值增加, 周期略有增加。在相同放电电压下, 相对于感应式电磁铆接, 自激励式电磁铆接放电电流幅值要小, 但大于感应式放电电流幅值的一半, 周期大约为感应式周期的一半。这是由于自激励式电磁铆接单个回路的放电电容仅为感应式的一半所致, 其能量



a 自激励式电磁铆接不同电压下放电电流变化



b 感应式电磁铆接不同电压下放电电流变化



c 150 V下放电电流对比

图6 不同电压下放电电流的变化

Fig.6 Variation of discharge current at different voltages

也是感应式的一半。

电磁铆接驱动力来源于两电流的相互作用。感应式电磁铆接驱动力取决于线圈放电电流和驱动片感应电流乘积的大小。由于驱动片为一块铜板, 其感应电流的大小难以测量。自激励式电磁铆接驱动力取决于两线圈放电电流乘积的大小, 两线圈的电流均可通过测量获得。在两线圈一致时, 线圈中的

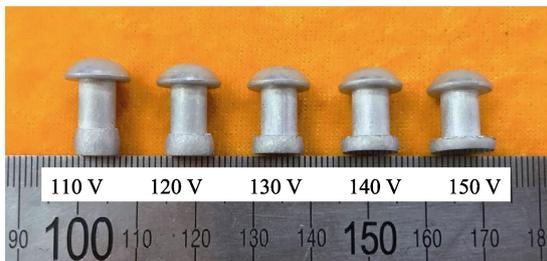
放电电流将一致，所以自激励式铆接驱动力与某一线圈中放电电流的平方成正比。由于自激励式电磁铆接是两路放电回路同时放电，保证了两放电线圈电流的一致性，克服了感应式电磁铆接中线圈与驱动片的耦合问题，使铆接驱动力增大，进而铆钉变形量增加，提高了放电能量利用率。同时由于两线圈的放电电流处于各自的放电回路中，为铆接驱动力的产生引入新方式，实现了铆接驱动力的主动控制，提高了控制的灵活性，所以自激励式电磁铆接是一种动力源可控的连接方法。

3.2 放电电容对铆钉墩头变形的影响

放电电容也是电磁铆接中最重要的参数之一，放电电容除了决定放电能量大小外，放电电容还是影响放电电流的重要参数，对其幅值和周期都有影响。试验中，为了保证放电能量一致，在改变放电电容时，其放电电压也将随之改变。不同放电电容铆钉墩头变形如图 7 所示（其中的放电电容为两放电回路之和，自激励式单路放电电容为 1/2）。在相同放电电容下，随着放电电压的升高，铆钉变形量增大。在放电电容为 192 000 μF 时，150 V 即能实现直径 6 mm 铆钉的

成形。随着放电电容减小，成形铆钉的放电电压增加。当放电电容为 48 000 μF 时，300 V 也能实现铆钉的成形。对于该设备，其铆接能力的极限远未达到，在 400 V 内，可以实现直径大于 6 mm 的高强度铆钉的成形，所以，采用自激励式电磁铆接是实现高强度大直径铆钉成形的有效方式。

不同放电电容铆钉墩头尺寸如图 8 所示。自激励式电磁铆接在放电能量相同时，当放电电容为 96 000 μF 时，铆钉的变形量最大。当放电电容为 192 000 μF 和 48 000 μF 时，铆钉的变形量均小于此值。放电电容增加，设备的放电能量增加，但其能量利用率并未随之增加，说明铆接设备存在最佳的能量利用率。由放电电压对铆钉变形影响可知，提高放电电压是提高铆接力最有效的措施，且放电电压越高，铆接力变化越大。当放电电容为 48 000 μF 时，其放电电压为 300 V，明显高于其他组放电电容下的放电电压，但其铆钉变形量并不是最大，所以对于自激励式电磁铆接而言，在放电电容为 96 000 μF 时，铆钉变形量最大，设备能量利用率最高，为较为理想的工艺参数。感应式电磁铆接在放电能量相同时，铆钉墩头变形量随着放电电容的增加而降低，能量利用率随



a 192 000 μF 下自激励式电磁铆接成形铆钉



b 144 000 μF 自激励式电磁铆接下成形铆钉



c 96 000 μF 下自激励式电磁铆接成形铆钉



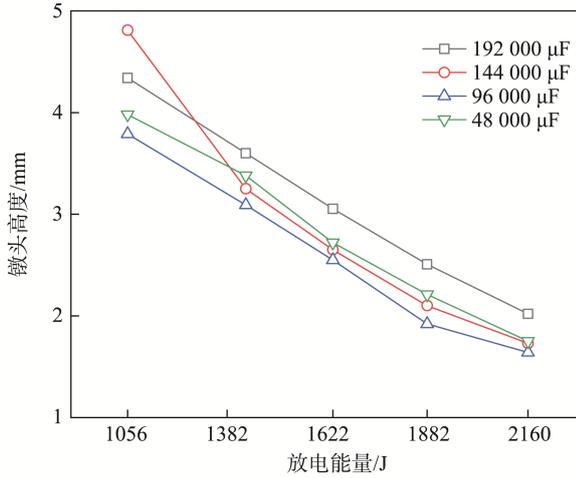
d 48 000 μF 自激励式电磁铆接下成形铆钉



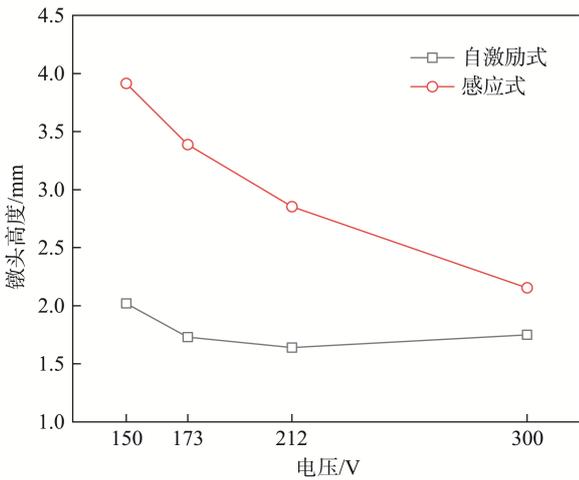
e 放电能量 2160 J 下感应式电磁铆接成形铆钉

图 7 不同电容下成形的铆钉

Fig.7 Forming rivets at different capacitances



a 自激励式电磁铆接不同电容下铆头尺寸



b 放电能量 2160 J 下不同电容铆钉铆头尺寸

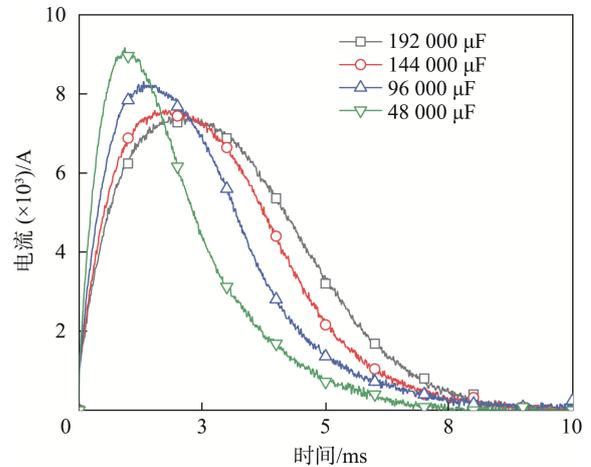
图 8 不同电容下铆钉铆头尺寸变化

Fig.8 Variation of rivet head dimension at different capacitances

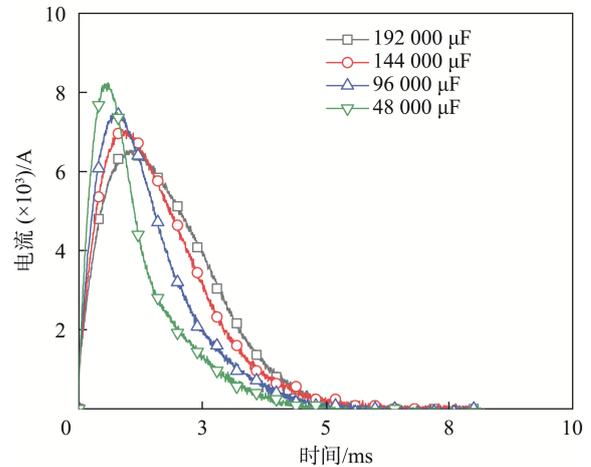
随着设备放电电容的增加而降低。放电电容为 48 000 μF 时，铆钉铆头变形量最大，能量利用率最高。这与自激励式电磁铆接的变化规律是不同的。

相同放电能量下，不同放电电容时线圈放电电流如图 8 所示。随着放电电容增加，两种铆接形式的放电电流幅值均减小，周期均增大，到达电流峰值所需时间均增加。铆钉变形是铆接驱动力幅值在一定时间下的作用效果。对于自激励式电磁铆接，放电电容增加，两线圈电流乘积值减小，铆接驱动力幅值减小，放电电流周期增加，铆接驱动力作用时间增加，两者在某一电容值下拥有最优的匹配关系，此时铆钉变形量最大，能量利用率最高；对于感应式电磁铆接，放电电容减小使铆接驱动力幅值增加的影响大于铆接驱动力作用时间减小的影响，表现为在相同放电能量下铆钉铆头变形量随着放电电容的减小而增大。所以，对于某一种材料而言，为了获得铆钉最大的变形程度，需要综合考虑放电电流的幅值和周期。对于感应式电磁铆接，放电电容和放电线圈确定以后，放电

电流的周期基本确定，其幅值可通过改变放电电压进行调整，但周期基本无法调整。对于自激励式电磁铆接，放电电容确定以后，可以对两个放电线圈进行调节，两个放电线圈的匝数可以一致也可以不同，其周期的调节范围要比感应式大得多，也更为灵活，可以满足不同材料对于加载速率的要求，提高了加载速率调节的柔性。



a 感应式电磁铆接



b 自激励式电磁铆接

图 9 放电能量为 2160 J 时不同电容下放电电流的变化
Fig.9 Variation of discharge current at different capacitances when the discharge energy is 2160 J

3.3 放电线圈参数对铆钉铆头变形的影响

3.3.1 线圈匝数

匝数是放电线圈最重要的参数，也是线圈设计的指标之一。在导线截面尺寸相同时，匝数不同，线圈的外径不同。不同匝数下铆钉铆头试样及尺寸如图 11 和 12 所示。自激励式 18 匝和 32 匝线圈铆钉试样变形量差别不大，感应式 32 匝线圈铆钉铆头变形量大于 18 匝线圈。对于感应式而言，线圈匝数增加，铆钉铆头变形量增加，能量利用率增加。在 150 V 时，感应式电磁铆接 32 匝线圈铆钉铆头变形量也远远小

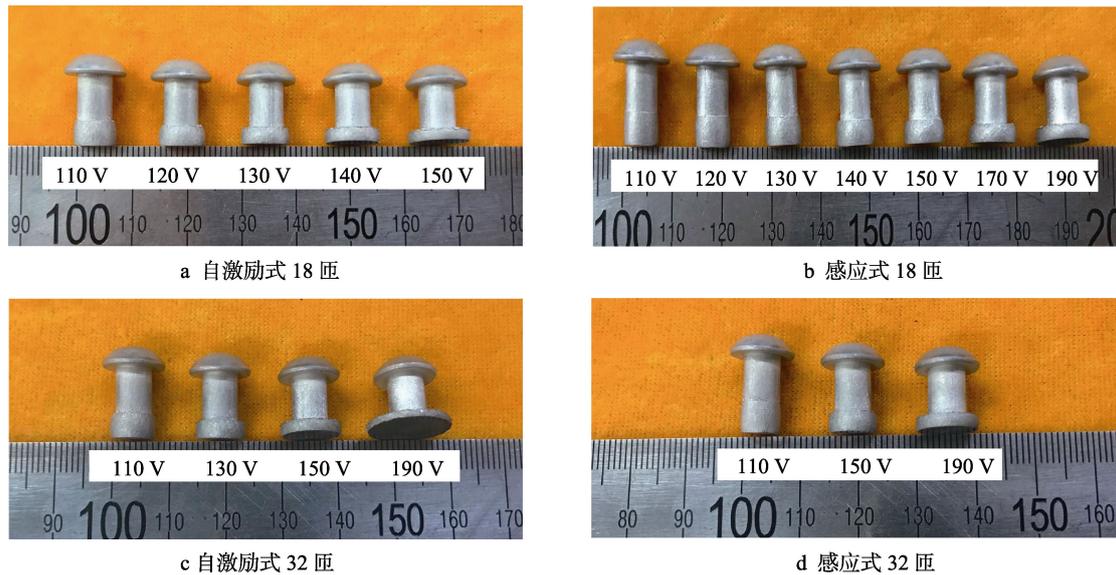


图 10 不同线圈匝数下成形的铆钉
Fig.10 Forming rivets at different turns

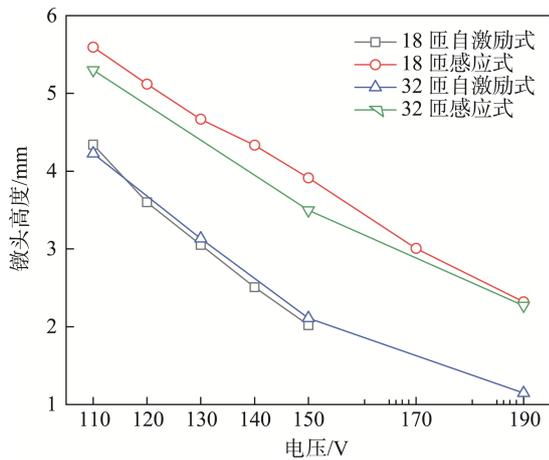


图 11 不同线圈匝数下铆钉墩头尺寸的变化
Fig.11 Variation of rivet head dimension at different turns

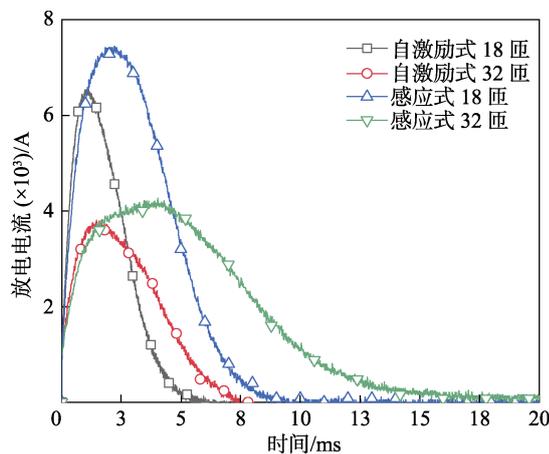


图 12 不同线圈匝数下放电电流的变化
Fig.12 Variation of discharge current at different turns

于自激励式电磁铆接 18 匝线圈铆钉墩头的变形量，进一步说明自激励式电磁铆接能量利用率高于传统

感应式电磁铆接的能量利用率。

电压 150 V 时，不同匝数线圈放电电流如图 12 所示。随着线圈匝数增加，放电电流幅值降低，周期增大。线圈电感与线圈匝数平方成正比，而整个电磁铆接系统电感则主要来自于线圈电感，线圈匝数决定了系统的电感。线圈匝数增加，系统电感增加，阻碍回路中放电电流的变化，所以放电电流幅值降低，周期增大。铆钉变形是冲头对铆钉做功的结果，既取决于铆接力的大小又取决于铆接力持续时间。虽然电感增加使回路中放电电流幅值降低，但其周期增加，使得整体上呈现有利于铆钉变形的趋势。同时线圈匝数增加，线圈电阻增加，也会影响线圈放电电流的幅值和周期，使得电路中的能量损耗变大，将影响能量的分配，改变能量的利用率。对于自激励式电磁铆接，线圈匝数增加，电感增加使能量利用率增加，但电阻增大使能量利用率下降，二者的改变量接近，最终导致不同线圈铆钉墩头变形量相似，能量利用率并未明显增加；对比感应式电磁铆接，线圈匝数增加，电感的影响要强于电阻的影响，铆钉墩头变形量增大，能量利用率增加。

3.3.2 线圈导线宽度

线圈的结构一旦确定，导线的缠绕面积就保持不变，导线宽度决定了线圈的匝数，进而影响系统电感及电阻。改变线圈 2 的线宽，导线宽度越宽，绕制线圈的匝数越少。不同导线宽度下铆钉墩头试样及尺寸如图 13 和 14 所示。导线越宽，铆钉墩头变形量越小。导线宽度越小，其匝数越大，线圈电感也越大，有利于铆钉的变形。导线截面积减小，导线长度增加，会使线圈电阻增加，导致线路上的能量损耗增加。对于现有线圈结构，导线宽度减小使电感增加的影响大于

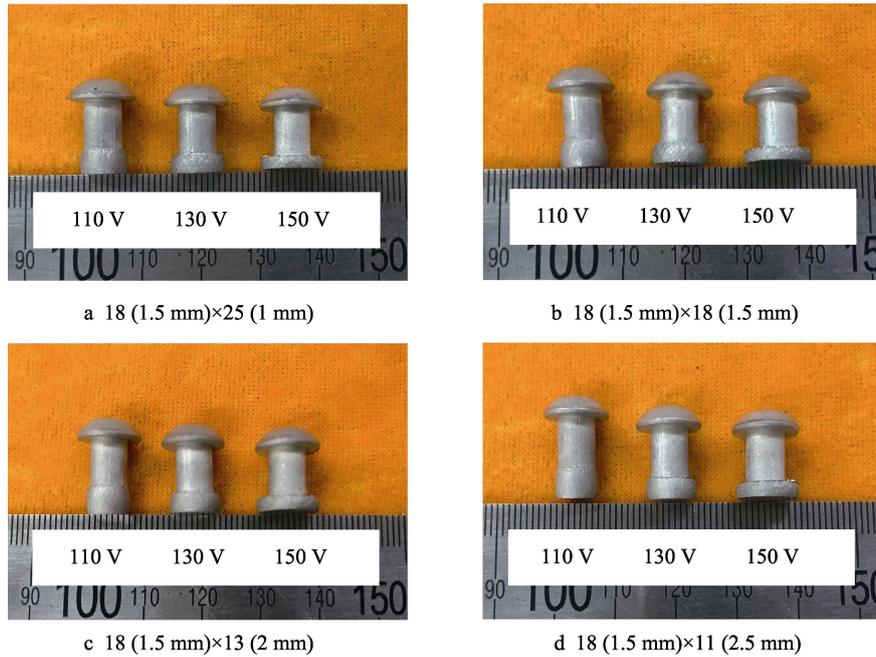


图 13 不同导线宽度下成形的铆钉
Fig.13 Forming rivets at different wire widths

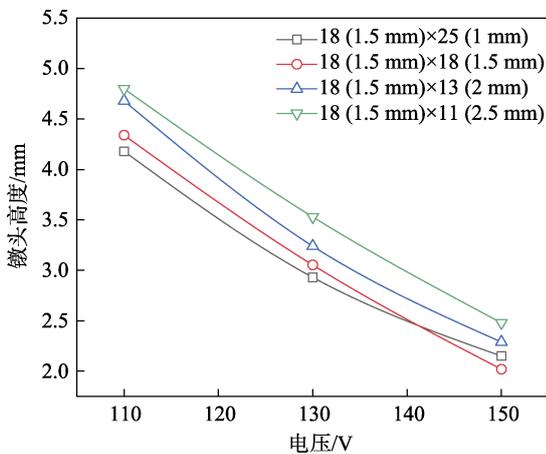


图 14 不同导线宽度下铆钉铆头尺寸的变化
Fig.14 Variation of rivet head dimension at different wire widths

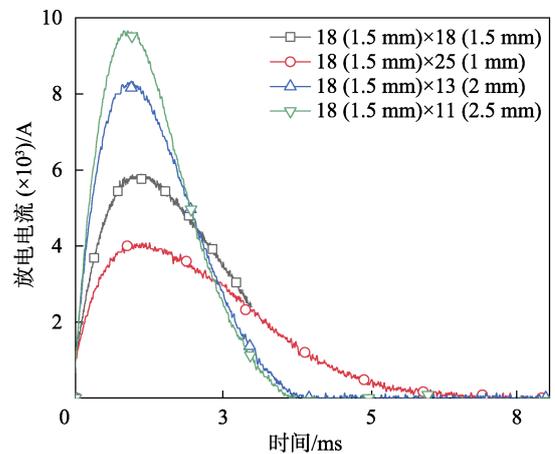


图 15 不同导线宽度下放电电流的变化
Fig.15 Variation of discharge current at different wire widths

电阻增大的影响,导线宽度较小时铆钉铆头变形量较大。不同导线宽度下放电电流如图 15 所示。导线宽度越宽,放电电流幅值越大,周期越短。从铆钉铆头的变形量看,并非放电电流幅值越高,周期越短的铆钉铆头变形量最大。要提高铆接的能量利用率,考虑放电电流的幅值与作用时间的综合效果。

4 结论

1) 自激励式电磁铆接驱动力源于两放电线圈电流的相互作用,是一种动力源可控的连接方法,为铆接驱动力的产生引入新方式,实现了铆接驱动力的主动控制,提高了控制的灵活性,可以满足不同材料对加载速率的要求,提高了加载速率调节的柔性。

2) 自激励式电磁铆接是两路放电回路同时放电,保证了两放电线圈电流的一致性,克服了感应式电磁铆接中线圈与驱动片的耦合问题,其能量利用率较感应式高,铆接驱动力大,为高强度大直径铆钉的成形提供一种有效的方式。

3) 铆钉变形是铆接驱动力幅值在一定时间下的作用效果,电压、电容、电感和电阻是影响铆接驱动力和放电电流幅值和周期的重要因素。确定合理的工艺参数,提高铆接能量利用率,要综合考虑放电电流幅值与作用时间的关系。

参考文献:

[1] GROCHE P, WOHLLETZ S, BRENNIS M, et al. Joining by Forming-A Review on Joint Mechanisms, Appli-

- cations and Future Trends[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(10): 1972—1994.
- [2] XIAO H, DUAN Y G. Sensitivity Analysis of Correlated Inputs: Application to a Riveting Process Model[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(13/14): 6622—6638.
- [3] LEPRETRE E, CHATAIGNER S, DIENG L, et al. Numerical and Experimental Investigations of Hot Driven Riveting Process on Old Metal Structures[J]. *Engineering Structures*, 2016, 127: 583—593.
- [4] ZHANG X, YU H P, LI C F. Microstructure and Mechanical Properties of 2A10 Aluminum Alloy Bar Subjected to Dynamic Heading[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 227: 259—267.
- [5] 于海平, 张旭, 章茂云, 等. 大直径铝合金铆钉以铆代螺可行性试验研究[J]. *航天制造技术*, 2016(4): 1—4.
YU Hai-ping, ZHANG Xu, ZHANG Mao-yun, et al. Experimental Investigation on Feasibility of Substituting Large Diameter Riveting for Bolting[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2016(4): 1—4.
- [6] 王新, 闻伟, 张毅, 等. 复合材料电磁铆接技术现状及评析[J]. *航天制造技术*, 2016(1): 1—6.
WANG Xin, WEN Wei, ZHANG Yi, et al. Current Situation and Evaluation of Electromagnetic Riveting Technology for Composite Materials[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2016(1): 1—6.
- [7] LIU J, WU H, YANG J, et al. Effect of Edge Distance Ratio on Residual Stresses Induced by Cold Expansion and Fatigue Life of TC4 Plates[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, 109(3): 130—137.
- [8] 常正平, 王仲奇, 王斌斌, 等. 基于镦头不均匀变形的压铆力建模[J]. *航空学报*, 2016, 37(7): 2312—2320.
CHANG Zheng-ping, WANG Zhong-qi, WANG Bin-bin, et al. Riveting Force Computation Model Based on Formed Head Inhomogeneous Deformation[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2016, 37(7): 2312—2320.
- [9] ZIEVE P B. *Low Voltage Electromagnetic Riveter*[D]. Seattle: University of Washington, 1986.
- [10] CAO Z Q, CARDEW-HALL M. Interference-fit Riveting Technique in Fiber Composite Laminates[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2006, 10(4): 327—330.
- [11] DENG J H, YU H P, LI C F. Numerical and Experimental Investigation of Electromagnetic Riveting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 499(1/2): 242—247.
- [12] DENG J H, TANG C, FU M W, et al. Effect of Discharge Voltage on the Deformation of Ti Grade 1 Rivet in Electromagnetic Riveting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 591: 26—32.
- [13] ZHANG X, YU H P, LI J, et al. Microstructure Investigation and Mechanical Property Analysis in Electromagnetic Riveting[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78: 613—623.
- [14] 张岐良, 曹增强, 秦龙刚, 等. 钛合金电磁铆接数值模拟[J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(9): 1832—1837.
ZHANG Qi-liang, CAO Zeng-qiang, QIN Long-gang, et al. Numerical Simulation of Electromagnetic Riveting of Titanium Alloy, 2013, 42(9): 1832—1837.
- [15] 邓将华, 程漂, 王林峰. 自激励式电磁铆接放电电流分析[J]. *航空学报*, 2017, 38(5): 420669.
DENG Jiang-hua, CHENG Li, WANG Lin-feng. Discharge Current in Self-Excited Electromagnetic Riveting[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2017, 38(5): 420669.