

引文格式: 杨柳, 岳婷, 左杨杰, 等. 干涉螺栓电磁安装力控制参数建模分析[J]. 航空制造技术, 2022, 65(9): 110-114.

YANG Liu, YUE Ting, ZUO Yangjie, et al. Simulation investigation on electromagnetic installation force of interference fit bolt[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(9): 110-114.

干涉螺栓电磁安装力控制参数建模分析*

杨 柳¹, 岳 婷², 左杨杰³, 曹增强⁴, 仇继伟¹

(1. 西安爱生技术集团公司, 西安 710072;

2. 西安航天发动机有限公司, 西安 710100;

3. 四川大学, 成都 610065;

4. 西北工业大学, 西安 710072)

[摘要] 干涉螺栓安装是飞机干涉螺接构件疲劳强化的重要工艺组成。为了优化干涉螺栓电磁力安装方法, 基于电磁铆接技术, 建立干涉螺栓电磁安装力加载有限元模型, 研究控制参数对电磁安装力的影响规律。结果表明充电电压对安装力峰值影响最显著, 但对脉宽无影响; 当低电容量放电时, 对安装力峰值和脉宽均有明显影响, 当高电容量放电时, 对安装力峰值影响变小, 对脉宽影响仍旧显著; 放电电阻可实现安装力峰值线性调控, 且不改变脉宽; 当次级线圈厚度较小时, 次级线圈厚度对安装力峰值影响显著, 随着厚度增加, 安装力峰值增长速度放缓并最终达到稳定值。工程实际中, 为了得到合适的电磁安装力, 宜采用大电容量电容、低电阻电缆, 并利用充电电压控制安装力峰值。
关键词: 干涉螺栓; 安装力; 电磁铆接; 参数研究; 模拟分析

Simulation Investigation on Electromagnetic Installation Force of Interference Fit Bolt

YANG Liu¹, YUE Ting², ZUO Yangjie³, CAO Zengqiang⁴, QIU Jiwei¹

(1. Xi'an ASN Technology Group Co.Ltd., Xi'an 710072, China;

2. Xi'an Space Engine Co., Ltd., Xi'an 710100, China;

3. Sichuan University, Chengdu 610065, China;

4. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] The installation of interference fit bolt is important for the interference fit long-life joining of aircraft. To optimize the electromagnetic force installation method of interference fit bolt, a finite element model was developed to investigate the effects of key parameters on the interference fit bolt installation force in electromagnetic riveting method. The results showed that the charging voltage had a significant influence on the peak installation force, however, exhibited little influence on the force pulse width. Both the peak and pulse width of the installation force increased obviously with the increasing of the discharging capacitance at small discharging capacitance, however, the peak installation force was not sensitive to large discharging capacitance. The peak of the installation force decreased linearly with the increasing of the discharging resistance, while the pulse width of the installation force exhibited no relationship with the discharging resistance. Moreover, the peak of the installation force increased obviously with the early increasing thickness of the slave coil, then with the increasing of the thickness, the increasing rate of the peak decreased and finally reached a constant. To obtain a suitable installation force in service, the large discharging capacitance and low discharging resistance are suggested, and the charging voltage is suggested to control the peak installation force.

Keywords: Interference fit bolt; Installation force; Electromagnetic riveting; Parameter study; Simulation analysis

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.09.110

* 基金项目: CAST-BISEE 项目(CAST-BISEE2019-003)。

尽管整体成型具有独特的技术优势,但目前的航空航天结构仍主要由多组件通过连接装配而成^[1]。螺接因其低成本、安全可靠等优点^[2],已成为航空航天结构装配的主要连接方法。疲劳失效是航空航天结构常见的失效形式^[3-4],而螺接结构是典型的疲劳失效危险点。

干涉配合螺接可以成倍提高接头疲劳寿命^[5],干涉配合螺栓的安装是干涉配合螺接构件的重要装配工艺环节,对构件连接性能具有重要影响,安装不当将造成初始损伤,进而引起构件连接性能下降。基于电磁铆接技术的干涉螺栓电磁力安装利用高速加载方法对紧固件实施安装,具有加载速率高、可控性强、可安装干涉量大等优点^[6],有利于大直径、厚夹层、高干涉量紧固件安装^[7-8]。然而,目前的研究尚处于初级阶段,干涉螺栓电磁力安装方法中电磁铆接设备的关键控制参数对电磁安装力的影响规律仍不完全清楚,不利于其安装工艺的进一步优化。

综上,本研究基于电磁铆接技术建立电磁安装力加载有限元模型,研究关键控制参数对干涉螺栓电磁安装力的影响规律,为干涉螺栓高质量装配提供技术指导。

1 脉冲电磁力加载模型

1.1 理论模型

基于电磁铆接技术,干涉配合螺栓电磁力安装方法电磁安装力理论加载模型如图1所示,基于RLC放电原理,利用电容对初级线圈释放脉冲强电流并在初级线圈周围激发强磁场,强磁场进而与次级线圈中感应涡流相互作用产生电磁安装力,并通过驱动头加载到干涉配合螺栓上,完成螺栓安装。放电过程中,放电回路满足二阶线性齐次微分方程,即

$$LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \quad (1)$$

式中, L 、 R 、 t 和 u_c 分别为等效电感、放电电阻、时间和电容电压。RLC电路在欠阻尼状态下工作时,加载效果较好,即 $R < 2\sqrt{L/C}$,对方程(1)求解得放电电流 $i(t)$ 的计算式。

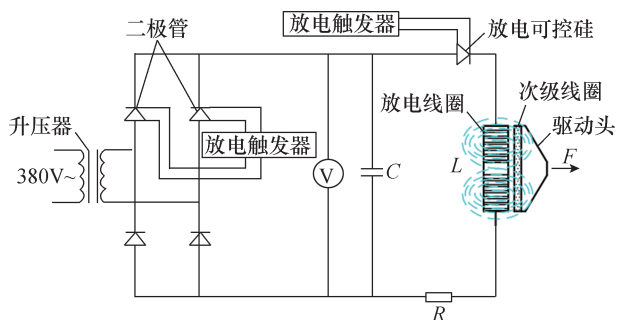


图1 电磁安装力理论加载模型

Fig.1 Theoretic loading model of electromagnetic installation force

$$i(t) = \frac{U_0}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t) \quad (2)$$

式中, δ 为与放电回路相关的常数; ω 为放电回路圆频率。此时,电磁安装力 $F(t)$ 可表示为^[9]

$$F(t) = \frac{r \mu_0 \omega M n^2}{\alpha \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}} i^2(t) \quad (3)$$

式中, α 为次级线圈与初级线圈距离; L_2 和 R_2 分别为次级线圈的电感和电阻; n 为初级线圈的匝数; M 为初级线圈和次级线圈之间的互感值; μ_0 为真空中的磁导率; r 为初级线圈的半径。将式(2)代入式(3)可得

$$F(t) = \frac{r \mu_0 M n^2 U_0^2}{\alpha L^2 \omega \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}} e^{-\frac{2R}{L}t} \sin^2(\omega t) \quad (4)$$

电磁安装力脉宽 T 的计算公式为

$$T = \frac{2\pi}{2\omega} = \frac{\pi}{\sqrt{1/LC - R^2/4L^2}} \quad (5)$$

1.2 有限元模型

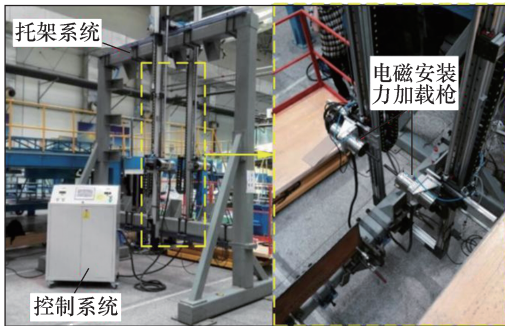
基于电磁铆接的电磁安装力加载以RLC放电电路为基础,利用Ansoft软件Maxwell 2D模块^[10-11]建立电磁安装力加载模型,主要针对电磁安装力核心控制参数充电电压、放电电容、放电电阻和次级线圈厚度进行建模分析。建模分析过程中,针对工程实际,选择西北工业大学为我国某主机厂研制的EMR-S1000干涉螺栓电磁力安装装备为研究对象。装备实物如图2(a)所示,装备放电线圈几何参数如表1所示。

如图2所示,根据EMR-S1000干涉螺栓电磁力安装装备建立电磁安装力加载模型,以Z轴为旋转轴,为了降低计算量,根据对称性建立1/2初级线圈和次级线圈模型,两线圈间设置厚度为2mm的绝缘层,两线圈材料均为铜,假设绝缘层和求解域材料为真空。放电回路等效模型如图2(b)所示,回路总放电电感测量值大小为5 μ H。电磁安装力加载模型如图2(c)所示,模型网格采用三角形网格,并进行局部网格细化。参数研究采用单一变量法,分别模拟分析充电电压、放电电容、放电电阻、次级线圈厚度对电磁力的影响。

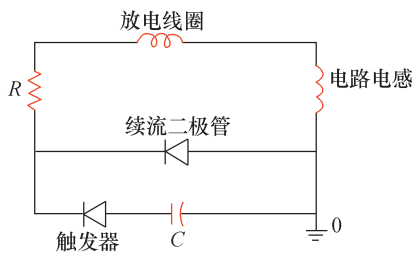
2 试验验证

为了验证模型的正确性,针对EMR-S1000干涉螺栓电磁力安装装备对应的放电线圈,在放电电阻 $R=27M\Omega$ 、次级线圈厚度 $H=8mm$ 、放电电容 $C=47mF$ 的条件下,搭建电磁安装力峰值测试平台(图3),对前文中对应的加载条件下的电磁安装力峰值模拟结果进行验证。其中,测试平台压力传感器为石英压力传感器,利用Datalab软件采集压力数据,采集频率40MHz。测量过程中,充电电压选择2组,分别为常用的400V

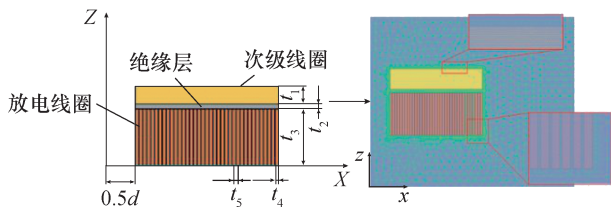
和 500V, 每组充电电压下分别放电 3 次, 分别测量 3 次放电对应的电磁安装力峰值, 以 3 次测得峰值的算数平均值作为对应充电电压下的电磁安装力峰值。



(a) EMR-S1000干涉螺栓电磁力安装装备



(b) 放电回路等效模型



(c) 1/2 2D模型及网格划分

图2 电磁安装力加载建模

Fig.2 Loading model of electromagnetic installation force

表1 放电线圈几何参数

Table 1 Geometrical parameters of the master coil

匝数 $n/\text{匝}$	铜带宽度 4/mm	铜带高度 t_3/mm	绝缘层厚度 t_2/mm	铜带间距 t_4/mm	中心孔直径 d/mm
37	1.2	25	2	1.7	24



图3 电磁安装力测试平台

Fig.3 Test platform of electromagnetic installation force

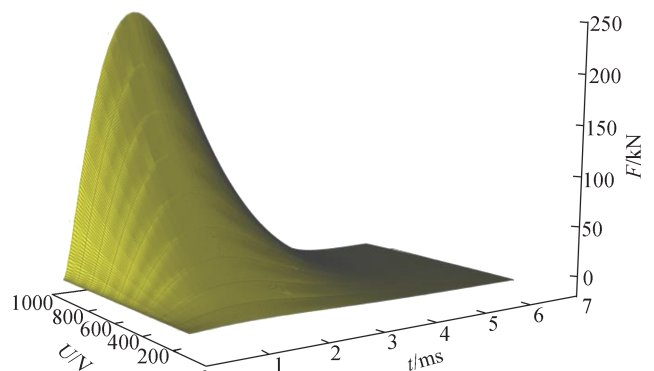
测试结果表明, 充电电压为 400V 和 500V 时, 实测电磁安装力峰值分别为 44.27kN 和 62.8kN。相同条件下, 根据前文模型, 充电电压为 400V 和 500V 时, 模拟电磁安装力峰值分别为 40.19kN 和 60.84kN。对比可知, 400V 和 500V 充电电压下, 电磁安装力峰值模拟结果与试验结果相对误差分别为 9.22% 和 3.12%, 证明所建模型具有较好的可信度。

3 结果与讨论

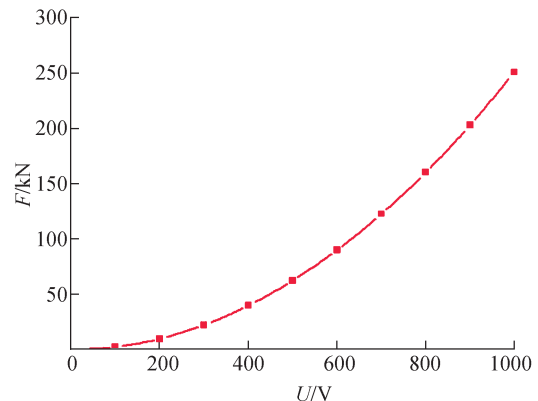
电磁安装力波形为类正弦波, 其主要特征包括峰值和脉冲宽度, 峰值为电磁安装力激发过程中的最大值, 脉冲宽度为电磁安装力激发过程持续的时间。以下结果将重点讨论关键控制参数对电磁安装力峰值和脉冲宽度的影响效果。

3.1 充电电压

充电电压是电磁安装力的主要影响参数, 测量多组充电电压下的脉冲电磁力特征。电磁安装力随充电电压及时间变化曲面如图 4 (a) 所示, 可以看出, 电磁安装力曲面的上升坡面明显较下降坡面陡峭, 充电电压不影响电磁安装力脉冲宽度; 结合图 4 (b) 可知, 随着充电电压增加, 电磁安装力峰值呈现出明显二次函数的特



(a) 电磁安装力-充电电压-时间曲面



(b) 电磁安装力峰值-充电电压曲线

图4 充电电压对电磁安装力的影响

Fig.4 Effects of charging voltage on electromagnetic installation forces

征,与理论分析相互验证。

3.2 放电电容

为了研究放电电容对电磁安装力的影响,选择3组充电电压,分别是200V、600V和1000V,在3组充电电压下分别模拟电磁安装力的放电电容影响规律。模拟结果表明,3组充电电压下,电磁安装力-放电电容-时间曲面相似。以600V为例(图5):沿着放电电容 C 轴,相同充电电压下,电磁安装力峰值随放电电容增加而显著增加,但当放电容量不断增大,峰值增长率放缓;沿着时间 t 轴,相同充电电压下,电磁安装力脉冲宽度(即持续时间)亦随放电容量增加而明显增加。

3.3 放电电阻

分别选择充电电压为200V、600V和1000V,在每组充电电压下分别模拟放电电阻对电磁安装力的影响。与放电电容相似,不同充电电压下脉冲电磁力-放电电阻-时间曲面形状相似,其中充电电压600V对应曲面如图6(a)所示,曲面呈现出带状,沿时间 t 轴,电磁安装力脉冲宽度随放电电阻增加几乎不发生改变,沿放电电阻 R 轴,放电电阻增加导致电磁安装力峰值降低;如图6(b)所

示,可以进一步看出,3组充电电压下,电磁安装力峰值与放电电阻呈现出线性递减关系,充电电压越高,递减斜率越大,放电电阻对电磁安装力峰值具有线性调控功能。

3.4 次级线圈厚度

次级线圈厚度是电磁安装力的重要影响参数。设置3组充电电压,分别是200V、600V和1000V,分别模拟每组充电电压下的电磁安装力与次级线圈厚度的关系。研究发现,3组充电电压下,次级线圈厚度对电磁安装力的影响规律相同。

600V充电电压时,如图7(a)所示,沿时间 t 轴,不同次级线圈厚度下,电磁安装力脉冲宽度基本不变,即次级线圈厚度对电磁安装力持续时间无明显影响;沿次级线圈厚度 H 轴,电磁安装力峰值随次级线圈增加而增加,但随着次级线圈厚度增加,峰值增长率下降。

图7(b)为电磁安装力峰值-次级线圈厚度曲线,可以看出,当次级线圈厚度较小时,放电线圈表面可看作匀强磁场,电磁安装力峰值随次级线圈厚度线性增长;当次级线圈厚度进一步增加,此时磁场强度开始分布不均匀,距离放电线圈表面较远区域磁场强度低于表

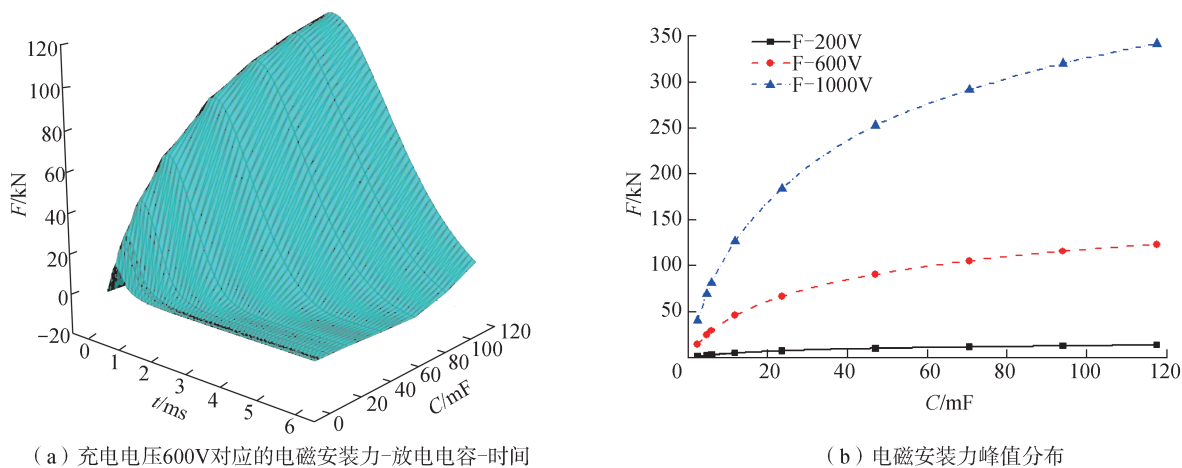


图5 电磁安装力与放电电容的关系

Fig.5 Effects of discharging capacitance on electromagnetic installation forces

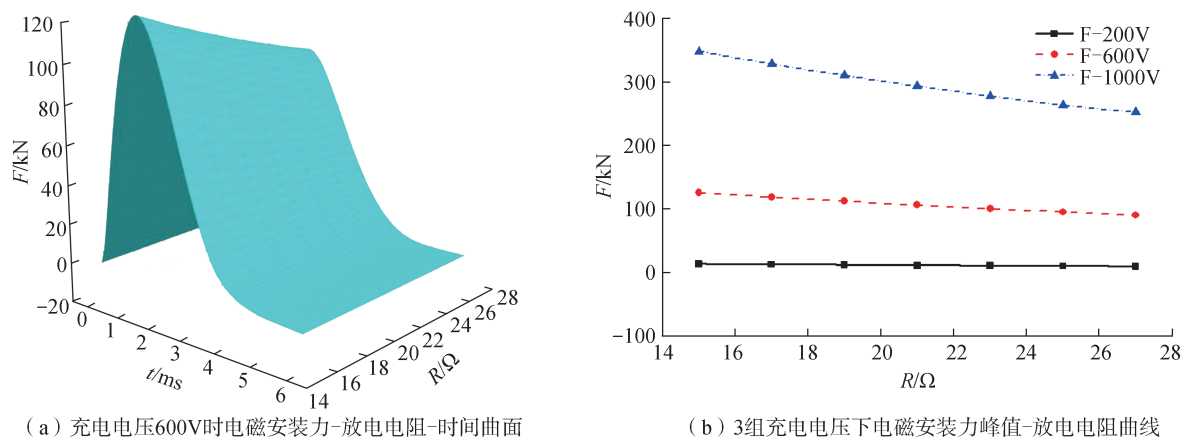
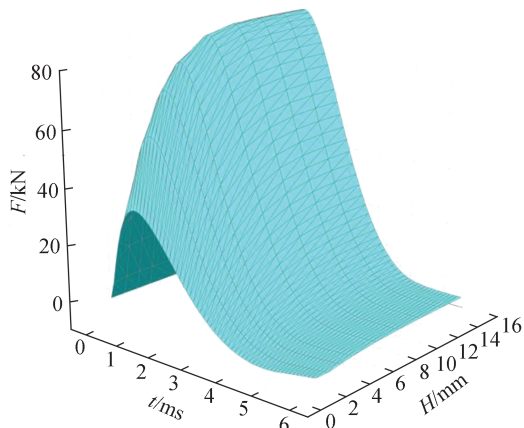
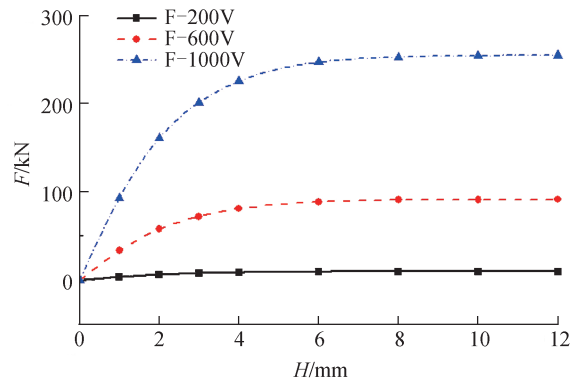


图6 电磁安装力与放电电阻的关系

Fig.6 Effects of discharging resistance on electromagnetic installation forces



(a) 充电电压600V时电磁安装力-二次线圈厚度-时间曲面



(b) 3组充电电压下电磁安装力峰值-二次线圈厚度曲线

图7 电磁安装力与次级线圈厚度的关系影响

Fig.7 Effects of slave coil thickness on electromagnetic installation forces

面附近磁场,次级线圈单位厚度上感应的电磁安装力降低,此时电磁安装力峰值随次级线圈厚度增加的增长斜率变小;最后,次级线圈厚度继续增加,远端磁场进一步变弱,对感生电磁安装力的贡献几乎为零,次级线圈厚度增加不再引起电磁安装力峰值变化。

4 结论

本研究针对干涉螺栓电磁力安装方法,对电磁安装力控制参数进行了数值建模研究,并通过试验验证了模拟结果的可靠性。研究表明,充电电压对电磁安装力峰值影响最显著,宜用于控制峰值,但放电电阻增加将导致电磁安装力峰值线性下降,实际中应采用低电阻放电电缆避免放电电阻过高;放电电容对电磁安装力峰值作用效果明显弱于充电电压,但对电磁安装力脉冲宽度的调控作用十分明显,宜采用较大电容量放电电容提高电磁安装力持续时间;次级线圈厚度增加,电磁安装力峰值呈现出先线性增长然后增长率放缓的增长特征,为了得到较高的电磁安装力峰值,次级线圈厚度不应低于 2mm。

参考文献

[1] 熊涛,孙刚,刘孟周.数字化技术在卫星总装中的应用[J].航天器环境工程,2008,25(1):80-83.
 XIONG Tao, SUN Gang, LIU Mengzhou. The application of digitization technology in satellite general assembly[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(1): 80-83.
 [2] 韦红余,陈文亮,蒋红宇,等.面向现代飞机装配的长寿命机械连接技术[J].航空制造技术,2009,52(17):34-37.
 WEI Hongyu, CHEN Wenliang, JIANG Hongyu, et al. Long-life mechanical connecting technology for modern aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(17): 34-37.
 [3] 朱林,王晓飞.热声载荷下高温合金薄壁结构非线性动态响应特性[J].航天器环境工程,2015,32(3):252-259.
 ZHU Lin, WANG Xiaofei. Characteristics of nonlinear dynamic response of high temperature alloy thin-walled structures under thermo-acoustic loadings[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2015, 32(3):

252-259.

[4] CHAKHERLOU T, TAGHIZADEH H, AGHDAM A. Experimental and numerical comparison of cold expansion and interference fit methods in improving fatigue life of holed plate in double shear lap joints, Aerospace Science and Technology, 2013(29): 351-362.
 [5] 陈允全,曹增强,秦龙刚,等.钛合金结构干涉配合铆接疲劳试验研究[J].航空制造技术,2017,60(4):83-86.
 CHEN Yunquan, CAO Zengqiang, QIN Longgang, et al. Research on fatigue experimental of interference fit riveting of titanium alloy structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(4): 83-86.
 [6] CAO Z Q, ZUO Y J. Electromagnetic riveting technique and its applications[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(1):5-15.
 [7] 杨晓娜,曹增强,左杨杰,等.基于应力波加载的钛合金干涉螺栓安装工艺试验研究[J].西北工业大学学报,2017,35(3):462-468.
 YANG Xiaona, CAO Zengqiang, ZUO Yangjie, et al. Experimental study of titanium Hi-lock bolts installation using stress wave[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(3): 462-468.
 [8] 曹增强,杨晓娜,左杨杰,等.钛合金干涉螺栓应力波安装质量模拟研究[J].材料科学与工艺,2018,26(1):24-30.
 CAO Zengqiang, YANG Xiaona, ZUO Yangjie, et al. Installation quality assessment of interference fit titanium bolt in stress-wave driving process by simulations[J]. Materials Science and Technology, 2018, 26(1): 24-30.
 [9] 奉孝中,周光泉.应力波铆枪设计理论初探[J].金属成形工艺,1990(2):11-15.
 FENG Xiaozhong, ZHOU Guangquan. Design mechanism investigation of stress wave riveting gun[J]. Metal Forming Technology, 1990(2): 11-15.
 [10] 宁少飞.电磁斥力操作机构电磁效率优化研究[D].武汉:华中科技大学,2014.
 NING Shaofei. Study on optimization of electromagnetic efficiency of electromagnetic repulsion operating mechanism[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
 [11] BASU S, SRIVASTAVA K D. Electromagnetic forces on a metal disk in an alternating magnetic field[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1969, 88(8): 1281-1285.

通讯作者:杨柳,硕士,工程师,主要从事飞行器先进装配连接技术研究。

(责编 古京)