

铆钉成形技术研究及性能评价

Study on Upsetting Technique of Rivets and Rating of Merits

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 赵建国 郭洪杰 董 帅

[摘要] 针对电磁铆接和普通铆接铆头变形差异,建立铆钉成形过程的数学模型,并通过试验验证了有限元模型的合理性,得出了不同铆接工艺铆钉的变形规律;设计了铆钉拉脱试验方法,验证了电磁铆接在成形质量和轴向抗拉强度方面均高于普通铆接,得出了电磁铆接工艺性能优于普通铆接的结论。

关键词: 铆钉成形 有限元模型 拉脱强度 性能评价

[ABSTRACT] Finite element model on process of upsetting rivets is built to explore rivet ending variance between electromagnetic riveting and hammer riveting. The finite element model is verified by rivet experiment, based on which regularity of upsetting rivets is obtained. In order to determine pull-off strength of rivet ending variance, tensile experiment is designed, which proves electromagnetic riveting processing property is better than hammer riveting.

Keywords: Upsetting rivet Finite element model Pull-off strength Rating of merit

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.23/24.114

铆接技术具有工艺简单、连接强度稳定、检查和排除故障容易、对复杂结构的适应性强等优点,在飞机生产过程中获得了大量应用。但是,普通锤铆铆接件结构强度低、铆钉变形量大、操作环境差、工作强度高,已不能满足新一代飞机的研制要求。电磁铆接成形时间短,钉杆膨胀和铆头成形几乎同步完成,钉杆和钉孔间形成的干涉量比较均匀,当钉孔间隙较大或夹层较厚时仍能实现较好的干涉配合,利于提高飞机结构的疲劳寿命,而且电磁铆接为一次成形,铆钉材料不易产生加工强化,适用于难于成形材料以及大直径铆钉的铆接,此外,电磁铆接还具有噪音低、后坐力小、铆接工艺质量稳定的优点。

20世纪60年代,波音公司最早意识到传统铆接工艺难以满足新机型、新材料的工艺需求,率先开展了电磁铆接技术研究,并于1968年申请了强冲击电磁铆接装置的专利,解决了普通铆接存在的问题,从此

拉开了电磁铆接工艺研究的序幕。1986年Zieve^[1]研制成功低压电磁铆接设备,解决了高压电磁铆接的缺陷,使电磁铆接技术得到较快发展。1988年Peter^[2]将原来需6~10kV的工作电压降到0.5~1.0kV,并成立了Electroimpact公司,其产品已广泛用于世界各地飞机制造行业,如波音767、空客380等飞机机身复合材料连接均采用了电磁铆接技术。俄罗斯伏尔加航空科学技术中心研制的YMK-6AM、YMK-8AM电磁铆接设备已用于IL-86、TY-154飞机的生产,研制的YMKCH3装置已用于发动机燃烧室筒体Cr-Ni钢等铆接。国内电磁铆接技术研究相对较晚,具有代表性的有西北工业大学的曹增强^[3]和哈尔滨工业大学的李春风等^[4]。电磁铆接工艺应用研究相当重要,华盛顿大学Reinhal等^[5]考虑到电磁铆接的材料动力响应与普通铆接不同,通过试验计算得出铆模的形状对成形质量有较大影响的结论,电磁铆接不能采用普通铆接所用的铆模。Vincent等^[6]提出了加载速率是影响铆接质量的重要参数。此外,铆钉材料、铆钉规格、钉孔间隙、垫圈和铆头形状尺寸的不同对电磁铆接工艺均有较大影响^[7]。国内设备总体性能仍落后于国外,各大主机厂主要是在引进国外先进设备的基础上,开展相关的应用研究,如中航工业北京航空制造工程研究所于1999年从俄罗斯引进两台电磁铆接设备,将电磁铆接工艺应用于机翼整体油箱的铆接,中航工业西飞于2008年从美国Electroimpact公司引进了双枪电磁铆接设备,用于无头铆钉的铆接。

电磁铆接与普通锤铆铆头变形差别较大,为保证铆接质量和连接强度,开展铆钉铆头成形技术研究及相关评价方法至关重要。

1 铆钉铆头成形数值分析

铆钉铆接过程中,不可避免产生加工强化,影响金属的塑性性能。断面收缩率是金属材料塑性性能的特征,由文献[8]~[9]可知,断面收缩率随着变形速度的增加而增加,加工强化效果降低,塑性损失减小。电磁铆接为单次应力波载荷,普通锤铆为多次冲击载荷,两种铆接方式铆钉变形速率不同,材料发生加工强化的程度不同,最终导致铆钉铆头形状不同。

铆钉塑性变形具有高度的非线性, MSC 公司的 MARC 软件非线性求解能力较强, 美国 NASA 主要用于航空航天工业有限元计算。铆钉镢头成形过程中, 钉体塑性变形较大, 故本文采用 MARC 求解器, 按增量法计算铆钉变形过程。

铆钉材料为钛铝合金, 弹性模量为 20000MPa, 泊松比为 0.28, 屈服强度为 495MPa。铆钉直径 5mm, 长度 10mm, 铆接夹层厚度 4mm, 为提高计算精度, 有限元网格采用六面体八节点一次单元, 单元数 7992 个, 节点数 9211 个, 如图 1 所示。

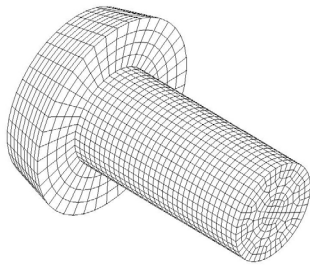


图1 平锥头铆钉有限元模型
Fig.1 Finite element model of rivet

为节约计算时间, 除铆钉外, 上、下铆模, 铆接夹层等实体均按实际条件简化为刚体。铆接过程铆钉受力状态随着钉体变形而发生变化, 很难进行理论描述, 故本文采用刚体接触分析进行计算, 同时由于铆接力测定难度较大, 本文采用位移加载方式模拟实际铆接过程, 位移加于上、下铆模。为限制有限元数学模型的刚体位移, 采用弹簧约束, 弹性系数足够小, 以不影响计算精度为宜, 本文取 1N/mm。接触判定中接触容限为最小单元边长的 5%, 偏移因子为 97%。由于库伦摩擦模型出现阶跃, 数值计算导致奇异解, 本文对阶跃部分进行线性改进, 摩擦系数取 0.08。经有限元计算, 铆钉变形云图如图 2 所示, 考虑不同强化程度的影响, 铆钉变形后镢头外廓如图 3 所示, 原点位于靠近铆接夹层一侧。

为验证上述计算的合理性, 对两种铆接形式分别进行铆接试验。电磁铆接设备为 EI 公司的 HH54 型电磁铆枪, 采用对铆, 普通铆接为风动铆枪, 采用正铆。铆接

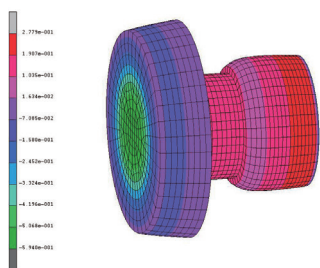


图2 铆钉镢头变形有限元计算结果
Fig.2 Calculation result of rivet ending deformation based on FEM

后, 铆钉变形如图 4 所示, 铆钉有部分破损, 这是在拆钉过程中造成的, 但不影响镢头的外观。距离原点每间隔 0.5mm 采用游标卡尺测量, 两种不同铆接方式镢头直径对比如表 1 所示, 可见有限元计算值与实际吻合。由上可知有限元计算铆钉变形规律与试验一致, 从而验证了有限元模型的合理性。

经有限元计算, 两种不同铆接方式铆钉钉杆直径变化如图 5 所示。由图 5 可见, 电磁铆接后钉杆变形差别较小, 与被铆接件干涉量均匀, 这对提高飞机机体疲劳寿命有利。

2 铆接性能验证

由图 4 可见, 采用普通铆接, 铆钉镢头变形更接近于鼓形, 这与实际吻合较好。采用电磁铆接, 靠近铆接夹层侧的铆钉镢头变形小于普通铆接, 而远离铆接夹层端铆钉镢头变形大于普通铆接, 这可能对铆钉的轴向承

表1 铆接后镢头直径对比 mm

距离	电磁铆接		普通铆接	
	计算值	实测值	计算值	实测值
0.5	6.62	6.64	6.71	6.68
1.0	7.03	7.04	6.97	6.96
1.5	7.10	7.09	6.96	6.94
2.0	7.06	7.05	6.88	6.88

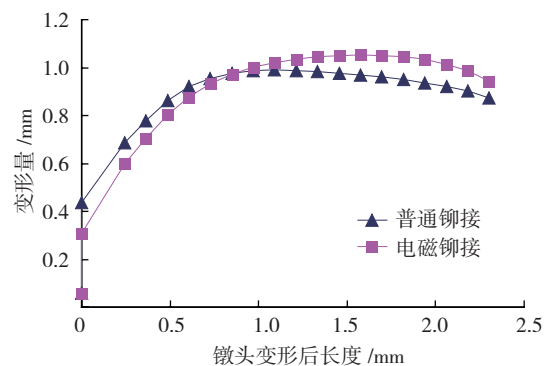


图3 不同铆接变形后镢头外廓对比
Fig.3 Comparison of rivet ending shape after different riveting deformation



(a) 普通铆接 (b) 电磁铆接

图4 实际铆接后铆钉变形

Fig.4 Actual deformation of rivets after riveting

载能力造成影响,为此,以下进行试验分析。

查阅大量文献后,本文采用拉脱试验验证两种不同铆接工艺铆钉的轴向抗拉强度。试验设备为 Instron5569 电子万能材料试验机(图 6),拉脱试验专用夹具如图 7 所示。

在相同条件下,电磁铆接和普通铆接各进行 5 次试验,取最大拉脱应力对比,如图 8 所示。可见,电磁铆接

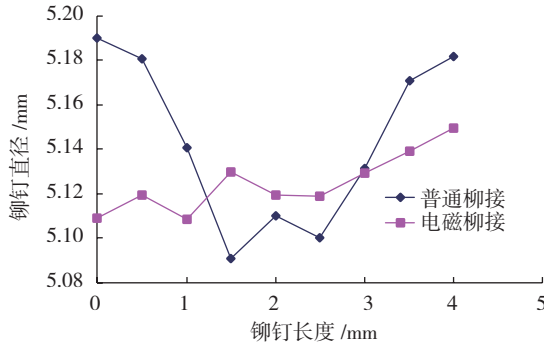


图5 有限元计算铆接后铆钉直径对比

Fig.5 Comparison of rivet diameter by FEM after riveting

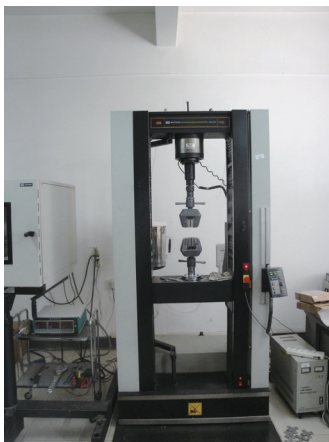


图6 Instron5569电子万能材料试验机

Fig.6 Instron5569 electron material test machine



图7 拉脱试验件及工装

Fig.7 Tools and parts for pull-off test

的拉脱强度显著优于普通铆接,所以电磁铆接工艺中铆钉的轴向承载能力优于普通铆接。

综上所述,电磁铆接工艺干涉量均匀,而且轴向承载能力优于普通铆接,有利于提高铆接连接强度,完全满足飞机铆接工艺要求。

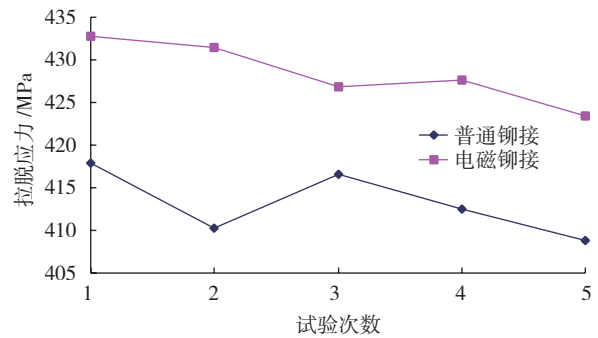


图8 拉脱应力对比

Fig.8 Comparison of pull-off stress

3 结论

(1) 建立了铆接过程的数学模型,对铆钉成形过程进行了模拟,得出了不同铆接工艺铆钉的变形规律,并通过试验验证了有限元模型的合理性;

(2) 设计了铆钉拉脱试验方法,通过对比得出电磁铆接比普通铆接有更强的轴向承载能力;

(3) 电磁铆接铆钉钉杆变形均匀,干涉配合较好,连接疲劳强度大,有利于提高铆接连接寿命。

参考文献

- [1] ZIEVE P B. Low voltage electromagnetic riveter[D]. Washington: University of Washington, 1986.
- [2] PETER B Z. An electromagnetic pulse actuator: US, 0293257[P]. 1988.
- [3] 曹增强. 电磁铆接理论及应用研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 1999.
- [4] 邓将华,李春风,于海平. 电磁铆接铆钉变形分析. 北京科技大学学报, 2006,28(S1):61-63.
- [5] REINHAL P G, GHASSAEI S, CHOO V. An analysis of rivet die design in electromagnetic riveting. Transaction of the ASME, 1988, 110: 65-69.
- [6] VINCENT K S C, PER G R, SAEID G. Effect of high rate deformation induced precipitation hardening on the failure aluminum rivets. Journal of Material Science, 1989, 24: 599-608.
- [7] 邓将华. 电磁铆接数值模拟与实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [8] 潘川,李正邦,田志凌,等. 不锈钢焊缝金属的氢脆. 金属学报, 2001, 37(9):985-990.
- [9] 王者昌,陈怀宁. 变形速度和温度对高氢钛合金脆性的影响. 金属学报, 2002, 38(S):226-229.

(责编 春早)