无头铆钉自动钻铆工艺试验研究

刘连喜[1]，李西宁[1]，王仲奇[1]，李卫平[2]

(1. 西北工业大学 机电学院 现代设计与集成制造教育部重点实验室，陕西 西安 710072
2. 西安飞机工业(集团)有限责任公司工装设计所，陕西 阎良 710089)

摘 要：为了提高装配质量和寿命，自动钻铆技术在飞机装配中得到广泛应用，而钻铆参数是影响装配效率和质量的关键因素。文章通过有限元模拟技术对无头铆钉铆接变形进行了分析，提炼了自动钻铆工艺参数，并结合 G86 自动钻铆系统，采用正交试验法进行了无头铆钉的工艺试验研究，通过极差分析法确定了无头铆钉的钻铆参数值，为无头铆钉在飞机装配中的应用提供了依据。

关 键 词：自动钻铆，无头铆钉，铆接变形分析，正交试验
中图分类号：V262 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-2758(2013)01-0077-06

为保证飞机轻量化、长寿命、高可靠性和气密、油密性的要求，无头铆钉在飞机装配中得到了重要的应用。据统计，在民用飞机 ARJ21 机翼的制造过程中，无头铆钉铆接占铆接工作总量的 80% 以上[1-3]。目前无头铆钉铆接主要由自动钻铆机完成。

自动钻铆机是集电气、液压、气动、自动控制为一体的，在装配过程中不仅可以实现组件(或部件)的自动定位，同时还可以一次完成夹紧、钻孔/锪窝、涂胶、送钉、铆接/安装等一系列工作，是现代飞机先进制造装配技术之一[4]。

由于自动钻铆过程涉及的工艺参数多、参数可调解范围广，因而如何选择自动钻铆参数是飞机装配面临的重要问题。

本文结合 G86 自动钻铆系统，采用正交试验设计方法对无头铆钉的铆接工艺进行研究，分析各工艺参数对铆接质量的影响，为无头铆钉在 G86 自动钻铆系统上的应用提供依据。

1 自动钻铆工艺过程

G86 自动钻铆系统如图 1 所示。

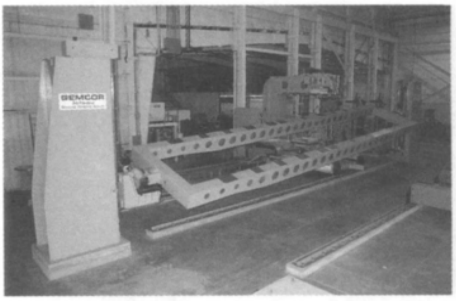


图 1 G86 自动钻铆系统

自动钻铆结构如图 2 所示。1 次完成钻孔、锪窝、铆接和铣平，时间不超过 5 s，重复误差在 ±0.05 英寸以内。自动钻铆工艺过程如图 3 所示：首先将需要用铆钉连接的紧固件安装到钻铆机的指定位置(主要为托架)，用专用定位工具进行定位；当定位精度达到要求后，用上压力脚和下铆头对紧固件进行夹紧，防止在钻铆过程中连接件位置变动或随主

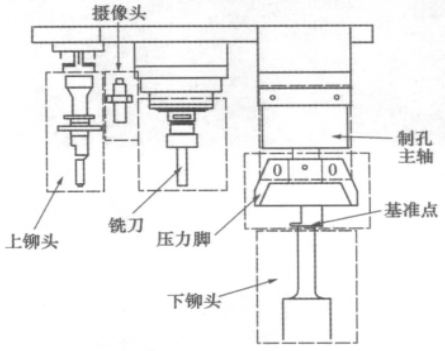


图 2 自动钻铆结构主要部件

收稿日期：2012-03-01 基金项目：国家科技支撑计划(2011BAF13B01 和 2011BAF13B07)资助
作者简介：刘连喜(1988—)，西北工业大学硕士研究生，主要从事飞机装配与连接技术研究。

轴转动;钻头下降,开始对紧固件进行钻孔,根据具体铆钉需要选择性进行锪窝操作,钻孔完毕后,钻头上升;送钉装置将匹配的铆钉送到上铆头铆钉孔内,如有密封要求,进行涂胶操作;下铆头铆模顶住铆钉下端,上铆模下降,挤压铆钉,完成铆接;铣平工作头下降,完成钉头多余材料的铣平工作。

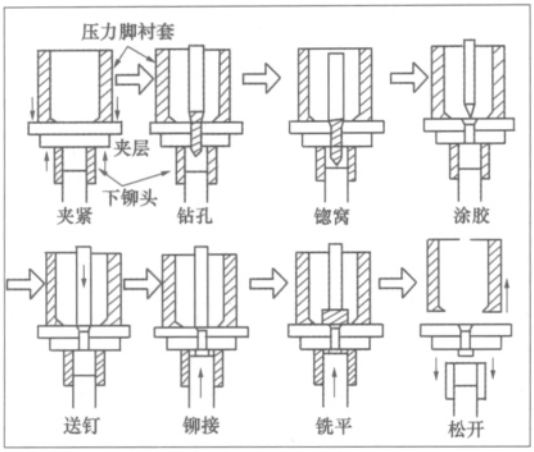


图3　自动钻铆工艺过程

2　无头铆钉铆接变形分析

通过有限元模拟技术,模拟无头铆钉的铆接过程,分析在压铆力的作用下,铆钉和铆接件的变形。整个铆接过程由铆头接触铆钉开始,到铆钉完全变形,铆头离开铆钉为止[5,6],整个过程可划分为5个阶段:

阶段1　此阶段从铆头接触铆钉开始,随着铆头位移的增长,铆钉受到的压铆力逐渐增大,开始发生变形,钉杆整体发生镦粗变形如图4a)所示。当钉杆接触到铆接件时,这个阶段结束。此阶段只涉及到铆钉的变形,压力尚未传递到铆接件,铆接件没有发生变形。

阶段2　此阶段从钉杆接触铆接件孔壁边缘开始,如图4b)所示,由于无头铆钉在阶段1镦粗过程中发生了双鼓形变形(高径比大于2),故铆钉和铆接件从上下两侧各有接触,随着铆头位移的不断增加,铆钉与孔壁接触区域开始变大,直到应力在铆接件厚度上呈现出类似对称时,阶段2结束。此时,镦粗的钉杆与铆钉孔周围圆面已充分接触,尚未形成镦头,铆钉中的金属以上下流动为主,类似于挤压的金属流动。

阶段3　随着铆头位移的继续增加,铆钉在埋头窝侧部分开始发生填充埋头窝变形,而另外一侧发生局部镦粗,形成镦头,并接触到铆接件的金属板面,如图4c)所示。铆钉和铆接件之间接触区域之间的摩擦力使金属流动方向发生改变,同时铆接件因为受到镦头的压力开始发生变形。此阶段,铆接件不仅在孔周围受到铆钉膨胀带来的压力,而且受到铆钉两端材料的周向流动带来的压力。

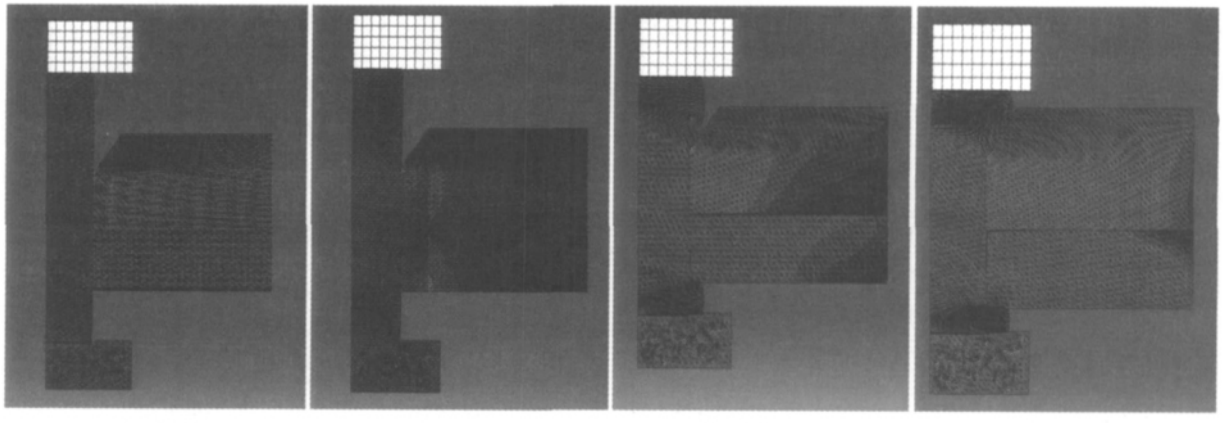


图4　铆接过程变形

阶段4　铆头位移减小,载荷降低。此阶段铆钉仍与铆头相接触,铆钉和铆接件发生弹性回复,如图4d)所示。

阶段5　铆头离开铆钉,压铆过程结束。

3　无头铆钉自动钻铆试验方案设计

3.1　自动钻铆工艺参数分析

分析G86自动钻铆系统铆接无头铆钉全过程

涉及的工艺参数,排除系统内部编号类参数和与加工质量无关的参数,本文研究的自动钻铆参数为:

制孔参数: 主轴转速、进给速率;

铆接参数: 压铆力、压力脚回缩压力、夹紧解除力、双向挤压夹紧力、镦铆过程时间、镦铆停留时间、上铆头空腔。

G86 自动钻铆系统中,无头铆钉铆接后的铣平端面采用固定参数,这些参数包括: ①铣刀主轴转速: 8 000 rpm; ②进给速率: 25 ipm。在铣平过程中,系统内置的点位测量算法能自动定位蒙皮端面位置,并在达到该位置时铣刀自动终止。

3.2　铆钉和试片

铆钉: 选取 ARJ21 机翼壁板用进口无头铆钉,牌号为: NAS1321AD8E13,材料为 2A12 铝合金。

选择和产品材料及厚度相同的平板试件,试件材料为牌号分别为 7075T3511 和 2324T39 铝合金,对应 2 块板的厚度分别为 5.5 mm 和 3.5 mm,试件尺寸为 220 mm × 110 mm。

3.3　自动钻铆制孔试验方案

结合自动钻铆机高速钻削性能,选取各个因素水平数为 3,采用一一对应的试验方法。

表 1　制孔试验因素及水平规划

水平	因素	
	主轴转速 /rpm	进给速度 /ipm
1	11 000	65
2	12 000	75
3	13 000	85

3.4　自动钻铆铆接试验方案

选取 9 因素 4 水平正交试验表,留 2 空列,总试验次数为 32 次,铆接因素及水平如表 2 所示。

表 2　铆接试验因素及水平规划

水平	因素						
	A/ (lbs)	B/ (psi)	C/ (lbs)	D/ (lbs)	E/s	F/s	G/ (in)
1	7 000	20	200	800	0.025	0.25	0.1
2	9 000	30	300	1000	0.05	0.05	0.15
3	11 000	40	400	1 200	0.075	0.075	0.2
4	13 000	50	500	1 400	0.1	0.1	0.25

表中: A——压铆力、B——压力脚回缩压力、C——夹紧解除力、D——双向挤压夹紧力、E——镦铆过程时间、F——镦铆停留时间、G——上铆头空腔; 单位 lbs 为重量单位: 磅; psi 为压力单位: 磅/平方英寸; in 为长度单位: 英寸。

4　无头铆钉自动钻铆试验结果分析

4.1　动钻铆制孔试验结果分析

制孔试验完成后,需将 2 块试片分开后进行测量,图 5 为制孔试验完成后上下 2 层试片,左侧图为带埋头窝部分。

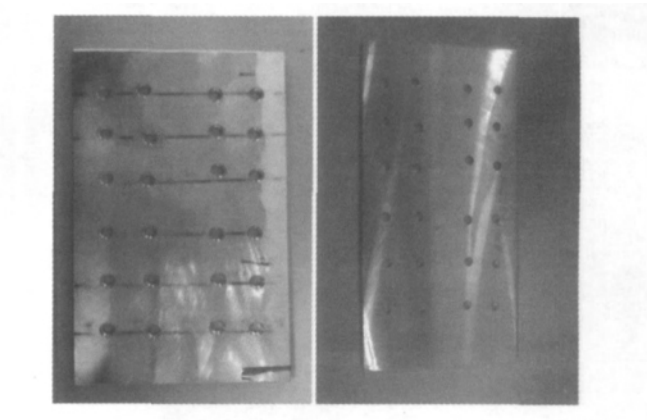


图 5　制孔试验件

根据无头铆钉制该孔标准,钉孔间隙为 0.15 ± 0.05 mm,故理论合理孔径值为: 6.50 ± 0.05 mm; 毛刺高度应小于 0.127 mm。制孔试验数据及处理如表 3 所示。

通过数据处理结果,得出以下结论:

1) 影响因素的主次顺序。从表中数据计算结果可知: 进给速率和主轴转速对试验结果都有影响。影响孔径的主次顺序: 进给速率 > 主轴转速; 影响毛刺高度的主次顺序同样是进给速率 > 主轴转速。

2) 最优组合。铆钉孔孔径最接近 6.50 mm 的组合为 A_2B_3,毛刺高度最低的水平组合为 A_3B_1。

无头铆钉铆接为干涉配合连接,其干涉量值严重影响着铆接件的连接强度和疲劳寿命,故应放在第 1 指标考虑,而铆钉孔孔径直接影响着干涉量的形成,因此,在制孔试验时应着重考虑孔径指标,因此在此处选择最优参数组合为 A_2B_3,即: 主轴转速为 12 000 rpm,进给速率为 85 ipm。

表3 制孔试验数据及处理

编号	水平组合	试验条件 A 主轴转速 rpm	试验条件 B 进给速度 ipm	孔径均值 mm	毛刺最大高度 μm
1	A_3B_3	13 000	85	6.503	65
2	A_1B_3	11 000	85	6.500	89
3	A_2B_2	12000	75	6.502	58
4	A_2B_1	12 000	65	6.494	52
5	A_3B_2	13 000	75	6.488	60
6	A_2B_3	12 000	85	6.487	77
7	A_3B_1	13 000	65	6.479	55
8	A_1B_2	11 000	75	6.478	76
9	A_1B_1	11 000	65	6.475	68
对于孔径指标的极差分析	K_1	19.453	19.448		
	K_2	19.482	19.468		
	K_3	19.470	19.489		
	k_1	6.484	6.483		
	k_2	6.494	6.489		
	k_3	6.490	6.496		
	极差	0.01	0.013		
	主次	B > A			
	优化	A_2	B_3		
对于毛刺指标的极差分析	K_1	233	175		
	K_2	187	194		
	K_3	180	231		
	k_1	77.667	58.333		
	k_2	62.333	64.667		
	k_3	60.000	77.000		
	极差	17.667	18.667		
	主次	B > A			
	优化	A_3	B_1		

4.2 自动钻铆铆接试验结果分析

制孔试验完成后，得到了最优的制孔工艺参数组合，此时，认为在此参数组合下的铆钉孔已符合铆接孔要求，继而在此组制孔参数基础上进行铆接试验。

铆接试验铆钉如图6所示，要测量铆接后的铆钉尺寸，需破坏试件并取出铆钉，其中，铆接干涉量可由下式表示:

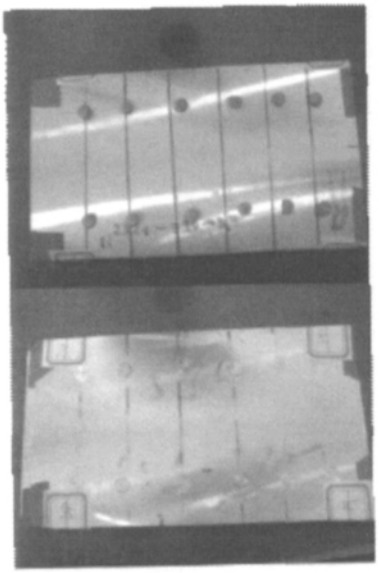


图6 铆接试件

$$干涉量 = D - d$$

式中，D 为铆接后钉杆直径，d 为通孔孔径6.50 mm;

根据西飞公司标准，牌号为 NAS1321AD8E13 的铆钉，干涉量合格范围为: 0.089 ~ 0.170 mm。

铆接试验数据及处理如表4所示。

表4 铆接试验数据处理

编号	水平组合	试验条件 A 压铆力 lbs	试验条件 B 压力脚回缩压力 psi	试验条件 C 夹紧解除力 lbs	试验条件 D 双向挤压夹紧力 lbs	试验条件 E 镦铆过程时间 s	试验条件 F 镦铆停留时间 s	试验条件 G 上铆头空腔 in	干涉量 /mm
1	$A_1B_2C_4D_4E_4F_3G_1$	7 000	30	500	1 400	0.100	0.075	0.10	0.03
2	$A_2B_1C_3D_2E_3F_1G_1$	9 000	40	400	1 000	0.075	0.025	0.10	0.04
3	$A_4B_2C_1D_2E_1F_3G_2$	13 000	30	200	1 000	0.025	0.075	0.25	0.15
4	$A_2B_2C_1D_3E_2F_1G_2$	9 000	30	200	1 200	0.075	0.025	0.15	0.07
5	$A_1B_4C_1D_3E_2F_2G_3$	7 000	50	200	1 200	0.050	0.050	0.20	0.04
6	$A_1B_1C_3D_2E_2F_2G_4$	7 000	20	400	1 000	0.050	0.050	0.25	0.02
7	$A_4B_4C_2D_2E_4F_1G_3$	13 000	50	300	1 000	0.100	0.025	0.20	0.10
8	$A_3B_4C_1D_2E_4F_4G_1$	11 000	50	200	1 000	0.100	0.100	0.10	0.11
9	$A_4B_2C_3D_1E_2F_4G_1$	13 000	30	400	800	0.050	0.100	0.10	0.11

续表 4

编号	水平组合	试验条件							干涉量/mm
		A 压铆力 lbs	B 压力脚回缩压力 psi	C 夹紧解除力 lbs	D 双向挤压夹紧力 lbs	E 镦铆过程时间 s	F 镦铆停留时间 s	G 上铆头空腔 in	
10	$A_3B_1C_1D_4E_3F_3G_4$	11 000	20	200	1 400	0.075	0.075	0.20	0.08
11	$A_2B_1C_2D_1E_1F_4G_4$	9 000	20	300	800	0.025	0.100	0.20	0.05
12	$A_3B_3C_4D_3E_1F_2G_1$	11 000	40	500	1 200	0.025	0.050	0.10	0.10
13	$A_2B_3C_1D_1E_4F_2G_4$	9 000	40	200	800	0.100	0.050	0.25	0.09
14	$A_1B_2C_2D_3E_3F_4G_4$	7 000	30	300	1 200	0.075	0.100	0.25	0.03
15	$A_2B_1C_4D_2E_2F_3G_2$	9 000	20	500	1 000	0.050	0.075	0.15	0.05
16	$A_2B_2C_3D_3E_4F_2G_3$	9 000	30	400	1 400	0.100	0.050	0.20	0.06
17	$A_2B_4C_4D_2E_1F_4G_4$	9 000	50	500	1 400	0.025	0.100	0.25	0.07
18	$A_1B_3C_4D_2E_3F_4G_3$	7 000	40	500	1 000	0.075	0.100	0.20	0.01
19	$A_3B_1C_3D_3E_4F_4G_2$	11 000	20	400	1 200	0.100	0.100	0.15	0.09
20	$A_3B_2C_4D_1E_2F_1G_4$	11 000	30	500	800	0.050	0.025	0.20	0.09
21	$A_1B_4C_3D_4E_1F_1G_2$	7 000	50	400	1 400	0.025	0.025	0.15	0.03
22	$A_3B_2C_2D_2E_1F_2G_2$	11 000	30	300	1 000	0.025	0.050	0.15	0.13
23	$A_1B_3C_2D_1E_4F_3G_2$	7 000	40	300	800	0.100	0.075	0.15	0.00
24	$A_3B_4C_3D_1E_3F_3G_4$	11 000	50	400	800	0.075	0.075	0.25	0.09
25	$A_4B_1C_2D_4E_3F_2G_1$	13 000	20	300	1 400	0.075	0.050	0.10	0.18
26	$A_4B_1C_4D_3E_4F_1G_4$	13 000	20	500	1 200	0.100	0.025	0.25	0.20
27	$A_4B_3C_3D_3E_1F_3G_3$	13 000	40	400	1 200	0.025	0.075	0.20	0.20
28	$A_2B_4C_2D_3E_3F_3G_1$	9 000	50	300	1 200	0.050	0.075	0.10	0.06
29	$A_1B_1C_1D_1E_1F_1G_1$	7 000	20	200	800	0.025	0.025	0.10	0.01
30	$A_3B_3C_2D_4E_3F_1G_4$	11 000	40	300	1 400	0.050	0.025	0.25	0.11
31	$A_4B_4C_4D_1E_3F_2G_2$	13 000	50	500	800	0.075	0.050	0.15	0.14
32	$A_4B_3C_1D_4E_2F_1G_2$	13 000	40	200	1 400	0.050	0.100	0.15	0.17
K_1		0.130 0	0.373 0	0.382 0	0.360 0	0.420 0	0.456 0	0.388 0	
K_2		0.298 0	0.403 0	0.388 0	0.348 0	0.440 0	0.390 0	0.349 0	
K_3		0.474 0	0.423 0	0.360 0	0.458 0	0.380 0	0.383 0	0.378 0	
K_4		0.685 0	0.393 0	0.492 0	0.448 0	0.408 0	0.383 0	0.358 0	
k_1		0.032 5	0.093 3	0.095 5	0.090 0	0.105 0	0.114 0	0.097 0	
k_2		0.074 5	0.100 8	0.097 0	0.087 0	0.110 0	0.097 5	0.087 3	
k_3		0.118 5	0.105 8	0.090 0	0.114 5	0.095 0	0.095 7	0.094 5	
k_4		0.171 3	0.098 3	0.123 0	0.112 0	0.102 0	0.095 7	0.089 5	
	极差	0.138 8	0.012 5	0.033 0	0.027 5	0.010 0	0.018 3	0.009 8	
	主次顺序	A > C > D > F > B > E > G							
	优化水平	A_3	B_3	C_4	D_3	E_2	F_2	G_1	

通过上述分析可以得出:

1) **影响因素的主次顺序。从表中数据计算结果可知:** 7 **个参数对试验结果干涉量均有不同程度的影响。影响孔径的主次顺序: 压铆力 > 夹紧解除力 > 双向挤压夹紧力 > 镦铆停留时间 > 压力脚回缩压力 > 镦铆过程时间 > 上铆头空腔。**

2) **最优组合。铆钉孔孔径最接近要求干涉量中间值的组合为** $A_3B_3C_4D_3E_2F_2G_1$**,即: 压铆力为** 11 000 lbs(4 990 kg) **,压力脚回缩压力** 40 psi(2.76 MPa) **,夹紧解除力为** 500 lbs(227 kg) **,双向挤压夹紧力为** 1 200 lbs(544 kg) **,镦铆过程时间为** 0.05 s**,镦铆停留时间为** 0.025 s**,上铆头空腔为** 0.10 in (2.54 mm) 。

5　结　论

1) **依据自动钻铆的工艺过程及原理,分析其各个工艺参数的主要功能,得到了主轴转速和进给速**

率是影响制孔质量的主要参数，压铆力、夹紧解除力、压力脚回缩压力、双向挤压夹紧力、镦铆过程时间、镦铆停留时间和上铆头空腔为影响铆接质量的工艺参数。

2) 以孔径和毛刺为指标设计了无头铆钉的制孔试验，得到对应编号为 NAS1321AD8E13 无头铆钉制孔的最优工艺参数组合，主轴转速：12 000 rpm，进给速率：85 ipm。

3) 用正交试验的方法设计了铆接试验，通过极差分析法分析了各参数对铆接的影响。结果表明，压铆力是影响无头铆钉干涉配合的主要参数，并得到了该类型铆钉的最优工艺参数组合。

参考文献：

[1] 范玉青. 现代飞机制造技术. 北京：北京航空航天大学出版社，2001
Fan Yuqing. Modern Aircraft Manufacturing Technology. Beijing: Press of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001 (in Chinese)

[2] 王云勃，张关康. 飞机装配工艺学. 北京：国防工业出版社，1990
Wang Yunbo, Zhang Guankang. Aircraft Assembly Technology. Beijing: National Defense Industry Press, 1990 (in Chinese)

[3] 蒋 怡. 飞机铆接装配工艺手册. 北京：国防工业出版社，1984
Jiang Yi. Aircraft Riveted Assembly Process Manual. Beijing: National Defense Industry Press, 1984 (in Chinese)

[4] 费 军. 自动钻铆技术在波音 737 尾段项目中的应用. 航空制造技术，2007，9：85-89
Fei Jun. Application of Automatic Drilling/Riveting Technology in Boeing 737 Tail Project. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007, 9: 85-89 (in Chinese)

[5] 冯晓旻，谢兰生. 铆接变形的有限元分析. 机械制造与自动化，2009，2：62-63
Feng Xiaomin, Xie Lansheng. Rivet Deformation and Finite Element Analysis. Machine Building & Automation, 2009, 2: 62-63 (in Chinese)

[6] Blanchot V, Daidie A. Study and Numerical Characterisation of a Riveting Process. International Journal of Material Forming. 2008, 1: 1275-1278

Semi-Empirical Research on Automatic Drilling and Riveting Process of Headless Rivet

Liu Lianxi[1], Li Xining[1], Wang Zhongqi[1], Li Weiping[2]

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi´an 710072, China
2. Xi´an Aircraft Company, Yanliang 710089, China)

Abstract: The automatic drilling and riveting technology is widely used to improve assembly quality and service life in the aircraft assembly industry, and the drilling and riveting parameters are the key factors which affect the efficiency and quality of assembly. Sections 1 through 4 of the full paper explain our semi-empirical research mentioned in the title, which we believe provides some theoretical basis for P. R. C. aircraft assembly engineers. Their core consists of: (1) the deformation of headless rivet was analyzed using finite element method; (2) the process parameters of the automatic drilling and riveting were distilled; (3) an orthogonal experimental method with range analysis was used on the riveting of headless rivets to find the reliable parameter values. Based on the experiments and theoretical analysis in sections 1 through 4, section 5 presents three preliminary conclusions which provide some theoretical basis for the headless rivet application in P. R. C aircraft assembly.

Key words: aircraft, assembly, drilling, efficiency, experiments, finite element method, plastic deformation, quality control, reliability, riveting; automatic drilling and riveting, headless rivet, interference fit, orthogonal experiment