

# 铆接工艺参数对孔边细观结构影响规律研究

王仲奇,许敏恒,赵海涛,常正平,康永刚

(西北工业大学机电学院,西安 710072)

[摘要] 铆接结构的疲劳寿命在很大程度上取决于孔边的微裂纹及其扩展,而铆接工艺参数对微裂纹的萌生与扩展影响显著。从细观角度分析铆接工艺参数对孔边细观结构的影响,探索铆接工艺参数对孔边细观结构的影响规律。采用试验方法,构建孔边细观结构表征参数,选择壁板与墩头和钉杆接触处圆角半径(MR)、孔边塑性层厚度(Md、MD)为表征的3个参数,分别研究了铆接工艺参数压铆力(Riveting Force)、铆接过程时间(Riveting Process Time)、上铆头空腔(Upper Riveting Cavity)对孔边细观结构表征参数的影响规律。通过铆接工艺参数对孔边细观结构影响规律的研究,在装配连接时通过控制工艺参数实现对细观结构的改善,进而提高铆接结构的疲劳性能。

关键词: 铆接工艺参数; 细观结构; 表征参数; 试验研究; 疲劳寿命

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.20.040



王仲奇

教授、博士生导师,主要研究飞机数字化协调技术、装配变形预测与准确度保障技术、数字化装配工艺与装备以及智能装配等技术,先后主持国家863计划、科技支撑计划、陕西省统筹创新基金、国防基础科研、总装预研以及型号攻关等项目。

飞机使用过程中发生的强度问题有80%以上由疲劳破坏引起<sup>[1]</sup>,75%~80%的飞机疲劳破坏发生在结构的连接部位<sup>[2]</sup>。铆接结构因其稳定可靠而成为飞机结构中应用最广泛的连接方式,提高铆接结构的疲劳性能对保障飞机的飞行寿命具有重要的意义。研究表明,干涉配合能大幅度地提高铆接结构的疲劳寿命<sup>[3]</sup>,在飞机装配过程中,通过改变铆接工艺参数来控制干涉配合的干涉量、干涉均匀性、内应力分布和孔边细观结构,以提高铆接结构的抗疲劳性能。

近年来,国内外学者在铆接方面做了大量研究,目前针对铆接工艺参数与铆接结构疲劳性能关系的研究主要从两方面展开:一是直接研究铆接工艺参数和铆接结构疲劳寿命,如Fuiore等<sup>[4]</sup>通过试验分析了不同铆钉直径和压铆力对飞机结构疲劳寿命的影响,得到了裂纹萌生的最低

Kcycles值; Skorupa<sup>[5]</sup>、Cheraghi<sup>[6]</sup>等通过试验和数值方法研究了铆钉类型和被连接件材料对疲劳寿命的影响;陈福玉等<sup>[7]</sup>利用Workbench软件对铆接件疲劳寿命进行了仿真分析。二是通过中间变量,如干涉量、残余应力、铆头尺寸来间接表征铆接工艺参数与铆接结构疲劳寿命的关系,如Rans等<sup>[8]</sup>研究了在铆接过程中因干涉配合形成的残余应力场对铆接疲劳寿命的影响;Fox等<sup>[9]</sup>测量了电磁铆接后的应力,发现孔周围有峰值达到400MPa的环向压应力,在远离孔的地方却被拉伸应力削减到了150MPa;Mu等<sup>[10]</sup>分析了2117-T4无头铆钉的铆接过程,并构建了干涉量与铆接工艺参数的理论模型;田冬凤等<sup>[11]</sup>结合数值模拟和试验方法,研究了单钉铆接结构的抗疲劳性,提出一种铆头高度控制的区间估计方法。

上述两种途径能够在宏观上得到一定的影响规律,在一定程度上解释了干涉配合提高疲劳寿命的机理。但随着被连接件和铆钉材料、种类的增多,传统分析方法存在一定的局限性,在工艺参数和铆接结构固定条件下得到的规律不能得到更广泛的应用。现有文献大多研究孔边微裂纹与疲劳寿命之间的关系,但对铆接工艺参数与细观结构(包括微裂纹)的关系研究并不充分。本文主要通过优化铆接工艺参数来改善细观结构,探索铆接工艺参数对细观结构和铆接结构疲劳寿命的影响。

### 铆接工艺参数分析

以无头铆钉压铆过程为例,自动钻铆工艺流程主要包括:定位、夹紧、钻孔、镗窝、送钉、铆接、铣平和松开,如图1所示<sup>[12]</sup>。

考虑自动钻铆工艺实际过程,去掉不可控的工艺参数,不考虑铆接过程中保持定值的参数,排除可以由其他工艺参数确定的非独立变量,可得出对铆接质量影响较大的可控工艺参数有:压铆力、铆接过程时间、铆接停留时间与上铆头空腔<sup>[13]</sup>。

(1) 压铆力(Riveting Force,

RF)。RF的大小直接影响着铆钉的铆头高度、壁板的平整度、干涉量的大小以及铆接结构孔壁细观质量,进而对结构件的疲劳寿命产生影响。

(2) 铆接过程时间(Riveting Process Time, RPT)。RPT指上下铆头挤压铆钉的时间,RPT决定铆接过程的加载速率。RPT过短会使铆钉中产生明显的应变集中带,影响铆钉材料的塑性流动;RPT过长会导致铆钉材料产生明显的冷作硬化,影响塑性性能,同时降低自动钻铆系统工作效率。

(3) 铆接停留时间(Riveting Stay Time, RST)。RST指挤压铆钉完成后,上下铆头停留在原位的时间。当压铆力卸载后,由于壁板对铆钉存在轴向拉力和径向压力,表现为板孔挤压铆钉,使铆钉发生弹性变形。RST对铆钉的回弹有重要影响,从而影响铆钉铆头对周围板料的分布压力,改变铆钉周围的应力场分布。

(4) 上铆头空腔(Upper Riveting Cavity, URC)。URC是指铆接件镗窝一侧的铆钉上端面距离铆接件表面的距离。由于在一次铆接过程中,无头铆钉的长度是固定的,故上铆头

空腔决定了形成铆头一端的铆钉伸出量,最终对铆头的大小造成影响,而铆头的大小对壁板的变形和应力有较大的影响。

### 铆钉连接处细观结构表征参数

#### 1 铆钉孔周围细观结构分析

在工程实际当中,自动钻铆机常用的钉为平锥头铆钉和无头铆钉,可以初步确定铆接结构当中细观结构变化较大的区域共8处,依次标记为A、B、C、D、E、F、G、H,如图2所示。图2(a)为平锥头铆钉铆接结构整体示意图,图2(b)为无头铆钉铆接结构整体示意图,其中标注的A~H区域即为初步确定的铆接结构细观结构变形较大区域。它们是铆接结构残余应力最大的区域,或者是壁板材料经过材料流动引起的变形最大

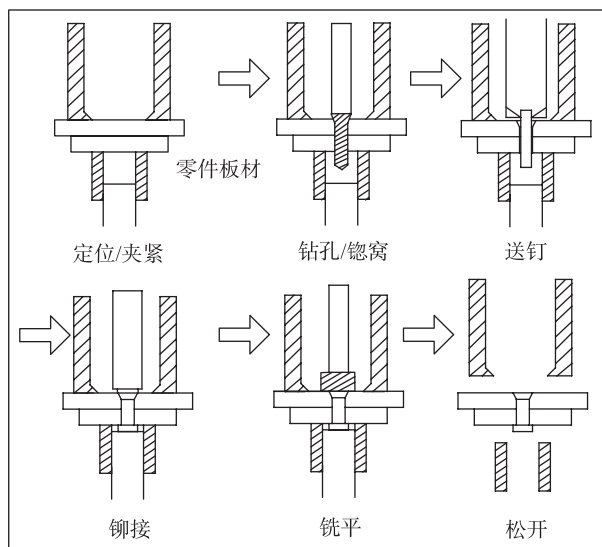
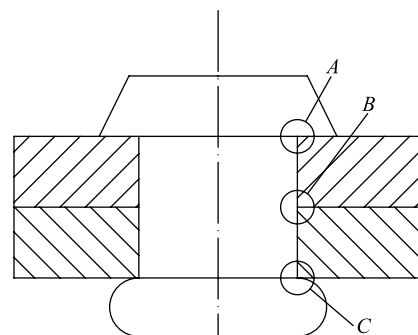
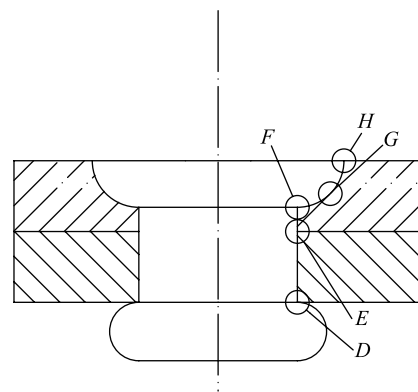


图1 自动钻铆工艺流程

Fig.1 Process flow of automatic drilling and riveting



(a) 平锥头铆钉铆接结构



(b) 无头铆钉铆接结构

图2 细观结构变形较大区域

Fig.2 Large deformation region meso-structure

的区域,或者是在典型疲劳载荷情况下产生疲劳微裂纹的初始位置的区域,有学者针对不同材料进行了不同干涉量的孔挤压强化研究<sup>[14-19]</sup>,结果表明塑性变形层的宽度与孔结构的疲劳寿命有密切的关系。因此,这8处区域需重点分析。

通过金相显微分析和电子显微镜观测,得到无头铆钉和平锥头铆钉铆接结构钉头部分金相组织结构和SEM图像,如图3所示。图3中的(a)~(h)分别为图2中8处区域的显微放大图。

(1)对于A区域,由于倒角的存在,壁板与钉杆接触区域主要为铆钉钉杆的变形,壁板并未发生明显的变形,晶粒组织(图4)也未产生明显的变化,所以不考虑。

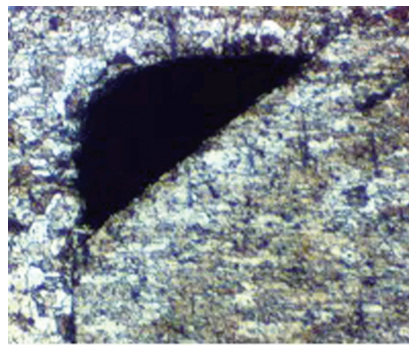
(2)B、E两处结构类似,以E区域为例,接触区域为上壁板、下壁板与铆钉钉杆3部分共同结合处,如图5(a)所示。

对E区域进一步放大,如图5(b)所示,可以看到孔壁受挤压处存在和其他组织明显不同的条形带,细观结构发生了较为明显的变化,因此E区域塑形变形层的厚度与疲劳寿命关系密切,选为细观结构表征参数。

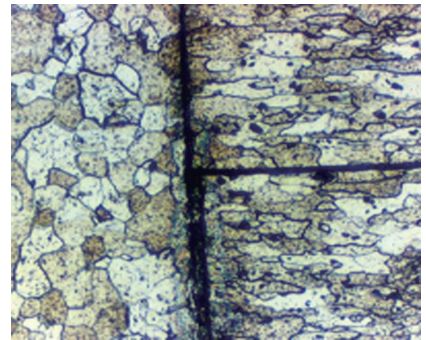
(3)C和D处均为铆头与壁板孔壁接触的区域,受力情况较为类似,如图6所示。

图6中可看到区域I中的组织结构发生了较大的扭曲,晶粒变形严重;区域II出现了与E区一样的带状结构,组织发生明显变化。因此将C、D区域定义为危险区域。此处的塑形变形层的厚度作为细观结构表征参数。

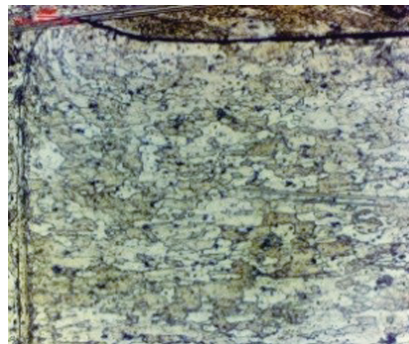
(4)对于F、G、H3个区域,由于壁板孔壁变形较小,金相组织中的变形并不明显,因此采用更为清晰的SEM图像,如图7、图8、图9所示。可知,这3处区域孔壁与铆钉钉杆接触区域的组织变形很小,带状结构亦不明显。这3个区域孔壁材料沿径



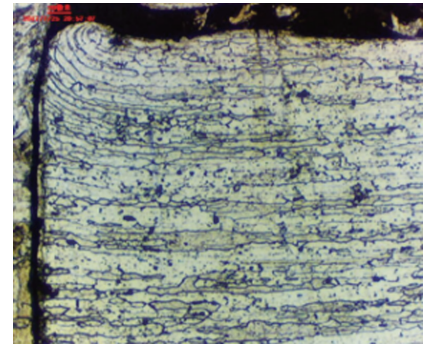
(a) A区域细观结构



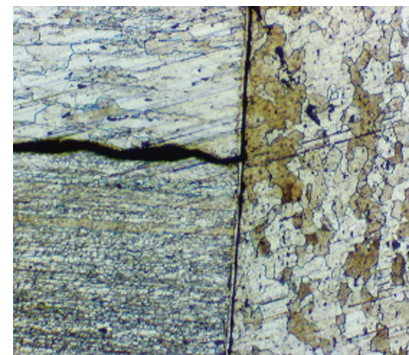
(b) B区域细观结构



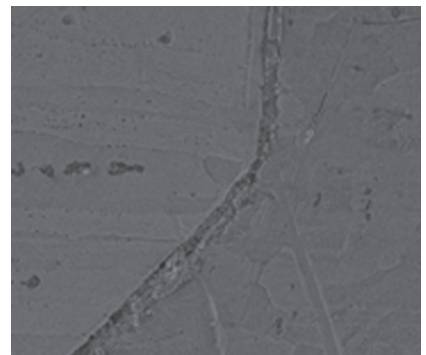
(c) C区域细观结构



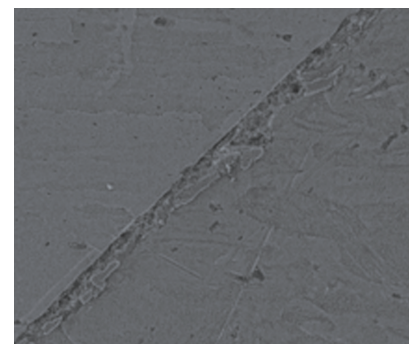
(d) D区域细观结构



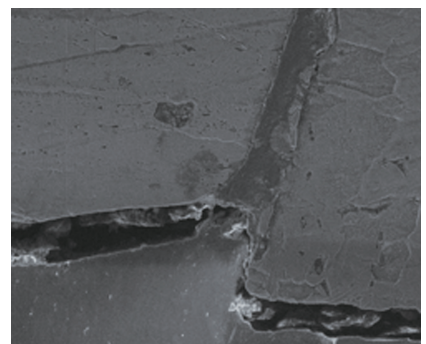
(e) E区域细观结构



(f) F区域细观结构



(g) G区域细观结构



(h) H区域细观结构

图3 铆接结构局部细观组织

Fig.3 Local meso-structure of the riveted structure

向的扩展量较小,即材料变形量较小,不作考虑。

## 2 细观结构表征参数

根据上述分析,铆接结构孔边细观表征参数为 MD、MR、Md。

MD 为 C 区的塑性变形层厚度,如图 10 所示,在固定位置取 8 处,分别命名为 MD<sub>1</sub>~MD<sub>8</sub>,最终的 MD 为

这 8 个值的均值。得到测量值后,由比例尺换算可得到 MD 实际值。

MR 为区域图 6 中 I 区域的圆弧半径。用圆弧拟合晶粒的扭曲程度,如图 11 所示。

Md 为图 2 中 B、E 区域的塑性变形层厚度。以 E 区为例,在上、下壁板各取 5 处,分别定义为 Md<sub>1</sub>~

Md<sub>10</sub>,如图 12 所示,Md 为这 10 个值的均值。

## 试验设计

### 1 试验材料选择

根据工程实际应用,试验选用型号为 NAS1321AD8E13 的无头铆钉和 4mm × 9mm、5mm × 12mm 的平锥头铆钉作为对象。按铆钉和壁板的特征对铆接试验进行分组,共分为 5 组,每组试验的命名规则为铆钉型号英文首字母大写 + 数字编号,即无头铆钉 (Slug Rivet, SR) 组铆接试验,平锥头铆钉 (Cone Head Rivet, CHR) CHR-1~CHR-4 组铆接试验。壁板材料选用铝合金 7055-T7751 和铝合金 7055-T7651;CHR-1~CHR-4 组为平锥头铆钉铆接试验,分别为不同铆钉尺寸的平锥头铆钉与铝合金 7075、2024-T3 壁板组合得到。

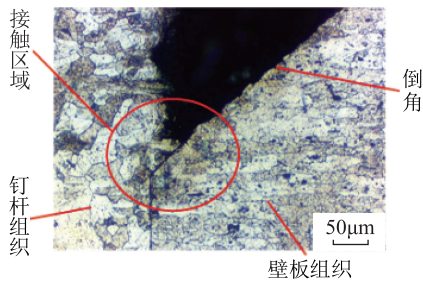
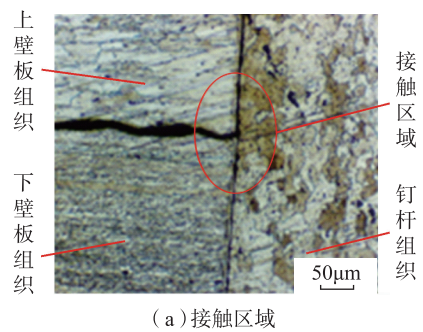
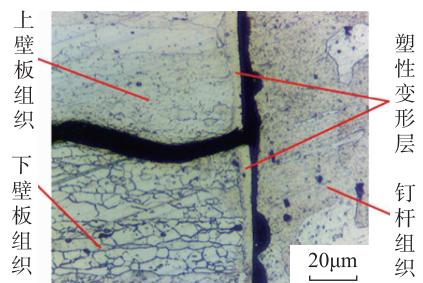


图4 A区域局部细观结构  
Fig.4 Local meso-structure of area A



(a) 接触区域



(b) 塑性变形

图5 E区域细观结构  
Fig.5 Meso-structure of area E

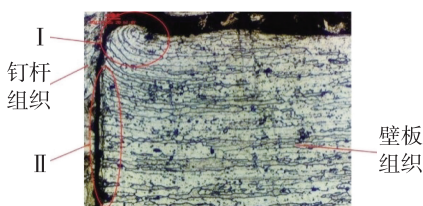


图6 C区域细观结构  
Fig.6 Meso-structure of area C



图7 F区域细观结构  
Fig.7 Meso-structure of area F

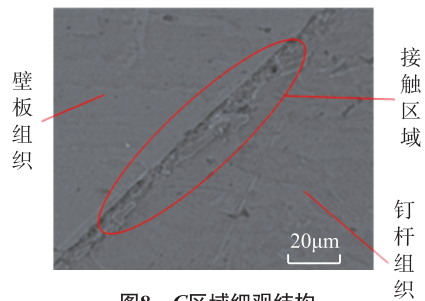


图8 G区域细观结构  
Fig.8 Meso-structure of area G

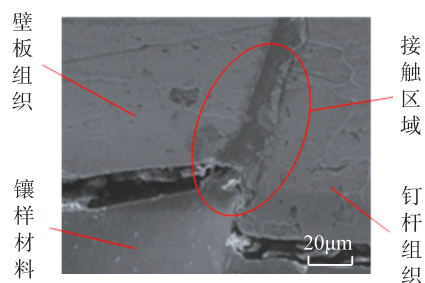


图9 H区域细观结构  
Fig.9 Meso-structure of area H

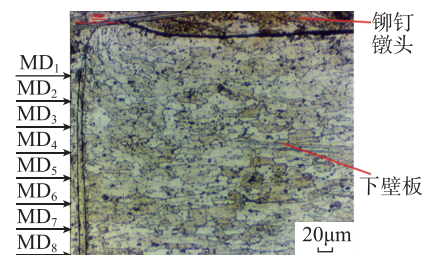


图10 MD的计算方法  
Fig.10 Calculation method of MD

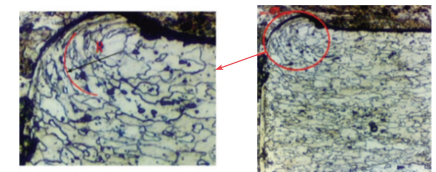
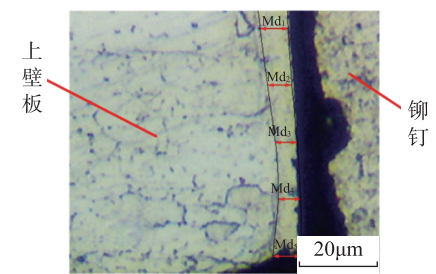
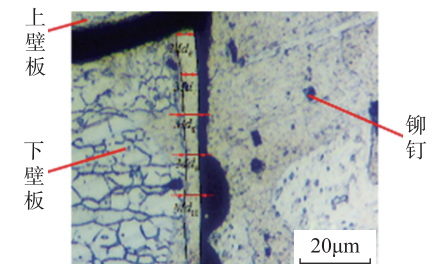


图11 MR的计算方法  
Fig.11 Calculation method of MR



(a) 上壁板



(b) 下壁板

图12 Md的计算方法  
Fig.12 Calculation method of Md

## 2 试验工艺参数

试验选定的铆接工艺参数为：压铆力(RF)、铆接过程时间(RPT)、铆接停留时间(RST)和上铆头空腔(URC)。

## 3 试验详细设计

对本文各组试验的试件进行设计,铆钉间距为 $5d$ ,距试件边界为 $3d$ 。为减小试验误差,每组工艺参数组合下均重复2次,最后对试验结果求均值。

### 3.1 SR组试验设计

铆接试件尺寸参数如表1所示,其中,无头铆钉型号中的8和13表示铆钉在英制标准下的直径和长度,转换为公制标准分别为6.35mm和20.64mm。

本组主要考虑的铆接工艺参数有:RF、RPT、RST和URC,其他铆接工艺参数保持不变,钻孔镗窝深度为3.62mm,钻头转速为10000r/min,钻头进给速度为1905mm/min。

为研究不同铆接工艺参数对孔边细观质量影响的程度,通过极差法分析铆接工艺参数对细观质量影响的重要度。研究铆接工艺参数对孔边细观质量的影响,是在满足宏观铆接质量的基础上对铆接工艺参数做进一步优选,因此本文结合G86自动钻铆机实际生产设置的参数,以常用参数为中心并将单位换算成为公制单位,向两边扩展,根据经验各因素皆平均取4水平,呈等差分布,选取L16(45)正交表,如表2所示。

### 3.2 CHR-1/CHR-2组试验设计

铆接试件尺寸参数如表3所示。

平锥头铆钉铆接试验选定的铆接工艺参数为:RF、RPT和RST3种可控工艺参数,其他参数设置为:钻孔镗窝深度2.51mm,钻头转速8000r/min,进给速度399mm/min。

#### (1) 正交试验设计。

采用与SR组相同的试验设计和方法分析铆接工艺参数对组织影响的重要度。本组根据G2000自动

钻铆机实际生产设置的参数,以常用参数为中心,向两边扩展,各因素取3水平,呈等差分布,选取L9(33)正交表,如表4所示。

#### (2) 单因素试验设计。

为研究不同铆接工艺参数对孔边细观质量的影响规律,进行单因素试验研究。根据正交试验可得出铆接停留时间相对其他因素影响较小,故只考虑其他两种因素对孔边细观质量的影响,每个因素等差均分6水

平,如表5所示。

由于CHR-2组的壁板厚度和CHR-1组相同,均为2mm,因此铆接工艺参数设为一致,试验设计方案与CHR-1组相同。

### 3.3 CHR-3/CHR-4组试验设计

铆接试件尺寸参数如表6所示。

表4 CHR-1组铆接试验因素及水平设计  
Table 4 Experimental design of riveting group CHR-1

水平	因素		
	RF/N	RPT/s	RST/s
水平 1	18620	0.1	0.05
水平 2	19600	0.15	0.1
水平 3	20580	0.2	0.15

表5 CHR-1组单因素试验  
Table 5 Single factor experiment of group CHR-1

序号	RF/N	RPT/s	RST/s
1	17640	0.2	0.05
2	18620	0.2	0.05
3	19600	0.2	0.05
4	20580	0.2	0.05
5	21560	0.2	0.05
6	22540	0.2	0.05
7	19600	0.15	0.05
8	19600	0.175	0.05
9	19600	0.200	0.05
10	19600	0.225	0.05
11	19600	0.250	0.05
12	19600	0.275	0.05

表6 CHR-3组铆接试件尺寸参数  
Table 6 Riveting specimen size parameters of group CHR-3

几何尺寸定义	数值/mm
铆钉直径	5
铆钉长度	12
铆接孔直径	5.10
铆接件长度	475
铆接件宽度	30
铆接件上板厚度	3
铆接件下板厚度	3

表1 SR组铆接试件尺寸参数  
Table 1 Riveting specimen size parameters of group SR

几何尺寸定义	数值/mm
铆钉直径	6.35
铆钉长度	20.64
铆接孔直径	6.5
铆接件长度	222.25
铆接件宽度	127
铆接件上板厚度	4.5
铆接件下板厚度	4.5

表2 SR组正交试验因素及水平设计  
Table 2 Orthogonal experimental design of group SR

水平	因素			
	RF/N	RPT/s	RST/s	URC/mm
水平 1	46675	0.05	0.05	4.32
水平 2	48902	0.1	0.1	4.57
水平 3	51117	0.15	0.15	4.83
水平 4	53341	0.2	0.2	5.08

表3 CHR-1组铆接试件尺寸参数  
Table 3 Riveting specimen size parameters of group CHR-1

几何尺寸定义	数值/mm
铆钉直径	4
铆钉长度	9
铆接孔直径	4.08
铆接件长度	380
铆接件宽度	24
铆接件上板厚度	2
铆接件下板厚度	2

平锥头铆钉铆接试验选定的铆接工艺参数为: RF、RPT 和 RST, 其他参数为: 钻孔铤窝深度 2.51mm, 钻头转速 10000r/min, 钻头进给速度 505mm/min。

(1) 正交试验设计。

各因素取 3 水平, 选取 L9 (3<sup>3</sup>) 正交表, 呈等差分布, 如表 7 所示。

(2) 单因素试验设计。

进行单因素试验研究, 根据正交试验可得出铆接停留时间相对其他因素影响较小, 故只考虑其他两种因素对孔边细观质量的影响, 每个因素等差均分 6 水平, 如表 8 所示。

CHR-4 组试验由于蒙皮、长桁厚度和 CHR-3 组试验相同, 均为

表7 CHR-3组铆接试验因素及水平设计  
Table 7 Experimental design of riveting group CHR-3

水平	因素		
	RF/N	RPT/s	RST/s
水平 1	27440	0.05	0.02
水平 2	28910	0.075	0.03
水平 3	30380	0.1	0.04

表8 CHR-3组单因素试验  
Table 8 Single factor experiment of group CHR-3

序号	RF/N	RPT/s	RST/s
1	27440	0.1	0.03
2	28910	0.1	0.03
3	30380	0.1	0.03
4	31850	0.1	0.03
5	33320	0.1	0.03
6	34790	0.1	0.03
7	28910	0.05	0.03
8	28910	0.08	0.03
9	28910	0.11	0.03
10	28910	0.14	0.03
11	28910	0.17	0.03
12	28910	0.20	0.03

3mm, 因此铆接工艺参数设为一致。

## 铆接工艺参数对孔边细观结构的影响

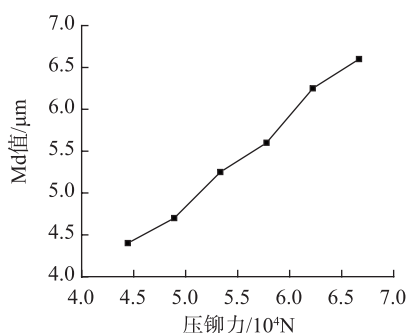
### 1 RF对孔边细观结构的影响

RF 的大小是铆接结构受力的主要来源, 对铆接连接件的铆头高度、铆接板的平整度、铆钉与铆钉孔的干涉量的大小以及铆接结构孔壁细观结构都具有很大的影响。本文分别研究 RF 对 Md、MD、MR 的影响。

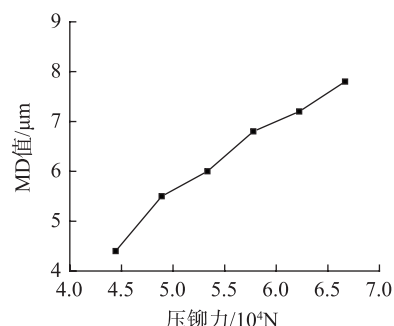
RF 对 Md 的影响规律如图 13 所示, 纵坐标 Md 范围最小值为 2 $\mu$ m, 最大值为 7 $\mu$ m。可以看出, 在

试验数据范围内, 两种铆钉结构的 Md 都随着 RF 的增大而增大。因为在铆接过程中, 压铆力会通过铆钉的径向微粗传递到壁板孔壁, 间接作用于孔壁材料。在 Md 所表示的区域, 当 RF 增大时, 铆钉微粗程度会加剧, 钉杆对壁板孔壁挤压力增大, 进而引起 Md 的增大。

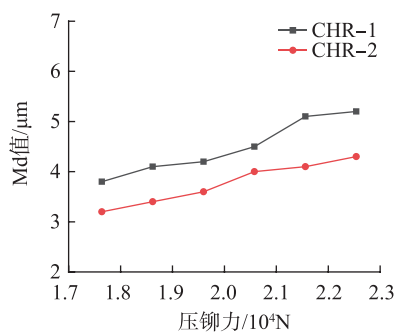
RF 对 MD 的影响规律如图 14 所示, 纵坐标 MD 的范围取相同的值: 最小值为 4 $\mu$ m, 最大值为 9 $\mu$ m。可以看出, 在试验数据范围内, 两种铆钉的 MD 都随着 RF 的增大而增大。因为在铆接过程中, RF 增大会



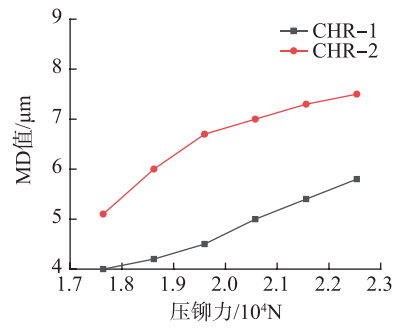
(a) SR 组



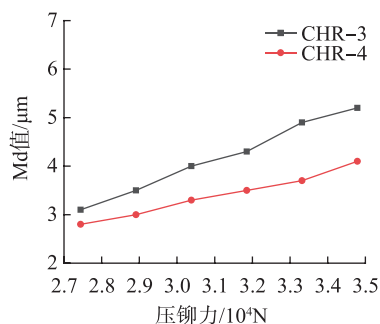
(a) SR 组



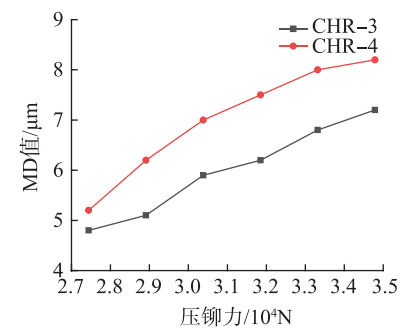
(b) CHR-1、CHR-2 组



(b) CHR-1、CHR-2 组



(c) CHR-3、CHR-4 组



(c) CHR-3、CHR-4 组

图13 RF对Md的影响规律

Fig.13 Effect of riveting force on Md

图14 RF对MD的影响规律

Fig.14 Effect of riveting force on MD

导致铆头对壁板孔壁挤压力增大, MD 所表示的区域的壁板材料变形加剧, 孔壁表层材料滑移带增多, 位错密度增大, 塑性变形层厚度增大, 即 MD 增大。另外, RF 相同时 MD 比 Md 大, 因为 MD 所在区域是直接 与铆头接触的区域, 变形程度更大, 而 Md 所在区域的受力主要来自钉杆的传递施力, 钉杆膨胀变形的程度 较铆头小得多。

RF 对 MR 的影响规律如图 15 所示, 纵坐标 MR 的范围都取相同的值: 最小值为  $15\mu\text{m}$ , 最大值为  $65\mu\text{m}$ 。可以看出, 在试验数据范围内, 两种铆接结构的 MR 都随着 RF 的增大而减小。因为在铆接过程中, RF 会导致 MR 所在区域的晶粒组织 扭曲, 随着 RF 的增大, 晶粒扭曲程度 加剧, 圆弧半径会减小, 即 MR 减小。

## 2 RPT对孔边细观结构的影响

墩铆过程时间(RPT)对Md的

影响规律如图 16 所示。纵坐标 Md 范围最小值为  $2\mu\text{m}$ , 最大值为  $7\mu\text{m}$ 。可以看出, 在试验数据范围内, 两种 铆钉结构的 Md 都随着 RPT 的增 大而增大。在 Md 所在区域的塑性 变形层主要是在钉杆的径向挤压和 钉杆材料的轴向流动共同作用下产 生的, 当 RPT 增大时, 钉杆材料的 轴向流动相对更为充分, 进而增加 对壁板孔壁材料的作用时间, 更有 利于壁板材料的位错运动的进行, 因此塑性变形层厚度增大, 即 Md 增大。

RPT 对 MD 的影响规律如图 17 所示。纵坐标 MD 的范围最小值为  $4\mu\text{m}$ , 最大值为  $8\mu\text{m}$ 。可以看出, 在 试验数据范围内, 两种铆钉结构的 MD 都随着 RPT 的增大而减小。在 参数 MD 所表示区域的壁板材料变 形主要是由铆钉铆头的挤压力造成 的, 由于压铆力的施加是从 0 到设定

值, 当压铆力为定值时, 墩铆过程时 间越长, 加载速率则越低, 铆钉铆头 附近的壁板孔壁材料会通过弹性变 形而减少塑性变形, 表现到细观结构 就是 MD 的减小。

RPT 对 MR 的影响规律如图 18 所示。纵坐标 MR 的范围最小 值为  $15\mu\text{m}$ , 最大值为  $65\mu\text{m}$ 。可以 看出, 在试验数据范围内, 两种铆 接结构的 MR 都随着 RPT 的增大 而增大。因为在铆接过程中, RPT 的增大会导致 MR 所表示的区域的 晶粒组织扭曲程度因板料弹性 变形而减弱, 随着 RPT 的增大, MR 增大。

## 3 URC对孔边细观结构的影响

上铆头空腔(URC)指的是铆接 件铆窝一侧铆钉端面距离铆接件表 面的距离。URC 对 Md 的影响规律 如图 19 (a) 所示。可以看出, 在试 验数据范围内, 对于无头铆钉铆接结

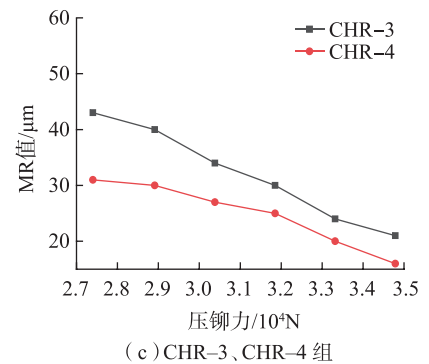
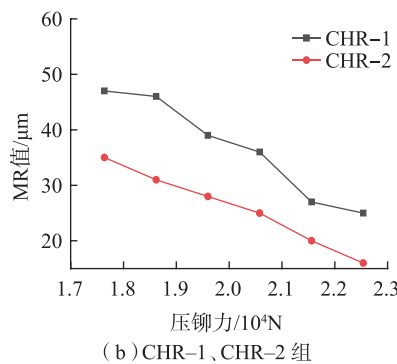
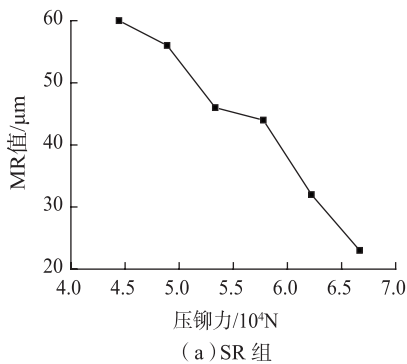


图15 RF对MR的影响规律

Fig.15 Effect of riveting force on MR

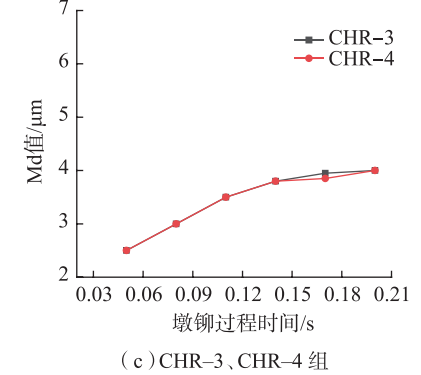
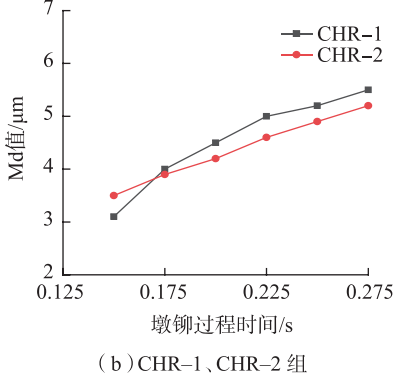
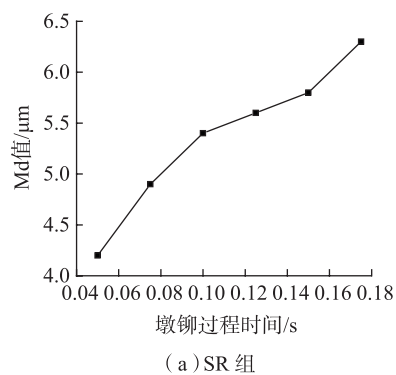


图16 RPT对Md的影响规律

Fig.16 Effect of riveting process time on Md

构,随着 URC 的增大, Md 并没有明显的变化,在一定范围内波动。因为上铆头空腔的大小主要影响的是铆头的大小,对两壁板间区域的影响较小。

URC 对 MD 的影响规律如图 19 (b) 所示。可以看出,在试验数据范围内,对于无头铆钉铆接结构,

MD 随着 URC 的增大而减小。因为在铆接过程中,上铆头空腔的增大会导致铆钉受挤压形成的铆头变小,进而造成铆头对壁板孔壁挤压力减小,在 MD 所表示区域的壁板材料变形减小,塑性变形层厚度减小,即 MD 减小。

URC 对 MR 的影响规律如图

19 (c) 所示。可以看出,在试验数据范围内,对于无头铆钉铆接结构,MR 随着 URC 的增大而增大。这是因为在铆接过程中,URC 增大会导致铆钉受挤压形成的铆头变小,进而造成铆头对壁板孔壁挤压力减小,在 MR 所表示的区域的壁板材料变形减小,所在区域的晶粒组织

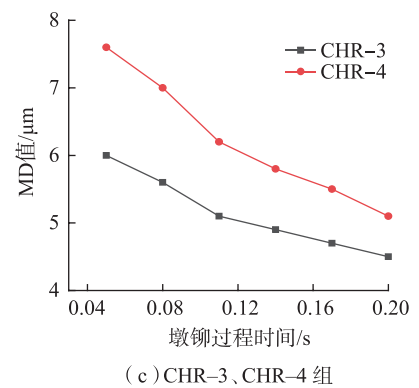
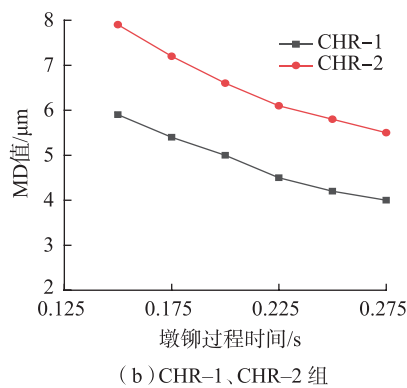
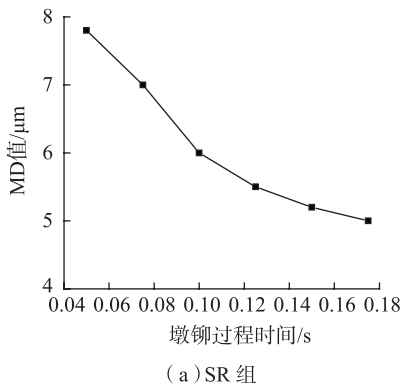


图17 RPT对MD的影响规律

Fig.17 Effect of riveting process time on MD

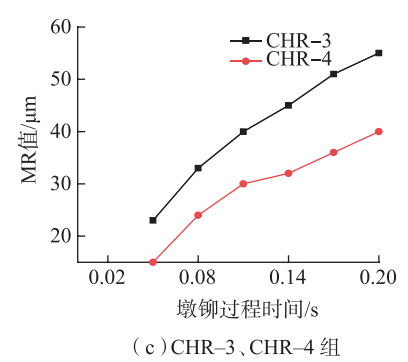
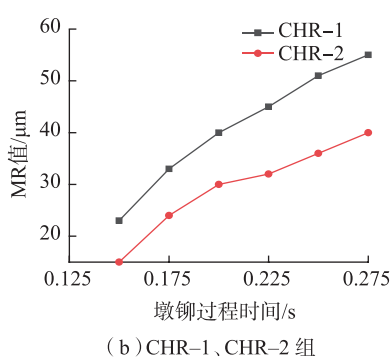
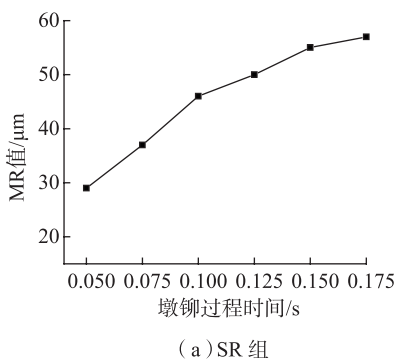


图18 RPT对MR的影响规律

Fig.18 Effect of riveting process time on MR

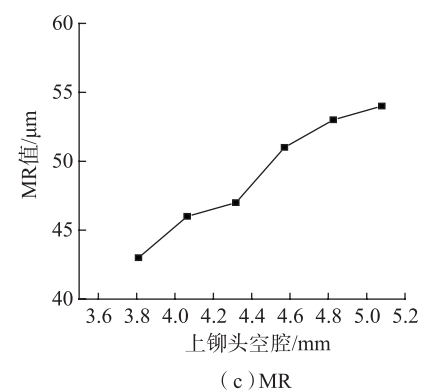
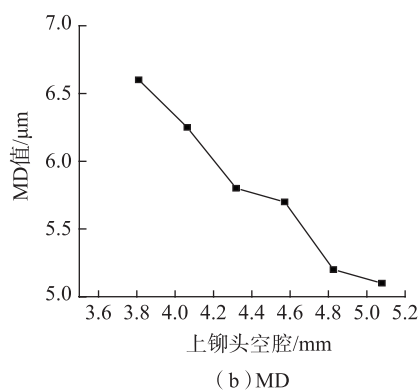
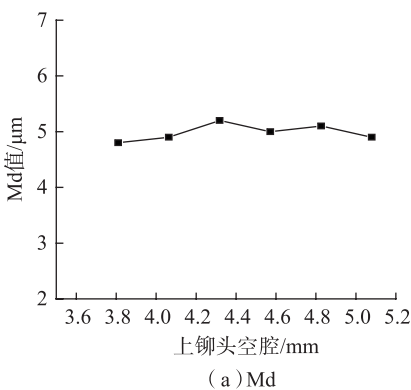


图19 SR组URC对Md、MD和MR的影响规律

Fig.19 Effect of upper riveting cavity on Md, MD and MR of SR group

扭曲程度减弱,弯曲程度减小,则MR增大。

## 结论

本文采用统计学方法以Md、MD、MR 3种参数为孔边细观表征参数,研究了铆接工艺参数对铆钉连接处的细观质量的影响规律。在试验数据范围内,对于无头铆钉铆接结构和平锥头铆钉铆接结构,随着压力的增大,Md增大,MD增大,MR减小;在试验数据范围内,对于无头铆钉铆接结构和平锥头铆钉铆接结构,随着铆接过程时间的增大,Md增大,MD减小,MR增大;在试验数据范围内,对于无头铆钉铆接结构,随着上铆头空腔的增大,Md增大,MD减小,MR增大。

## 参考文献

- [1] 陈福玉. 航空铆接连接件疲劳寿命研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- CHEN Fuyu. Study on fatigue life of aeronautical riveted joints[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011.
- [2] 薛红前. 飞机装配工艺学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2015: 127.
- XUE Hongqian. Aircraft assembly technology [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2015: 127.
- [3] DUPRAT D, CAMPASSENS D, BALZANO M, et al. Fatigue life prediction of interference fit fastener and cold worked holes[J]. International Journal of Fatigue, 1996, 18(8): 515-521.
- [4] FUIOREA I, BARTIS D, NEDELCO R, et al. The rivet parameter influence in fatigue strength[J]. Fatigue of Aircraft Structures, 2009, 1(1): 50-57.
- [5] SKORUPA M, SKORUPA A, MACHNIEWICZ T, et al. Effect of production variables on the fatigue behaviour of riveted lap joints[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(7): 996-1003.
- [6] CHERAGHI S H, KRISHNAN K, BAJRACHARYA B. Effect of variations in the riveting process on the quality of riveted joints[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(11/12): 1144-1156.
- [7] 陈福玉, 朱如鹏, 王宇波, 等. 基于Workbench的铆接连接件疲劳寿命的仿真分析[J]. 机械制造与自动化, 2011, 40(4): 112-115.
- CHEN Fuyu, ZHU Rupeng, WANG Yubo, et al. Fatigue simulation of riveting based on Workbench[J]. Jiangsu Machine Building & Automation, 2011, 40(4): 112-115.
- [8] RANS C, STRAZNICKY P V, ALDERLIESTEN R. Riveting process induced residual stresses around solid rivets in mechanical joints[J]. Journal of Aircraft, 2007, 44(1): 323-329.
- [9] FOX M E, WITHERS P J. Residual stresses in and around electromagnetically installed rivets measured using synchrotron and neutron diffraction[J]. Journal of Neutron Research, 2007, 15(3/4): 215-223.
- [10] MU W Q, LI Y, ZHANG K F, et al. An effective method of studying interference-fit riveting for 2117-T4 aluminum slug rivet[C]// Proceedings of 2010 International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering. New York: IEEE, 2010: 303-307.
- [11] 田冬凤, 韦红余, 陈文亮, 等. 铆接结构抗疲劳性的工艺影响分析[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(9): 1332-1336.
- TIAN Dongfeng, WEI Hongyu, CHEN Wenliang, et al. Effect of riveting process on fatigue resistance for riveted structure[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(9): 1332-1336.
- [12] 殷俊清. 航空薄壁件铆接变形分析及预测研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- YIN Junqing. Study on riveting deformation and its prediction of aeronautical thin-walled components[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
- [13] 刘连喜. 自动钻铆工艺实验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2012.
- LIU Lianxi. Experimental research on automatic drilling and riveting process[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2012.
- [14] 姬浩, 刘国光. 孔挤压强化对7A85铝合金锻件组织和疲劳性能的影响[J]. 机械工程材料, 2015, 39(6): 25-28.
- JI Hao, LIU Guoguang. Effects of cold hole expansion on microstructure and fatigue property of 7A85 aluminum alloy forging[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(6): 25-28.
- [15] 伊琳娜, 汝继刚, 黄敏, 等. 孔挤压强化对2124铝合金疲劳寿命及微观质量的影响[J]. 航空材料学报, 2016, 36(5): 31-37.
- YI Linna, RU Jigang, HUANG Min, et al. Effect of hole extrusion strengthening on fatigue life and microscopic quality of 2124 aluminum alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(5): 31-37.
- [16] 龚澎, 郑林斌, 张坤, 等. 7B50-T7451铝合金板材孔挤压工艺性能研究[J]. 航空材料学报, 2011, 31(4): 45-50.
- GONG Peng, ZHENG Linbin, ZHANG Kun, et al. Study on hole extrusion performance of 7B50-T7451 aluminum alloy plate[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(4): 45-50.
- [17] 张坤, 龚澎, 宋德玉, 等. 孔挤压强化对超高强7055-T7751厚板组织性能的影响[J]. 航空材料学报, 2010, 30(5): 44-48.
- ZHANG Kun, GONG Peng, SONG Deyu, et al. Effects of cold hole-expansion on microstructure and fatigue property of 7055-T7751 aluminum alloy plate[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(5): 44-48.
- [18] 王亮, 汝继刚, 李惠曲, 等. 孔挤压强化工艺对7A12铝合金组织及疲劳性能影响的研究[J]. 新技术新工艺, 2014(11): 14-17.
- WANG Liang, RU Jigang, LI Huiqu, et al. Research on effects of cold holes expansion on microstructure and fatigue property of 7A12 aluminum alloy[J]. New Technology & New Process, 2014(11): 14-17.
- [19] 罗学昆, 王欣, 胡仁高, 等. 孔挤压强化对Inconel718高温合金疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(3): 116-122.
- LUO Xuekun, WANG Xin, HU Rengao, et al. Effect of hole extrusion strengthening on fatigue properties of Inconel 718 superalloy[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(3): 116-122.

通讯作者: 王仲奇, E-mail: wangzhqi@nwpu.edu.cn.

(下转第77页)

CN104816307A[P]. 2015-08-05.

[15] 应高明, 王仲奇, 康永刚, 等. 飞机壁板自动钻铆法向量测量方法研究[J]. 机床与液压, 2010, 38(23): 1-7.

YING Gaoming, WANG Zhongqi, KANG Yonggang, et al. Study on normal vector measurement method in auto-drilling & riveting of aircraft panel[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(23): 1-7.

[16] 徐敦忠. 激光平台的仿真、调平、参数软测量及振动控制方法探讨[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2002.

XU Dunzhong. Discussion on laser

platform simulation, leveling, parameter soft measurement and vibration control method[D]. Beijing: Beihang University, 2002.

[17] 杜宝瑞, 冯子明, 姚艳彬, 等. 用于飞机部件自动制孔的机器人制孔系统[J]. 航空制造技术, 2010, 53(2): 47-50.

DU Baorui, FENG Ziming, YAO Yanbin, et al. Robot drilling system for automatic drilling of aircraft component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(2): 47-50.

[18] 杜兆才. 数字化钻铆的曲面法向测量方法[J]. 航空制造技术, 2011, 54(22): 108-111.

DU Zhaocai. Measurement method for evaluating normal direction of surface for digital drilling and riveting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(22): 108-111.

[19] 薛汉杰, 张敬佩. 蒙皮类部件钻孔法向的测量和调整[J]. 航空制造技术, 2010, 53(23): 60-62, 66.

XUE Hanjie, ZHANG Jingpei. Normal measurement and adjustment for skin drilling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(23): 60-62, 66.

通讯作者: 罗群, E-mail: lko821215@sina.com。

## Experimental Study on Application of Automatic Hole Contacting Normal Leveling Structure

LUO Qun, HUANG Min, YANG Chao

(Wing Assembly Plant, AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company Ltd., Xi'an 710089, China)

**[ABSTRACT]** Automatic drilling technology has been widely used in the assembly of aerospace product. With the further application of automatic drilling, the problem of insufficient capacity or model feedback errors occur when the traditional laser normal-leveling methods were used in the complex curved surface structures and intensive fastener arrangements. Aiming at this problem, this paper proposed a contact leveling device and some related process tests and analysis experiments were also conducted. The experimental results indicate that the contact leveling device are still effective to meet the final quality requirements under special conditions.

**Keywords:** Automatic drilling; Contact leveling device; End effector; Complex surface structure; Normal measurement

(责编 逸飞)

(上接第48页)

## Effect of Riveting Process Parameters on Mesoscopic Quality of Holes

WANG Zhongqi, XU Minheng, ZHAO Haitao, CHANG Zhengping, KANG Yonggang

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**[ABSTRACT]** The fatigue life of the riveted structure greatly depends on the meso-cracks around the hole and the crack expansion. Furthermore, the riveting process parameters have significant effect on the initiation and growth of the meso-cracks. It is analyzed that how these parameters affect the mesoscopic quality of the areas around the hole in this paper. There are three parameters used to describe the mesoscopic structure around the hole. Here MR represents the fillet radius of the area where the panel touches the riveting head and rod. MD and Md are both the parameters for the plastic layer thickness around the hole. The effects of some riveting process parameters on the above three characterization parameters for the meso-structure around the hole are researched respectively, including riveting force, riveting process time and upper riveting cavity. This study helps to polish up the quality of the meso-structure through adjusting riveting process parameters, and get further improvements on the fatigue performance of the riveted structure.

**Keywords:** Riveting process parameter; Meso-structure; Characterization parameter; Experimental investigation; Fatigue life

(责编 逸飞)