

# Forming Technology and Performance Analysis of Headless Rivet with Double Drum Upsetting Head

Jiujiu Lv<sup>1</sup>, Xiuyan Zhang<sup>1</sup>, Xinghai Ma<sup>1</sup>, Diange Huang<sup>1</sup>, Jianxin Zang<sup>1</sup>, Lihui An<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Capital Aerospace Engineering Machinery Co., Ltd., Beijing

<sup>2</sup>China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing

Email: machinejiu@163.com, 13520489265@163.com, maxh211@163.com, 164302775@qq.com, 2406821097@qq.com, anlihui@263.net

Received: Sep. 14<sup>th</sup>, 2018; accepted: Oct. 10<sup>th</sup>, 2018; published: Oct. 17<sup>th</sup>, 2018

## Abstract

According to the riveting of headless rivet with double drum upsetting head, the special equipment for pressing rivet is designed. It's concluded that the greater the shear force, the more obvious the upsetting phenomenon. It can be described as follows. The first one is: the higher the upsetting head, the lower the shear force when the riveting diameter and the upsetting head diameter are the same. The second one is: the bigger the upsetting head diameter, the larger the shear force when the riveting diameter and the upsetting head height are the same. The third one is: for the rivet of different diameters, the bigger the rivet diameter, the larger the shear force when the diameter of rivet is different. Through the incision test, it's concluded that the rivet with the diameter of 4 and 5 can be filled well, but the diameter of 6 has obvious cracks in the joint, and the reasons for the poor filling are analyzed.

## Keywords

Headless Rivet, Pressing Rivet, Double Drum Upsetting Head, Shearing Test, Microstructure Analysis

# 无头铆钉双面鼓形镦头成形工艺与性能分析

吕九九<sup>1</sup>, 张秀艳<sup>1</sup>, 马兴海<sup>1</sup>, 黄殿阁<sup>1</sup>, 臧建新<sup>1</sup>, 安立辉<sup>2</sup>

<sup>1</sup>首都航天机械有限公司, 北京

<sup>2</sup>中国运载火箭技术研究院, 北京

Email: machinejiu@163.com, 13520489265@163.com, maxh211@163.com, 164302775@qq.com, 2406821097@qq.com, anlihui@263.net

收稿日期: 2018年9月14日; 录用日期: 2018年10月10日; 发布日期: 2018年10月17日

## 摘要

针对双面鼓形镢头无头铆钉的铆接方法,设计出适用压铆设备的专用工装,通过力学性能检测和截面微观分析对铆接结构进行了研究。结果表明,镢粗现象越明显,剪切力越大,同一直径的铆钉,镢头直径一致,镢头高度越大,剪切力越小;同一直径的铆钉,镢头高度一致,镢头直径越大,剪切力越大;不同直径的铆钉,长度相同,铆钉直径越大,剪切力越大; $\Phi 4$ 和 $\Phi 5$ 铆钉均能较好填充至孔隙中,而 $\Phi 6$ 两试片对接处出现明显的缝隙,偏心和试片错位是造成该现象的主要原因。

## 关键词

无头铆钉,压铆铆接,双面鼓形镢头,剪切试验,微观分析

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

铆接是一种不可拆卸的干涉配合连接,有头铆钉的制造和装配工艺技术成熟,广泛应用于飞机和运载火箭的装配。然而,有头铆钉的钉头限制了自动化生产设备中送钉杆、内铆接杆直径的最小值。送钉杆直径和内铆接杆直径过大会与桁条立筋干涉,制约了自动钻铆技术的发展。因此,一种将有头铆钉的铆钉头去掉,形成一种新的铆钉——无头铆钉的铆接技术,可解决这一难题。

众多学者对无头铆钉进行了研究,发表于西北工业大学学报的《无头铆钉干涉配合铆接工艺试验报告(之一)》针对不同铆模进行了干涉量对比,得出无头铆钉的干涉配合铆接必须采用凹形上下铆模的结论,以保证均匀合理的干涉量;钉孔直径、铆钉长度、外伸量、板材厚度等也影响干涉量的变化,生产时需合理选用[1]。王晶等通过有限元分析得出应力波安装(动态加载)相比铆枪锤击打入(准静态加载)和液压力压入(静态加载),可获得较大的干涉量[2]。刘连喜采用正交试验分析各工艺参数对无头铆钉铆接质量的影响[3]。牟伟强等提出采用幂指数硬化理论来确定压铆力关于镢头高度的数学函数[4]。刘恩洋等通过电磁铆接试验得出镢头是否铣平对剪切强度影响不大,但镢头铣平后拉脱强度有所减小,为满足铆钉的拉脱强度,可适当增加钉孔镢窝深度[5]。

目前的研究对于铆接完成后的性能试验:干涉量、剪切试验、拉脱试验、剖切后放大等均是破坏性试验,做完试验后的铆钉或试片失去紧固件功能,不能继续使用。建立一种破坏性试验与非破坏性试验的关系是现在铆接试验亟待解决的问题,本文将从铆钉镢头尺寸与剪切力间的关系来分析无头铆钉的长度及铆接参数的选择,用来指导生产。

## 2. 无头铆钉

### 2.1. 无头铆钉的选型

无头铆钉主要有三种:1) 国军标 GJB131.1 [6]内的两头实心无头铆钉;2) 国标 GB1016-86 内的两头空心无头铆钉;3) 国外铆钉,美国航空航天工业协会的 NAS1321 内的无头铆钉。

本文采用国军标 GJB131.1 的无头铆钉,规格如表 1 所示,仅有直径 4 mm, 5 mm, 6 mm 的铆钉,

铆钉长度为整数。

### 2.2. 铆钉长度选择

铆钉长度是关乎铆接质量的重要参数，铆钉过长，铆钉墩头就过大，钉杆易弯曲；铆钉过短，则墩粗量不足，钉头成型不完整，影响铆接强度和紧密性。无头铆钉长度与工件厚度的关系如图 1 所示，根据 QJ3143 普通铆钉通用规范中附录 A.1 [7]中推荐的铆钉长度，可总结出铆钉长度需要超出工件厚度的经验公式为：

$$L = S + L_{外} + L_{内} \tag{1}$$

$$L_{外} + L_{内} = 2 \times (1.2 \sim 1.4) \times d \tag{2}$$

其中： $L$  为铆钉总长度； $S$  为工件总厚度； $d$  为铆钉直径； $L_{外}$ 和  $L_{内}$ 分别为工件两端，铆钉的外伸量。

### 2.3. 铆钉孔合格范围

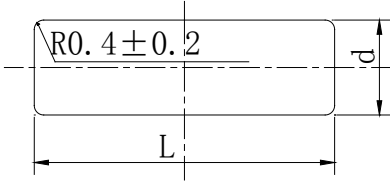
根据国军标 GJB131.2 [8]，无头铆钉钉孔直径合格范围如下，比铆钉直径大 0.08 mm~0.155 mm，如表 2 所示。因此使用  $\Phi 4.1$ 、 $\Phi 5.1$ 、 $\Phi 6.1$  的钻头能满足孔径要求。

### 3. 铆接工装设计

无头铆钉两边均有外伸量，两边外伸量一致是保证两边墩头成形一致的关键，为此设计了专用工装，专用工装要求为：1、保证无头铆钉放置时两边尺寸一致；2、铆接时两边能同时移动；3、保证适用于压铆机。

Table 1. GJB131.1 Non-head rivet information sheet

表 1. 国军标(GJB131.1)无头铆钉信息表

	d	L	材料
	4	12~24	LY10
	5	15~30	
	6	18~36	

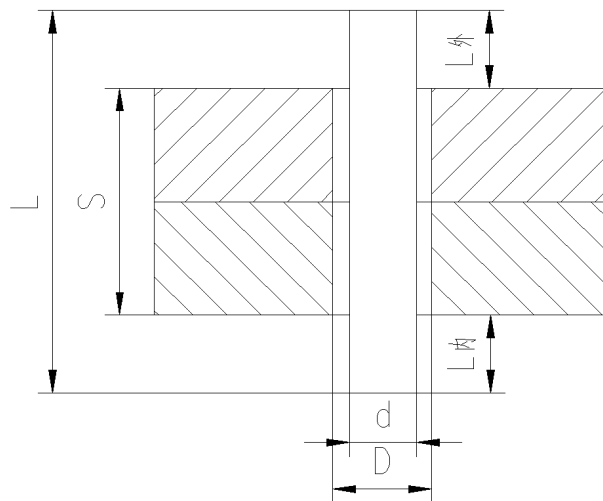


Figure 1. Length dimension figure of Non-head rivets

图 1. 无头铆钉长度尺寸图

**Table 2.** GJB131.2 Non-head rivet Interference fit riveting rivet hole diameter  
**表 2.** GJB131.2 无头铆钉干涉配合铆接的铆钉孔直径

铆钉直径/mm		4	5	6
	基本尺寸	4.08	5.08	6.08
钉孔直径/mm	偏差		+0.075	
			0	

无头铆钉压铆定位工装需成对使用，内置压缩弹簧，使用时保证铆钉处于工装中心，压铆机向下移动，带动上定位工装向下运动，上定位工装向下运动的同时会压缩弹簧将压力传铆接件，进而传至下定位工装。因工装是成对使用，两弹簧的初始压缩量是一致的，弹簧刚度足够大，定位工装的重量和铆接试片的重量对弹簧的压缩可忽略，如图 2 所示。

为适应不同长度无头铆钉外伸量的变化，压铆定位工装还配备了调整垫片，三种厚度：0.3 mm、0.5 mm、1 mm，可组合使用来调整铆钉的外伸量。

使用时应使无头铆钉中心位于工装中心，保证工装和工件表面清洁，确保压铆圆周方向受力均匀。

## 4. 剪切试验

剪切试验试片如图 3 所示[9]，在万能试验机上进行剪切破坏试验，获得最大剪切力数据。本文使用的铆接设备为压铆铆接设备，为节约材料，作废的试片可将铆钉拆除，直径扩大一级当正常试片使用。

### 4.1. 铆钉镢头成形性能

剪切试片铆接后实物如图 4 所示，分别用来研究铆钉成形后镢头高度，成形后镢头直径，铆钉原始长度以及铆钉原始直径对铆钉镢头性能的影响：

1) 铆钉原始尺寸为  $\Phi 4 \times 15$ 、 $\Phi 4 \times 16$ ，成形后使镢头直径保持基本一致，铆钉长度不同会使镢头高度不同。

2) 铆钉原始尺寸为  $\Phi 4 \times 16$ 、 $\Phi 4 \times 17$ ，成形后使镢头高度保持基本一致，铆钉长度不同会使镢头直径不同。

3) 铆钉原始尺寸为  $\Phi 4 \times 17$ 、 $\Phi 5 \times 17$ ，成形后使镢头高度保持基本一致，铆钉直径不同。

做完铆接试片后，先测量镢头尺寸再进行剪切试验，得到镢头尺寸的测量值和最大剪切力。表 3 所示为相同铆钉直径下，不同成形后镢头尺寸与最大剪切力均值。

分析铆钉成形后镢头尺寸对最大剪切力的影响，分别作图，镢头高度对比组如图 5 所示，镢头直径对比组如图 6 所示。可以得出，镢头直径一致，镢头高度越大，剪切力越小。这是由于铆钉长度不一致，在镢粗过程中，镢头高度小的，铆钉镢粗越明显，铆钉剪切强度越高。铆钉镢头高度一致，镢头直径越大，剪切力越大。这是由于铆钉长度不一致，镢粗过程中，镢头直径越大的，镢粗现象越明显，镢头剪切强度越高。相比之下，镢头高度的降低，比镢头直径的提高，对于最大剪切力的提升，效果更为明显。

将相同铆钉直径，不同铆钉长度铆接试样的最大剪切力进行对比，如图 7 所示，可以得到在满足条件的铆钉长度当中，长度为 15 的铆钉最大剪切力明显高于长度为 16 和 17 的铆钉。因此，铆钉长度越短，也即铆钉外伸量越小，最大剪切力越大。相同铆钉长度，不同铆钉直径铆钉镢头成形后及试样最大剪切力如表 4 和图 8 所示，可以得到长度相同，直径不同的铆钉，直径越大，剪切力越大的结论。

综合以上结论，在满足镢头直径和镢头高度要求的前提下：可适当增加镢头直径来提高剪切强度。

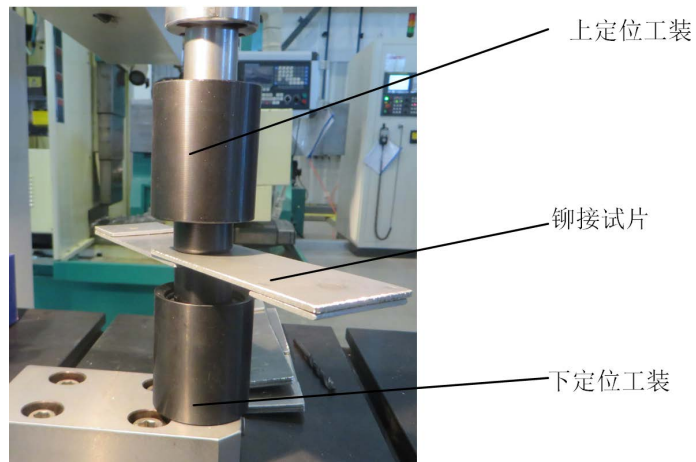


Figure 2. Use of the Non-head Rivet locating fixture on the press riveting machine

图 2. 无头铆钉定位工装在压铆机上使用

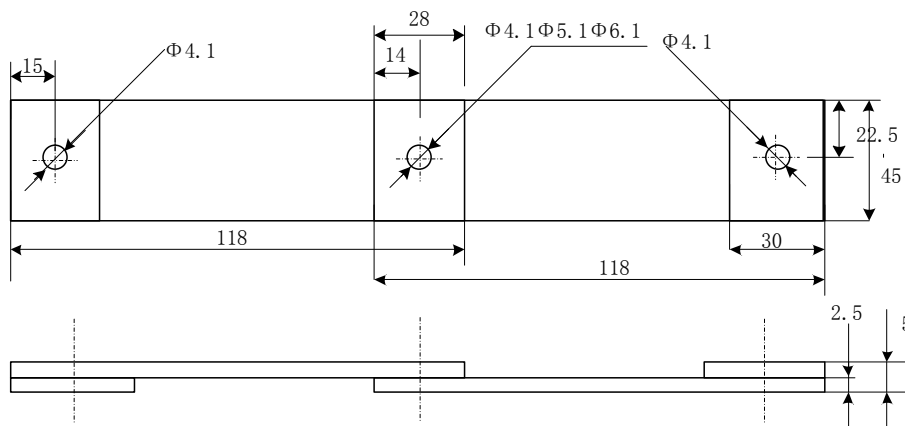


Figure 3. Size diagram of shear test specimens

图 3. 剪切试验试片尺寸图



Figure 4. Material drawing after riveting of shear test piece

图 4. 剪切试片铆接后实物图

$\Phi 4 \times 15$ 、 $\Phi 4 \times 16$ 、 $\Phi 4 \times 17$  三种铆钉中， $\Phi 4 \times 15$  的剪切力最高，镦头直径和高度也满足要求，故对试件总厚是 5 mm，直径 4 mm 的铆钉长度 15 mm 最合适。建议的镦头直径 5.7~5.8 mm、镦头高度为 2.2~2.3 mm。剪切试验是破坏性试验，镦头直径和镦头高度的测量时非破坏性试验，控制镦头直径和镦头高度可间接控制铆钉的最大剪切力。

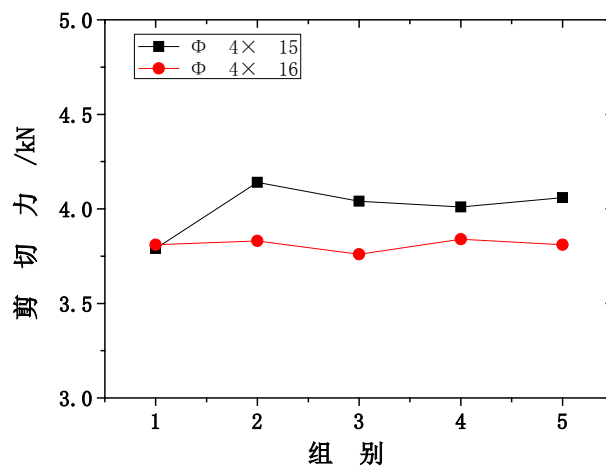
#### 4.2. 无头铆钉与有头铆钉试验对比

为了研究无头铆钉与有头铆钉成形后性能差距，分别做了直径为  $\Phi 4$  和  $\Phi 5$  的有头铆钉剪切力试验。

**Table 3.** The diameter and height of the head of shear test ( $\Phi 4$ )

**表 3.** 剪切试验镦头直径和高度值( $\Phi 4$ )

组别	铆钉直径 d × 铆钉长度 L	镦头 1 直径 D1	镦头 1 高度 h1	镦头 2 直径 D2	镦头 2 高度 h2	镦头直径和高度均值/mm	剪切力均值/kN
1	$\Phi 4 \times 15$	5.70	2.30	5.74	2.40	D1 = 5.756 h1 = 2.280 D2 = 5.748 h2 = 2.308	4.062
2		6.00	2.28	5.74	2.22		
3		5.62	2.30	5.86	2.22		
4		5.70	2.24	5.74	2.22		
5		5.76	2.28	5.66	2.48		
1	$\Phi 4 \times 16$	6.00	2.72	5.80	2.56	D1 = 5.884 h1 = 2.620 D2 = 5.856 h2 = 2.518	3.810
2		5.86	2.96	5.87	2.57		
3		5.85	2.74	5.93	2.86		
4		5.80	2.38	5.86	2.30		
5		5.91	2.30	5.82	2.30		
1	$\Phi 4 \times 17$	6.13	2.77	6.25	2.72	D1 = 6.158 h1 = 2.626 D2 = 6.176 h2 = 2.77	3.882
2		6.19	2.69	6.20	2.81		
3		6.15	2.57	6.13	2.76		
4		6.20	2.66	6.08	2.78		
5		6.12	2.44	6.22	2.78		



**Figure 5.** Comparison of shear forces of diameter 4, same diameter and different height of upsetting head

**图 5.** 直径 4 镦头直径一致、高度不同剪切力对比

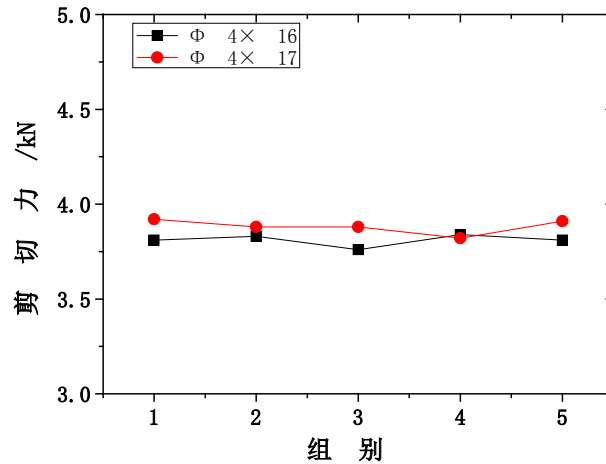


Figure 6. Comparison of shear forces with diameter 4, same height and different diameter of upsetting head

图 6. 直径 4 镦头高度一致、直径不同剪切力对比

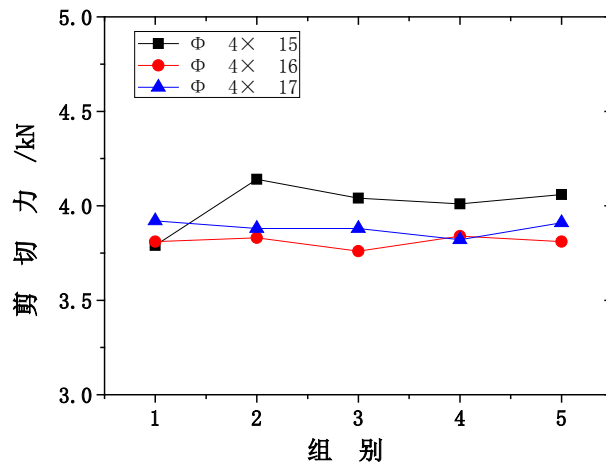


Figure 7. Comparison of shear force of rivets with diameter 4 and different lengths

图 7. 相同直径不同长度铆钉剪切力对比

Table 4. The diameter and height of the head of shear test ( $\Phi 4 \times 17$ ,  $\Phi 5 \times 17$ )

表 4. 剪切试验镦头直径和高度值( $\Phi 4 \times 17$ ,  $\Phi 5 \times 17$ )

组别	铆钉直径 d	铆钉长度 L	镦头 1 直径 D1	镦头 1 高度 h1	镦头 2 直径 D2	镦头 2 高度 h2	镦头直径和高度均值/mm	剪切力均值/kN
1	$\Phi 4 \times 17$		6.13	2.77	6.25	2.72	D1 = 6.158 h1 = 2.626 D2 = 6.176 h2 = 2.77	3.882
2			6.19	2.69	6.20	2.81		
3			6.15	2.57	6.13	2.76		
4			6.20	2.66	6.08	2.78		
5			6.12	2.44	6.22	2.78		
1	$\Phi 5 \times 17$		7.58	2.62	7.60	2.62	D1 = 7.640 h1 = 2.572 D2 = 7.720 h2 = 2.560	6.288
2			7.55	2.46	7.78	2.58		
3			7.86	2.56	7.68	2.50		
4			7.60	2.64	7.78	2.48		
5			7.61	2.58	7.76	2.62		



由于有头铆钉一头无需成形,因此铆钉外伸量为无头铆钉的一半。同时,根据经验公式(1-2),直径更大的铆钉,需要更大的外伸量。鉴于此,有头铆钉尺寸的选择分别是 $\Phi 4 \times 10$ 以及 $\Phi 5 \times 12$ ,用来和 $\Phi 4$ 以及 $\Phi 5$ 的无头铆钉进行对比。实验获得的有头铆钉最大剪切力如表5所示。与无头铆钉的剪切力进行对比,图9所示为 $\Phi 4$ 直径的无头铆钉和有头铆钉最大剪切力对比图,图10所示为 $\Phi 5$ 直径的无头铆钉和有头铆钉最大剪切力对比图。

由图9知 $\Phi 4 \times 15$ 无头铆钉的最大剪切力明显大于有头铆钉的最大剪切力, $\Phi 4 \times 17$ 无头铆钉的最大剪切力略大于有头铆钉的最大剪切力, $\Phi 4 \times 16$ 无头铆钉的最大剪切力不小于有头铆钉的最大剪切力。由图10知 $\Phi 5 \times 17$ 无头铆钉的最大剪切力明显大于 $\Phi 5 \times 12$ 有头铆钉的最大剪切力。可以得到,无头铆钉的最大剪切力要优于同等条件下有头铆钉的剪切力。有头铆钉是单面成形,越靠近铆头处干涉配合越好,而因无头铆钉是双面成形,使得靠近两边铆头的干涉配合均较好,故无头铆钉的最大剪切力要优于有头铆钉的剪切力。

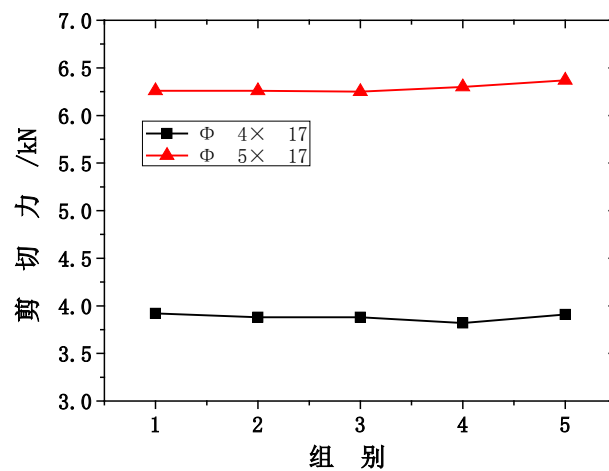


Figure 8. Comparison of shear force of rivet with different diameter and length 17

图8. 长度17不同直径铆钉剪切力对比

Table 5. Rivet with head shear force table

表5. 有头铆钉剪切力表

有头铆钉直径d × 铆钉长度L	组别	铆钉剪切力(kN)	剪切力均值(kN)
$\Phi 4 \times 10$	1	3.87	3.835
	2	3.82	
	3	3.89	
	4	3.79	
	5	3.84	
$\Phi 5 \times 12$	1	5.75	5.774
	2	5.64	
	3	5.98	
	4	5.79	
	5	5.71	



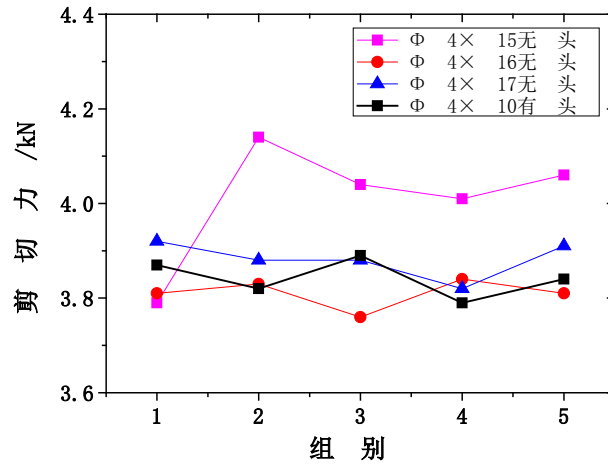


Figure 9. Comparison of shear forces for diameter 4 headed and Non-head rivets

图 9. 直径 4 有头和无头铆钉剪切力对比

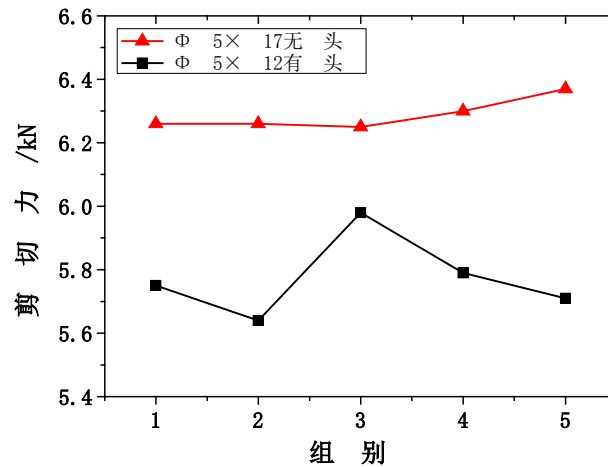


Figure 10. Comparison of shear forces for diameter 5 headed and headless rivets

图 10. 直径 5 有头和无头铆钉剪切力对比

### 5. 剖切金相试验

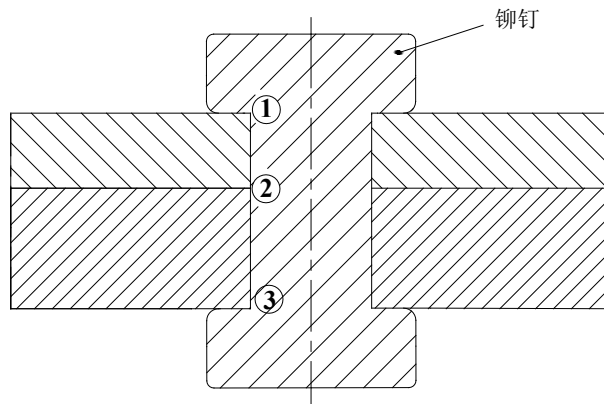
剪切试验是宏观上从铆接性能方面来评判连接方式，轴向剖切金相分析试验则可以从微观情况来分析铆接情况。本文通过观察钉杆不同位置连接情况来选取更适合的铆接方式。铆接轴向剖切金相分析试片不同观察位置示意如图 11 所示，对图中的位置 1、2、3 处的微观连接情况进行观察，位置 1 和 3 代表铆接铆头与上下试片表面铆接孔接触位置，位置 2 代表铆钉在上下试片接触面位置处。

试片 1 厚度 3 mm、试片 2 厚度 3 mm，试片总厚为 6 mm 进行金相微观分析，前文结论中，试片总厚度 5 mm 时、Φ4 铆钉建议长度为 15 mm。因此，金相剖切试验中试片总厚度 6 mm，Φ4 铆钉剖切试验采用 Φ4 × 16、Φ4 × 17 的无头铆钉，Φ5 铆钉剖切试验采用 Φ5 × 18、Φ5 × 19 的无头铆钉，Φ6 铆钉剖切试验采用 Φ6 × 20 的无头铆钉，如图 12 所示。同时为对比与有头铆钉的区别，需加入有头铆钉的金相试验。进行金相试验试片铆钉原始尺寸如下：

- 1) Φ4 × 16、Φ4 × 17 无头铆钉；

- 2)  $\Phi 5 \times 18$ 、 $\Phi 4 \times 19$  无头铆钉;
- 3)  $\Phi 6 \times 20$  无头铆钉;
- 4)  $\Phi 4 \times 12$  半圆头铆钉。

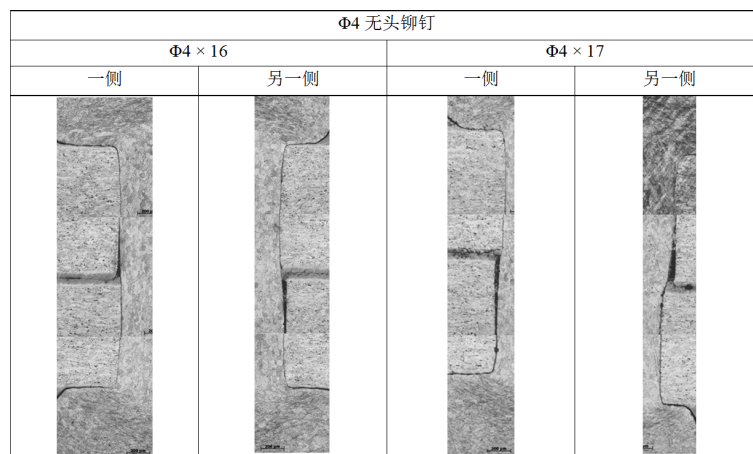
得到剖切后金相图如图 13~图 15 所示。 $\Phi 4 \times 16$ 、 $\Phi 4 \times 17$  均能较好填充孔径, 在两试片对接缝处  $\Phi 4 \times 17$



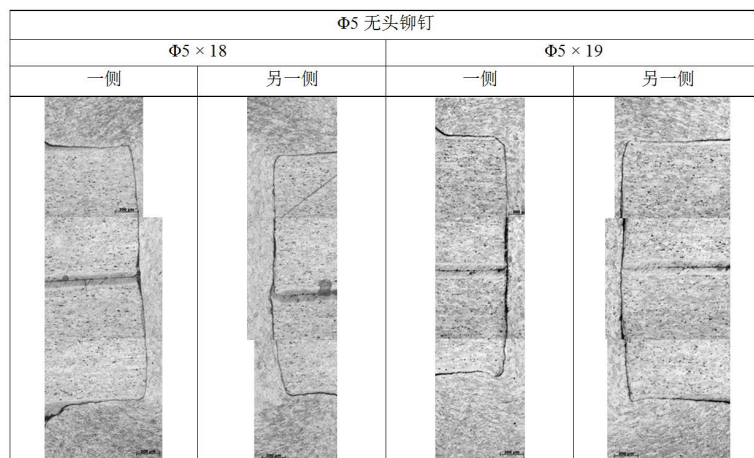
**Figure 11.** Schematic diagram of metallographic cutting test  
**图 11.** 金相剖切试验示意图



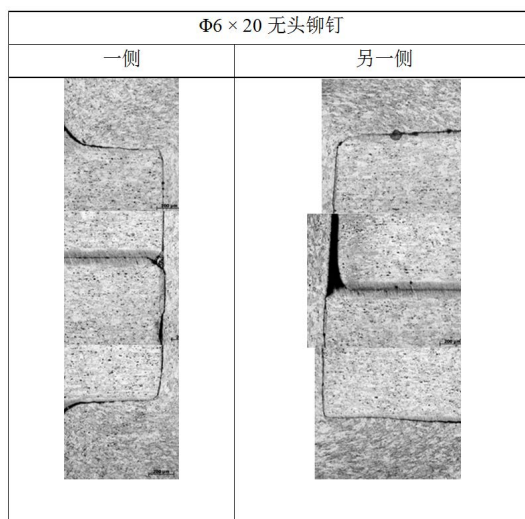
**Figure 12.** Test specimens for metallographic dissection  
**图 12.** 金相剖切试验试片



**Figure 13.** Diameter  $\Phi 4$  Non-head Rivet Kimsanto  
**图 13.** 直径  $\Phi 4$  无头铆钉金相图



**Figure 14.** Diameter Φ5 Non-head Rivet Kimsanto  
**图 14.** 直径 Φ5 无头铆钉金相图



**Figure 15.** Diameter Φ6 Non-head Rivet Kimsanto  
**图 15.** 直径 Φ6 无头铆钉金相图

的另一侧有明显的空隙铆钉未完全填充，原因是两试片出现错位。

Φ5 × 18、Φ5 × 19 明显比 Φ4 × 16、Φ4 × 17 填充的好，Φ5 × 19 在对缝处的填充情况没有 Φ5 × 18 的好，在两铆头处填充均较好。

Φ6 × 20 两试片对接处出现明显的缝隙。无头铆钉因压铆力较大，压铆时产品偏心靠工装无法自动调整，故铆头呈一高一低，且金相试验时两试板没有完全定位，压铆过程中试片出现错位，在错位处铆钉无法完全填充。

为对比，做了同样厚度的有头铆钉的试片试验。因半圆头铆钉铆接时一边是固定的，故两试片对接处无明显错位，铆钉填充较好。但半圆头铆钉在钉头一端总会出现一侧铆钉钉头与试件间有较大间隙，这与铆接时半圆头铆钉未完全与钉孔垂直有关，如图 16 所示。

## 6. 结论

本文通过铆头直径和高度测量、剪切试验、剖切试验，从不破坏试片试验到宏观力学和微观分析，

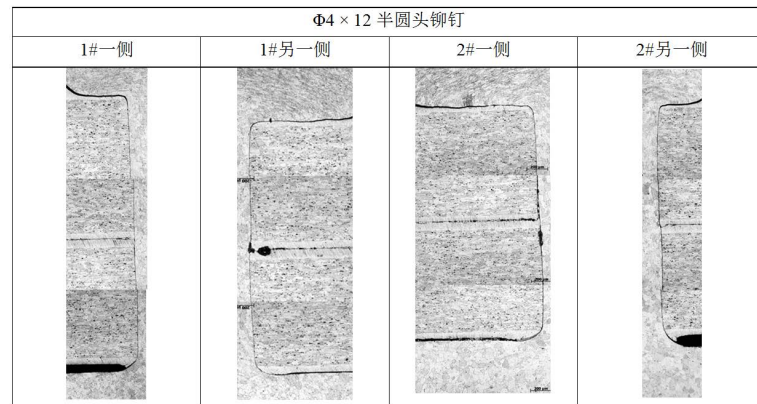


Figure 16. Diameter Φ4 semicircle Head rivet Kimsanto

图 16. 直径 Φ4 半圆头铆钉金相图

通过试验得出以下结论:

- 1) 无头铆钉即使采用专用工装, 两边镢头直径和镢头高度也会存在 0~0.2 mm 之间的差距。
- 2) 同一直径的铆钉, 镢头直径一致, 镢头高度越大, 剪切力越小。
- 3) 同一直径的铆钉, 镢头高度一致, 镢头直径越大, 剪切力越大。
- 4) 不同直径的铆钉, 长度相同, 铆钉直径越大, 剪切力越大。
- 5) Φ4 和 Φ5 都能较好填充, Φ6 两试片对接处出现明显的缝隙, 原因: ①试片错位, ②压铆力大, 产品偏心无法靠自动调整。

## 参考文献

- [1] 无头铆钉干涉配合铆接试验组. 无头铆钉干涉配合铆接工艺试验报告(之一) [J]. 西北工业大学学报, 1974(2).
- [2] 王晶, 曹增强, 刘剑. 干涉配合紧固件安装的数值模拟[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(4): 527-531.
- [3] 刘连喜, 李西宁, 王仲奇, 李卫平. 无头铆钉自动钻铆工艺试验[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(1): 77-82.
- [4] 牟伟强, 李原, 张开富, 程晖. 无头铆钉压铆力数学建模与仿真分析[J]. 西北工业大学学报, 2010, 28(5): 742-747.
- [5] 刘恩洋, 范治松, 黄伍平, 邓将华. 外伸量对无头铆钉电磁铆接变形的影响[J]. 精密成形工程, 2017, 9(1): 96-102.
- [6] 西北工业大学, 一七二厂, 三零一所. GJB131.1-86, 无头铆钉[S].
- [7] 中国航天标准化研究所, 中国航天科工集团公司六四九厂, 二院科研生产部. QJ3143-2001, 普通铆钉通用规范[S].
- [8] 西北工业大学, 一七二厂, 三零一所. GJB131.2-86, 无头铆钉干涉配合铆接技术条件[S].
- [9] 西北工业大学, 三零一所, 一七二厂, 七零八所. GJB715-19, 紧固件试验方法搭接接头剪切[S].

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2167-6631，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[met@hanspub.org](mailto:met@hanspub.org)