

引文格式: 廖宇轩, 蒋浩, 金长城, 等. 大直径钢铆钉电磁铆接工艺及性能试验研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(23/24): 60-65.

LIAO Yuxuan, JIANG Hao, JIN Changcheng, et al. Study on electromagnetic riveting and tensile performances of large diameter steel rivet[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(23/24): 60-65.

大直径钢铆钉电磁铆接工艺及性能试验研究*

廖宇轩¹, 蒋浩¹, 金长城¹, 李光耀^{1,2}, 崔俊佳¹

(1. 湖南大学整车先进设计制造技术全国重点实验室, 长沙 410082;

2. 北京理工大学深圳汽车研究院(电动车辆国家工程实验室深圳研究院), 深圳 518118)

[摘要] 电磁铆接技术可以有效地使大直径铆钉一次成形, 快速生产高质量铆接接头, 在航空航天工业中有广阔的应用场景, 但目前针对大直径钢铆钉电磁铆接接头的相关研究较少。本文通过搭建大直径铆钉电磁铆接平台, 对直径 10 mm 的钢铆钉进行工艺试验。试验结果表明, 铆接后的镢头直径均随着放电能量增大而增大, 镢头高度均随着放电能量增大而减小。在相同放电能量下, 预制孔直径越大, 镢头高度越低且直径越大。此外, 大直径钢铆钉电磁铆接接头的干涉量随着放电能量的增大逐渐增大。预制孔直径 10.1 mm 铆接接头的干涉量始终要大于预制孔直径 10.3 mm 铆接接头。与此同时, 由于预制孔直径为 10.3 mm 铆接接头在铆接过程中容易歪斜, 此值不宜作为优选工艺参数。另外, 综合放电能量区间参数, 得到了大直径钢铆钉电磁铆接最佳工艺参数: 预制孔直径 10.1 mm、放电能量 15.5 kJ。最后, 对大直径钢铆钉电磁铆接接头及传统液压铆接接头的干涉量和机械性能进行了对比。结果表明, 对于最佳工艺参数制备的大直径钢铆钉电磁铆接接头, 其干涉量为 2.15%, 较液压铆接接头的干涉量 1.75% 数值更大, 也更均匀, 其最大剪切载荷及吸能值高于液压铆接接头。

关键词: 大直径钢铆钉; 电磁铆接; 工艺试验; 力学性能; 干涉量

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.23/24.060



廖宇轩

博士研究生, 主要研究方向为异种材料电磁铆接技术。

* 基金项目: 国家自然科学基金(52005173); 湖南省自然科学基金(2021JJ40073); 深圳市科技计划(KQTD20200820113110016)。

铆接工艺具有操作简单、连接强度稳定、适应性强等优点, 在航空航天装备等工业生产领域获得了广泛应用^[1]。传统的铆接技术主要包括气动铆接、液压铆接和热铆接^[2]。其中, 气动铆接技术很难使大直径铆钉成形^[3], 由于接头干涉量不均匀、一致性较差等缺陷, 其疲劳寿命较低。此外, 液压铆接和热铆接技术则存在工作环境差、对环境污染较严重等缺点。在热铆接过程中, 板材上诱发的高应力将导致疲劳裂纹的产生和扩展, 从而降低铆接点的疲劳性能^[4]。此外, 传统的铆接技术也容易出现头裂、过盈不均、密封性差等缺陷^[5]。因此, 传统铆接工艺已不能满足新一代航空航天装备的研制要求^[6]。

电磁铆接是在电磁成形工艺的

基础上发展起来的一种新型铆接工艺方法^[7], 具有冲击力强、相对噪声小、加载速度快、铆钉杆变形均匀等工艺优点, 能够实现大直径铆钉高质量铆接^[8]。同时, 由于其利用电能进行充放电, 对环境友好、不产生污染, 是一种绿色制造工艺^[9]。

目前, 众多学者对电磁铆接技术进行了一系列工艺研究。于海平等^[10]对 $\phi 10$ mm 的 2A10 铝合金铆钉进行了工艺试验研究, 并利用铆钉代替螺栓来实现接头减重。章茂云等^[11]研究了工艺参数对铆接结构成形质量的影响, 并对比了 $\phi 8$ mm 的 2A10 铝合金铆钉电磁铆接接头和气动铆接接头的力学性能; 结果表明, 电磁铆接接头的力学性能远优于气动铆接接头。

以上研究均是针对铝合金铆钉。对于成形困难的钢铆钉,学者们也进行了一些研究。西北工业大学曹增强等^[12]利用手提式电磁铆接设备对 $\phi 10$ mm的A3钢铆钉进行了3次电磁铆接使其成形,并与压铆接头对比了宏观疲劳力学性能,结果表明,电磁铆接接头的疲劳寿命较压铆接头提高了72%;李光耀等^[13]利用直径6 mm的Q235钢铆钉进行电磁铆接并将其运用到商用车车架工艺上以研究其可行性;胡鑫等^[14]利用直径6 mm的ML10钢铆钉进行电磁铆接试验,分析了接头的金相组织和剪切拉脱性能,发现电磁铆接接头具有良好的铆接质量,并未出现裂纹。

电磁铆接的诸多优点可以很好地解决钢铆钉难以一次成形的问題。但是目前针对电磁铆接的多数研究主要针对在较小直径铆钉的工艺和力学性能研究方面,针对大直径钢铆钉连接的研究较少,电磁铆接冲击力大的优点并没有被完全发掘。本文对大直径钢铆钉进行了电磁铆接工艺研究;利用铆接评价准则确定了铆接的最佳放电能量、预制孔直径等工艺参数,为大直径钢铆钉电磁铆接技术在工业制造领域应用提供指导。

1 试验方法及设备

1.1 试验材料

本试验选用的是直径 $\phi 10$ mm的Q235钢制铆钉,连接板材为3.75 mm厚的Q345钢板。两种材料的力学性能参数如表1所示。

1.2 试件准备

铆接接头的几何尺寸如图1所示,Q345钢板尺寸为140 mm \times 40 mm \times 3.75 mm,搭接区域长度40 mm。铆钉直径为10 mm。根据经验公式^[15],铆钉总长度为

$$L=1.1\delta+1.15d \quad (1)$$

式中, δ 为板材总厚度; d 为铆钉直径。本文连接板材总厚度为7.5 mm,根据式(1)求出铆钉总长度为

表1 Q235钢铆钉和Q345钢材板料的材料参数
Table 1 Material parameters of Q235 steel rivets and Q345 steel sheet material

性能	Q235 钢铆钉	Q345 钢板
密度 / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	7.85	7.85
屈服强度 /MPa	235	409
拉伸强度 /MPa	500	567
杨氏模量 /GPa	200	206
泊松比	0.3	0.33
化学成分(质量分数)/%	C \leq 0.18, Si \leq 0.30, S \leq 0.04, Mn \leq 0.50, P \leq 0.04, Fe=余量	C=0.16, Si=0.30, Mn=1.45, P=0.019, S=0.03, V=0.004, Nb=0.003, Ti=0.006, Cr=0.09, Ni=0.01, Cu=0.04, Fe=余量

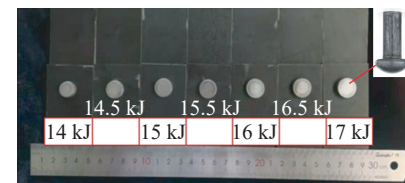
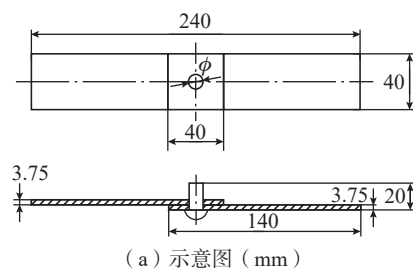
19.75 mm。因此,选择满足国家标准GB 867—1986《半圆头铆钉》且在工业生产中与其相近的20 mm长度铆钉,其外伸量为12.5 mm。

此外,文献[10]表明2A10铝合金电磁铆接预制孔直径应为10.1 mm,由于与本研究的材料不同,所以此文献的最优参数不一定适用于大直径钢铆钉。此外,根据铆接通用标准GB/T 152.1—1988《紧固件 铆钉用通孔》,预制孔直径应为10.3 mm。由于电磁铆接工艺与传统液压铆接工艺具有一定差异,所以GB/T 152.1—1988并不一定适用于电磁铆接方式。因此,本文选择两种预制孔直径作为研究对象探究最佳工艺参数。

在制取3.75 mm的Q345板材试件时,为保证切割的精度,所有试件均采用水切割仪器进行加工,孔精度控制在0.02 mm以内,板材边缘切割精度控制在0.05 mm以内。在加工Q235钢铆钉时,需要用车床固定铆钉,然后通过控制刀具的移动来对铆钉进行车削,使其表面达到光滑平整,从而满足电磁铆接要求,避免出现铆接时铆钉歪斜的情况。

1.3 试验设备

图2为本研究所用电磁铆接设备及其原理图,该设备主要由磁脉冲发生器和铆接平台组成,磁脉冲发生器负责提供铆接所需能量,拥有控制系统和储能系统。本试验用磁脉冲发生器型号为PS48-16,由德国PST



(a) 示意图 (mm)
(b) 实物图
图1 铆接试件
Fig.1 Riveted specimen

公司研制,其最大放电能量为48 kJ,最大放电电压为16 kV。该磁脉冲发生器由6个电容器组并联组成,每组电容器最大电容66 μF 。电容 C 、放电能量 E 和放电电压 U 满足

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \quad (2)$$

铆接平台将释放的电能转换为动能,负责铆接。本试验的铆接平台是根据电磁铆接原理自主开发设计,主要由线圈、驱动片、放大器和顶铁等组成。线圈由带包裹绝缘纸的铜线缠绕而成,并且缠绕过程中通过玻璃丝带和绝缘胶水进行固定,绝缘胶水由环氧树脂、聚酰胺树脂与增韧剂(邻苯二甲酸二丁酯)按60:20:3的配比组成。本研究所用线圈共缠绕了39匝。驱动片由紫铜制成,该材料具有优异的导电性。根据驱动片

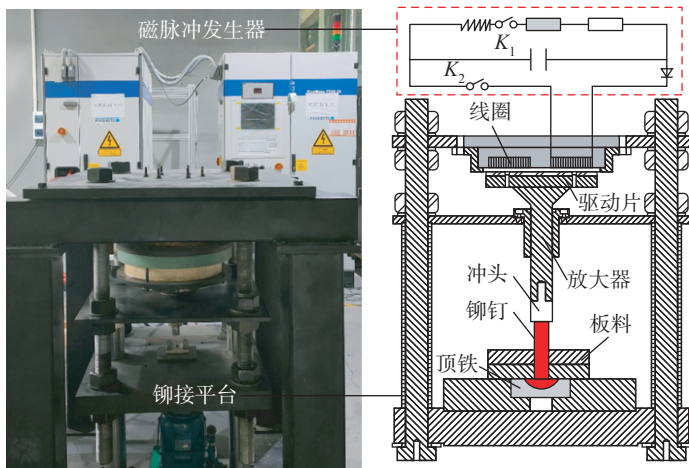


图2 电磁铆接设备
Fig.2 Electromagnetic riveting equipment

表层感应电流的深度(集肤效应)^[16], 该部件厚度定为 10 mm, 直径与线圈保持一致, 大约 300 mm。放大器材料为 45 号钢, 尺寸与驱动片匹配。顶铁材料也为 45 号钢, 尺寸与 $\phi 10$ mm 铆钉的半圆头配套。冲头作为与铆钉直接接触的零部件, 需要承受较大的冲击载荷而不发生脆性断裂。因此材料选择模具钢 Cr12MoV, 保证其强度和韧性^[17]。在安装过程中, 需要将螺纹拧紧, 防止因应力集中而造成冲头螺纹断裂^[18]。其他部件主要起到安装、固定和导向的作用。

2 结果与讨论

2.1 铆接效果评价

根据航天工业标准 QJ 782A—2005《铆接通用技术要求》, 在铆接过程中, 铆头尺寸(铆头直径与高度)是评价铆接性能好坏的标准之一。图 3 所示为铆接后的连接件, H 为铆头高度, D 为铆头直径。根据文献报道, 对于直径 10 mm 铆钉, 铆头直径应该为原始直径的 1.4~1.6 倍^[19], 铆头高度要求不低于 0.4 倍原始钉杆直径(4 mm)^[20]。

铆钉干涉量是评价接头性能好坏的另一指标^[21]。在铆接过程中, 铆钉受到挤压膨胀, 迫使孔壁发生扩张, 从而使铆钉与孔壁形成紧密干涉配合关系。由于不同直径铆钉干涉

量差距较大, 为了描述方便, 通常采用铆钉相对干涉量的概念来描述, 其公式为

$$I = (d'_i - d') / d' \times 100\% \quad (3)$$

式中, d' 为铆接前孔壁的直径; d'_i 为孔壁扩张后的直径(即钉杆扩张后的直径)。

通常, 铆钉钉杆的干涉量并非均匀, 往往是靠近铆头一侧干涉量较大, 靠近制造头一侧干涉量较小。因此, 本研究将在铆钉钉杆的 3 个位置点量取干涉量, 然后求取平均值表征铆钉干涉量, 如图 3 所示。

2.2 最佳工艺参数

为了获得电磁铆接工艺最佳放电能量区间, 对两种预制孔直径的铆接板料进行不同放电能量的电磁铆接工艺试验, 初步选取放电能量区间为 14~17 kJ。利用切割机将铆接后的样件切除铆钉周围板材并取出铆钉, 如图 4 所示。观察发现, 无论是预制孔直径 10.1 mm 的铆接接头还是 10.3 mm 的铆接接头, 铆头均呈现鼓状形貌, 且放电能量越大, 铆头越扁平。

图 5 为铆钉铆头高度、直径与放电能量关系图, 由铆接效果评价准则可知, 铆钉铆头高度应大于 4 mm, 铆头直径应在 14~16 mm 范围内。当符合铆头高度和直径标准时, 不同预制孔直径接头的放电能量区间会有不同, 如表 2 所示。这是因为预制

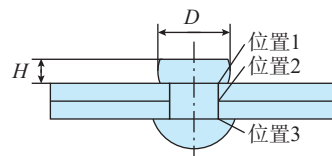


图3 电磁铆接连接件

Fig.3 Electromagnetic riveted connections



14 kJ 14.5 kJ 15 kJ 15.5 kJ 16 kJ 16.5 kJ 17 kJ
(a) 孔直径10.1 mm



14 kJ 14.5 kJ 15 kJ 15.5 kJ 16 kJ 16.5 kJ 17 kJ
(b) 孔直径10.3 mm

图4 孔直径 10.1 mm 与 10.3 mm 的不同放电能量下铆钉铆头

Fig.4 Rivet header with different discharge energy for hole diameter 10.1 mm and 10.3 mm

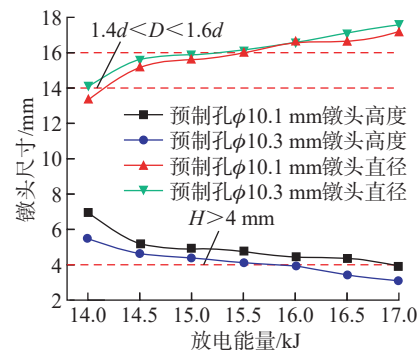


图5 铆头尺寸与铆接工艺参数关系

Fig.5 Relationship between header size and riveting process parameters

孔直径越大, 孔壁与铆钉原始间隙越大, 造成在相同放电能量下铆钉充盈孔壁间隙的体积更多, 从而导致铆钉铆头高度更低。综合铆头高度和直径评价参数可以得出, 预制孔直径 10.1 mm 的铆接接头放电能量区间为 14.5~15.5 kJ, 预制孔直径 10.3 mm 的铆接接头放电能量区间为 14~15 kJ。

为了进一步评价铆接接头的连接效果, 对两种预制孔直径接头的铆钉干涉量进行测量及计算。根据干涉量测量方法, 测量了不同预制孔直径铆接接头在不同放电能量下的铆钉干涉量。铆钉的平均干涉量随放电能量变化关系如图 6 所示。可以看出, 铆钉干涉量随着放电能量的增大逐渐增大。同等能量下, 预制孔直

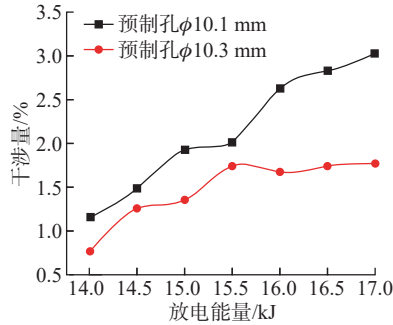
表2 不同预制孔直径铆接接头符合铆头标准的放电能量区间

Table 2 Discharge energy ranges for riveted joints with different prefabricated hole diameter meeting header criteria

墩头形态标准	放电能量区间 /kJ	
	预制孔直径 10.1 mm	预制孔直径 10.3 mm
符合墩头高度标准	14.0~16.5	14.0~15.5
符合墩头直径标准	14.5~15.5	14.0~15.0
符合墩头综合标准	14.5~15.5	14.0~15.0

径 10.1 mm 的铆钉干涉量始终要大于预制孔直径 10.3 mm 的铆钉干涉量。这主要与铆钉成形过程有关。钉杆的墩粗过程分为两步：第 1 步钉杆先膨胀至与预制孔孔壁相同的直径；第 2 步钉杆挤压孔壁形成干涉配合。在第 1 步中，预制孔直径较大的接头所需能量要大于预制孔直径较小的接头；在相同放电能量下，这将造成预制孔直径较大的接头在第 2 步变形过程中所剩能量更小，进而造成其铆钉干涉量小于预制孔直径较小的接头。此外，预制孔直径 10.3 mm 的铆接接头在放电能量达到 15.5 kJ 后，铆钉干涉量一直在 1.75% 上下浮动，几乎不发生变化；这说明预制孔直径 10.3 mm 的铆接接头已经达到其最大平均干涉量。同时，在实际的铆接过程中，预制孔直径 10.3 mm 的铆接接头更容易出现铆钉歪斜现象，这主要是因为孔壁与铆钉原始间隙较大。铆钉歪斜将影响铆接接头的力学性能。预制孔直径 10.1 mm 的铆接接头未出现歪斜现象，因此选择预制孔直径 10.1 mm 作为优选工艺参数。

根据前文墩头尺寸的评价标准，预制孔直径 10.1 mm 铆接接头放电能量区间为 14.5~15.5 kJ。综合干涉量数值，放电能量越大，干涉量越大，接头力学性能越好，因此选取的最佳工艺参数即为预制孔直径为 10.1 mm，放电能量为 15.5 kJ。

图6 钉杆干涉量与铆接工艺参数关系
Fig.6 Relationship between the amount of nail bar interference and riveting process parameters

2.3 铆接接头性能对比

为探究电磁铆接工艺与常规液压铆接工艺接头的差异，对两种铆接接头的干涉量和机械性能进行了对比。其中电磁铆接接头根据最佳工艺参数制备，液压铆接接头通过液压铆接机制备。通过控制液压铆接机下压距离，使常规液压铆接接头的墩头高度与电磁铆接接头相同，墩头直径相近。剪切拉伸试验设备选用 SUNS 万能拉伸试验机，拉伸试验速度设置为 2 mm/min。为了防止因加载非对称载荷对试验结果造成的影响，在夹持区域中增加了与板料材料及厚度一致的 Q345 钢垫片。两种铆接接头的剪切拉伸试验均重复做 3 次。

参照图 3 分别在电磁铆接接头与液压铆接接头的 3 个位置点测量铆钉杆直径，并计算出干涉量，其对比结果如表 3 所示。可以看出，在位置 1 处，电磁铆接接头的铆钉杆直径与液压铆接接头基本相当，而在位置 2 和 3 处的电磁铆接铆钉杆直径明显高于液压铆接接头，其干涉量也较液压铆接接头更为均匀。此外，电磁铆接接头的平均干涉量为 2.15%，明显高于液压铆接接头的平均干涉量 1.75%。

图 7 为电磁铆接接头与液压铆接接头的剪切载荷-位移曲线。无论是电磁铆接接头还是常规液压铆接接头，其剪切拉伸试验均为铆钉剪切断裂。在 0~2.8 mm 位移阶段，载荷上升曲线完全一致，说明此时两种

表3 电磁铆接接头与液压铆接接头的干涉量对比

Table 3 Comparison of interference fit size between electromagnetic riveted joints and hydraulic riveted joints

测量位置	电磁铆接接头		液压铆接接头	
	铆钉杆直径 / mm	干涉量 / %	铆钉杆直径 / mm	干涉量 / %
1	10.42	3.17	10.48	3.76
2	10.33	2.28	10.24	1.39
3	10.20	0.99	10.11	0.10
平均值	10.32	2.15	10.28	1.75

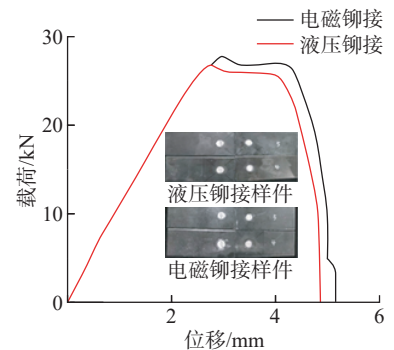


图7 电磁铆接接头与液压铆接接头的剪切载荷-位移曲线

Fig.7 Shear load-displacement curves of electromagnetic riveted joint and hydraulic riveted joint

铆接接头的载荷-位移曲线均处于弹性上升阶段。在 3.0 mm 左右时，两种铆接接头的曲线均出现了载荷突然下降现象；原因在于从墩头侧到半圆头侧的铆钉干涉量是均匀递减的，干涉量的差异会造成铆钉与钉孔的间隙存在差异。在剪切拉伸过程中，靠近墩头侧的铆钉杆受到加载方向上的载荷，而靠近半圆头侧的铆钉杆受到相反方向的载荷，这将使铆钉发生偏转。此时，间隙被突然释放，在载荷-位移曲线上表现为载荷突然减小。同时，通过对比两种铆接接头可发现载荷突然下降阶段出现在不同的位移处，电磁铆接接头相对于液压铆接接头到达此阶段的时间更为延后；原因在于液压铆接接头在上下板料交界处(图 3 中位置 2)的铆钉干涉量比电磁铆接接头小，这

将使铆钉更早发生偏转,进而导致铆钉与钉孔间隙更早释放。此外,电磁铆接接头的铆钉相对直径大于液压铆接接头,导致电磁铆接接头的最大剪切载荷略高于液压铆接接头剪切载荷。在 3.0~4.0 mm 阶段,两种铆接接头曲线均达到了强化阶段,并且都在 4.0 mm 左右时到达了强度极限值。在 4 mm 以后,即剪切载荷达到了强度极限值后,铆钉出现了颈缩现象,载荷值开始迅速减小,最终钢铆钉被完全拉断。两种铆接接头的机械性能重复试验结果如表 4 所示。通过计算发现,液压铆接接头的平均最大剪切载荷值为 26.81 kN,平均吸能量为 89.20 J;电磁铆接接头的平均最大剪切载荷值为 27.74 kN,平均吸能量为 96.67 J。因此,电磁铆接接头的最大剪切载荷及吸能值高于液压铆接接头,电磁铆接接头较液压铆接接头具有较好的力学性能。

3 结论

(1) 电磁铆接后的铆头直径随着放电能量增大而增大,铆头高度随着放电能量增大而减小。在相同放电能量下,预制孔直径越大,孔壁与铆钉原始间隙越大。这造成铆钉充盈孔壁间隙的体积更多,进而使得铆头高度更低、铆头直径更大。

(2) 大直径钢铆钉电磁铆接接头的干涉量随着放电能量的增大逐渐增大。预制孔直径变大,造成钉杆膨胀

时自身做功较多,钉杆挤压钉孔产生干涉的能量就较小,从而使预制孔直径 10.1 mm 的铆接接头干涉量始终要大于预制孔直径 10.3 mm 铆接接头。

(3) 预制孔直径 10.3 mm 铆接接头在放电能量 15.5 kJ 时达到其最大干涉量,且实际铆接过程铆钉容易歪斜,不宜作为优选工艺参数,因此确定预制孔直径 10.1 mm 为最佳制孔参数。此外,综合放电能量区间参数,得到大直径钢铆钉电磁铆接最佳工艺参数为预制孔直径 10.1 mm、放电能量 15.5 kJ。

(4) 根据最佳工艺参数制备的大直径钢铆钉电磁铆接接头,其干涉量为 2.15%,较液压铆接接头(1.75%)更大且更均匀,其最大剪切载荷及吸能值也高于液压铆接接头。

参考文献

[1] 杜明旭, 赵文辉, 王峻峰, 等. 基于有限元的座舱罩自动铆接力学分析[J]. 机械设计, 2022, 39(S2): 1-5.

[2] DU Mingxu, ZHAO Wenhui, WANG Junfeng, et al. Mechanical analysis of automatic cockpit cover riveting based on finite element method[J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(S2): 1-5.

[3] WU J L, CHEN C, OUYANG Y W, et al. Recent development of the novel riveting processes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117(1): 19-47.

[4] WANG H, ZHANG J L, YU J Y. Squeezing force detection and signal processing for robot assisted pneumatic percussive riveting system[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57: 389-399.

[5] 徐德行. 铁道车辆热铆连接的有限元分析[J]. 锻压技术, 2020, 45(2): 118-128.

[6] XU Deyan. Finite element analysis on hot riveting connection for railway vehicles[J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45(2): 118-128.

[7] LI M, TIAN W, HU J S, et al. Influence of riveting die configuration and squeeze force on the mechanical properties and fatigue behavior of aircraft lap joints[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 142: 106772.

[8] 王彬文, 陈先民, 苏运来, 等. 中国

航空工业疲劳与结构完整性研究进展与展望[J]. 航空学报, 2021, 42(5): 524651.

WANG Binwen, CHEN Xianmin, SU Yunlai, et al. Research progress and prospect of fatigue and structural integrity for aeronautical industry in China[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(5): 524651.

[7] 黄运凯, 张旭, 李杰, 等. 电磁铆接技术国内外研究进展[J]. 精密成形工程, 2021, 13(5): 51-57.

HUANG Yunkai, ZHANG Xu, LI Jie, et al. Development at home and abroad on electromagnetic riveting[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(5): 51-57.

[8] 曹增强, 张铭豪, 谭学才, 等. 航空复合材料结构铆接技术综述[J]. 航空制造技术, 2023, 66(1/2): 26-37.

CAO Zengqiang, ZHANG Minghao, TAN Xuecai, et al. Overview of riveting technology for aviation composite structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(1/2): 26-37.

[9] 仇继伟, 左杨杰, 苏娇. 针对飞机小曲率结构的半自动化电磁铆接系统设计[J]. 机床与液压, 2022, 50(20): 135-140.

QIU Jiwei, ZUO Yangjie, SU Jiao. Semi-automatic electromagnetic riveting system design for small curvature structures[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(20): 135-140.

[10] 于海平, 张旭, 章茂云, 等. 大直径铝合金铆钉以铆代螺可行性试验研究[J]. 航天制造技术, 2016(4): 1-4, 12.

YU Haiping, ZHANG Xu, ZHANG Maoyun, et al. Experimental investigation on feasibility of substituting large diameter riveting for bolting[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2016(4): 1-4, 12.

[11] 章茂云, 于海平, 孙立强, 等. $\Phi 8$ mm 2A10 铝合金铆钉电磁铆接工艺试验研究[J]. 航天制造技术, 2012(3): 7-10.

ZHANG Maoyun, YU Haiping, SUN Liqiang, et al. Electromagnetic riveting experiments of $\Phi 8$ mm 2A10 aluminum alloys rivet[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2012(3): 7-10.

[12] 曹增强, 陶华, 余公藩, 等. 大直径铆钉的应力波铆接[J]. 航空制造技术, 1996, 39(2): 27-28.

CAO Zengqiang, TAO Hua, SHE Gongfan, et al. Stress waves riveting with large diameter rivets[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1996, 39(2): 27-28.

[13] 李光耀, 陈乾, 蒋浩, 等. 卡车车架磁脉冲铆接结构可行性研究[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(3): 1-6.

LI Guangyao, CHEN Qian, JIANG Hao, et

表 4 电磁铆接接头与液压铆接接头的机械性能对比

Table 4 Comparison of mechanical properties of electromagnetic riveted joints and hydraulic riveted joints

试件	电磁铆接接头		液压铆接接头	
	最大剪切载荷 / kN	吸能量 / J	最大剪切载荷 / kN	吸能量 / J
试件 1	27.74	96.68	26.79	89.21
试件 2	27.85	96.79	26.71	89.02
试件 3	27.64	96.54	26.93	89.37
平均值	27.74	96.67	26.81	89.20

al. Feasibility research on structure of magnetic pulse riveting for truck frame[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2017, 24(3): 1–6.

[14] 胡鑫, 谭圆安, 段超琪, 等. ML10 钢铆钉电磁铆接接头力学性能研究[J]. *塑性工程学报*, 2021, 28(3): 92–97.

HU Xin, TAN Yuanan, DUAN Chaoqi, et al. Study on mechanical properties of electromagnetic riveted joints with ML10 steel rivets[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28(3): 92–97.

[15] 夏平, 吴安如, 毛文贵. 关于 5T 型载重车车架上铆钉长度的确定[J]. *装备维修技术*, 2004(1): 12–13.

XIA Ping, WU Anru, MAO Wengui. Deciding on the length of rivets in the 5T farm transporter[J]. *Technology of Equipment Maintenance*, 2004(1): 12–13.

[16] CUI J J, SUN H, JING L J, et al. Failure analysis of pulse magnetic induction coil in electromagnetic riveting[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 136: 106178.

[17] 陈森林, 廖敦明, 滕子浩, 等. Cr12MoV 钢动态再结晶过程的元胞自动机模拟[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(3): 536–543.

CHEN Senlin, LIAO Dunming, TENG Zihao, et al. Dynamic recrystallization simulation of Cr12MoV steel using cellular automation method[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(3): 536–543.

[18] 李秀珍, 邓华, 吕杏梅, 等. 兆瓦级风力机偏航齿圈高强度联接螺栓螺纹表面裂纹扩展分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(1): 91–98.

LI Xiuzhen, DENG Hua, LÜ Xingmei, et al. Growth analysis of surface crack on high-strength connecting bolt thread of yaw gear ring of MW wind turbine generator system[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(1): 91–98.

[19] JIANG H, LI G Y, ZHANG X, et al. Fatigue and failure mechanism in carbon

fiber reinforced plastics/aluminum alloy single lap joint produced by electromagnetic riveting technique[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 152: 1–10.

[20] 张旭. 电磁铆接过程铆钉动态塑性变形行为及组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

ZHANG Xu. Research on dynamic plastic deformation behavior and microstructure and mechanical properties of rivets in electromagnetic riveting[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[21] 杨悦, 余路, 蒋红宇, 等. 铆接干涉量对疲劳寿命的影响分析[J]. *机械制造与自动化*, 2021, 50(2): 87–90.

YANG Yue, YU Lu, JIANG Hongyu, et al. The effects of interference-fit level on fatigue[J]. *Machine Building & Automation*, 2021, 50(2): 87–90.

通讯作者: 崔俊佳, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为异种材料高效连接技术。

Study on Electromagnetic Riveting and Tensile Performances of Large Diameter Steel Rivet

LIAO Yuxuan¹, JIANG Hao¹, JIN Changcheng¹, LI Guangyao^{1,2}, CUI Junjia¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing Technology for Vehicle, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Shenzhen Automotive Research Institute (Shenzhen Research Institute of National Engineering Laboratory for Electric Vehicles), Beijing Institute of Technology, Shenzhen 518118, China)

[ABSTRACT] Electromagnetic riveting (EMR) technology can effectively form large-diameter rivets in a single process and quickly produce high-quality joints. It has broad application scenarios in the aerospace industry, but there are few studies related to EMR joints for large-diameter steel rivets. In this paper, an EMR platform for large diameter rivets was built, and the riveting process test was carried out for 10 mm diameter steel rivets. The results show that the header diameter increased with increasing discharge energy and the header height decreased with increasing discharge energy. At the same discharge energy, the larger the preformed hole diameter, the smaller the header height and the larger the header diameter. In addition, the interference fit size of riveted joints gradually increased with the increase of discharge energy for both prefabricated hole diameters. The interference fit size of riveted joint with the prefabricated hole diameter 10.1 mm was always greater than that with 10.3 mm. At the same time, the value (10.3 mm) was not suitable as the preferred process parameter because the riveted joint with the prefabricated hole diameter 10.3 mm tended to be skewed during the riveting process. In addition, the optimal process parameters were obtained by combining the discharge energy: the prefabricated hole diameter of 10.1 mm and the discharge energy of 15.5 kJ. Finally, the interference fit size and mechanical properties of the EMR joints were compared with those of the conventional hydraulic riveted joints. The results indicated that the interference fit size (2.15%) of the EMR joint prepared according to the optimal process parameters was larger and more uniform than that of the hydraulic riveted joint (1.75%). The maximum shear load and energy absorption values were slightly higher than those of the hydraulic riveted joint.

Keywords: Large-diameter steel rivets; Electromagnetic riveting; Process testing; Mechanical properties; Interference

(责编 逸飞)