

## 无铆钉铆接技术原理及优劣势分析

冯玉涛<sup>1</sup>, 胡志强<sup>2</sup>, 刘 铁<sup>3</sup>, 李光志<sup>1</sup>, 张斯钰<sup>4</sup>, 王凤奇<sup>5</sup>

(1. 长春汽车工业高等专科学校 电气工程学院, 吉林 长春 130013; 2. 中国机械工程学会, 北京 100048;  
3. 长春汽车工业高等专科学校 汽车工程学院, 吉林 长春 130013; 4. 长春汽车工业高等专科学校 产教融合发展中心,  
吉林 长春 130013; 5. 中国第一汽车集团, 吉林 长春 130013)

**摘要:** 对无铆钉铆接技术的起源、国内外研究现状以及其在制造行业的应用情况进行了介绍; 介绍了无铆钉铆接接头的 3 种基本形式和特点; 阐述了无铆钉铆接技术的工作原理、主要工作过程及在各工作阶段中需要注意的事项; 通过与传统有铆钉铆接技术和电阻点焊技术的对比, 深入分析了无铆钉铆接技术在缩减工艺步骤、降低原材料投入、轻量化材料连接、提高疲劳强度、节能减排、安全环保和降低综合成本等方面的优势; 同时指出了无铆钉铆接技术在板材性能要求、板材层数要求、板材厚度要求和静态强度等方面的不足及其未来的研究和发展方向。为我国制造行业自主应用无铆钉铆接技术提供了理论参考和选择依据。

**关键词:** 无铆钉铆接; 连接原理; 铆接接头; 有铆钉铆接工艺; 电阻点焊

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.08.024

**中图分类号:** TG376.3; TH162 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 08-0169-07

## Principle of clinching technology and advantages and disadvantages analysis

Feng Yutao<sup>1</sup>, Hu Zhiqiang<sup>2</sup>, Liu Tie<sup>3</sup>, Li Guangzhi<sup>1</sup>, Zhang Siyu<sup>4</sup>, Wang Fengqi<sup>5</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Changchun Automotive Industry College, Changchun 130013, China;  
2. China Society of Mechanical Engineering, Beijing 100048, China;  
3. School of Automotive Engineering, Changchun Automotive Industry College, Changchun 130013, China;  
4. Industrial Education Integration Development Center, Changchun Automobile Industry College, Changchun 130013, China;  
5. China First Automobile Group, Changchun 130013, China)

**Abstract:** The origin, research status at home and abroad and application in the manufacturing industry of clinching technology were introduced, and the three basic forms of clinching joints and their characteristics were introduced. Then, the working principle, main working process and issues needed to be paid attention to in each working stage of clinching technology were expounded. Furthermore, by comparing with traditional riveting technology with rivets and resistance spot welding technology, their advantages in reducing process steps, reducing raw material investment, lightweight material connection, improving fatigue strength, energy conservation and emission reduction, safety and environmental protection, and reducing comprehensive cost were deeply analyzed, meanwhile, the shortcomings and future research and development directions of clinching technology in terms of sheet performance requirements, sheet layer amount requirements, sheet thickness requirements, static strength, etc. were pointed out, which provided theoretical reference and selection basis for the independent application of clinching technology in the manufacturing industry of China.

**Key words:** clinching; connection principle; riveted joint; riveting process with rivets; resistance spot welding

21 世纪, 制造业的竞争愈发激烈, 对质量、成本、节能、环保、轻量化等方面提出了新的要求。

各种新工艺、新技术、新材料随之得以不断地产生和应用。其中, 无铆钉铆接技术是一种用于金属薄板之间连接的新型工艺技术, 相对于点焊、铆接等板材连接技术, 其具有显著的节能、环保、经济、轻量化、连接点美观及动态强度高优势<sup>[1]</sup>, 逐步在汽车的发动机罩、后备箱盖、车门、顶盖等车身覆盖件上得到广泛应用, 呈现出逐步取代传统点焊技术之势。

收稿日期: 2023-04-09; 修订日期: 2023-07-06

基金项目: 吉林省教育厅科学技术研究项目 (JJKH20221343KJ);  
吉林省职业教育与成人教育教学改革项目 (2022ZCZ034)

作者简介: 冯玉涛 (1980-), 男, 工学学士, 正高级工程师

E-mail: 30433465@163.com

## 1 无铆钉铆接技术概述

### 1.1 板材连接技术基本分类

以连接接头的成形特点划分, 板材连接技术主要分为热连接、冷连接和介质连接 3 种。制造中常用的点焊、气体保护焊、激光焊等焊接方法属于热连接技术, 通过热源熔化板料形成连接接头<sup>[2]</sup>; 包边连接、铆接(冷)连接等属于冷连接技术, 不熔化板材而形成连接接头; 胶接等属于介质连接技术。铆接属于冷连接技术, 是指在一定的外部力量作用下, 利用零件自身塑性变形或其与铆钉发生塑性变形而形成不可拆的机械连接接头的技术。铆接又可分为有铆钉铆接和无铆钉铆接。

### 1.2 无铆钉铆接技术简述

无铆钉铆接技术又称无铆钉自冲铆接技术, 由德国 TOX 公司最早研发和广泛应用, 部分行业内也将其称为“TOX 连接”。该技术在工业领域得到了大规模的应用, 涌现出德国 TOX、美国 BTM 等专业进行无铆钉铆接设备制造的公司, 我国近年也有部分公司开始尝试进行无铆钉铆接设备制造和技术服务, 但在我国制造业中的应用占比明显较小。设备制造自主化、技术服务自主化成为该技术在我国应用的重要方向和课题。目前, 圆形接头的无铆钉自冲铆接已经迅速发展为铆钉自冲铆接连接技术的一个主要的分支<sup>[3]</sup>。图 1 为典型的圆形无铆钉铆接接头及其剖面。

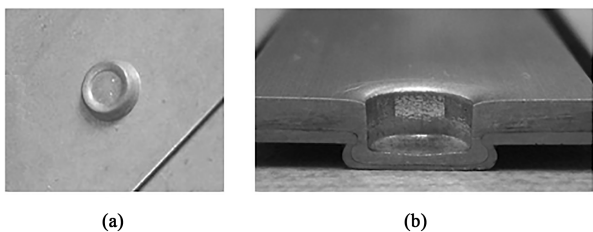


图 1 圆形无铆钉铆接接头 (a) 及其切面 (b)

Fig. 1 Circular clinching joint (a) and its section (b)

### 1.3 国内外研究现状及发展趋势

目前, 国内外对无铆钉铆接技术的研究主要包括原理实验研究、数值模拟研究和经济性研究等方面。

#### 1.3.1 原理实验研究

主要集中在成形过程分析、力学性能及失效形式分析、金相组织分析以及铆接参数等方面。如, Oudjene M 等<sup>[4]</sup>采用正交实验方法研究了凸模和凹

模的几何参数, 得出了通过对其几何参数进行优化即能够有效提高连接接头的抗拉能力的结论。李晓静等<sup>[5]</sup>比较了传统铆钉铆接、半空心铆钉自冲铆接和无铆钉铆接 3 种铆接技术的特点及其行业应用。

#### 1.3.2 数值模拟研究

无铆钉铆接的过程, 具有边界非线性等特点, 可以采用非线性的有限元数值模拟方法和理论对其过程和接头的性能进行分析和研究。如刘丽亚<sup>[6]</sup>应用 MARC 有限元软件, 分析了铆接接头的常见失效模式和其工艺参数对连接点强度的影响。

#### 1.3.3 经济性研究

无铆钉铆接的设备价格较高, 但是能耗小, 对其经济性的评价须综合两者进行。如 Vavis J<sup>[7]</sup>从生产成本、装置成本、模具使用寿命、是否需要辅助连接件等方面分析了无铆钉铆接技术的经济性, 并给出了评价连接方式经济成本的计算公式。

### 1.4 主要应用领域

无铆钉铆接技术被广泛地应用在汽车、火车、航空、航天等各个行业的制造领域, 如冰箱门、洗衣机壳体、电视机边框、铝合金桌椅、家具、金属防火门等<sup>[8]</sup>。该技术在汽车行业的应用最为广泛, 主要分为两个领域: (1) 汽车零件小总成制造领域, 如车身金属支架、门锁板等; (2) 汽车车身制造领域, 主要应用在车身非轴向承载部位, 如车厢板、侧围、四门两盖(图 2)等。



图 2 某车型后盖内板铆接总成

Fig. 2 Riveting assembly of rear cover inner plate for a certain vehicle

## 2 无铆钉铆接接头基本形式及工作原理

### 2.1 接头的基本形式

因所使用的模具形式不同, 无铆钉连接的接头具有不同的形式。其最基本的接头形式有圆形和方

形两种,如图3所示<sup>[6]</sup>。

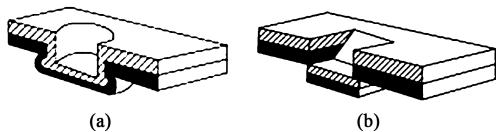


图3 铆接接头基本形式

(a) 圆形接头 (b) 方形接头

Fig. 3 Basic types of riveted joints

(a) Circular joint (b) Square joint

圆形接头因其圆形特征和上下板材的镶入量为轴对称结构<sup>[9]</sup>,能够更好地承受沿切向的载荷,在制造领域得到了更广泛的应用。依据连接接头的成形区划分,圆形铆接接头有凸点式、平点式和穿孔式3种基本样式,以这3种接头为基础,又可衍生出其他多种形式的连接接头,如双点连接、旋压连接、微型点连接、凹模分体式连接等。

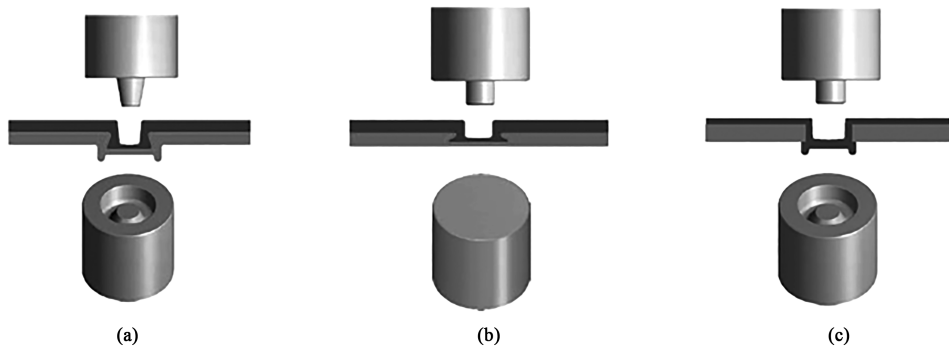


图4 圆形接头的基本形式

(a) 凸点式 (b) 平点式 (c) 穿孔式

Fig. 4 Basic types of circular joints

(a) Convex point type (b) Flat point type (c) Perforated type

## 2.2 基本工作原理

无铆钉铆接接头本质上是利用金属薄板的可塑性而发展出来的一种冲压点连接技术。其基本工作原理为:利用冲压设备产生一个瞬间的高压力,通过凸、凹模具,使金属板材之间相互挤压,产生材料的塑性流动和变形,形成一个互相镶嵌的、与凸凹模具形状吻合的圆形连接点<sup>[10]</sup>。以凸点式接头为例,其成形宏观上可分为4个基本阶段,如图5所示。

### 2.2.1 待铆阶段

脱模器、凸模及凹模进入待铆接位置,凹模上平面贴紧板材,脱模器下平面距离板材5~10 mm,进入预备阶段。此阶段,脱模器、凸模和凹模的中心轴线须重合,防止在其后的铆接过程中因凸模、凹模错位而损坏模具;同时,脱模器、凸模和凹模的轴心线,应与板材的平面方向相垂直,以防止损

### 2.1.1 凸点式

接头一侧为带凸缘的凸出圆点,另一侧为内凹形状。其凸、凹模具的制造成本低、磨损率低,连接接头成形容易、合格率高。这种形式的连接接头,在各个行业中的应用占比最大,如图4a所示。

### 2.1.2 平点式

接头一侧为平点,与板材在同一平面,另一侧为内凹形状。采用平点模具与凸模配合一次成形平点式接头,或对凸点式接头进行二次加工,将凸起部分压回形成平点,主要用于有外观平整需求和装配无干涉需求的产品,接头形式如图4b所示。

### 2.1.3 穿孔式

接头最外侧板材中的一侧板材上有预制孔,其余板材在冲压力和凸凹模的作用下形成连接接头。主要用于异种板材(如金属、非金属)、板材间厚度差异大等情况,如图4c所示。

毁板材和模具。对于穿孔式接头,还须注意凸、凹模具的轴线与板材的预制孔同轴。

### 2.2.2 基本成形阶段

脱模器开始下行,与板材1接触后,凸模开始下行,当其接触板材1后,板材1和板材2开始发生塑性变形,当板材2接触到凹模内侧的上平面时,铆接接头的初始轮廓逐渐形成。随着凸模继续压入,板材1和板材2产生材料流动,填充至凹模的凹槽中。在此过程中,凸模、板材1、板材2、凹模4者之间的相互挤压力保证了金属材料向下流动至凹模凹槽处,板材1和板材2之间相互镶嵌、咬合的连接接头基本成形。

### 2.2.3 强化成形阶段

接头在基本成形后,还需继续通过凸模对接头施加一定时间的压力,一方面能够使金属材料充足

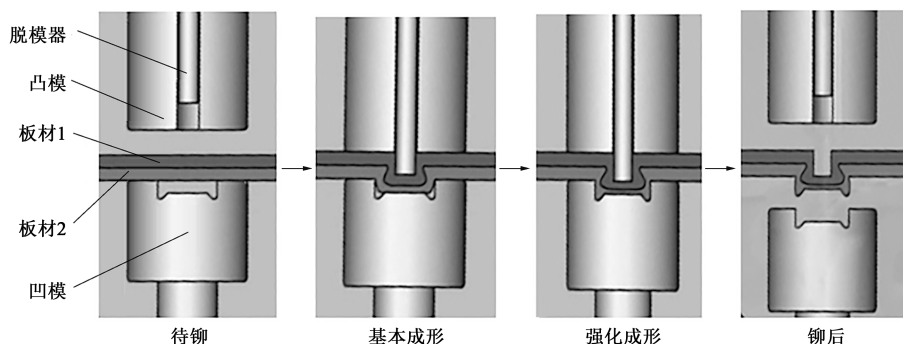


图 5 无铆钉铆接过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of clinching process

填充, 保证接头的嵌合量; 另一方面, 能够强化接头部位的内部组织结构, 防止接头的塑性回弹。在这一阶段, 无铆钉铆接接头在加固、定型的基础上实现了强度上的要求, 形成了合格接头。

#### 2.2.4 铆后阶段

接头形成后, 凸模借助脱模器上行, 离开板材之间的接头, 完成凸模退模工作。凸模离开板材平面 5~10 mm 后, 停止上行, 脱模器上行, 同时铆钳开始下行, 带动凹模下行, 完成最终退模。在生产时, 尤其须注意不能遗忘凹模的退模步骤, 否则强行横向移动铆钳, 带动凹模与铆接接头之间发生严重干涉, 将损坏模具和零件。

### 3 无铆钉铆接技术的优劣势分析

与传统的金属板材点连接技术相比, 在产品制造的低碳节能、安全环保以及质量、成本、轻量化等方面, 无铆钉铆接有着非常显著的技术优势。但是, 在适用条件等方面又存在若干不足。

#### 3.1 无铆钉铆接技术的优势分析

##### 3.1.1 与传统有铆钉铆接技术对比

###### (1) 工步减少

传统的有铆钉铆接冷连接工艺, 其基本步骤为 6 步: 第 1 步, 零件成形; 第 2 步, 转运至开孔工位; 第 3 步, 零件开孔; 第 4 步, 零件转运至铆接工位; 第 5 步, 铆钉转运至铆接工位; 第 6 步, 进行铆接。如图 6 所示。

而凸点式和平点式等典型无铆钉铆接工艺的基本步骤为 3 步: 第 1 步, 零件成形; 第 2 步, 转运至铆接工位; 第 3 步, 进行无铆钉铆接, 如图 7 所示。但穿孔式无铆钉铆接在铆接前也须对零件开孔。

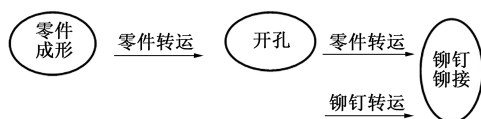


图 6 传统有铆钉铆接工艺步骤

Fig. 6 Steps of traditional riveting process with rivets

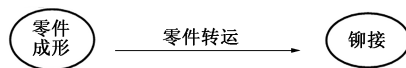


图 7 典型无铆钉铆接工艺步骤

Fig. 7 Steps of typical clinching process

由上对比可知, 典型无铆钉铆接技术较传统有铆钉铆接, 节省了零件转运、铆钉转运和开孔 3 个工艺步骤, 相应地节省了转运设备、开孔设备等固定资产投资, 同时, 也节省了相应的生产维护等成本。相对于有铆钉铆接热连接工艺, 无铆钉铆接技术又节省了铆钉加热等工艺步骤。

###### (2) 成本降低

有铆钉铆接技术, 每个连接点至少消耗 1 个铆钉, 需要投入专用铆钉输送机, 而无铆钉铆接的每个连接点, 均无需铆钉等原材料。以奔腾系列的某车型零件为例, 每件有 40 个铆接点, 较采用铆钉铆接至少节省了 40 个铆钉和 1 台铆钉输送机, 该车型的年产量为 10 万辆, 则每年可至少减少 400 万个铆钉的原材料投入和 1 台铆钉输送机及其日常运转、维护保养费用。

###### (3) 无增重

无铆钉铆接技术, 不会增加额外铆钉等原材料和辅助材料, 所以, 不会额外增加产品的重量和体积, 有利于产品的轻量化和使用过程中的节能减排。

###### (4) 强度优势

有铆钉铆接接头容易因震动或受到外力的作用

而松动,动态疲劳强度较低,而无铆钉铆接的接头为圆形封闭式,动态疲劳强度相对较高<sup>[11]</sup>。

#### (5) 外观优势

有铆钉铆接的铆钉结构有明显的凸起、缝隙或加工痕迹,而无铆钉铆接的接头外观无缝隙,非常规整和美观。

### 3.1.2 与电阻点焊技术比较

#### (1) 外形美观

焊接接头经常出现扭曲、飞溅、咬边、击穿、焊痕等明显的外观缺陷,需要进行人工修磨处理或遮挡处理,增加了制造成本,如图8所示。同时,同等条件下形成的焊点,其外形轮廓外观各不相同,多个焊点时,呈现参差不齐的观感。

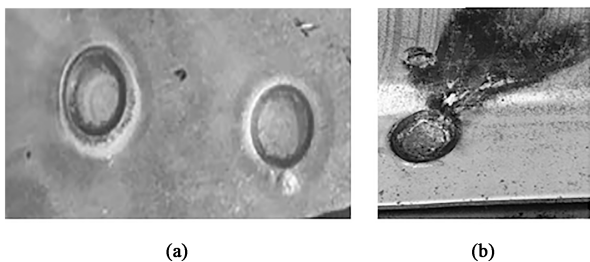


图8 电阻点焊外观缺陷

(a) 压痕 (b) 扭曲和飞溅

Fig. 8 Appearance defects of resistance spot welding

(a) Indentation (b) Distortion and splashing

而无铆钉铆接的接头,其外观均比较规整和平滑。对于金属板材的镀层和涂漆,铆接接头在成形后对其也并不形成损伤,而呈现圆滑过渡效果,外观较为美观,如图9所示。同时,同等条件下形成的无铆钉铆接接头的外形轮廓目视无差别,多个铆点时,呈现整齐划一的观感。

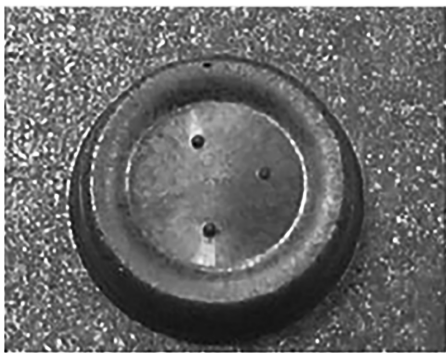


图9 无铆钉铆接接头

Fig. 9 Clinching joint

#### (2) 尺寸精度高

电阻点焊时,金属薄板的热影响区及附近将出

现不同程度的变形和扭曲,点焊电极的端面尺寸小,未能对变形和扭曲进行矫正和预防,零件焊后的尺寸精度较差;而无铆钉铆接过程中不输入热量,金属薄板不会发生热变形和扭曲,同时,其脱模器与零件有大面积接触,起到矫正外力变形的作用,零件铆后间隙及面差等尺寸的精度较高。

#### (3) 适合异质材料连接

由于功能性等需要,部分板材之间需设计为异质材料组合,或在金属板材之间加装碳纤维、布匹等非金属材料。在电阻点焊时,其熔池将破坏、损毁非金属材料,无法形成有效的连接接头;采用胶接,又存在脆性失效、剥离强度低等问题。而无铆钉铆接技术则可弥补上述缺陷<sup>[12]</sup>,其不会熔化非金属夹层材料,并能够利用非金属材料的塑性,在异质材料之间形成有效、可靠的铆接接头。

#### (4) 轻量化优势

产品轻量化的重要途径之一,是在产品上采用轻质、高强的轻量化材料以降低产品自重,如镁铝合金等轻金属材料<sup>[13]</sup>。采用点焊等热加工技术来实现这些轻金属材料之间或轻金属与钢板之间的连接,有较大的难度,存在板材导热快、焊接接头形成困难等问题,需付出较大的技术成本代价才能够解决上述问题。而铝镁等轻量化材料的塑性好,适合于无铆钉铆接接头成形<sup>[14]</sup>,可以从根本上有效地规避电阻点焊接头的上述问题。同时,采用胶体粘接与无铆钉铆接结合使用的结构,在实现产品高强度的同时,还能够实现其结构的轻量化<sup>[15]</sup>,如图10所示,奥迪某车型车身即采用此种结构。

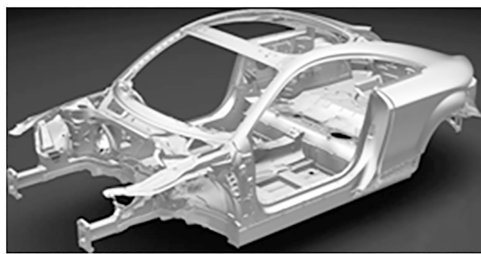


图10 轻混结构车身

Fig. 10 Vehicle body with light mixed structure

#### (5) 节能减排

电阻点焊时,需要消耗大量的压缩空气和循环水维持设备运转,消耗大量的电能转化为电阻热源,如在点焊时,焊接电流可达到10 kA以上,多台点焊机同时工作时,能量量非常大,将引起网路电压的不稳定。而无铆钉铆接,仅使用压缩空气和极小功率的控制电,较电阻点焊节约了大量电力能源。

点焊时,焊钳钳体产生电磁辐射,电极接头处产生飞溅、二氧化碳烟尘、火花以及弧光辐射等,对环境和人身安全有较大影响,即使在夏天,操作者也须穿戴厚重的劳保用品进行防护,如图 11a 所示。而无铆钉铆接时,无飞溅、无烟尘、无火花、无弧光辐射和设备的电磁辐射,安全环保,如图 11b 所示。

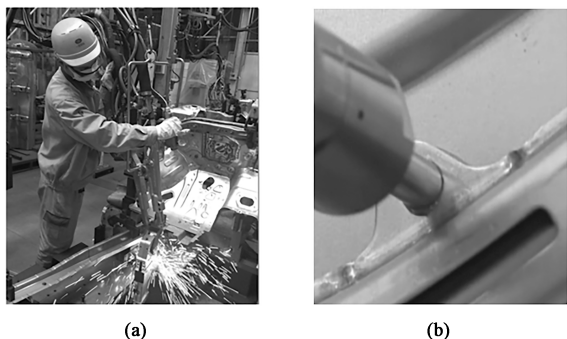


图 11 点焊 (a) 与无铆钉铆接 (b) 过程对比

Fig. 11 Comparison between spot welding (a) and clinching (b) processes

### (6) 动态疲劳强度高

电阻点焊接头,是利用电极、板材间通电后产生的电阻热量熔化板材而形成熔池,而断电后再凝固的方式形成连接接头,属于热加工工艺。点焊时,熔池内外的凝固速度存在差异,使接头处产生较大的应力集中和腐蚀,同时也容易产生气孔、裂纹等缺陷,降低了焊点的疲劳强度。而无铆钉铆接技术不产生热量,其挤压、流动塑性成型的方式,强化了接头的金属材料内部结构,加之外观的圆形凸缘结构,使其具有较高的动态疲劳强度。在同等条件下,无铆钉铆接接头的动态疲劳强度,约为点焊接头的 2~3 倍<sup>[11]</sup>。

### (7) 综合成本低

电阻点焊时,需要冷却水、大功率焊接电和压缩空气 3 种能源;而无铆钉铆接时,仅需要压缩空气和小功率的控制电两种能源。后者的能源消耗成本远低于前者。

但无铆钉铆接的装备等固定投资则高于电阻点焊,其铆接钳和凸模、凹模易损件的单个成本也均高于电阻点焊的焊机、焊钳和电极帽等易损件的成本。

所以,在初始使用阶段,无铆钉铆接的能源消耗和设备等综合成本高于点焊;随着继续使用,无铆钉铆接的低能源优势将逐步抵消其高投资劣势,综合成本将开始低于点焊。如某车型后盖内板总成,经统计分析,在第 1 年时,无铆钉铆接的综合成本

高于点焊,在第 1.8 年时,则与点焊相同;其后,其综合成本低于点焊的幅度越来越大,如图 12 所示。

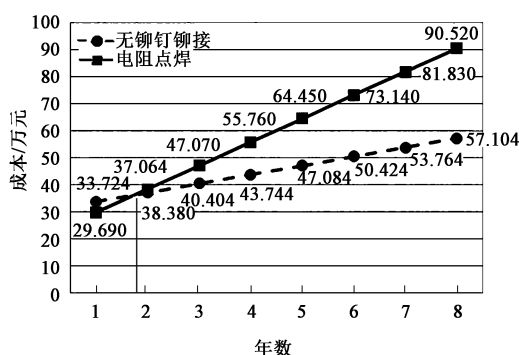


图 12 某零件无铆钉铆接与电阻点焊成本对比图

Fig. 12 Comparison diagram of cost between clinching and resistance spot welding for a certain part

## 3.2 无铆钉铆接技术的不足之处

### 3.2.1 工艺条件要求较高

#### (1) 操作姿态

无铆钉铆接时,为避免模具损坏和保证接头质量,须保证脱模器、凸模、凹模与板材之间的垂直度为 90°,一般最大偏差不能超出 2°,而实际生产中,由于零件之间的匹配精度问题,个别零件存在一定的位位置偏差,在铆接时,脱模器对零件的矫形强行实现贴合,会在零件上留下较深的压痕,这种情况在机器人铆接时出现的比较多。而在人工操作铆钳时,与板材垂直度的最大偏差可以达到 15°以上,由此,对操作者的操作手法和经验有较高要求。

#### (2) 干涉区大

无铆钉铆接的钳臂体积较焊钳大,其脱模器和凹模也较焊钳电极的截面积大,所以,在进行作业时,需要的无干涉空间较大,不适用于空间结构狭小、复杂的零件,对零件结构有一定的避让要求。

#### (3) 板材性能

无铆钉铆接接头依靠板材的塑性冷加工成形,需要板材具有较好的塑性性能,对于连接延展性较差的板材难以形成互锁结构<sup>[16]</sup>,如热处理硬化板材、高硬板材等。而传统有铆钉铆接和电阻点焊则不会发生这种难形成连接接头的问题。

#### (4) 板材厚度和层数

无铆钉铆接技术适用于薄板铆接,对板材的层数和厚度有限制。板材层数普遍为 2 层,较少采用 3 层结构;板材总厚度一般不能超过 5 mm<sup>[11]</sup>。而传统有铆钉铆接则薄板、厚板、多层结构均可适用,电阻点焊也能够较普遍地实现 3 层板材结构的连接

点成形。

### 3.2.2 轴向载荷强度低

无铆钉铆接头为强力挤压后产生的镶嵌结构,板材之间为非熔合状态,其轴向承载力较低,低于电阻点焊接头和传统有铆钉铆接头。所以,对于具有一定承载要求的产品部位,如汽车车身中承载重量的地板总成等部件,无铆钉铆接还未能广泛地应用。

无铆钉铆接技术的上述不足,限制了其在制造领域的应用范围。与此同时,如何适用于高强硬化板材和提高轴向载荷强度也成为业内进行研究和探索的重要方向。

## 4 结语

无铆钉铆接技术是一种冷连接工艺,对其工作原理和技术优劣势进行深入的分析,将进一步提升我国制造业的自主应用能力。与传统连接技术相比,无铆钉铆接技术有着显著的优势,尤其在世界对环境问题、能耗问题愈加重视和我国碳达峰等节能减排的政策和背景下,其显著的低碳、无排、轻量化等特点使其在制造业中更具竞争力。但无铆钉铆接技术也存在着明显的不足,其在高脆硬化钢板、多层板材、高载荷等条件下的应用还需要进行深入地研究,使该技术不断得到更新和完善,更广泛地应用于制造产业中来。

### 参考文献:

- [1] 王志勇,韩善灵,卢翔. 汽车车身轻量化材料无铆冲压连接技术的研究进展[J]. 热加工工艺, 2019, 48 (17): 5-10, 4.  
Wang Z Y, Han S L, Lu X. Research progress of clinching technology for lightweight automobile body materials [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (17): 5-10, 4.
- [2] 皮智谋. 几种先进的焊接技术研究现状综述[J]. 热加工工艺, 2013, 42 (23): 8-13.  
Pi Z M. Research review of several advanced welding technology [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (23): 8-13.
- [3] 何玉林. 金属板料无铆钉自冲铆接成形规律的研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2011.  
He Y L. Research on the Deformation Behaviors of the Clinch Joining of Metallic Sheets [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Science and Technology, 2011.
- [4] Oudjene M, Ben-Ayed L. On the parametrical study of clinch joining of metallic sheets using the Taguchi method [J]. Engineering Structures, 2008, 30 (6): 1782-1788.
- [5] 李晓静, 李晓雷. 汽车制造业中自冲铆接的新型连接工艺初探[J]. 天津职业院校联合学报, 2007, 9 (7): 16-18.  
Li X J, Li X L. A kind of late-mode joining technique-self-piercing riveting in automobile manufacturing [J]. Journal of Tianjin Vocational Institutes, 2007, 9 (7): 16-18.
- [6] 刘亚丽. 无铆钉连接技术研究及有限元模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.  
Liu Y L. Research on the Technology and the Simulation Using Finite Element Analysis of Clinching [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [7] Vavis J. Economics of clinched joint compared to riveted joint and example of applying calculations to a volur product [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 172 (1): 130-138.
- [8] 杨照军. 无铆连接技术在金属防火门行业的应用可行性研究[J]. 机电信息, 2020, (11): 78-79.  
Yang Z J. Feasibility study on the application of clinching technology in the metal fireproof door industry [J]. Mechanical and Electrical Information, 2020, (11): 78-79.
- [9] 杨欣怡. 板材无铆连接机理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.  
Yang X Y. Study on Mechanism of No-riveting Connection of Sheet [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [10] 黄兴, 杨宏, 陈东, 等. 铝合金车身设计中的铆接技术[J]. 汽车工艺师, 2019, (8): 45-48.  
Huang X, Yang H, Chen D, et al. Riveting technology in designing aluminum alloy body [J]. Auto Manufacturing Engineer, 2019, (8): 45-48.
- [11] 钟丽慧, 孔淑华, 高荣波, 等. 无铆钉冲连质量检验及其影响因素[J]. 电焊机, 2018, 48 (6): 37-44, 54.  
Zhong L H, Kong S H, Gao R B, et al. Quality inspection of clinchen and its influencing factors [J]. Electric Welding Machine, 2018, 48 (6): 37-44, 54.
- [12] 李孟强. CFRP/Al 异质材料胶接/无铆钉铆接及混合连接技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.  
Li M Q. Research on CFRP/Al Heteroplastic Bonding/Clinching and Hybrid Connection Technology [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018.
- [13] 朱上, 李志辉, 闫丽珍, 等. 预时效对汽车用新型 Al-Mg-Si-Cu-Zn 合金烘烤硬化性的影响[J]. 稀有金属, 2022, 46 (3): 281-288.  
Zhu S, Li Z H, Yan L Z, et al. Bake-hardening response in a novel Al-Mg-Si-Cu-Zn alloy with pre-aging [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (3): 281-288.
- [14] 李永兵, 马运五, 楼铭, 等. 轻量化薄壁结构点连接技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2020, 56 (6): 125-146.  
Li Y B, Ma Y W, Lou M, et al. Advances in spot joining technologies of lightweight thin-walled structures [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56 (6): 125-146.
- [15] 张启森. 新型车身接合粘接技术探究[J]. 粘接, 2022, 49 (4): 160-162.  
Zhang Q S. Research on new body bonding technology [J]. Adhesion, 2022, 49 (4): 160-162.
- [16] 何玉林, 党菁, 宗鹏举, 等. 板材无铆钉连接技术的进展[J]. 锻压技术, 2021, 46 (6): 8-15.  
He Y L, Dang J, Zong P J, et al. Development of clinching technology for sheets [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (6): 8-15.