

# 轻量化板材、管材塑性连接 技术研究进展\*

王朋义<sup>1</sup>,金加庚<sup>1</sup>,万戈辉<sup>1</sup>,张昌松<sup>1</sup>,赵雪妮<sup>1</sup>,王忠金<sup>2</sup>

(1. 陕西科技大学机电工程学院,西安 710021;

2. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院,哈尔滨 150001)

[摘要] 轻量化设计中异种材料复杂连接构件的需求日益增多,对传统的连接技术提出了挑战。塑性连接技术是一种通过材料自身塑性变形实现材料间连接的成形技术,由于其具有生产高效、环境友好、连接稳固等特点,成为近年来国内外学术界和工程界研究的热点之一。综述了近年来板材-板材、板材-管材和管材-管材塑性连接新方法,分析了不同塑性连接方法的原理、特点及潜在应用,并对板材、管材塑性连接技术的发展趋势进行了探讨和展望。

关键词: 塑性连接; 板材-板材连接; 板材-管材连接; 管材-管材连接; 轻量化

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.21.022



王朋义

博士,硕士生导师,主要在板材软模精密成形新工艺、轻量化板材与管材塑性连接新技术等方向开展研究,近年来发表SCI收录论文10余篇,主持国家自然科学基金等多项科研项目。

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51805309); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JQ-770); 陕西省教育厅科研计划项目(18JK0112); 陕西高校青年创新团队项目。

随着能源和环境问题的日益严峻,制造业在生产中更加注重“绿色、节能、环保”,轻量化设计已成为现代结构设计中重点考虑的因素之一。在航空、航天、汽车等先进制造领域,以高强钢、铝合金、镁合金及复合材料等为代表的轻质、高强度、难变形材料的应用日益增加。为了能够最大限度发挥材料的各自优点,异种材料构件在汽车、航空航天等领域应用日益增多,在轻量化设计中有很大比重。然而,异种材料间化学成分、组织等的不同,对传统的连接工艺带来了挑战。如对于焊接性能较差或厚度差别较大的铝、铜等材料,焊接存在困难,且易发生应力集中。螺栓连接通用性强,但在承受交变载荷或振动工作环境中需考虑防脱落的问题,且螺栓及螺钉头部进一步增加了连接件的重量。传统铆接工艺需要预制孔,降低了原材料强度。采用胶接方法,其连接强度受温度影响,耐老

化性能差。因此,发展面向轻质、高强度、难变形、异种材料间的新塑性成形方法具有广阔的发展空间。

工程中连接结构的比例极大,同种材料、异种材料间的连接应用广泛,其中以金属连接件的应用最多。塑性连接技术是指依靠材料自身的塑性变形流动,实现材料间连接的新型工艺。综合来说,塑性连接大体可以分为两类:(1)靠界面压力实现连接,如利用材料热胀冷缩进行装配连接,使用冷棒料作为凸模,冲裁加热后的板料,实现二者的连接<sup>[1]</sup>,或者利用液压力实现管材之间的连接<sup>[2]</sup>;(2)机械连接,通过形成机械锁扣及类似的形式实现连接,如卷边、自冲铆接、平板铆接等。近年来,随着连接结构的多样化、连接功能的复合化,出现了许多新的连接方法。与常规铆钉或其他需要辅助材料的连接方法相比,塑性连接方法通过材料自身变形实现连接,可以有效减重。因

此,本文主要对近年来发展的板材、管材间的无辅材塑性连接技术进行介绍。

本文首先对近年来提出的板材-板材、板材-管材和管材-管材间塑性连接新方法进行综述,并分析了各种工艺方法的优缺点及潜在应用前景,在此基础上,对板材、管材塑性连接技术的发展趋势进行了展望。

## 板材-板材塑性连接新方法

铆接是常见的板材间机械连接工艺之一,无铆连接和平底铆接是近年来发展起来的无辅材塑性连接新工艺。然而,无铆连接在连接点处一侧形成凸起,另一侧形成凹坑,影响其美观程度。Chen等<sup>[3]</sup>提出了一种用整形铆钉对铆接接头进行整形的新方法,以降低凸出高度,提高连接强度。在整形过程中,将整形铆钉嵌入到铆接处,然后用平模在一次行程中压缩突出部分。通过有限元模拟和试验研究,优化了整形铆钉的几何

参数,并验证了该方法的有效性。由于该方法加入了整形铆钉,增加了连接件的重量。为了克服这个缺点,进一步提出一种适用于汽车铝合金板材的平压整形无铆连接技术,其原理如图1所示,通过分瓣式模具和平滑模具获得平压整形无铆连接点,研究表明,平压整形无铆连接技术在降低凸起高度的过程中可增加颈厚值,从而有效提高连接点的强度和能量吸收能力,整形力为30kN时,平压整形无铆连接点的强度比未整形无铆连接点的强度增加了16.3%<sup>[4-5]</sup>。此外,断裂是平压整形无铆连接点的主要失效模式。平底无铆塑性连接工艺是通过专用的平底无铆塑性连接模具,利用板材的塑性变形能力,在外力的作用下迫使被连接的板材在连接点处产生材料流动,使板材之间形成一个相互镶嵌的倒置 $\Omega$ 形状的机械锁,从而实现不同板材之间的连接,且与板材接触的平底模具的平面是光滑平整的。韩晓兰等<sup>[6]</sup>针对平底无铆塑性连接铆接头的抗拉强度

检测成本高、周期较长的问题,建立了平底无铆塑性连接抗拉强度预测模型,并通过试验验证了抗拉强度预测模型的准确性。Gerstmann等<sup>[7]</sup>通过数值模拟研究了平底铆接-粘合混合工艺成形过程,结果表明粘合固化后进一步提高了连接强度,并结合试验对如何减小粘结剂死区尺寸进行了粘结层厚度、压边力等参数优化。

为了达到较高的表面质量和较好的连接强度,Kato等<sup>[8]</sup>提出了一种端部预制锥度的管状铆钉,放置于板材间并压缩板材,管状铆钉刺穿板材从而实现二者的连接。由于受到挤压作用,管状铆钉的截面变成月牙形,能够承受较高强度的抗剪及抗拉强度,另外板材表面无凸起,表面质量佳。另外,还提出了一种波浪式带状铆钉制作方法及连接方法(图2),该铆钉适用于宽度较大板材间的搭接接头。采用管状铆钉或波浪式带状铆钉的剪切强度达到粘结连接强度的12~14倍。Alves等<sup>[9]</sup>进一步

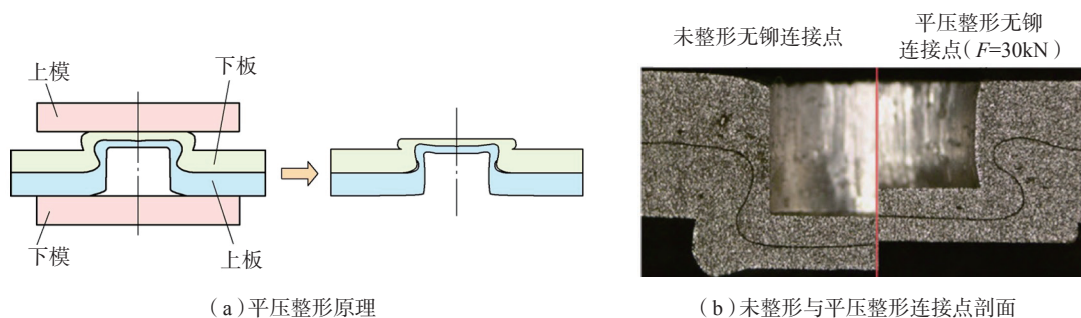


图1 平压整形原理与连接点对比

Fig.1 Flat-reshaping technology and cross section comparison of joining points

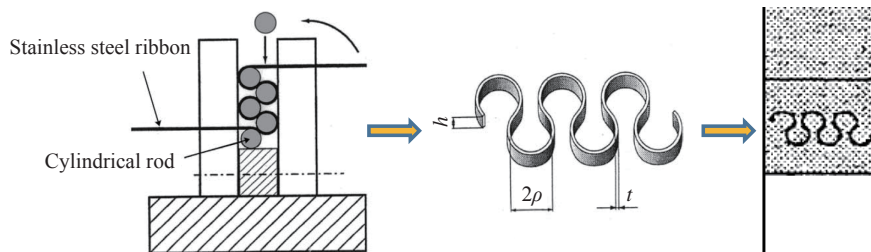


图2 波浪式带状铆钉制造及应用

Fig.2 Method of making wavy ribbon rivet and its application

研究了不同铆钉高度、角度对铆接后互锁值、铆钉高度及剪切、拉脱强度的影响规律。但是,管状铆钉在连接过程中也会出现铆钉位置发生转动的情况,为了解决这个问题, Huang 等<sup>[10-11]</sup>在管状铆钉的内侧或外侧添加了较薄的法兰,研究了分别具有内、外法兰的管状铆钉连接过程,可有效改善铆钉铆接时的转动问题。

碳纤维增强复合材料由于具有较高的比强度、比刚度,轻量化效果明显,因此也受到越来越多的关注。金属-复合材料混合结构由于能够大幅度减轻产品重量、节省燃料,在运输业、民用基础设施和建筑业等领域的应用越来越广泛,实现碳纤维增强复合材料与铝合金等轻量化金属材料间的连接具有重要的应用价值。然而,两种材料间性能的巨大差异,对金属-复合材料混合结构的连接提出了挑战。Lambiasi 等<sup>[12]</sup>探讨了 AA6082-T6/碳纤维增强聚合物(CFRP)薄板的铆接工艺的可行性,结果表明,采用带滑动功能的分瓣模来铆接铝和碳纤维复合材料薄板是可行的,接头在破坏试验中均以脱出的形式失效,因此,颈厚值是铆接过程中需要重点关注的参数。在此基础上,提出了两步铆接法实现碳纤维增强复合材料与铝合金之间的有效连接,其成形原理如图3所示,第1步通过分瓣滑动凹模实现二者的无铆连接;第2步更换整形模具,通过在凸模下方放置不同高度的圆环,实现不同的整形深度  $R_d$  (0.5~2.0mm),整形模具对铆接点施力并压缩其高度,研究了整形模具形状和整形力对铆接点剪切强度和吸能性的影响规律,采用优化的整形模具获得的铆接强度较未整形条件下提高了 32%<sup>[13]</sup>。

唐华清等<sup>[14]</sup>提出了一种金属与复合材料间的胶-多金属细针的新型连接方法,并对传统胶接接头和胶-多细针接头进行对比试验研究,发现新型胶-多细针接头在极限破

坏载荷、破坏应变和能量吸收量等方面均有提高,细针与连接件的桥联作用力起到抑制胶层开裂的作用,从而提高承载能力和可靠性。Lee 等<sup>[15-16]</sup>针对高强度、低塑性材料机械连接方面存在的问题,提出了一种“孔铆连接”新工艺,其连接原理及获得的连接件截面如图4所示,首先将韧性材料放置带有预制孔的脆性材料上方,凸模下压,韧性材料底部压薄,并填充凹模型腔,实现铝合金等材料与先进高强钢、热压钢、碳纤维增强复合

材料等高强度/低塑性材料间的有效连接,通过有限元分析和试验进一步验证了该方法的可行性,获得了达到要求的接头质量。

此外,一些学者也开始借助一些特殊能场来实现板材连接。Babalo 等<sup>[17]</sup>提出一种电液铆接新方法,将电液成形应用于薄板铆接中。储存在脉冲发生器中的电能在浸没于液体中的电极之间突然放电,并在液体中引发冲击波,冲击波使板材变形并形成接头。采用该方法获得了 0.5mm

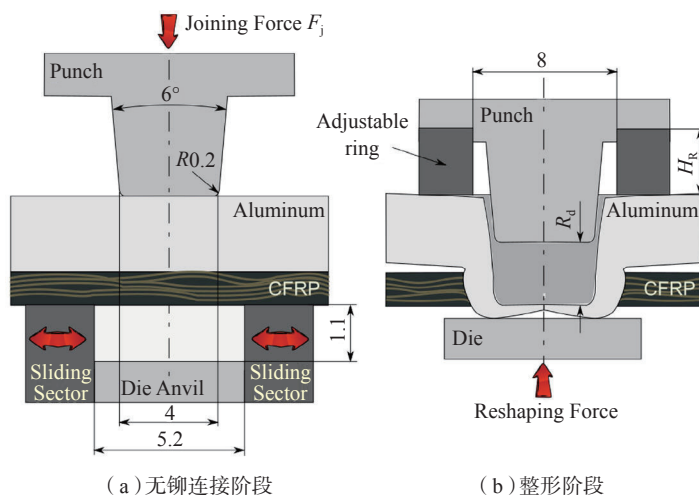


图3 金属-碳纤维复合板“两步法”铆接原理  
Fig.3 Schematic of two-steps clinching of aluminum and carbon fiber reinforced polymer sheets

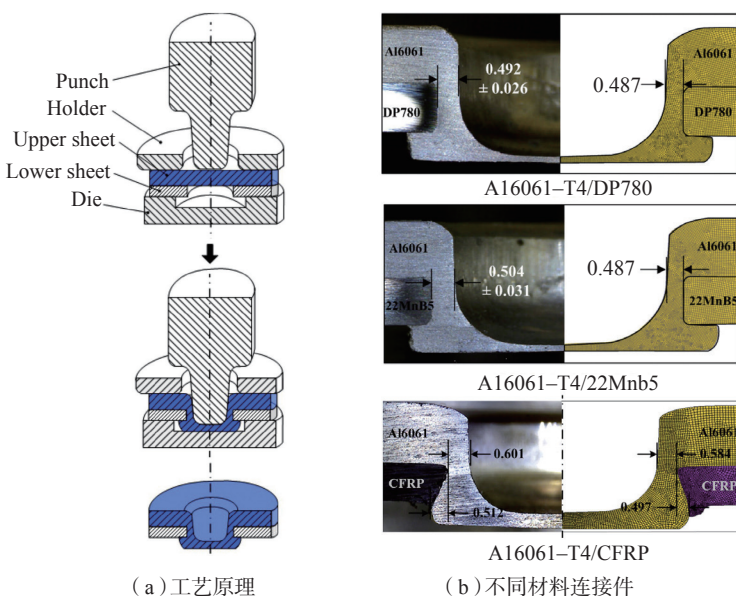


图4 孔铆连接工艺原理及连接件截面  
Fig.4 Schematic of hole-clinching process and cross-section of hole-clinched joint

厚度的 AA3105/Ck67 薄板的孔铆连接件,确定了工艺参数对接头质量的影响,单搭剪切和剥离试验结果表明,该连接工艺的应用提高了接头的强度,其连接效率约为其他孔铆连接方法的两倍。激光冲击铆接成形新技术(Laser shock clinching, LSC)是一种利用脉冲激光诱发的高压冲击波,对板材进行无铆钉铆接的新方法,在电子、微制造等领域具有潜在的应用前景。Wang 等<sup>[18-19]</sup>采用该工艺实现了预制孔不锈钢板与单层和双层铜箔之间的连接,图5为该工艺原理及获得的不锈钢板-双层铜箔的铆接件,研究表明在合适的激光能量和成形高度下才能获得良好的连接件,接头的抗剪强度远远大于剥离强度。Wang 等<sup>[20-21]</sup>利用激光冲

击对 1060 铝箔、铜箔和 304 不锈钢箔进行了微铆接,通过特定的模具实现对底层箔材的剪切并形成锁扣结构,并研究了激光能量对颈厚值和最小壁厚的影响规律。

Wang 等<sup>[22]</sup>在无铆连接中引入一种含碳纤维增强塑料预浸料和铝粉的夹层结构,应用于碳纤维复合材料板与铝合金板的连接。研究表明预浸料能有效地填补板材变形产生的空隙,机械连锁与树脂粘接相结合,提高了接头的可靠性。初明明<sup>[23]</sup>和赵得锁<sup>[24]</sup>等研究了泡沫金属对压印-粘接复合接头力学性能的影响,将泡沫铜、泡沫镍和泡沫铁镍作为复合接头三明治结构的夹层,分析不同泡沫金属夹层对 Al5052-Al5052 压印接头成形质量(峰值载

荷、失效位移和能量吸收能力)的影响。针对金属板材连接成形时在厚度方向上承载能力较差且易产生脱落等问题,李峰等<sup>[25]</sup>提出一种对板材端部预加工出一定形状的凸齿、孔洞或凹槽,将处理后两板材的连接端部进行匹配搭接,冲头对连接部位加载使其发生塑性变形,实现板材间的连接。针对不等厚度的不锈钢板与铝板进行了板材搭接工艺研究,预先设计好端部形状,交叉连接后通过模具进行压缩连接。利用有限元模拟软件 DEFORMTM-3D 模拟了连接过程,试验与仿真结果较为吻合<sup>[26]</sup>。Pragana 等<sup>[27]</sup>提出了一种通过局部切口、弯曲和板料压缩获得搭接接头的新方法(图6),对该接头工艺参数进行了试验与模拟研究,获得的搭接

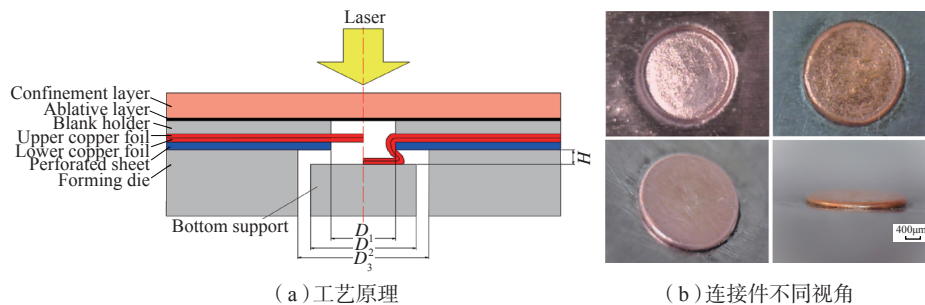


图5 激光冲击铆接工艺原理及连接件

Fig.5 Schematic diagram of making interlock by laser shock forming and obtained clinched joint

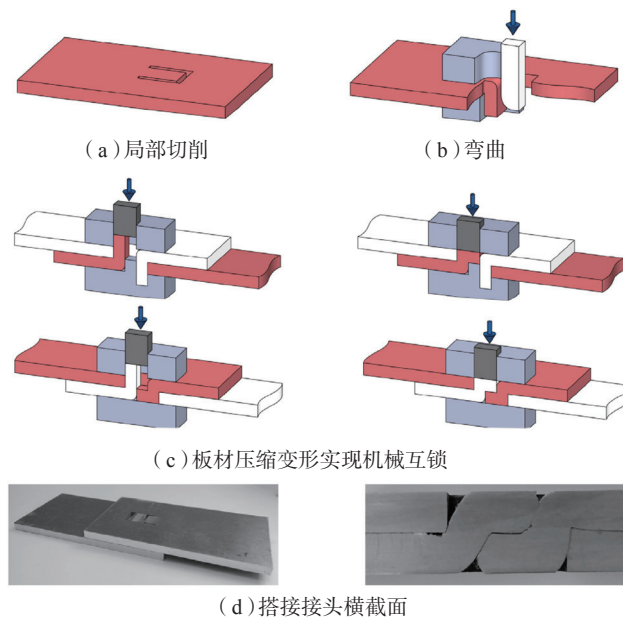


图6 新型板材搭接接头连接工艺

Fig.6 A new joining by forming process to produce lap joints

接头表面无凸起,但连接过程较为复杂。

“榫卯结构”是古代建筑中木构件的一种常用连接方式,近年来,“榫卯结构”也被逐渐应用于金属板材间的连接中。Silva 等<sup>[28]</sup>提出了一种将切缝剪切与板料体积压缩相结合的成形连接工艺,用于制造作为能量吸收器的薄壁防撞箱,比较了新型防撞箱与传统点焊防撞箱的整体耐撞性能,结果表明,这种焊接工艺可以很好地替代电阻点焊。Bragança 等<sup>[29]</sup>提出了一种室温下垂直板材间的“榫卯”连接方法,基本原理为在平板上预制矩形孔(卯),在垂直板端部预制突出的榫头,将榫头穿过矩形孔后采用模具对其端部压缩,从而实现二者间的连接。但该方法在连接部位仍存在突出部分,在对连接件外观要求严格的表面仍难以满足要求。针对该问题, Silva 等<sup>[30]</sup>提出了一种两步法获得垂直板材间连接接头的方法,其原理和获得的连接件如图 7 所示,首先通过在厚度方向部分压缩其中一块板来获得阶梯型的榫槽,然后通过垂直于榫槽厚度的方向上镦粗榫头,以完全填充榫槽,采用该方法可获得表面平整的接头。对于平行板材间的连接,榫头无法像垂直板材间通过去除材料的方式制造, Silva 等<sup>[31]</sup>提出一种电弧熔丝增材制造与塑性成形相结合的方法来获得板材间的搭接接头,上部板材预制榫槽,下方板材通过电弧熔丝增材制造的方法制造榫头,然后压缩榫头实现平行板材间的连接。该方法可以获得任意形状和厚度的榫头,拓宽了工艺适应性。Baptista 等<sup>[32]</sup>提出了一种金属-聚合物三明治复合板搭接接头制造新方法,其成形过程及获得的搭接接头及剖面如图 8 所示,通过在金属-聚合物三明治复合板钻盲孔,去除表层的金属板和中间层的聚合物板,然后在二者之间盲孔部位放置金属镶块并压缩

使其变形,从而获得三明治板材的搭接接头,表面无凸起。

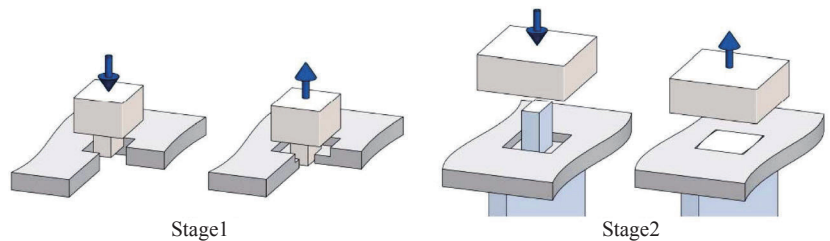
### 板材-管材塑性连接新方法

板材与管材间的塑性连接方法可以归纳为两种主要方式:(1)在管材端部制造环形法兰,将板材放置于法兰上,再对管材端部进行压缩,实现二者的固定和连接;(2)通过压缩管材,使其发生失稳起皱,实现对板材的固定和连接。

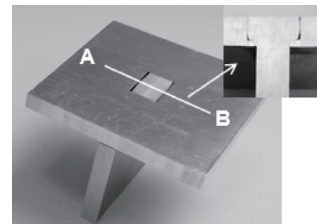
Alves 等<sup>[33]</sup>在板材-管材塑性

连接工艺上进行了大量的探索,提出了一种在室温下通过塑性变形将管与平板固定的连接工艺,其原理如图 9 所示,主要是通过对管材端部进行局部挤压形成凸台,将板材置于凸台上后,再通过扩口模对管材端部施压,从而实现管材端部与板材之间的连接,通过该方法获得了铝合金管与钛合金、钢和聚碳酸酯塑料的连接件。

该工艺的难点在于制造环形法兰过程容易出现折叠或破裂等缺陷,而且该方法中法兰是尖角的,对于



(a) “两步法”成形原理



(b) 连接件及截面

图7 “两步法”垂直板材间连接方法

Fig.7 Two-stage joining of sheets perpendicular to one another

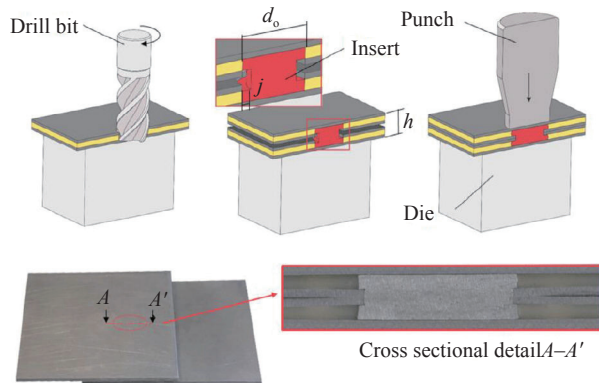


图8 金属-聚合物三明治复合板搭接接头成形过程

Fig.8 Joining by forming process to produce lap joints in metal-polymer sandwich composite sheets

连接强度存在一定影响。鉴于此, Alves 等<sup>[34]</sup>提出了一种新的薄壁管环形法兰制造工艺,采用新型凹模和上、下模具同时运动的方式获得优化的凸台。采用该方法成功制备了金属聚合物夹芯复合板与金属管的连接件<sup>[35]</sup>。在此基础上,在板材待连接处预制沉孔,进而获得端部更为平整的连接表面,并研究了不同沉孔尺寸对连接效果的影响规律<sup>[36]</sup>。他们还提出了一种利用薄壁管受压后产生塑性失稳波纹,实现板材与管材间连接的新室温连接工艺,可以作为

现有紧固件机械固定、焊接和结构胶接之外的一种低成本、高效替代连接技术<sup>[37]</sup>。为了进一步提高连接效率,提出了采用单行程冲压成形的管材,将板料固定于管材上。该方法是一种灵活、经济的机械连接工艺,采用该工艺获得了不同材料间的连接、凸轮轴、座椅靠背框架结构等(图10)<sup>[38]</sup>。

为了达到在板材与管材任意位置的快捷连接,且保证表面美观程度, Alves 等<sup>[39]</sup>提出了一种基于板材周向挤压的连接工艺,通过挤压紧

邻管材部位的薄板,材料沿内径方向塑性流动使得管材缩颈变形,实现二者的快速连接。将试验和有限元建模相结合,确定了主要工艺参数对塑性流动中的影响,并分析了完好和失效接头的不同变形模式。传统的挤压工艺也被应用于轴套连接中,通过挤压芯轴使其发生塑性变形而实现连接,如图11所示,然而接触面上产生的非均匀接触应力分布影响到连接强度。为此, Meissner 等<sup>[40]</sup>采用数值模拟方法获得挤压连接工艺中需求的制造精度和工艺窗口。

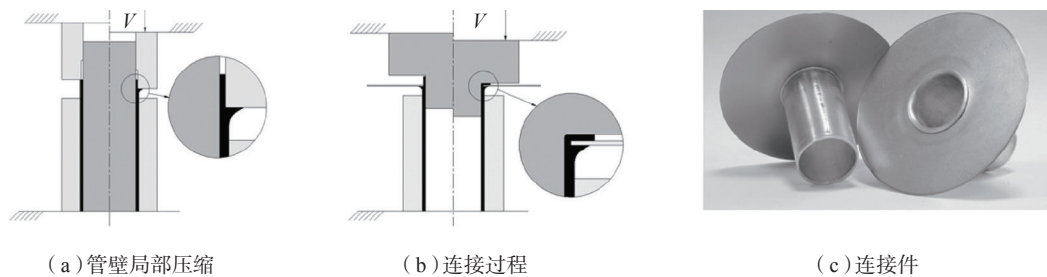


图9 依靠薄壁管体积成形实现板-管连接

Fig.9 Sheet-bulk forming of thin-walled tubes for joining applications

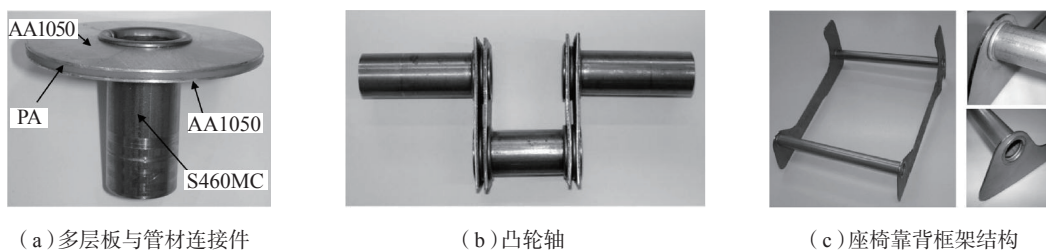


图10 连接件示例

Fig.10 Examples of joining applications

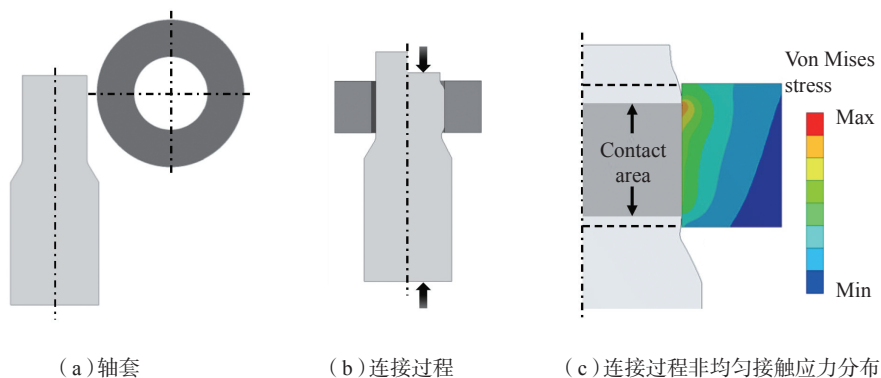


图11 轴套径向挤压连接

Fig.11 Shaft-hub connection joined by lateral extrusion

Kitamura 等<sup>[41]</sup>提出一种室温下轴与法兰的挤压连接方法,先在室温下通过锯齿模具挤压,在轴的端部制造锯齿,对锯齿部分进行渗碳和淬火处理提高硬度,然后轴的锯齿端部作为模具挤压进入预制孔的法兰中,对法兰孔内径材料进行去除,并实现二者的连接。采用该方法获得的连接件的屈服扭矩为采用机械组装方法的1.5倍。

Agrawal 等<sup>[42]</sup>提出了一种通过管材末端卷曲实现板材-管材连接的方法,其原理如图12所示,通过试验与有限元分析,发现成形参数中模具圆角半径、摩擦条件和管支架长度对接头质量有重要影响。但是,该方法会在连接处产生卷圆,不适用于对连接端面表面质量要求高的情形。Park 等<sup>[43]</sup>探索了采用电磁成形方法对板材和管材进行连接,其原理及获得的铝合金板-管连接件如图13所示,瞬间的高压脉冲磁场迫使管材局部发生变形,依靠管材上侧的翻边和下侧的胀形实现二者的连接,研究了不同电压对连接强度的影响,当脉冲电压大于9.2kV时,获得了连接完好的Al6063管与7075板的连接件。

### 管材-管材塑性连接新方法

Zhang 等<sup>[44]</sup>采用旋锻工艺实现了不同直径的铜管间的塑性连接,其原理如图14(a)所示,利用有限元模拟软件 Forge 2D 建立了旋锻成形模型和拉伸试验模型,研究了成形参数对连接管拉伸强度和连接机理的影响规律。通过光学显微镜观察到的接头微观结构如图14(b)所示,金属流线在接头处是连续的,沿管轴向方向排列整齐。连接管的间隙很小,在宏观上几乎是无缝的。

液力胀接技术是通过在管材内部的液体介质施加精确内压,使管材与套环产生局部变形,进而实现二者一次性整体装配的工艺方法,具有工

艺简单、结合面加工精度要求低、材料适应范围广、一致性好等优点。图15为液力胀接的工作原理,主要通过轴管和套环的弹塑性变形和弹复后的残余应变形成过盈配合,实现二者的胀接,该工艺被应用于发动机空心凸轮轴装配(图16)和油气输送用不锈钢-碳钢复合管的制造<sup>[45-46]</sup>。Liu 等<sup>[46]</sup>研究发现凸轮采用非圆形孔可以提高连接强度,采用合适的内压和凸轮孔尺寸,与采用圆形内孔的凸轮相比,抗扭强度可近似增加2倍,达到工作扭矩要求的3~5倍。Müller<sup>[47]</sup>和Weber<sup>[48]</sup>等采用液

压胀接工艺对椭圆形管和矩形管进行连接,并应用于轻质框架结构的制造中。通常液力胀接是从管材内部施加液压力,但是对于复杂轮廓管件的连接,模具的放置及液压的施加等较为困难。Weber 等<sup>[49]</sup>提出从管材外部施压,实现管材间的液力连接,并引入最大弹性应变值作为连接的关键参数,大大拓展了该工艺的适用性和应用范围。

磁脉冲连接技术属于电磁成形的一个分支,常见的管件磁脉冲连接系统示意图如图17所示,是利用渐进脉冲电磁力对金属管进行连接的

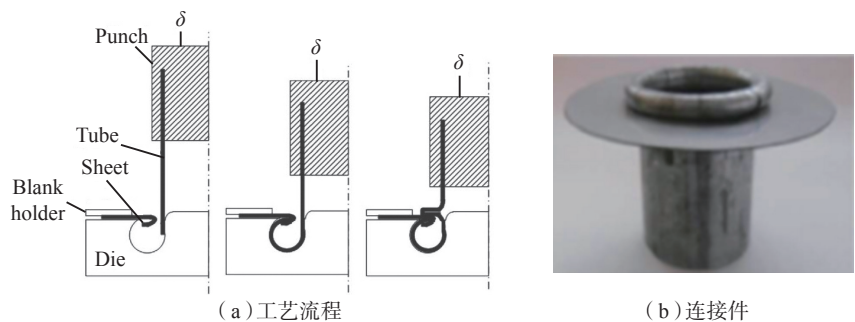


图12 通过卷边实现板-管连接工艺  
Fig.12 Joining a tube to a sheet using end curling

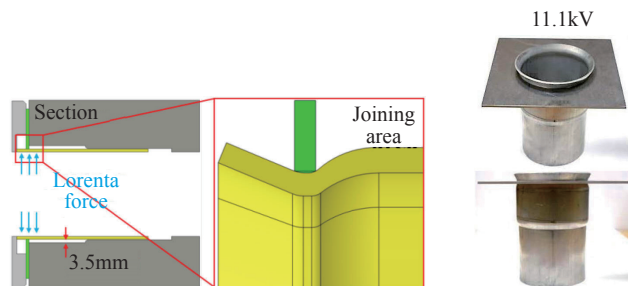


图13 板-管电磁连接工艺原理  
Fig.13 Principle of sheet-tube electromagnetic joining

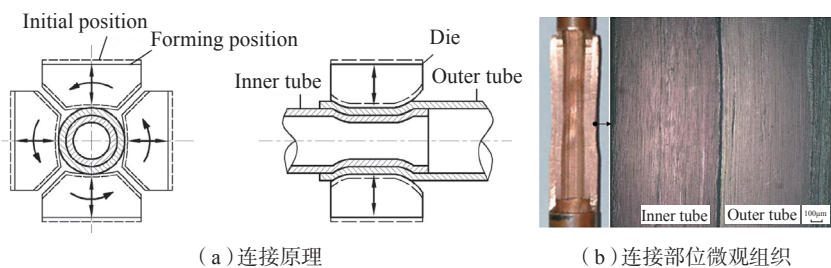


图14 采用旋锻连接实现不等径间管连接工艺  
Fig.14 Joining tubes with different diameters by rotary swaging

一种高能率、高速加工方法,可以实现同种金属或异种金属、金属与非金属间的连接,连接界面不会发生融化,从而能够保持材料的原有特性。与传统焊接工艺相比,磁脉冲连接具有效率高、环境友好、适合大批量生产等优点,但同时也存在设备投入大、工艺参数严苛、安全防护等级要求高、对连接零件尺寸有限制等问题<sup>[50-53]</sup>。

管路系统被喻为飞机的血管,航空导管的连接性能对于管路系统的安全性和可靠性有着重要影响。张荣震等<sup>[54-55]</sup>针对基于扭矩控制的导管内径滚压连接工艺进行了研究,该方法的工作原理如图18所示,芯轴主动转动,滚柱带动保持架轴向转动,依靠芯轴与滚柱间的径向挤压力和切向摩擦力,迫使导管材料进入管套凹槽,完成连接过程,研究了成形机理及特点,分析了成形扭矩与连接件管端伸出量和连接件内径的关系,并成功制备了TA18钛合金导管连接件,装配面的密接度满足设计要求。张凌云等<sup>[56]</sup>采用聚氨酯橡胶挤压实现航空液压导管接头的连接,采用有限元分析方法研究了胀形压力、聚氨酯橡胶套厚度与长度、导管与管套的间隙等工艺参数对于连接质量的影响,并采用优化参数获得了连接质量良好的导管接头,对实际生产起到了重要的指导作用。

Alves等<sup>[57]</sup>提出了一种实现管材端部简单快速的连接方法(图19),先利用外层管材的胀形实现管材端部的搭接,然后沿管材轴向进行压缩,搭接部位两层管均发生塑性失稳,压合后实现互锁。采用该工艺实现了S460MC碳钢管的连接,并结合有限元方法确定了影响连接质量的两项工艺参数:开口间隙与管材半径的比值和管材初始无支撑高度比值。另外,该方法也同样适合于异种材料间的连接<sup>[58]</sup>。

Silva等<sup>[59]</sup>对管端部连接工艺

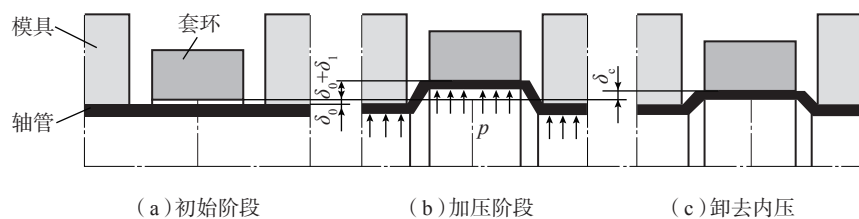


图15 液力胀接原理

Fig.15 Principle of hydrojoining



图16 采用液力胀接制造汽车发动机空心凸轮轴装配件

Fig.16 Assembled hollow camshaft for truck engine by hydrojoining

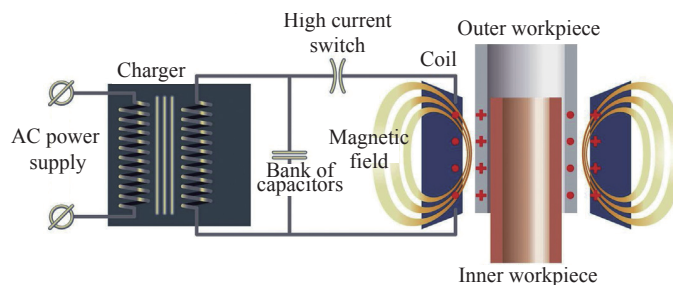


图17 管件磁脉冲连接系统

Fig.17 Magnetic pulse welding set up for two tubes

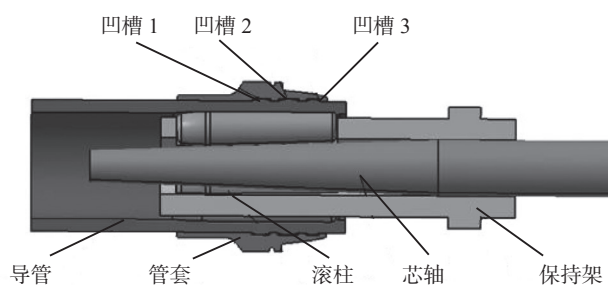


图18 内径滚压连接技术

Fig.18 Principle of inner diameter rolling connection

进行了改善,主要是对上、下模增加了环形凹槽,可以实现连接管之间更好的定位,同时搭接部分长度更长,且带有平直段,在输送液体或气体时也可以使用。拉伸、扭转、弯曲和密封性破坏试验结果表明,新的“搭接”

接头的性能均胜过“对接”接头。然而上述方法会在连接部位外端产生环形的凸起,影响到产品外观和美观性。Alves等<sup>[60]</sup>提出一种通过内部机械互锁实现管材间塑性连接的方法,此方法会在管内部形成凸起,外

部无凸起,美观性有了一定提升。通过管材塑性失稳的方法,也能够用来实现不同直径管材间的垂直连接和倾斜连接,以及三通管的制造(图20)<sup>[61]</sup>。Baptista等<sup>[62]</sup>将电弧熔丝增材制造技术与塑性成形相结合,通过电弧熔丝增材制造技术在型材交接处制造榫头,用来制造空心界面铝型材的十字接头(图21),研究表明,十字节点的单元能够承受2kN的拉脱力和3.2kN的剪切破坏力,可用于制造低成本铝材结构件,在公共汽

车、火车或轮船等客运车辆上具有潜在的应用。

### 板材、管材塑性连接 技术发展趋势

未来板材、管材塑性连接技术的研究应主要关注以下方向:

(1)注重塑性连接方法与其他工艺的结合。对于某些复杂的连接结构件,单纯依靠材料的塑性流动难以实现构件的连接。通过塑性连接方法与冲裁、弯曲、拉深、热处理等传

统工艺以及增材制造、激光成形、电磁成形等先进工艺的结合,获得高连接强度的复杂结构,是塑性连接技术的一个发展方向。

(2)尺寸、材料性能差异较大的构件间的连接。对于厚度差异较大的构件,强度、塑性差异较大的金属间或者金属与非金属(如工程塑料、复合材料等)间的连接,材料流动不足等问题对传统的连接方法带来了挑战,实现其高效、可靠连接亟需创新连接工艺。

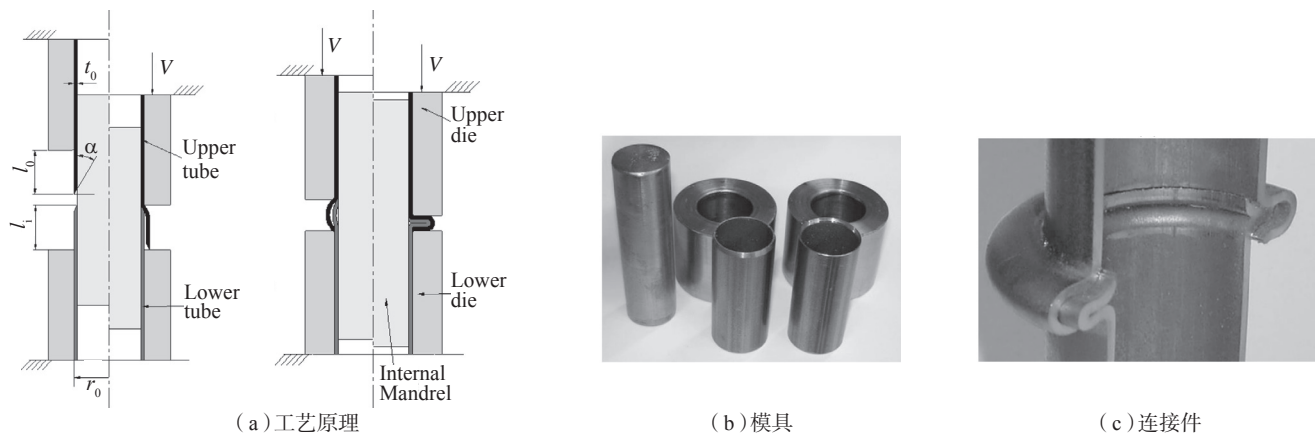


图19 管材连接工艺原理及连接件截面  
Fig.19 End-to-end joining of tubes by plastic instability

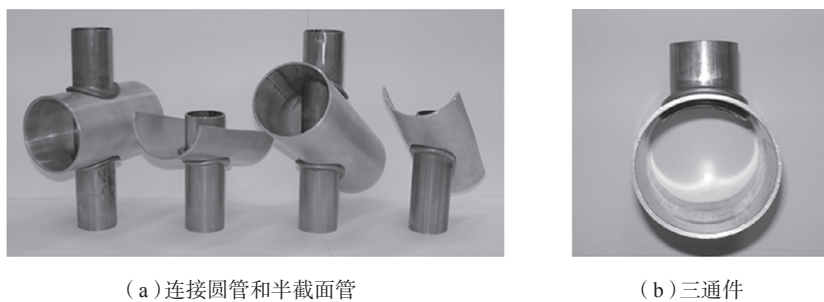


图20 基于薄壁管塑性失稳获得的管-管连接件  
Fig.20 Application of the new proposed technology based on plastic instability waves in thin-walled tubes

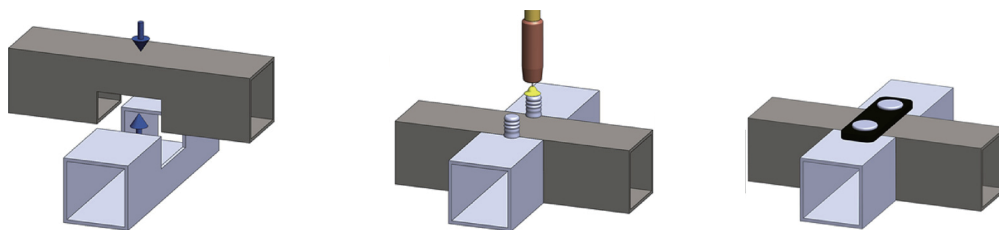


图21 基于电弧熔丝增材制造技术与塑性成形的方管交叉接头成形  
Fig.21 Cross joint consisting of square hollow section profiles obtained by combination of additive manufacturing and joining by forming

(3) 专用模具及设备的研发。目前,除了少数铆接工艺在汽车、航天等领域有着较为成熟的应用,大多数方法还处于基础研究和验证阶段,距离工程化应用还存在一定差距。塑性连接模具及设备的通用性和操作的便捷性将影响到塑性成形方法的推广和应用,因此,发展专用模具和设备,对加快新塑性连接方法的推广及工程化应用具有重要意义。

## 结论

作为传统螺栓紧固、焊接和胶接工艺之外一种绿色、高效的连接技术,塑性连接技术具有广阔的发展空间。本文对近年来板材间、板材-管材和管材间塑性连接新方法进行了归纳和论述,近年来国内外提出的板材、管材间的塑性连接技术主要依靠形成互锁结构,或者利用管材塑性失稳等方式,实现材料之间的有效连接。另外,借助挤压、冲裁等传统工艺或增材制造、激光成形、电磁成形等新型成形方法,实现尺寸、性能差异大的构件间的高强度可靠连接也成为一种趋势。总体来说,大多数工艺仍处于方法的提出及验证中,需要进一步加大专用设备及模具等的研发来实现进一步的工程化应用。

## 参考文献

- [1] MATSUMOTO R, HANAMI S, OGURA A, et al. New plastic joining method using indentation of cold bar to hot forged part[J]. *CIRP Annals—manufacturing Technology*, 2008, 57(1): 279–282.
- [2] GROCHE P, TIBARI K. Fundamentals of angular joining by means of hydroforming[J]. *CIRP Annals*, 2006, 55(1): 259–262.
- [3] CHEN C, ZHAO S D, HAN X L, et al. Optimization of a reshaping rivet to reduce the protrusion height and increase the strength of clinched joints[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 234: 1–9.
- [4] 陈超, 赵升吨, 崔敏超, 等. 汽车铝合金板材平压整形无铆连接技术的研究[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(18): 42–48.
- CHEN Chao, ZHAO Shengdun, CUI Minchao, et al. Study on the flat-reshaping technology with no rivet for joining aluminium alloy sheet of the automobile[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(18): 42–48.
- [5] CHEN C, ZHAO S D, HAN X L, et al. Experimental investigation of the mechanical reshaping process for joining aluminum alloy sheets with different thicknesses[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 26: 105–112.
- [6] 韩晓兰, 陈超, 刘辰, 等. 双层板材平底无铆塑性连接的抗拉强度预测模型[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(24): 61–68.
- HAN Xiaolan, CHEN Chao, LIU Chen, et al. Predictive model of tensile strength in flat clinching[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(24): 61–68.
- [7] GERSTMANN T, AWISZUS B. Hybrid joining: Numerical process development of flat-clinch-bonding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 277: 116421.
- [8] KATO K, OKAMOTO M, YASUHARA T. Method of joining sheets by using new type rivets[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 111(1): 198–203.
- [9] ALVES L M, AFONSO R M, MARTINS P A F. Double-sided self-pierce riveting[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 108(5–6): 1541–1549.
- [10] HUANG Z C, YAO Q H, LAI J M, et al. Developing a self-piercing riveting with flange pipe rivet joining aluminum sheets[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91(5–8): 2315–2328.
- [11] HUANG Z C, XUE S G, LAI J M, et al. Self-piercing riveting with inner flange pipe rivet[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 81: 2042–2047.
- [12] LAMBIASE F, KO D. Feasibility of mechanical clinching for joining aluminum AA6082-T6 and carbon fiber reinforced polymer sheets[J]. *Materials & Design*, 2016, 107: 341–352.
- [13] LAMBIASE F, KO D. Two-steps clinching of aluminum and carbon fiber reinforced polymer sheets[J]. *Composite Structures*, 2017, 164: 180–188.
- [14] 唐华清, 刘龙权. 新型金属/复合材料混合连接结构试验研究[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(22): 45–49.
- TANG Huaqing, LIU Longquan. Experimental investigation on hybrid structure of novel metal to composite[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(22): 45–49.
- [15] LEE C, LEE J, RYU H, et al. Design of hole-clinching process for joining of dissimilar materials—Al6061-T4 alloy with DP780 steel, hot-pressed 22MnB5 steel, and carbon fiber reinforced plastic[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(10): 2169–2178.
- [16] LEE C J, LEE S H, LEE J M, et al. Design of hole-clinching process for joining CFRP and aluminum alloy sheet[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, 15(6): 1151–1157.
- [17] BABALO V, FAZLI A, SOLTANPOUR M. Electro-Hydraulic Clinching: A novel high speed joining process[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 35: 559–569.
- [18] WANG X Y, JI Z, LIU R, et al. Making interlock by laser shock forming[J]. *Optics and Laser Technology*, 2018, 107: 331–336.
- [19] WANG X Y, JI Z, WANG J F, et al. An experimental and numerical study on laser shock clinching for joining copper foil and perforated stainless steel sheet[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 258: 155–164.
- [20] WANG X, LI X D, LI C, et al. Laser shock micro clinching of Al/Cu[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 258: 200–210.
- [21] WANG X, LI C, MA Y J, et al. An experimental study on micro clinching of metal foils with cutting by laser shock forming[J]. *Materials*, 2016, 9(7): 571.
- [22] WANG J, YU Y, FU C Y, et al. Experimental investigation of clinching CFRP/aluminum alloy sheet with prepreg sandwich structure[J]. *Journal of Materials Processing*

Technology, 2020, 277: 116422.

[23] 初明明, 何晓聪, 雷蕾, 等. 泡沫金属夹层对压印-粘接复合接头力学性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(3): 242-247.

CHU Mingming, HE Xiacong, LEI Lei, et al. Effect of foam metal sandwich on mechanical properties of clinch-bonded hybrid joint[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(3): 242-247.

[24] 赵得锁, 何晓聪, 雷蕾. 异种泡沫金属夹层板压印接头静力学性能对比分析[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(2): 217-222.

ZHAO Desuo, HE Xiacong, LEI Lei. Comparison and analysis on the static mechanical properties of clinched joints of dissimilar foamed metal sandwich plate[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(2): 217-222.

[25] 李峰, 徐明达, 隋小冲, 等. 一种金属板材变形连接成形方法: CN103191994B[P]. 2013-07-10.

LI Feng, XU Mingda, SUI Xiaochong, et al. A joining method of sheet metal by deformation: CN103191994B[P]. 2013-07-10.

[26] LI F, LIN J F, SUI X C, et al. Cold-pressing deformation characteristics of steel-aluminum sheets joining[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22: 553-559.

[27] PRAGANA J P M, SILVA C M A, BRAGANCA I M F, et al. A new joining by forming process to produce lap joints in metal sheets[J]. CIRP Annals—manufacturing Technology, 2018, 67(1): 301-304.

[28] SILVA D, SILVA C, BRAGANCA I, et al. On the performance of thin-walled crash boxes joined by forming[J]. Materials, 2018, 11(7): 1118.

[29] BRAGANCA I M F, SILVA C M A, ALVES L M, et al. Joining sheets perpendicular to one other by sheet-bulk metal forming[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(1-4): 77-86.

[30] SILVA C M A, BRAGANCA I M F, ALVES L M, et al. Two-stage joining of sheets perpendicular to one another by sheet-bulk forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 253: 109-120.

[31] SILVA D F, BRAGANCA I M,

SILVA C M, et al. Joining by forming of additive manufactured 'mortise-and-tenon' joints[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233(1): 166-173.

[32] BAPTISTA R J S, PRAGANA J P M, BRAGANCA I M F, et al. Joining metal-polymer sandwich composite sheets with mechanical nuggets[J]. CIRP Annals, 2020, 69(1): 249-252.

[33] ALVES L M, GAMEIRO J, SILVA C M A, et al. Sheet-bulk forming of tubes for joining applications[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240: 154-161.

[34] ALVES L M, AFONSO R M, SILVA C M A, et al. Boss forming of annular flanges in thin-walled tubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250: 182-189.

[35] ALVES L M, AFONSO R M, SILVA C, et al. Joining sandwich composite panels to tubes[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2019, 233(7): 1472-1481.

[36] ALVES L M, AFONSO R M, SILVA C M A, et al. Joining by forming of tubes to sheets with counterbored holes[J]. Key Engineering Materials, 2018, 767: 421-428.

[37] ALVES L M, DIAS E J, MARTINS P A F. Joining sheet panels to thin-walled tubular profiles by tube end forming[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(6): 712-719.

[38] ALVES L M, MARTINS P A F. Single-stroke mechanical joining of sheet panels to tubular profiles[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15(1): 151-157.

[39] ALVES L M, SILVA F L R, AFONSO R M, et al. Joining sheets to tubes by annular sheet squeezing[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2019, 143: 16-22.

[40] MEISSNER R J P, LIEWALD M, ULRICH D, et al. Numerical study on the applicability to manufacturing of contact-stress-optimised shaft-hub connections joined by lateral extrusion[J]. Manufacturing Review, 2020, 7: 21.

[41] KITAMURA K, HIROTA K, UKAI Y, et al. Cold joining of rotor shaft with flange by using plastic deformation[J]. CIRP Annals—

Manufacturing Technology, 2012, 61(1): 275-278.

[42] AGRAWAL A K, NARAYANAN R G. Joining of a tube to a sheet through end curling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 246: 291-304.

[43] PARK H, LEE J, KIM S J, et al. Form-fit joining behaviour between an aluminium tube and sheet using electromagnetic forming[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 418: 012115.

[44] ZHANG Q, JIN K Q, MU D. Tube/tube joining technology by using rotary swaging forming method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(10): 2085-2094.

[45] 苑世剑. 现代液压成形技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

YUAN Shijian. Modern hydroforming technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.

[46] LIU G, LIN J F, YUAN S J, et al. Mechanism of hydrojoining and approach to increase torsion strength of assembled camshafts[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2015, 137(5): 051015. DOI:10.1115/1.4031094.

[47] MÜLLER M, GIES S, TEKKAYA A E. Joining by Die-less hydroforming of profiles with oval cross section[J]. Key Engineering Materials, 2018, 767: 405-412.

[48] WEBER F, MULLER M, HAUPT P, et al. Analytical process design for interference-fit joining of rectangular profiles[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 276: 116391.

[49] WEBER F, HAHN M, TEKKAYA A E. Joining by Die-less hydroforming with outer pressurization[J]. Journal of Advanced Joining Processes, 2020, 1: 100014.

[50] KAPIL A, SHARMA A. Magnetic pulse welding: An efficient and environmentally friendly multi-material joining technique[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 100: 35-58.

[51] SHANTHALA K, SREENIVASA T N. Review on electromagnetic welding of dissimilar materials[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2016, 11(4): 363-373.

[52] FAN Z S, YU H P, LI C F. Interface

and grain-boundary amorphization in the Al/Fe bimetallic system during pulsed-magnetic-driven impact[J]. *Scripta Materialia*, 2016, 110: 14–18.

[53] XU Z D, CUI J J, YU H P, et al. Research on the impact velocity of magnetic impulse welding of pipe fitting[J]. *Materials & Design*, 2013, 49: 736–745.

[54] 张荣霞, 吴为, 郑文涛, 等. 基于扭矩控制的导管内径滚压连接成形特征分析[J]. *材料科学与工艺*, 2017, 25(3): 52–57.

ZHANG Rongxia, WU Wei, ZHENG Wentao, et al. Analysis of forming characteristics of the inner tube rolling connection based on torque control[J]. *Materials Science and Technology*, 2017, 25(3): 52–57.

[55] 张荣霞, 吴为, 曾元松. TA18 钛合金导管的内径滚压连接工艺[J]. *锻压技术*, 2017, 42(5): 43–47.

ZHANG Rongxia, WU Wei, ZENG Yuansong. Internal rolling connecting on guide

tubes for titanium alloy TA18[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2017, 42(5): 43–47.

[56] 张凌云, 冯越鹏, 孙伟光, 等. 不锈钢无扩口导管挤压连接成形数值模拟和试验研究[J]. *锻压技术*, 2019, 44(12): 56–64.

ZHANG Lingyun, FENG Yuepeng, SUN Weiguang, et al. Numerical simulation and experimental research on extrusion connection forming for stainless steel flareless tube[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2019, 44(12): 56–64.

[57] ALVES L M, SILVA C M A, MARTINS P A F. End-to-end joining of tubes by plastic instability[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(9): 1954–1961.

[58] ALVES L M, NIELSEN C V, SILVA C M A, et al. Joining end-to-end tubing of dissimilar materials by forming[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2017, 149: 24–32.

[59] SILVA C M A, NIELSEN C V, ALVES L M, et al. Environmentally friendly joining of tubes by their ends[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87: 777–786.

[60] ALVES L M, SILVA C M A, MARTINS P A F. Joining of tubes by internal mechanical locking[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 242: 196–204.

[61] ALVES L M, SILVA C M A, MARTINS P A F. Innovative cold joining technologies based on tube forming[J]. *Manufacturing Review*, 2015, 2: 16.

[62] BAPTISTA R J S, PRAGANA J P M, BRAGANCA I M F, et al. Joining aluminium profiles to composite sheets by additive manufacturing and forming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 279: 116587.

通讯作者: 王朋义, E-mail: wangpengyi@sust.edu.cn.

## Research Progress on Joining of Lightweight Sheet and Tube by Plastic Deformation

WANG Pengyi<sup>1</sup>, JIN Jiageng<sup>1</sup>, WAN Gehui<sup>1</sup>, ZHANG Changsong<sup>1</sup>,  
ZHAO Xueni<sup>1</sup>, WANG Zhongjin<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**[ABSTRACT]** In lightweight design, the demand for connecting components of different kinds of materials is increasing, which challenges the traditional joining technology. Joining by plastic deformation is a kind of forming technology which realizes the connection between materials through plastic deformation. Because of its characteristics of high efficiency, environment-friendly and stable connection, it has become one of the hot spots in the academic and engineering circles at home and abroad in recent years. In this paper, the new methods of joining by plastic deformation of sheets, sheet/tube and tubes in recent years are reviewed. The principles, characteristics and potential applications of different methods of plastic connection are analyzed. The development trend of joining by plastic deformation between sheets and tubes is discussed and prospected.

**Keywords:** Joining by plastic deformation; Sheet-sheet joining; Sheet-tube joining; Tube-tube joining; Lightweight

(责编 大漠)