

基于机械变形的压力连接技术及其在汽车车身制造中的应用

石柏军, 何涛, 何灿荣
(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 详细介绍了基于机械变形的压力连接技术的产生背景、分类、质量保证、技术优势以及发展趋势, 并简要介绍了该技术在汽车制造业中的应用。基于机械变形的压力连接技术是一种新型的机械变形连接技术, 适用于无任何其它协助元件的钣金件的连接。

关键词: 机械变形; 压力连接; 汽车制造
中图分类号: TG386.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3881(2009)4-046-6

The Pressurized Clinching Technology and Its Application in Automobile Body Manufacturing

SHI Baijun HE Tao HE Canrong
(School of Mechanical & Automotive Engineering, South China
University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract The technical background, classification, quality assurance, technical superiority and development trend of pressurized clinching technology were introduced, its application in the automotive industry was discussed. Pressurized clinching technology is a new mechanical joining method especially for sheet metal parts based on forming of joined materials, and no additional joining elements are needed.

Keywords Mechanical deformation Pressurized clinching Automotive industry

0 引言

钣金件一直以来都是采用传统的连接方式进行连接, 比如焊接、钎焊、铆接、螺纹连接以及胶接等。然而, 随着社会经济的发展, 人们在发展工艺技术时必然考虑到自然资源的保护和生产过程的优化。这时, 传统的连接技术已不能满足人们的需求, 不符合经济性、环保性、安全性的基本要求。直到 20 世纪 80 年代开始发展起来的机械变形连接技术才弥补了这方面的缺陷。压力连接技术是机械变形连接技术的一种, 它以其绝对的技术优势迅速在世界范围内得到推广, 并广泛应用于汽车行业中的车身制造业。作者将对基于机械变形的压力连接技术(以下简称为压力连接技术)以及其在汽车车身制造中的应用作详细的介绍。

1 压力连接技术

1.1 压力连接技术的产生背景

机械变形连接技术并非一项新型的发明, 早在 1897 年在德国就申请了专利, 直到 20 世纪 70 年代末德国托克斯冲压技术有限公司研究开发出了 TOX 连接技术, 并一举获得德国 RUDOLFEBERKE 技术改革大奖^[1]。从 20 世纪 80 年代开始, 机械变形连接技术在德国发展十分迅速, 德国将其归入 DN 8593 标准中的变形连接第 4.5 组^[2]。1986 年, BIM 公司在美国引入了 Tog-L-Loc 商标, Trumpf GmbH 和 TOX GmbH

在 1987 年开始生产机械压力连接设备。一年后, Attexor Equipments S.A. 在瑞士开始生产压力连接设备^[3]。目前机械变形连接技术在国外已经发展比较成熟。

机械变形连接技术指被连接件(被连接部分)或协助元件(协助连接部分)利用局部或全部变形来连接的加工方式^[4]。而压力连接技术则是机械变形连接技术上的一个分支(图 1), 它是一门集有限元建模分析、统计学、数值分析、材料特性研究、金属材料变形理论以及工业控制技术等众多课题的综合性学科。

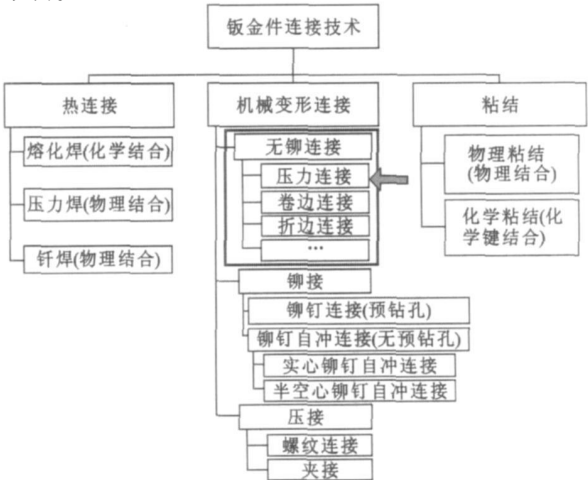


图 1 钣金件变形连接技术分类

1.2 压力连接技术分类

压力连接技术是指两个或者多个被连接件，在不利用任何协助元件的条件下，通过一个或者多个工作过程形成连接点连接起来的一种新型的连接技术。

压力连接技术按剪切形式可分为有剪切与无剪切两种形式。而按连接点的连接形式可分为圆点型连接、方形连接、特殊形状连接、双连接头连接、平连接头连接和带有预置孔的连接。不同形式压力连接技术除了生产过程的差别外，原则是相同的，这个动态

的过程是通过工装的连续运动来实现的。

1.2.1 无剪切压力连接技术

无剪切压力连接是指在一个工作流程中形成连接点，并且在流程过程中被连接件不会受到剪切破坏。无剪切压力连接的一个重要区别是其凹模的结构，其凹模的形式可分为整体式凹模、可分式凹模（凹模可动，可以分为两部分或者多部分），如图 2、3 所示。

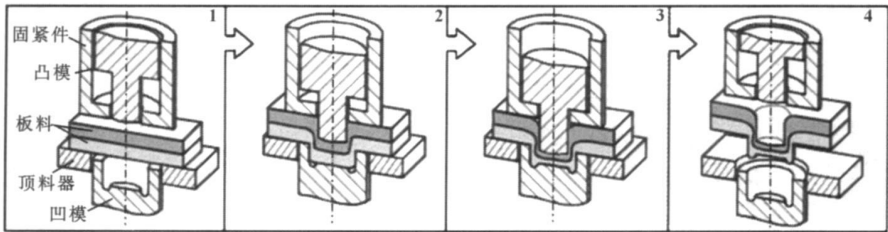


图 2 整体式凹模连接过程

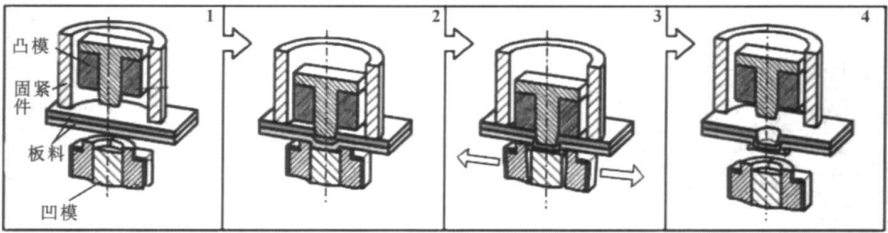


图 3 可分式凹模连接过程

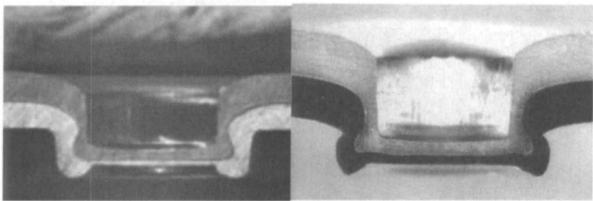


图 4 整体式凹模形成的连接点（左）和可分式凹模形成的连接点（右）

无剪切压力连接过程主要可以分为 4 步：当把连接件放好后，凸模开始下压，压入连接材料内，将部分材料冲入凹模中，初步形成连接点（如图 2 中第 2 步所示）。继续下压，下板材料由于受到挤压就会呈放射性流动趋势流入凹模的沟槽中，同时上板材料也会因为下板材料流入凹模沟槽也呈放射性流动状态流入下板材料中形成“燕尾状”内嵌，从而在两块连接板之间形成自锁连接点，完成压力连接过程。

1.2.2 剪切压力连接技术

剪切压力连接是指在一个工作流程中形成连接点，并且在流程过程中被连接件会被剪切。剪切压力连接装置的凹模都是可分的。剪切压力连接可以分为单层剪切压力连接与双层剪切压力连接（它们之间形成的区别在于对凸模的控制）。

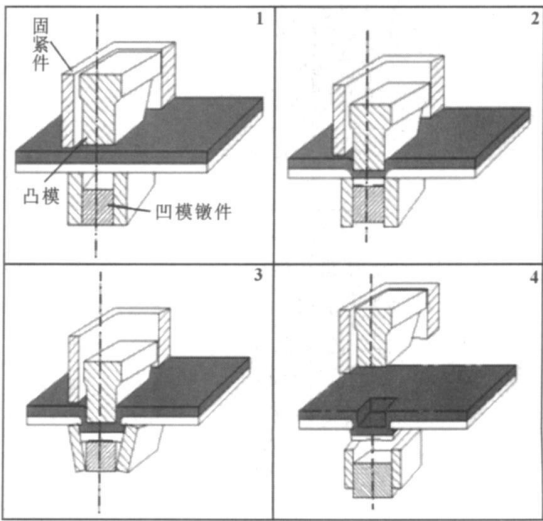


图 5 单层剪切连接过程

剪切压力连接是通过对接件的剪切与锻铆来实现的。主要过程可以分为 4 步（图 5）。当被连接件放好后，固紧件下压将被连接件固定。然后凸模开始向凹模侧运动。对于单层剪切连接来说，只有凹模侧被连接件剪切，凸模侧被连接件完整保留，保持与原连接件一体。对于双层连接来说，两层被连接件都被剪切。变形部分的材料只保持了部分与原连接件连

接。接着凹模镦件开始上移，使变形材料部分受到凸模与凹模的双向挤压，并使其材料呈放射性向周边流动，形成连接点，完成连接过程。

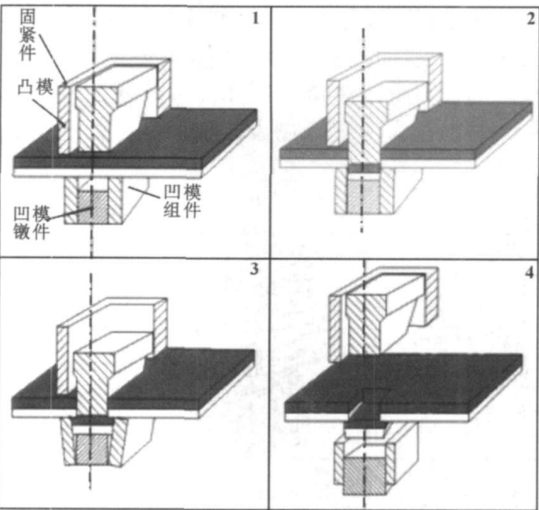


图 6 双层剪切连接过程

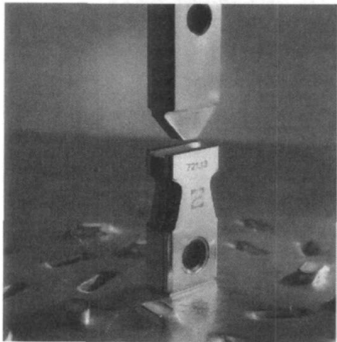


图 7 剪切压力连接模具与连接点

1.3 冲压连接技术的连接形式

冲压连接技术其连接形式主要有圆点型接头连接、方形连接头单层剪切连接、方形连接头双层剪切连接、特殊连接接头剪切连接、双连接头接头连接、平连接接头冲压连接以及带有预置孔的冲压连接(图 8)。

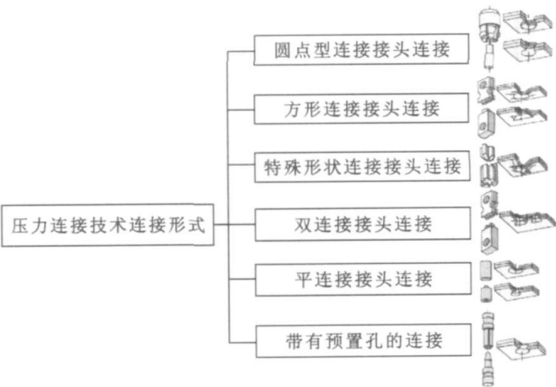


图 8 压力连接技术的连接形式

在应用压力连接技术时，对于不同的连接要求，需要采取不同的连接方式。比如：若连接点处有单侧或者双侧密封性要求，则需要选择圆点型连接技术、方形连接头单层剪切连接技术。若连接点处有抗扭要求则需要选择方形、特殊形状连接点双连接头连接技术。若对钣金件表面平度有要求，比如不能有凸起物，则需要采用平连接头连接技术。若钣金件有预钻孔要求或者预钻孔的费用相对较低，则可选用预置孔型连接技术来实现连接，如表 1 所示。

表 1 不同连接形式的连接特性

压力连接技术连接形式	是否剪切	旋转对称	抗扭可靠性	气液密封性	是否预置孔
圆点型连接接头连接	否	是	低	双侧密封	否
方形连接头单层剪切连接	单层剪切	否	较高	单侧密封	否
方形连接头双层剪切连接	双层剪切	否	较高	否	否
特殊连接接头剪切连接	双层剪切	否	高	否	否
双连接接头连接	单层剪切	否	高	单侧密封	否
平连接接头冲压连接	否	是	低	双侧密封	否
带有预置孔的冲压连接	否	是	低	单侧密封	是

1.4 冲压连接技术连接头的质量保证

如今，冲压连接技术已经被证明为一种具有革命意义的连接新工艺，这种新工艺看似简单，实际上，由于机械变形连接点的质量受到多种因素的综合影响，因此它的成型机制是十分复杂的。不同的连接形式其质量监控与检测原理是一致的，下面以圆点型连接为例说明，如图 9 所示，冲模直径 d_p 、冲模的圆角半径 $R_{\text{圆}}$ 、冲模高度 l_p 、连接点的底部厚度 $t_{b,p}$ 、颈部宽度 t_n 、镶嵌点高度 h 、内嵌宽度 f 等都

对连接点质量有至关重要的影响^[5]。只有当这些参数都能得到有效的控制才能得到最佳的机械变形压力连接点。Varis^[6]指出要得到一个好的连接点必须满足以下 4 个条件：（1）凹模必须完全被填充；（2）连接件必须连接性能良好；（3）下板连接点区域的材料不能有翘起现象；（4）上层连接件的延展率不能过大。其中翘起现象是因为过多材料被压入凹模，延展率过大则会导致颈部宽度 t_n 过小，导致连接失效。

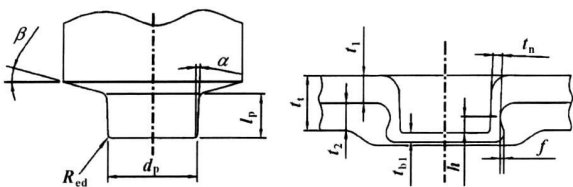


图 9 影响连接点质量的冲模几何参数与连接点几何参数

目前，传统的监控检测技术主要是对连接点单一参数进行检测（如 TOX 厚度自检测，BTM 直径检测），并不能完全在连接点冲压过程中与连接点的连接质量上进行良好的监控。而新发展起来的压机系统过程监控技术主要是基于包络线技术或者窗口技术对

压力、位移进行监控，通过对压力、位移的监控来判定连接点质量是否合格，若不合格，则采取相应控制策略，并找出问题所在。其中，包络线与窗口的定义是关键，需要根据不同连接形式定义不同的质量监测工艺标准。图 10 为某圆点型连接点过程监控示意图。其中标准曲线是由 10 个（或者更多）该类型的良好连接点的实时压力 - 位移曲线求平均得到。灰色区域表示压力控制范围，超出范围则压装过程停止。A、B 为紧急停止线，一旦超出则紧急停止整个过程。C/D/E/F 曲线分别代表四种不同的不合格曲线^[7]。

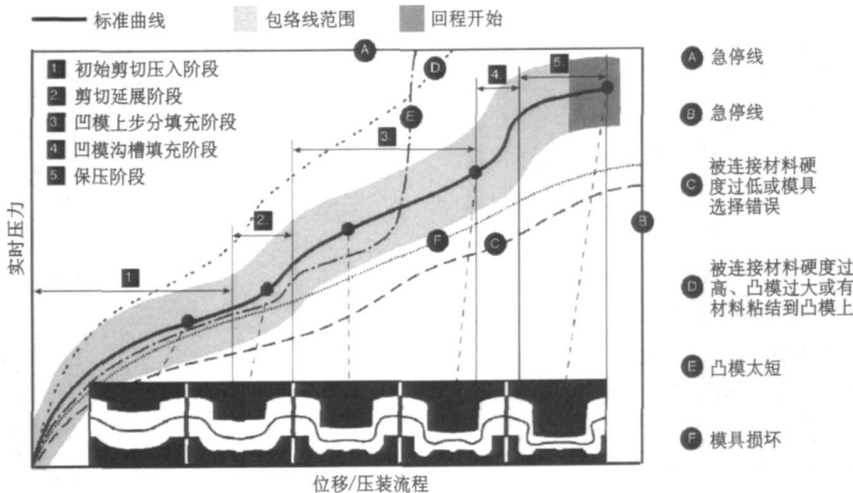


图 10 某圆形连接点过程监控示意

1.5 冲压连接技术的优势

冲压连接技术作为一种新型的连接工艺，除了在经济、环保、安全上比传统的焊接工艺具有其先天的优势外，同时在不同特性材料连接、合金材料连接、有油漆、镀层材料连接以及连接过程与连接点质量检测上具有其绝对优势：

(1) 对不同厚度，不同特性的材料进行连接时，传统焊接技术对于不同特性材料焊接质量不好，甚至无法焊接，这是因为两种材料的熔点、电阻率、可焊性均有不同。而冲压连接技术则只需要考虑连接板料的硬度差别和厚度差别，将相对柔、薄的板冲入相对硬、厚的板件即可达到理想的连接。

(2) 对合金材料进行连接时，特别是对于当今汽车制造业使用的铝合金、镁合金等轻质材料的连接，由于合金材料本身的理化特性（图 11），传统焊接技术有很大的弊端。

① 对于铝合金的连接而言，由于铝合金电阻小，传热快，传统的焊接技术必须采用大功率强规范快速焊接来克服铝合金表面易过热、易氧化、易粘结、易坍塌等缺陷。因此设备的控制精度要求很高，对表面清洁度要求也很高，这无疑大大增加了连接成本，而

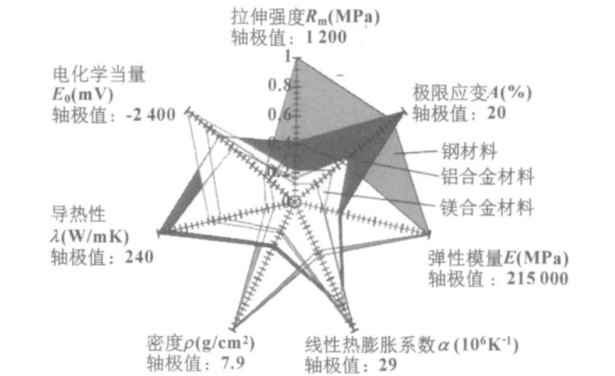


图 11 某钢、铝合金、镁合金材料基本特性且连接质量也不能保证^[8]。而压力连接技术对于铝合金的连接则无此类要求，它是利用连接件的机械变形来形成连接点，因此只要被连接件的力学特性符合条件即可完成理想连接。

② 对于镁合金而言，因为其具有导热快、熔点低、电阻小等物理特性的限制，使得镁合金焊接技术始终发展比较缓慢。而用压力连接技术来连接镁合金最大的限制则是镁合金在常温下延展性能不佳^[9]。则只需对被连接件或者模具进行预热，使其温度达到 220℃ 以上即可使镁合金的延展能力达到要求，预热

时间需要 3~6 s。一种新型的压力连接技术即无模压力连接技术的发展可以使预热时间减少至 1 s 以下,大大减少了加工时间与加工件的可靠性^[5]。因此,相对于传统的连接技术来说,压力连接技术在镁合金的连接具有很大优势。

③ 对于连接材料表面镀层或油漆等覆盖物的连接时,传统的焊接技术会破坏材料表面的镀层,油漆,对材料的强度、抗腐蚀性均有较大影响并且材料表面镀层与油漆会影响焊接的质量。而压力连接技术则不用考虑材料表面镀层、油漆等覆盖物影响。在连接点的成型过程中,表面镀层或油漆会随着材料的塑性形变一起流动,因此不会对零件表面造成破坏,不会影响材料抗腐蚀性及强度。

④ 传统的连接技术(如点焊)基本不能进行无损伤检测,而且连接过程也存在着许多的不确定因素,很难进行控制,而压力连接技术则不仅能对连接点进行无损伤检测,而且能对其连接点的形成过程进行监控,形成一套完整的质量保证体系。

2 冲压连接技术在汽车车身制造业中应用

汽车工业是全球制造业的支柱之一,而车身制造则是汽车制造业中关键的部分。随着汽车工业的发展,人们对汽车的燃油经济性要求越来越高,而降低汽车质量是提高汽车燃油经济性的重要措施之一。因此,汽车轻量化技术被越来越多的人关注。在不降低强度的前提下,为了降低汽车的质量,办法之一则是在多在车身制造中使用轻薄型材料如轻合金,高强度塑料等。但是使用传统连接工艺对这些材料进行连接时却遇到了挑战,传统的连接工艺如电阻焊(点焊)对于薄铝板、轻合金以及塑料等的连接则有很大的弊端,甚至不能用。而压力连接技术则可以有效弥补了这方面的缺陷。另外,由于汽车长期在变化的工况中工作,其车身长期受到不同频率的动载荷的作用,使得人们对车身动载荷强度要求越来越高,而传统的连接技术动载强度太低,与压力连接技术相差甚远。因此在经济、效率、质量、环保以及技术等方面的绝对优势使得它目前被大量用于汽车产业的车身制造业上来代替传统的焊接技术。

压力连接技术作为一种新兴的汽车车身钣金件连接技术,已经在世界范围内得到了广泛的认可与应用。目前该技术已经成功应用于汽车车身的很多部件当中。比如天窗框架,汽车天窗框架主要由铝合金与薄钢板材料组成,若利用焊接技术来连接则成本很高,且连接质量不理想,而采用压力连接技术则是不错的选择;汽车引擎盖板、引擎支架(图 12)主要由薄钢板冲压件组合连接而成,而薄板冲压件连接正是压力连接技术的优势,因此汽车引擎盖板与引擎支架中也大量采用了压力连接技术。另外还有汽车车顶

骨架(图 13)、前盖内板加强件、汽车前盖扣锁加强板、汽车前盖铰链加强板、汽车保险杠、行李箱盖板、制动器毂、仪表框架、车门内板、车尾盖板等部件中都使用了压力连接技术。在国外,奥迪、宝马、奔驰、大众、雪铁龙、福特、通用等国际知名公司,都早已在车身制造业中广泛采用压力连接技术。在国内,随着汽车工业的飞速发展,冲压连接技术也开始被众多汽车生产厂家所青睐,如一汽大众的迈腾、速腾、新宝来、上海大众公司的途安、POLO、SKODA 明睿、上海通用生产的凯迪拉克、林荫大道以及即将上市的中档车 EPSILON II/DELTA 等都在车身制造上成功应用了压力连接技术。

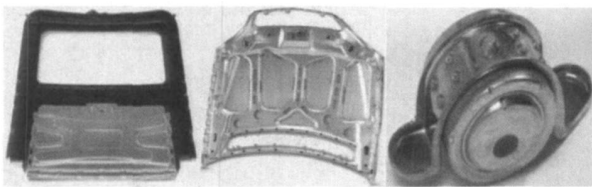


图 12 汽车天窗框架、引擎盖板与引擎支架



图 13 BMW3 系列车顶(125 个压力连接点)

3 发展现状与发展趋势展望

3.1 冲压连接技术存在的问题

从 20 世纪 80 年代至今,冲压连接技术已经在世界范围内得到长足的发展。但仍然存在一些问题。由于成型过程中复杂的应力变化、塑性形变以及多种参数影响相互影响的复杂性,至今并无一套公认完整的理论体系来从本质上完全描述冲压连接技术成型机理,导致冲压连接技术的发展与研发至今还处于在试验科学阶段。比如在模具选型上,至今没有一套完整的理论体系来描述如何对模具来选型,只是利用试验为基础,然后对试验数据加以分析,最后选出最优模具;在脆性材料以及某些高强度塑料的连接上,完成质量并不理想;机械变形压力连接监控系统并不完善,模具长时间工作磨损后系统无自动识别功能;制造系统刚性化。不能快速重组现有硬件及软件资源,实现新类型产品的再制造,不能动态响应变化的市场需求进行再制造加工,可扩充性、可重构性、可重用性及可兼容性不强等缺陷。

3.2 冲压连接技术的发展现状与发展趋势

对于机械变形压力连接技术未来的研究与发展问题上, 加强数值化方法仿真研究, 探究压力连接技术本质, 建立一套完整的压力连接理论, 减少试验次数是重点和基础。进入 21 世纪以来, 压力连接理论已经取得了进展, 在 2000 年, Hamel 等^[10]提出了在压力连接过程的有限元模拟中采用自动重组 (Automatic Remeshing) 的方法, 对压力连接有限元模拟做出了重要贡献。Varis^[11-13]在 2002、2003 年把不同厚度的高强度钢形成的圆形连接点与方形连接点进行了比较研究, 而在 2003 年的另一份研究报告中, 对连接过程中的各种参数与连接点的剪切强度的关系做了大量试验与研究。最近, de Paula 等^[14]对模具的几何参数与连接点颈部宽度与自锁宽度的关系做了研究, 而 Oudjene, Ben-Ayed^[15-16]利用田口方法 (Taguchi Methods) 对模具的几何参数与连接点颈部厚度、自锁宽度以及拉伸强度之间的关系做了研究, 发现模具的几何参数对连接点的质量影响很大, 并且对模具参数进行了优化, 取得了不错的效果。另外, 在 2008 年他们还在田口方法的基础上提出了利用基于移动最小二乘法的响应面方法 (The Response Surface Methodology with Moving Least-square Approximation) 对模具的几何参数与连接点颈部厚度、自锁宽度以及拉伸强度等之间的关系进行研究, 对压力连接理论的研究提出了一种新的研究方法, 具有很高的应用价值。同时, 在加强对压力连接理论研究的基础之上, 还需要在其理论的应用领域展开研究, 比如开发智能化模具选型系统, 减少试验次数和成本; 加强新型材料压力连接特性研究, 特别是对于汽车行业应用非常广泛的镁合金, 由于受到成型温度的限制, 使得对于镁合金机械变形压力连接技术仍处于研发阶段, 假如镁合金连接技术一旦成熟, 将会带来巨大的市场价值; 开发质量监测系统模具磨损自动识别功能, 减少样件试验次数和频率; 柔性制造系统 (Flexible Manufacturing System) 开发, 与机器人集成, 实现具有高度可扩充性、可重构性、可重用性及可兼容性制造系统, 实现模块化、标准化的生产线, 提高生产效率, 减少生产成本; 加强新型压力连接技术研究, 比如无模压力连接技术、液压连接成型技术等等。

参考文献

- 【1】Deutsches Reichspatent DRP-Nr 98517, 1897 (in German).
- 【2】H P Liebig, R Beyer Press joining of especially coated steel and aluminum sheets [J]. Advanced Technology of plasticity, Vol II Stuttgart 24 - 28 & 1987 Berlin SpringerVerlag 1987: 933-940
- 【3】J. P. Varis, J. Lepistö A simple testing-based procedure

and simulation of the clinching process using finite element analysis for establishing clinching [J]. Thin-Walled Structures 2003, 41: 691-709

- 【4】【德】奥尔特温·哈恩, 乌韦·克勒门斯. 机械变形连接 [M]. 杜菲娜, 谭义明, 译. 中国: 化学工业出版社, 2008
- 【5】S. Saberi, N. Enzinger, R. Valant Influence of plastic anisotropy on the mechanical behavior of clinched joint of different coated thin steel sheets [J]. International Journal of Material Forming, 2008 (1): 70-79
- 【6】Reinund Neugebauer, Reinhard Maumann A new technology for the joining by forming of magnesium alloys. German Academic Society for Production Engineering (WGP), 2007.
- 【7】J Varis A novel procedure for establishing clinching parameters for high strength steel sheet Dissertation Lappeenranta 2000
- 【8】Juha Varis Ensuring the integrity in clinching process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 174: 277-285
- 【9】王元良, 周友龙, 胡久富. 铝合金汽车轻量化以及其焊接新技术 [J]. 现代焊接, 2006 (8): 1-4
- 【10】袁择, 李德全, 付涛. 镁合金焊接技术的发展现状与趋势 [J]. 现代焊接, 2008 (3): 1-5
- 【11】V. Hamel, J.M. Roelandt, J.N. Gacel, F. Schmit Finite element modeling of clinch forming with automatic remeshing [J]. Computers and Structures 2000, 77: 185-200
- 【12】J. P. Varis The suitability for round clinching tools for high strength structural steel [J]. Thin-Walled Structures 2002, 40: 225-238
- 【13】J. P. Varis 2003. The suitability of clinching as a joining method for high-strength structural steel [J]. J Mater Process Technol, 2003, 132: 242-249.
- 【14】J. P. Varis, Lepistö J A simple testing-based procedure and simulation of the clinching process using finite element analysis for establishing clinching parameters [J]. Thin-Walled Struct., 2003, 41: 691-709
- 【15】A. A. de Paula, Aguilar M. T. P., Pertence A. E. M., Cetlin P. R. Finite element simulation of the clinch joining of metallic sheets [J]. J Mater Process Technol, 2007, 182: 352-357.
- 【16】M. Oudjene, L. Ben-Ayed On the parametrical study of clinch joining of metallic sheets using the Taguchi method [J]. Engineering Structures, 2008, 30: 1782-1788
- 【17】M. Oudjene, et al Shape Optimization of Clinching Tools Using the Response Surface Methodology with Moving Least-square Approximation [J]. J Mater Process Tech., 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.02.030