

薄板材料 连接新技术

BAOBAN CAILIAO
LIANJIE XINJISHU

何晓聪 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

薄板材料连接新技术

何晓聪 著

北 京

冶金工业出版社

2016

内 容 提 要

本书是作者近 30 年从事薄板材料连接新技术研究和教学经验的总结, 主要阐述了自冲铆接技术、压印连接技术及结构粘接技术, 包括连接机理、失效机理及结构粘接技术与自冲铆接技术或压印连接技术的复合应用。

本书可供航空航天、汽车制造等领域工程技术人员和研究人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

薄板材料连接新技术/何晓聪著. —北京: 冶金工业出版社, 2016. 1

ISBN 978-7-5024-7090-6

I. ①薄… II. ①何… III. ①金属薄板—连接技术
IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 271309 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 杨秋奎 加工编辑 李维科 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7090-6

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 固安华明印业有限公司印刷

2016 年 1 月第 1 版, 2016 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 21.5 印张; 519 千字; 327 页

75.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

序

我非常高兴地看到昆明理工大学何晓聪教授的学术专著《薄板材料连接新技术》出版。这是一部汇集作者及其研究团队多年研究成果的专著。

我于1999年在英国 Manchester 大学认识何晓聪教授。我注意到何教授从1991年留学日本开始,多年潜心研究薄板材料连接新技术。在英国 Manchester 大学获得工学博士学位后,何教授在英国 Bradford 大学、Manchester 大学等多所著名大学担任博士后助理研究员、副研究员,并于2005年被英国 Warwick 大学创新制造技术研究所聘为高级研究员,参与英国下一代节能型汽车制造技术的研究,承担汽车白车身轻型薄板材料连接新技术的研发工作,在该领域取得了国际公认的学术成就。何晓聪教授于2008年初作为海外高层次人才被引进回国,创建昆明理工大学创新制造技术研究所,继续进行薄板材料连接新技术的研发工作。

多年来,交通运输领域的能源消耗和环境污染问题非常突出。航空、汽车等制造业越来越多采用轻合金、复合材料等新、轻型薄板材料代替传统材料,以实现减重增效、节能减排,促进绿色发展。然而,由于很多新轻型薄板材料焊接性能不好或无法焊接,因此亟需开发薄板材料连接新技术。

何晓聪教授及其研究团队,对自冲铆接、压印连接等薄板材料连接新技术进行了系统深入的研究,在连接机理、失效机理和过程优化等方面得出重要结论,在国际重要学术期刊发表了系列研究论文,并在轿车全铝合金车身上用新技术全面取代传统的点焊技术并获得成功,为轻量化航空器机身及汽车白车身制造等提供了创新技术储备。

2008年以来,何晓聪教授多次应邀为包括《Progress in Materials Science》(2015年影响因子27.417)在内的多种国际重要学术期刊撰写薄板材料连接新技术学科领域综述专论,系统总结该技术领域30多年来在理论研究和实际应用方面的成就与不足,提出今后一段时期的发展思路。

目前,我国正处在由“制造大国”向“制造强国”转换的关键时期,自冲

铆接、压印连接等薄板材料连接新技术已开始应用于航空器、汽车、轻化工机械、家电等制造领域，具有广阔的应用前景，在不远的将来将成为轻量化航空器机身及汽车白车身的主流制造技术。

本书的出版，将对自冲铆接、压印连接等薄板材料连接新技术在我国航空航天、汽车制造等领域的推广应用起到积极的促进作用。另外，细心的读者会发现，本书所引用的参考文献中，绝大部分出自何晓聪教授及其研究生的研究成果。因此可以说，这本学术专著也是读者系统全面了解这项新技术的宝贵参考资料。

中国工程院院士 陈予恕

2015年10月26日

前 言

由于能源紧缺及环境污染所带来的巨大压力,各工业领域都将结构轻量化作为提高竞争力的重要手段之一,因此铝、钛、镁合金等轻合金薄板材料被广泛应用于各类产品的制造。由于很多轻合金薄板焊接性能不好,不能用传统的点焊技术进行连接,因此急需开发薄板材料连接新技术。

近年来,迅速发展的自冲铆接技术和压印连接技术为此提供了全新的解决思路。这些技术具有很多优点,例如可以连接同种或异种板材成为组合结构;可以连接双层或多层板材组合及“三明治”结构;可以连接表面有镀、涂层的板材;质量持续稳定;连接时无热量、烟、气、火花、粉尘或碎屑等产生,属典型绿色制造技术,在航空航天、汽车及轻化工等领域中的应用日益广泛。

粘接技术本属传统连接技术,然而近年来多种高强优质粘接剂的研发成功赋予了传统粘接技术新的生命力。尤其是当粘接技术与上述自冲铆接技术或压印连接技术相结合,往往可以得到“ $1+1>2$ ”的效果,并可有效减少或消除机械连接中普遍存在的微动磨损。

本书的撰写是作者在近30年从事薄板材料连接新技术研究和教学的经验积累上完成的。本书的内容绝大部分取自作者及其团队研究生的研究成果,并参考了国内外同行近年来的学术论著。

本书内容分为三部分,分别阐述自冲铆接技术、压印连接技术及结构粘接技术的连接机理、失效机理,以及结构粘接技术与自冲铆接技术或压印连接技术的复合应用。第一部分(第1~5章)由邢保英博士、许竞楠硕士协助撰写;第二部分(第6~12章)由郑俊超硕士、杨慧艳硕士、刘福龙硕士协助撰写;第三部分(第13~16章)由博士生王玉奇、唐勇硕士协助撰写。昆明理工大学创新制造技术研究所曾凯博士、丁燕芳讲师为本书的撰写提出很好的建议;博士生赵伦、张越及硕士生卢毅、王医峰、高爱凤、张先炼、程强、余童欣等人为本书的撰写提供了多方面的支持,在此一并衷心致谢!

虽然作者已在薄板材料连接技术领域从事研究教学近 30 年,但因学识所限,书中难免存在疏漏和不足之处,敬请同行和读者不吝赐教。若本书能对薄板材料连接新技术在我国航空航天、汽车制造等领域的推广应用起到一些促进作用,作者将感到十分欣慰。

本书的研究内容得到国家科技重大专项 (2012 ZX04012-031)、国家自然科学基金项目 (50965009) 及云南省教育厅科技重大专项 (ZD201504) 的资助,顺致谢意!

作 者

2015 年 10 月

目 录

1 自冲铆接技术概述	1
1.1 自冲铆接技术的发展	1
1.2 自冲铆接原理及工艺过程	2
1.2.1 实心铆钉连接工艺过程	2
1.2.2 半空心铆钉连接工艺过程	4
1.3 自冲铆接技术的特点	6
1.4 自冲铆接头的质量评价标准及其方法	7
1.5 自冲铆接头的质量检测	10
1.6 自冲铆接技术的应用	11
1.7 自冲铆接的实例	13
参考文献	15
2 自冲铆接头成形机理分析	17
2.1 Al5052 自冲铆接头金相实验及分析	17
2.1.1 Al5052 自冲铆接头金相试样的制备	17
2.1.2 阳极化覆膜过程	20
2.2 实验结果及分析	21
2.2.1 金相实验工艺参数的分析	21
2.2.2 金相组织流向和结构分析	21
2.3 自冲铆接过程中材料流动的有限元分析	24
2.3.1 有限元分析软件的选择及模型的建立	24
2.3.2 有限元数值模拟结果及分析	25
2.4 自冲铆接头铆接过程参数优化设计	29
2.4.1 凹模凸台高度对铆接质量的影响	29
2.4.2 铆钉尺寸对铆接质量影响	31
2.4.3 动、静摩擦系数对铆接质量影响	32
2.4.4 对塑性应变比的敏感性	33
2.5 小结	33
参考文献	34
3 自冲铆接头静力学性能及其失效机理	35
3.1 自冲铆接头的制备及静力学试验	35
3.1.1 材料测试	35

3.1.2 试件的连接设备及其制备	35
3.1.3 静力学试验设备及测试参数	39
3.1.4 静力学试验结果及断口 SEM 分析设备	39
3.1.5 静力学试验数据分析理论	39
3.2 板材几何尺寸对接头静力学性能的影响	41
3.2.1 板材几何尺寸对接头失效模式的影响	41
3.2.2 板材几何尺寸对接头静强度的影响	42
3.3 自冲铆接头静力学失效机理分析	46
3.3.1 接头互锁结构滑移	46
3.3.2 接头断口 SEM 分析	53
3.4 铆钉数量及其分布结构对接头静力学性能的影响	55
3.4.1 铆钉数量及其分布结构对接头失效模式的影响	55
3.4.2 铆钉数量及其分布结构对接头静强度的影响	56
3.5 自冲铆接头静力学性能的有限元分析	59
3.5.1 有限元模型的参数选择及建立	59
3.5.2 有限元模型网格划分	60
3.5.3 自冲铆接头静力学结果及分析	60
3.6 小结	61
参考文献	62
4 自冲铆接头动态性能及其失效机理	64
4.1 自冲铆接头疲劳试验	64
4.1.1 试验设备及试验参数	64
4.1.2 试验结果及断口 SEM 分析设备	64
4.1.3 疲劳试验数据分析理论	64
4.2 板材宽度对接头疲劳性能的影响	67
4.2.1 板材宽度对接头疲劳失效模式的影响	67
4.2.2 板材宽度对接头疲劳强度的影响	68
4.3 铆钉数量及其分布结构对接头疲劳性能的影响	70
4.3.1 铆钉数量及其分布结构对接头失效模式的影响	70
4.3.2 铆钉数量及其分布结构对接头疲劳强度的影响	71
4.4 自冲铆接头疲劳失效机理分析	73
4.4.1 板材断口分析	73
4.4.2 微动磨损分析	76
4.5 自冲铆接头疲劳性能有限元分析	78
4.5.1 疲劳分析步骤	78
4.5.2 疲劳分析结果及分析	80
4.6 自冲铆接头模态分析	84
4.6.1 实验模态分析	85

4.6.2 有限元模态分析	87
4.7 小结	91
参考文献	93
5 自冲铆接技术的适用性	95
5.1 连接形式和基板材质连接研究	95
5.1.1 试件连接设备及其制备	95
5.1.2 静力学测试设备及测试参数	96
5.1.3 静力学性能的影响	97
5.2 多层板材连接研究	101
5.2.1 试件连接设备及多层异质材料组合连接可行性研究	101
5.2.2 多层板材组合试件的制备及静力学测试	101
5.2.3 静力学测试结果及其分析	102
5.3 TA1 与异质板材连接研究	104
5.3.1 试件的制备及静力学测试	104
5.3.2 静力学测试结果分析	105
5.4 H62 与异质板材连接研究	109
5.4.1 试件的制备及静力学测试	109
5.4.2 静力学测试结果分析	110
5.4.3 疲劳测试及结果	118
5.5 小结	126
参考文献	127
6 压印连接技术概述	129
6.1 压印连接原理	129
6.1.1 压印连接定义和工艺过程	129
6.1.2 压印连接的几种形式	130
6.1.3 压印连接模具	131
6.2 压印连接技术特点	132
6.3 压印接头的质量控制及失效形式	133
6.3.1 影响压印连接质量的因素	133
6.3.2 压印接头失效形式	133
6.4 国内外研究状况	134
6.4.1 国外研究状况	134
6.4.2 国内研究状况	135
参考文献	136
7 压印连接成形机理分析	139
7.1 压印连接模型及金属流动规律	139

7.1.1 固定模接头成形过程模拟分析	139
7.1.2 分体式下模接头成形过程模拟分析	146
7.1.3 模拟结果及分析	148
7.1.4 分体式下模压印连接成形过程流向分析	150
7.2 金相试验及金属流动规律	151
7.2.1 金相试样的制备及金相实验过程	151
7.2.2 实验结果及分析	152
7.2.3 有限元模型与金相实验结果对比	153
7.3 压印连接过程数值模拟实例	153
7.3.1 典型薄板材料连接模型	153
7.3.2 三层板模型	155
参考文献	156
8 压印接头静强度研究	158
8.1 0°压印接头静载破坏试验	158
8.1.1 实验准备	158
8.1.2 试验过程	159
8.1.3 拉伸实验结果分析	159
8.1.4 裂纹扩展研究	161
8.2 0°单搭压印连接静力学有限元分析	161
8.2.1 0°单搭压印连接有限元模型的建立	161
8.2.2 0°压印连接件静力学分析	163
8.2.3 拉伸过程模拟及裂纹扩展分析	163
8.3 带预成角的压印接头静载破坏试验分析	164
8.3.1 试件制备	164
8.3.2 实验过程及结果	164
8.4 压印接头界面滑移分析	167
8.4.1 机械内锁区界面滑移分析	167
8.4.2 构件失效过程裂纹的自动识别	168
参考文献	170
9 压印接头疲劳强度研究	172
9.1 试验设备	172
9.2 压印接头疲劳寿命试验研究	172
9.2.1 SPCC 钢压印连接件的疲劳试验研究	172
9.2.2 Al5052 铝合金压印连接件的疲劳试验研究	175
9.3 压印接头疲劳寿命仿真分析	176
9.3.1 建模及参数设置	176
9.3.2 疲劳仿真结果分析	177

9.3.3 压印接头疲劳寿命仿真结果与试验结果比较分析	178
参考文献	178
10 压印连接的适用性研究	179
10.1 三层板压印接头静强度研究	179
10.1.1 板材组合顺序对成形性的影响	179
10.1.2 接头配置形式对静强度的影响	181
10.2 材料对接头强度的影响	185
10.3 板材组合顺序对接头强度的影响	187
10.4 提高 H62-Al5052 压印接头强度的方法	189
10.4.1 1.5mm H62-2.0mm Al5052 接头验证试验	189
10.4.2 1.5mm H62-1.5mm SPCC 接头验证试验	190
10.5 同种材料不同厚度分配	190
10.5.1 压印接头成形研究	190
10.5.2 接头拉-剪试验	191
10.6 钛合金同种和异种板材压印接头力学性能	193
10.6.1 钛合金压印接头连接过程	193
10.6.2 拉-剪试验及结果分析	194
参考文献	197
11 压印接头强度优化	198
11.1 多压印点接头研究	198
11.1.1 压印点布置形式	198
11.1.2 接头拉-剪试验	198
11.2 压印接头火焰淬火处理	200
11.2.1 试件制备	200
11.2.2 拉-剪试验	200
11.2.3 试验结果及分析	201
11.2.4 疲劳试验	203
11.2.5 疲劳试验结果及分析	204
参考文献	209
12 压印接头强度模型	211
12.1 压印接头静强度有限元模型	211
12.1.1 压印连接和拉-剪试验	211
12.1.2 模型建立	212
12.1.3 压印连接过程的数值模拟结果	215
12.2 压印接头静强度的理论模型	217
12.2.1 压印接头失效形式	217

12.2.2	颈部断裂失效的接头强度解析方法	218
12.2.3	上、下板拉脱失效的接头强度解析方法	219
12.2.4	接头强度求解模型的试验验证	222
12.2.5	模具设计程序	224
12.2.6	压印模具设计实例	226
参考文献		227
13	结构粘接技术概述	228
13.1	粘接技术的特点	228
13.2	粘接原理	229
13.3	常用粘接剂	230
参考文献		231
14	粘接接头的力学性能	232
14.1	粘接接头的破坏模式与失效	232
14.2	粘接接头的静力学性能	232
14.3	粘接接头的应力分析	233
14.4	粘接接头胶层的应力分布求解	234
14.5	粘接接头的静强度预测分析	238
14.5.1	界面端点处应力场	241
14.5.2	λ 的数值求解	241
14.5.3	不同粘接厚度的粘接接头奇异性求解	241
14.5.4	奇异性指数与应力强度因子的求解	242
14.6	粘接接头的疲劳性能	245
14.6.1	试件制备	246
14.6.2	试验过程	246
14.6.3	试验结果分析	247
14.6.4	小结	249
14.7	粘接接头的动力学性能	249
14.7.1	试验采集系统	251
14.7.2	仿真频率与试验频率对比	251
14.7.3	仿真振型与试验振型对比	253
14.7.4	仿真频率响应函数与试验频率响应函数对比	254
14.7.5	胶层厚度对单搭粘接接头频率响应函数的影响	255
14.8	粘接接头的无损检测	256
14.8.1	粘接接头工艺质量常用检测方法	256
14.8.2	粘接前被粘接试件的无损检测	257
14.8.3	粘接后粘接接头的无损检测	257
14.9	复合连接	258

14.9.1	试件连接设备及接头制备	259
14.9.2	试验过程	262
14.9.3	破坏模式分析	262
14.9.4	静强度分析	263
14.9.5	小结	268
参考文献		269
15	影响粘接接头力学性能的因素	272
15.1	几何形状	272
15.1.1	接头几何形状对粘接接头应力强度的影响	272
15.1.2	预成形角对单搭粘接接头应力分布影响的试验与仿真研究	272
15.1.3	胶厚对单搭粘接接头强度影响的试验与仿真研究	282
15.1.4	基于一维梁理论的单搭粘接贴片接头强度研究	287
15.2	材料参数	296
15.2.1	试验过程	296
15.2.2	试验结果及分析	296
15.2.3	有限元仿真分析	298
15.2.4	小结	300
15.3	环境因素	301
15.3.1	温度对粘接接头强度的影响	301
15.3.2	高温对单搭粘接接头影响的试验与仿真研究	302
15.3.3	磁场对粘接接头剪切强度的影响	307
15.4	固化条件	308
15.5	物料填充	308
参考文献		309
16	粘接技术的应用	311
16.1	汽车结构的粘接	311
16.1.1	对材料的要求	311
16.1.2	汽车车身的粘接	312
16.1.3	对粘接剂性能的要求	313
16.1.4	表面处理	314
16.1.5	强度和耐久性	314
16.1.6	粘接在车辆制造业中的应用实例	315
16.2	航空航天器的粘接	316
16.2.1	粘接在飞机制造业中的应用领域与特点	316
16.2.2	粘接在飞机制造业中的应用实例	318
16.3	粘接在宇航工业中的应用	319
16.3.1	粘接在宇航工业中的应用领域与特点	319

16.3.2 粘接在宇航工业中的应用实例	320
16.4 粘接在船舶工业中的应用	322
16.4.1 粘接在船舶工业中的应用领域与特点	322
16.4.2 粘接在船舶工业中的应用实例	323
参考文献	324
索引	325

1.1 自冲铆接技术的发展

近年来,全球工业迅速发展,对能源的消耗日益剧增。社会的持续发展是建立在能源不断消耗的基础之上的,由于能源的日益枯竭,生存环境的持续恶化,当今社会对环保的标准开始逐渐提高,在产品设计、制造和回收等全生命周期中越来越重视绿色能源理念,各行业对新型节能技术也越来越重视,将低碳环保作为自身的发展方向。

作为全球制造业的支柱产业之一的汽车行业,面临更加严峻的挑战。随着汽车工业的发展,对汽车经济性要求越来越高,从而使汽车制造商更加重视车身总成的轻量化和连接的高质量。汽车的轻量化,就是在保证汽车的安全和操控性能的前提下,尽可能降低汽车的整车质量,从而提高汽车的动力性,减少燃料消耗,降低排气污染。据统计,汽车总质量的30%为车身质量,降低车身质量能很好地实现节能减排,并能有效改善汽车经济性。研究表明,当整车质量减轻10%时,燃油经济性提高3.8%,加速时间缩短8%,CO排放量减少4.5%,制动距离缩短5%,轮胎寿命提高7%,转向力降低6%。迄今为止,我国轿车生产绝大部分采用钢板作为车身材料。为了减轻车身质量,必须减少车身钢板厚度,采用高强度薄钢板,但车身钢板厚度太薄,又会带来刚度及车身动态性能等问题。因此,减轻车身质量的有效办法就是使用轻型材料,如轻合金或复合材料等。

当采用钢板作为车身材料时,通常采用点焊作为连接钢质车身结构的主要方法。点焊不仅有利于大批量生产,而且质量牢固可靠。但是对于轻合金、复合材料及异种板材之间的连接,点焊就很难实现有效连接,需研发新的连接方法。目前多种新方法成功应用于新轻型薄板材料的连接,例如摩擦搅拌焊接^[1]、激光焊接^[2]等,而近年来迅速发展的自冲铆接技术更为此提供了全新的解决思路^[3]。

自冲铆接技术发明于20世纪中叶,但该技术的应用与研究,只在近30年中才取得了长足的进步^[4,5]。现在在发达国家,车身结构中已开始用铝合金等新轻型材料来代替传统的钢材,这样不仅降低了车身质量,还提高了整车性能。由于许多新轻型薄板材料的焊接性能不好,甚至无法焊接,因此急需开发新轻型薄板材料连接技术。各大汽车制造商在过去20年中一直在寻找解决问题的方法。英国的Henrob公司与美国、德国和澳大利亚的有关科研部门合作,共同为用户开发出自冲铆接技术,该技术始用于建筑业和大型家用电器的安装。在汽车行业,针对铝合金空间框架一体化车身的组装中,生产商开始重视自冲铆接技术^[6,7]。从1993年起,德国奥迪汽车公司在奥迪全铝系列汽车上开始采用自冲铆技术,许多汽车开发项目都采用了自冲铆接技术作为连接方法。随着自冲铆接技术的不断发展和成熟,其将会成为最有潜力的机械连接方法并具有更加广泛的应用^[8,9]。

一些欧美发达国家的知名汽车制造商在轿车车身生产制造过程中采用铝合金代替部分

或全部钢材,例如,第一代全铝车身的奥迪 A8、全铝承载式车身结构的捷豹 XJ 型、多种材料和多种连接工艺的沃尔沃 S80 等,如图 1.1 所示。

然而一种材料替代另外一种材料并不是一件简单的事情。与传统钢质硬壳式结构相比,铝合金挤压成形部件所组成的空间构架(见图 1.2)结构可获得等效的强度和刚度。尽管铝合金的强度和刚度远低于钢材,但在空间构架的设计中通过采用较厚的铝合金材料截面耦合可以补偿这个问题。然而,材料和白车身结构组合的改变使车身制造过程中面临着采用何种有效连接方法的挑战。空间构架连接技术选择的成功与否,在很大程度上取决于该连接技术如何使自身很好地适用于大批量生产。衡量潜在的连接技术是否适用于工业生产,需要考虑的项目包括:操作成本、生产周期、可靠性和质量^[10~13]。



图 1.1 铝合金在车身上的应用
(捷豹 XJ8 铆接铝质白车身)

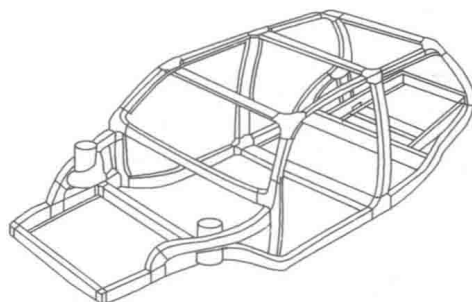


图 1.2 空间构架实例^[9]

1.2 自冲铆接原理及工艺过程

自冲铆接本质为机械冷成形技术,可以实现两层或多层板材的有效连接。其连接原理是通过冲头下行压迫铆钉刺入板材,铆钉在刺入板材的过程中向四周张开形成铆扣,在基板中形成一个永久性紧固结构,从而将基板紧紧连接在一起^[7,14]。

根据采用铆钉形式的不同,将自冲铆接分为实心铆钉自冲铆接和半空心铆钉自冲铆接。

1.2.1 实心铆钉连接工艺过程

实心铆钉自冲铆接可用来连接硬质和软质材料,以及不同机械性能的材料组合。假如连接条件不是很苛刻,可采用该技术。现代制造业中,已有装配过程中开始采用该技术。实心铆钉自冲铆接过程如图 1.3 所示,在接头连接过程中,铆钉充当切割冲头的作用。当冲头压迫铆钉头时,孔内的基板材料被切割下来,如阶段Ⅱ和Ⅲ所示,切割掉的废料从下模具的内孔中掉落下来。该模具边缘处有凹槽,并且其边缘相当于一个切削刃。在阶段Ⅳ中,基板被压紧,底层材料流入到铆钉周长方向处的凹槽内。最终,材料流动包围住铆钉形成接头。常用的实心铆钉和实心铆钉连接设备分别如图 1.4 和图 1.5 所示^[15,16]。

实心铆钉连接技术可连接多种材料,不仅是金属板材,还包括铸造合金、塑料和各种夹层材料组合。该技术被用于薄壁车身单元中高力学性能材料的连接,其连接实例如图 1.6 所示^[15]。