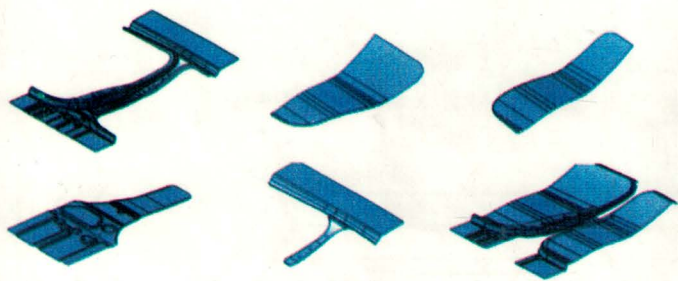



制 · 造 · 业 · 高 · 端 · 技 · 术 · 系 · 列

# 超高强度硼钢板 热冲压成形技术



林建平 田浩彬 张燕 林野 著

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



制造业高端技术系列

# 超高强度硼钢板 热冲压成形技术

林建平 田浩彬 张 燕 林 野 著



机械工业出版社

本书为机械工业出版社“制造业高端技术系列”之一。

本书共分为8章,主要包括绪论,超高强度硼钢板材料性能测试方法,超高强度硼钢板材料性能及其理论模型,超高强度硼钢板热成形过程中的相变、机理及控制,超高强度硼钢板热冲压的数值模拟,超高强度硼钢板的热冲压成形与开模变形,热冲压成形零件的尺寸控制,热冲压模具冷却系统设计。

本书主要读者对象是汽车企业、钢铁企业技术人员,轻量化、塑性成形及拼焊板研究人员,以及高等院校机械、汽车、材料加工等专业的师生等。

### 图书在版编目(CIP)数据

超高强度硼钢板热冲压成形技术/林建平等著. —北京:机械工业出版社, 2017. 7

ISBN 978-7-111-57051-6

I. ①超… II. ①林… III. ①硼钢—板材冲压—热处理—压制成型 IV. ①TG386.41

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第130384号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:沈红 责任编辑:沈红 杨璇

责任校对:刘志文 封面设计:马精明

责任印制:常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2017年8月第1版第1次印刷

169mm×239mm·10印张·2插页·186千字

0 001—1500册

标准书号:ISBN 978-7-111-57051-6

定价:79.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

# 前 言

高强度钢板热冲压技术是汽车轻量化成形技术之一。相对于冷冲压而言，热冲压成形时需要将板料加热到 900℃ 以上，成形后期还需进行相应的热机械处理以保证零件的尺寸精度和力学性能。在整个成形过程中，涉及材料学、热力学、传热学、机械等多学科领域。

本书共分为 8 章，以超高强度硼钢板材料性能、成形过程中的材料组织相变及热冲压过程的变形控制导热冲压关键技术为主线，介绍了超高强度钢热成形过程中的成形机理、力学行为变化及其相应的组织变化规律，并给出了考虑材料组织相变及温度变化的热冲压成形硼钢板的本构模型；基于成形仿真软件介绍了热冲压过程数值仿真分析方法及冲压过程的零部件尺寸控制，介绍了热冲压模具系统的设计，较系统地介绍了热冲压的基础理论与技术。

著者长期从事材料成形及其理论研究工作，特别是热冲压技术和理论研究。本书主要是课题组长期研究与积累的总结，也是许多硕士和博士论文的归纳和提炼。本书的出版期望给从事金属塑性成形技术领域的技术人员在金属板材热冲压技术与理论方面予以帮助，为金属板材热冲压技术的应用提供基础支撑。

本书可以为企业技术人员、高校师生及研究人员提供参考。

由于著者水平有限，本书若有不妥和不足之处，敬请批评指正。

著 者

# 目 录

## 前 言

<b>第1章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 超高强度硼钢板及其应用 .....	3
1.3 超高强度硼钢板冲压成形工艺 .....	4
<b>第2章 超高强度硼钢板材料性能测试</b> .....	6
2.1 超高强度硼钢板热力学性能测试 .....	6
2.1.1 测试装置 .....	6
2.1.2 测试步骤 .....	7
2.2 超高强度硼钢板成形性能测试 .....	8
2.2.1 测试装置 .....	8
2.2.2 测试方法 .....	8
2.3 超高强度硼钢板相变测试 .....	10
2.3.1 测试方法 .....	10
2.3.2 相变判断 .....	11
<b>第3章 超高强度硼钢板材料性能及其理论模型</b> .....	14
3.1 超高强度硼钢板的物理性能 .....	14
3.1.1 常温物理性能 .....	14
3.1.2 高温物理性能 .....	14
3.2 超高强度硼钢板的力学性能 .....	16
3.2.1 常温力学性能 .....	16
3.2.2 高温力学性能 .....	17
3.3 超高强度硼钢板的本构模型 .....	19
3.3.1 基于井上胜郎模型的本构模型 .....	20
3.3.2 基于动态回复的本构模型 .....	23
3.4 超高强度硼钢板的成形性能 .....	28
3.4.1 常温成形性能 .....	28
3.4.2 高温成形性能 .....	28
3.4.3 超高强度硼钢板热冲压成形极限预测模型 .....	30
3.5 超高强度硼钢板的焊接性能 .....	36
3.5.1 焊接接头的力学性能分析 .....	37
3.5.2 焊接接头宏观形貌分析 .....	37

3.5.3 焊点的金相分析 .....	38
3.6 本章小结 .....	39
<b>第4章 超高强度硼钢板热成形过程中的相变、机理及控制</b> .....	<b>41</b>
4.1 形变奥氏体的扩散相变热力学分析 .....	41
4.2 铁素体相变分析 .....	45
4.2.1 变形温度对形变诱导铁素体相变的影响 .....	49
4.2.2 应变速率对形变诱导铁素体相变的影响 .....	50
4.2.3 变形后冷却速率对形变诱导铁素体相变的影响 .....	50
4.2.4 应变量对形变诱导铁素体相变的影响 .....	50
4.3 贝氏体相变分析 .....	53
4.4 马氏体相变分析 .....	56
4.4.1 马氏体相变形核功 .....	56
4.4.2 马氏体相变动力学模型 .....	58
4.5 热冲压工艺参数对硼钢板相变的影响 .....	61
4.5.1 冷却速率对硼钢板相变的影响 .....	61
4.5.2 保温温度对硼钢板相变的影响 .....	63
4.6 本章小结 .....	72
<b>第5章 超高强度硼钢板热冲压的数值模拟</b> .....	<b>74</b>
5.1 热冲压常用数值模拟软件概述 .....	74
5.2 考虑开模温度场分布的热冲压开模变形仿真 .....	75
5.2.1 热冲压工艺的耦合分析方法概述 .....	76
5.2.2 考虑开模温度场分布的热冲压开模变形仿真方法 .....	77
5.2.3 回弹变形的热力耦合分析流程 .....	79
5.2.4 基于 Dynaform 的 B 柱的热冲压成形过程仿真 .....	81
5.2.5 带有温度历程的开模变形仿真方法 .....	87
5.3 热冲压开模变形仿真模型的验证 .....	95
5.4 本章小结 .....	97
<b>第6章 超高强度硼钢板的热冲压成形与开模变形</b> .....	<b>98</b>
6.1 成形工艺参数对热冲压工艺的影响 .....	98
6.1.1 板料成形初始温度对热冲压工艺的影响 .....	99
6.1.2 冲压速度对热冲压工艺的影响 .....	100
6.1.3 板料厚度对热冲压工艺的影响 .....	102
6.1.4 保压条件对热冲压工艺的影响 .....	102
6.2 热成形开模变形的原因及规律 .....	103
6.2.1 热胀冷缩及相变膨胀对变形影响分析 .....	103
6.2.2 热冲压 B 柱开模变形的原因及规律 .....	105
6.3 本章小结 .....	111
<b>第7章 热冲压成形零件的尺寸控制</b> .....	<b>112</b>

# VI

7.1 热冲压成形零件的尺寸控制技术 .....	112
7.1.1 零件接触压力的影响 .....	112
7.1.2 模具温度分布的影响 .....	115
7.1.3 模具型面补偿的影响 .....	121
7.2 本章小结 .....	123
<b>第8章 热冲压模具冷却系统设计</b> .....	<b>124</b>
8.1 热冲压模具简介 .....	124
8.2 热冲压模具冷却系统的设计方法 .....	126
8.2.1 热冲压模具冷却系统设计要求 .....	126
8.2.2 热冲压模具冷却系统设计参数 .....	126
8.2.3 热冲压模具冷却系统设计及其优化 .....	127
8.3 热冲压模具热平衡设计 .....	135
8.3.1 热冲压模具热平衡分析 .....	135
8.3.2 热冲压成形工艺传热数学模型的建立方法 .....	136
8.3.3 热冲压成形工艺传热数值分析方法 .....	139
8.4 本章小结 .....	144
<b>参考文献</b> .....	<b>146</b>
<b>后记</b> .....	<b>151</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引言

汽车工业是我国国民经济的支柱产业，随着世界经济与社会的发展，节能、舒适、降低排放和提高安全性已经成为现代汽车结构、性能和技术的重要发展方向。鉴于此，美国提出了新一代汽车（New Generation of Vehicle）的概念，工业发达国家也都在研制百公里油耗 3L 的新一代汽车，而实现这一目标的重要手段就是在不损失结构强度的情况下实现汽车的轻量化。据统计，汽车重量每减轻 10%，油耗可降低 8% ~ 10%<sup>[1]</sup>。汽车的轻量化不仅可以减小汽车的滚动阻力、加速阻力和爬坡阻力，还可降低燃油消耗，从而有利于改善汽车的转向、加速、制动和排放等多方面的性能。同时，还可以降低噪声和振动。总之，汽车的轻量化对于节约能源、减少废气排放、实现汽车工业的可持续发展战略具有十分重要的意义。

轻质材料的广泛使用是汽车轻量化的重要途径之一，如铝合金、高强度钢等<sup>[2,3]</sup>。根据“超轻钢制车身”联盟的研究，超高强度钢板（AHSS）在车身中的应用量达到 80%，可以在不增加成本的情况下，汽车车身重量比普通钢结构车身减少 20%<sup>[4,5]</sup>。超高强度钢板主要包括双相钢（DP）、相变诱发塑性钢（TRIP）、马氏体钢（MART）和超高强度硼钢板（Boron Steel）等。这类钢是通过相变组织强化来达到高强度的，其强度极限可达 500 ~ 2000MPa，尤其是超高强度硼钢板，其经过组织相变后强度可超过 1000MPa，故具有极大的减重潜力、抗碰撞性、好的成形性和低的平面各向异性等优点，是现代车身制造用钢板发展的主要方向。目前超高强度钢板可应用于汽车车身上的部位如图 1-1 和图 1-2 所示，其作用见表 1-1<sup>[6]</sup>。

由于超高强度钢板冷成形能力很差，较难冲压成形状复杂的零件。但是，在高温条件下，也就是将金属加热到再结晶温度以上，其塑性和延展性会增加，屈服强度迅速降低，此时再进行冲压成形，就可以得到形状复杂的超高强度零件。近年来，超高强度热冲压成形工艺成为获得板料优良成形性能和超高强度零件的新型成形工艺。

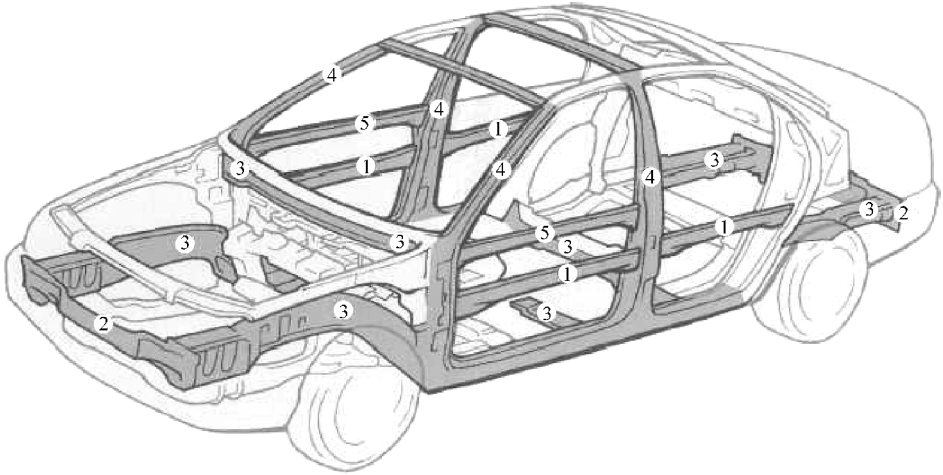


图 1-1 超高强度钢板在车身上的应用

1—车门侧板 2—保险杠 3—车身纵梁、横梁 4—A 柱、B 柱 5—车门加强板

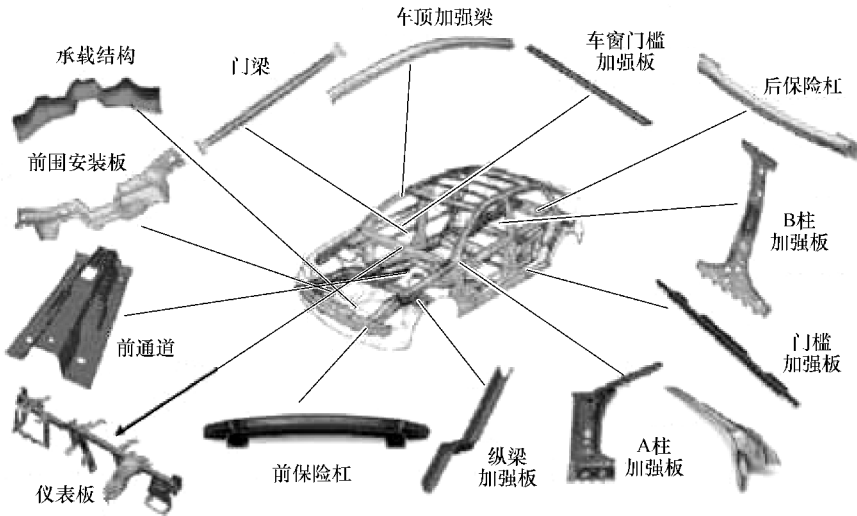


图 1-2 可应用热冲压技术的部件

表 1-1 超高强度钢板的要求

用超高强度钢板制造的零件	零件性能要求	板厚、强度和材料性能之间的关系
保险杠、加强板、门、防撞柱边梁、加强筋	高的压溃强度 $p_s$	$p_s \propto t \sigma_b^\alpha \alpha \sim 1/2$
	高的冲击吸收能量 $A_E$	$A_E = t^2 \sigma_b^{2\alpha} \alpha: 1/2 \sim 2/7$
车顶盖、门、油箱盖板	高的抗压痕抗力 $p_t$	$p_t \propto \sigma^\alpha \alpha \sim 1/2.5$
车身边梁、横梁	高的弹性模量值 $E$	$E = tE_D^\alpha (1/E_D = 1/E + 1/E_s)$

注： $t$ 为板厚； $E_D$ 为动负设计弹性模量。

根据热冲压的特点，超高强度硼钢板零件在生产、应用方面具有以下优势：

1) 变形抗力低，压力机设备吨位小。钢板在高温下成形，材料变形抗力相对较小，塑性好。与冷成形相比，热冲压成形可以明显地降低变形抗力，减少压力机吨位。

2) 超高强度硼钢板的高强度特性可以在厚度减薄的情况下依然保持汽车车身的力学性能要求，从而减轻了汽车重量；在撞击过程中，可以控制能量的吸收，从而增强耐撞性能。

3) 实现控形与控性。与传统的冷冲压工艺不同，热冲压工艺中的零件成形和保压淬火均在模具中进行，给控形与控性提供了空间。

## 1.2 超高强度硼钢板及其应用

热冲压硼钢板的特点是在轧制成形后，材料组织为均匀的铁素体和珠光体，屈服强度为 280 ~ 400MPa，抗拉强度大于 450MPa；在高温下具有高的延伸率和低强度，可以进行复杂零件成形；而经过热处理后，材料组织变为均匀的马氏体组织，屈服强度可达 1200MPa，抗拉强度可达 1500MPa，为普通钢板强度的 3 ~ 4 倍，是最高强度级别的汽车用钢板<sup>[7]</sup>。超高强度硼钢板按照合金元素类型主要分为 4 类，即 Mn - B 系列、Mn - Mo - B 系列、Mn - Cr - B 系列、Mn - W - Ti - B 系列。以超高强度硼钢板 USIBOR 1500 为例，其主要合金成分见表 1-2<sup>[8]</sup>。该钢板碳含量的质量分数为 0.221%，属于低碳钢，添加的 Mn 元素和 B 元素均可以提高钢板的淬透性，使得钢板淬火冷却时内部能较充分的马氏体化，从而提高零件的强度。同时研究发现，钢板淬透性的提高与 B 元素加入量成正比，当 B 含量的质量分数超过一定数值后（大约为 0.003%），淬透性保持不变，但 B 含量的质量分数超过 0.003% ~ 0.006% 后淬透性稍有下降。B 和 Mn 两种元素的添加使得超高强度硼钢板为了获得最佳的成形性能及使用性能，通常采用热成形方式。为了避免出现氧化层，钢板加热时需要保护气体保护，成形后需要喷丸处理，以消除表面的氧化皮<sup>[9]</sup>；或者板料表层增加涂层以提升成形过程中的抗氧化能力。

表 1-2 USIBOR 1500 钢板的主要合金成分

合金元素	C	Mn	B	P	S	Cr	Si	Al	Ti
质量分数 (%)	0.221	1.211	0.0037	0.019	0.003	0.191	0.258	0.036	0.039

目前，很多车型都使用了该类硼钢板材料。以国内上汽大众引进的德国大众 B6 车型为例，一部分重要结构零件，如门槛、门内侧梁、底板中央通道、B 柱等都采用超高强度硼钢板进行热成形，总质量与采用普通钢板冷成形相比可减少

28kg, 且增强了汽车的安全性。标致和宝马系列车型中的部分零件也采用了超高强度硼钢板热冲压成形部件, 如图 1-3 所示。

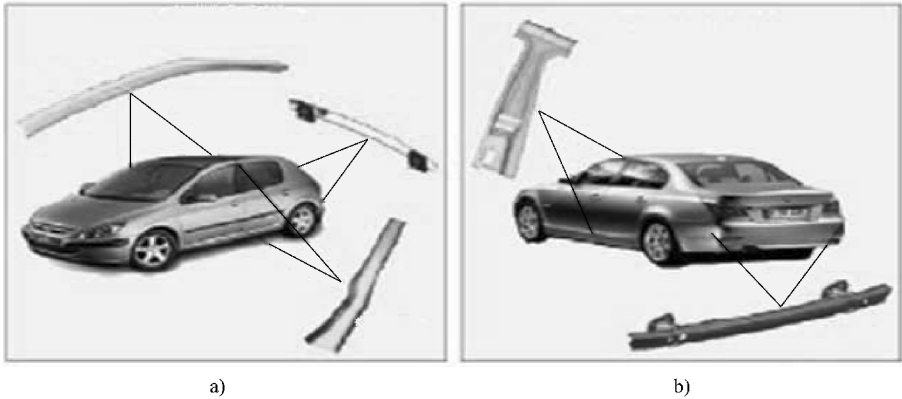


图 1-3 超高强度硼钢板热冲压成形部件

a) 标致 307 b) 宝马 5 系列

### 1.3 超高强度硼钢板冲压成形工艺

由于材料的特殊性, 为了获得优良的成形性能及零件使用性能, 超高强度钢板通常采用热冲压进行成形。按照板料热成形前后有无预成形工序, 热冲压可分为两种成形方法, 一种是直接热冲压方法, 一种是间接热冲压方法<sup>[10]</sup>。超高强度硼钢板采用直接热冲压方法 (图 1-4), 即将板料首先放在炉子里加热到奥氏体化温度, 然后迅速将奥氏体化板料放在模具上进行冲压成形, 同时在模具上实现零件的保压淬火促使零件形状尺寸趋于稳定, 另一方面促使板料内组织发生马氏体转变, 从而显著提高成形件的强度。为了避免板料在加热和转移过程中氧化皮的形成, 板料表层可进行涂层处理 (如铝镀层的处理), 以达到保护零件和模具, 提高生产率的目的, 并且在加热炉内也不需要使用时惰性气体来防止板料的氧化, 可降低工艺的复杂程度。

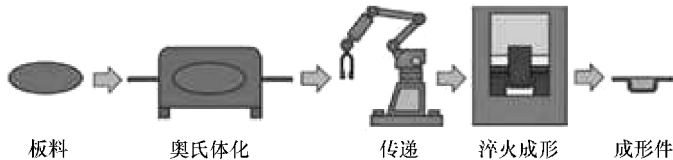


图 1-4 直接热冲压方法

在热冲压成形方面, 除了可以采用常规的单板坯料进行成形外, 还可以采用拼焊板进行成形。由于拼焊板具有按照零件使用要求及特点进行材料合理分配的

优点，可以将零件的强度和延展性的要求综合起来，满足零件的成形性能要求的同时提高零件的吸收撞击能量的能力。考虑到拼焊板在成形过程中要受到热成形的影响，在选择材料时要考虑其热成形过程及其相关组织转变的限制。使用低合金高强度钢与超高强度硼钢激光拼焊板进行热冲压成形，低合金高强度钢的硬度会有所增加，超高强度硼钢板的硬度会随着冷却速度的增加迅速提高，并且焊缝至母材过渡区硬度值平滑过渡，应力应变分别更趋均匀，可显著提高低合金高强度钢与超高强度硼钢激光拼焊板拉深成形性<sup>[11]</sup>。蒂森克虏伯开发的用于与硼钢板拼焊连接的微合金钢在热成形后还可实现强度的上升。用该微合金钢与锰硼钢制成的激光拼焊板用于成形汽车 B 柱（图 1-5）、后部纵梁，不仅可以降低零部件的重量和成本，并且还可以达到最佳的吸收撞击性能的要求，并已成功应用于奥迪 A4 和奥迪 A5 车型上<sup>[12]</sup>。



图 1-5 热成形拼焊板 B 柱

## 第 2 章 超高强度硼钢板材料性能测试

超高强度硼钢板在热冲压成形过程中，钢板需要加热至完全奥氏体化状态，然后在模具中进行冲压成形及淬火处理。在成形过程中，钢板的力学性能随着温度的变化而变化，而其力学性能将直接影响最终零件的成形性能和质量。采用传统的冷冲压材料性能测试方法很难准确衡量其力学性能及变形行为。因此，本章结合热冲压工艺的要求及其特点，介绍了超高强度硼钢板性能测试方法。

### 2.1 超高强度硼钢板热力学性能测试

材料在高温条件下的力学性能是成形工艺控制的首要问题。如果采用比普通拉伸机增加了一个加热炉的高温电子拉伸机（图 2-1），虽然可以通过控制加热炉的温度控制零件的加热温度，但该类设备在测试超高强度硼钢板的力学性能时，因为加热时间较长，零件容易产生氧化，并且在成形完毕后，炉内没有热处理装置，需要将零件拿出来进行热处理<sup>[13]</sup>，给材料的性能测试及其控制带来了很大不便。



在研究金属高温变形过程流变应力规律时，可以通过物理模拟技术对金属热变形过程中所要求的各种参数如温度、冷却速度等进行精确控制，并获得各参数对热变形过程中流变应力的影响。本节介绍采用 Gleeble 3800 热模拟试验机进行模拟试验，对硼钢板进行等温单向拉伸试验，图 2-1 日本岛津高温电子拉伸机研究其热冲压流变行为的测试方法。

#### 2.1.1 测试装置

热模拟试验机是专门用来模拟不同物理条件下材料性能的设备，可模拟热拉伸、多种变形条件下的热压缩、熔化和凝固、热处理及多种变形等，并可模拟焊接、连铸、热轧及锻造等多种工艺，比较适合超高强度硼钢板的性能测试。该类试验机主要有美国 Dynamic Systems Inc 公司的 Gleeble 系列热模拟试验机<sup>[14]</sup>和日本富士电波工机株式会社的 Thermorestor 系列热模拟试验机<sup>[13]</sup>。图 2-2 所示为 Gleeble 3800 热模拟试验机。图 2-3 所示为 Thermorestor - W 热模拟试验机。

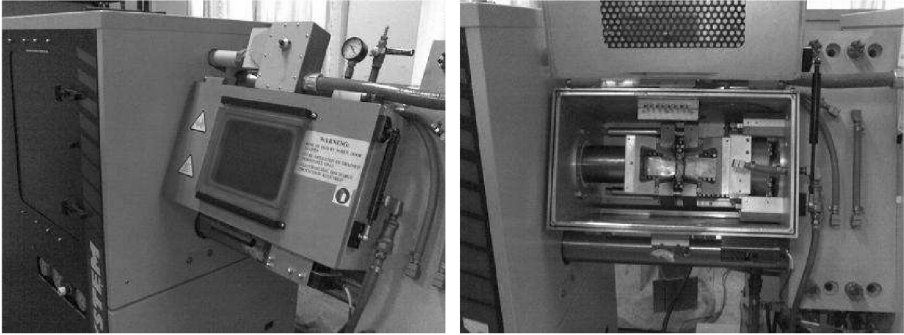


图 2-2 Gleeble 3800 热模拟试验机

各企业的热模拟试验机的工作原理均类似。通过多种变压器给试样通以大电流来实现对试样的加热。试样位于真空箱内，由试验机的真空泵提供真空。在试样的上表面中心部位焊接热电偶，如图 2-4 所示。热电偶与热模拟试验机相连，实时测量试样的温度并反馈给热模拟试验机从而实现温度闭环控制，以控制试样的升温 and 降温过程。



图 2-3 Thermorestor - W 热模拟试验机



图 2-4 试样上热电偶焊接位置

### 2.1.2 测试步骤

为使试验结果更准确地反映钢板在热冲压成形过程中的力学性能变化，更科学地指导热冲压研究，试验依照实际热冲压成形工艺过程来设计。热力学性能测试试样尺寸如图 2-5 所示；热模拟试验工艺过程如图 2-6 所示。整个温度控制过程包括五个阶段<sup>[14]</sup>，各阶段具体内容及试验过程如下。

(1) 升温阶段 先以 15K/s 的速度将试样温度升高到奥氏体化温度。

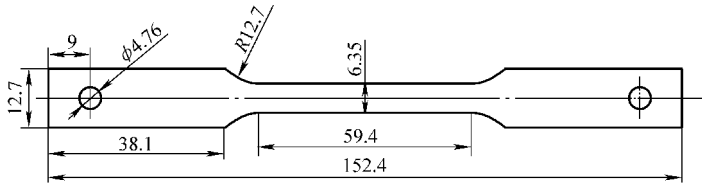


图 2-5 热力学性能测试试样尺寸

(2) 奥氏体保温阶段 在奥氏体温度区间内保温 5min 以获得均匀的奥氏体组织。

(3) 冷却阶段 为避免冷却过程中的铁素体相变，以 30K/s 的冷却速率降至试验变形所需温度，保温 5s 以便消除试样内部的温度梯度。

(4) 恒温变形阶段 按照试验中选取的应变速率进行恒温拉伸变形，直至拉断。

(5) 马氏体生成阶段 变形结束后快速冷却至室温，使组织转变为马氏体。

变形阶段真实应力 - 应变曲线由 Gleeble 3800 热模拟试验机测定并记录。按照试验选用的拉伸速度，缓慢加载直至试样断裂，记录各条件下的真实应力 - 应变曲线。

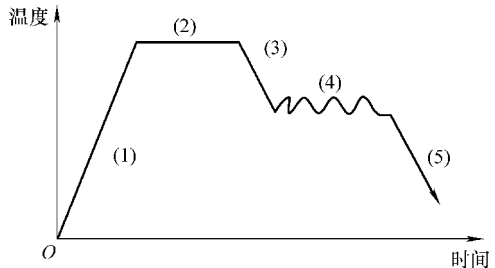


图 2-6 热模拟试验工艺过程

## 2.2 超高强度硼钢板成形性能测试

成形极限是衡量材料成形性能的重要指标和参数。它反映了加工过程中，板材在塑性失稳前所能取得的最大变形程度。目前最有现实意义和应用最为广泛的评定板材成形性能的方法是 20 世纪 60 年代由 Keeler 和 Goodwin 提出以极限应变构成的成形极限图 (FLD) 的概念。本节介绍超高强度硼钢板高温成形极限试验，用以评价其在不同温度下的成形性能。

### 2.2.1 测试装置

结合超高强度钢板高温胀形试验要求，参照《金属薄板成形性能与试验方法 第 8 部分：成形极限图 (FLD) 测定指南》<sup>[15]</sup> 规定。本书自行设计并制造了满足高温胀形试验功能要求的模具，如图 2-7 所示。

### 2.2.2 测试方法

按照 GB/T 15825.8—2008 《金属薄板成形性能与试验方法 第 8 部分：成形极限图 (FLD) 测定指南》<sup>[15]</sup>，试样为矩形试样，试样长度为 180mm，宽度分

别取 180mm、160mm、140mm、120mm、100mm、80mm、60mm、40mm、20mm，共 9 种。试样几何尺寸示意图如图 2-8 所示。试样几何尺寸见表 2-1。随着宽度从 180mm 减小到 20mm，应变状态也实现了从双向拉伸到平面应变再到单向拉伸的转变。

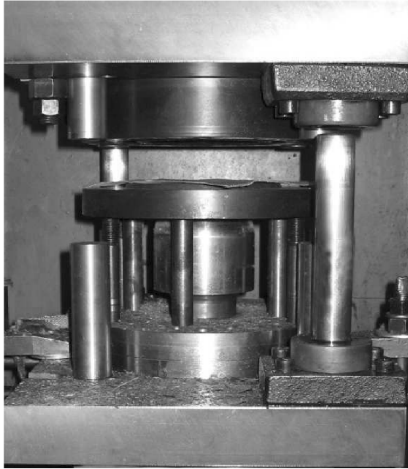


图 2-7 高温胀形模具

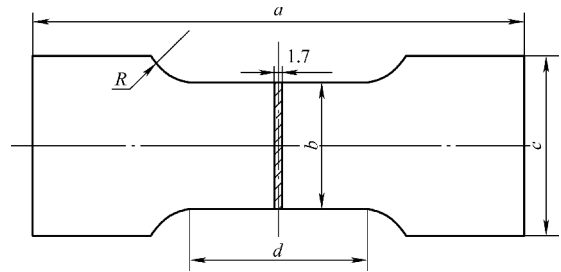


图 2-8 试样几何尺寸示意图

表 2-1 试样几何尺寸 (单位: mm)

$a$	180	180	180	180	180	180	180	180	180
$b$	180	160	140	120	100	80	60	40	20
$c$	180	160	140	140	120	100	80	55	30
$d$	0	0	0	0	20	40	60	80	100
$R$	0	0	0	25	25	25	25	25	25

试验过程中，采用坐标网格应变分析方法，即通过在试样表面制作网格来测量应变大小。常见的坐标网格制作法有印制或照相方法、蚀刻法和机械划线法等。本试验采用蚀刻法印制  $\phi 2.5\text{mm}$  的圆网格，FLD 最终加工试样如图 2-9 所示。

为了使试验结果能够准确反映超高强度硼钢板在热冲压成形过程中的成形性能变化情况，更科学地指导后续研究，依照实际热冲压成形工艺过

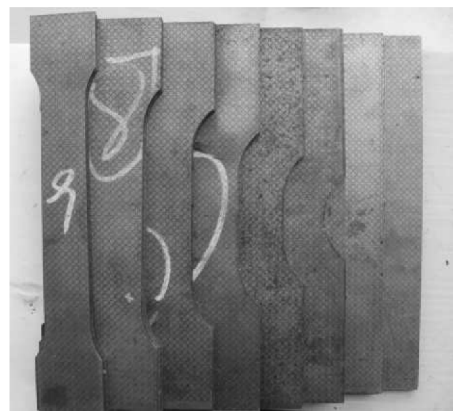


图 2-9 FLD 最终加工试样

程来设计实验过程。

先在电炉里把试样加热到 1173K，保温 5min 以获得均匀的奥氏体组织<sup>[16]</sup>。然后迅速移至模具上，事先在模具卸料板上铺上厚度为 0.8mm 的绝热石棉纸以保证恒温成形，通过红外测温仪监测板料的初始胀形温度和终了温度。由于热冲压成形工艺中，在 973K 以下板料会发生相变。因此，本试验只研究 973 ~ 1173K 温度范围内。

在规定工艺条件下，将图 2-9 所示试样进行胀形试验，获得如图 2-10 所示的试样。将靠近裂纹区或颈缩区的网格点作为临界点，通过应变分析软尺测量该区域网格的变形程度，获得不同应变路径下的极限应变点，并根据试验数据点进行多项式拟合，建立成形温度下的 FLD 图。

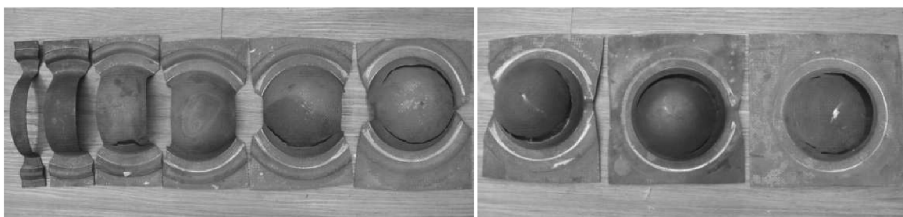


图 2-10 高温胀形试验试样

## 2.3 超高强度硼钢板相变测试

### 2.3.1 测试方法

为了研究冷却路径对硼钢板相变的影响，进行了考虑不同冷却速率及保温温度的热膨胀试验。热膨胀试验是研究钢材固态相变的最有效的技术手段之一。它通过实时测量试样尺寸随温度的变化来监控其相变情况。该试验所用仪器为 DIL805 高温相变仪。硼钢板试样的尺寸为 1.4mm × 5mm × 10mm，其中 1.4mm 为硼钢板的板材厚度，10mm 为沿着轧制方向切取的长度，试样通过线切割切取。将直径为 0.2mm 的热电偶焊接在尺寸为 5mm × 10mm 的平面中央，记录并通过反馈控制试样的温度。

虽然不同钢厂生产的硼钢板的化学元素有一定的不同，但硼钢板总体的相变规律和趋势基本是一致的。为了全面研究从奥氏体到马氏体、贝氏体及铁素体的相变过程，根据 Turetta 提出的 CCT 图，分别选择了 50K/s、10K/s 和 2K/s 的冷却速率。试验过程中，试样以 15K/s 的加热速率加热到 1173K，并保温 5min 使奥氏体组织均匀化，随后分别以 50K/s、10K/s 和 2K/s 的冷却速率降温至室温。

为了研究不同的保温温度对硼钢板相变的影响，根据马氏体、贝氏体及铁素体相变的不同温度范围选择了不同冷却速率下的多种保温温度。冷却速率为