



Classified Index: TG244

Dissertation for the Master Degree in Engineering

**Study on Numerical Simulation
and Experiment of SPF/DB for ZK60
Magnesium Alloy Corrugated part**

Candidate:	Feng Juan
Supervisor:	Yu Yandong
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Specialty:	Materials Processing Engineering
Date of Oral Examination:	March, 2010
University:	Harbin University of Science and Technology

哈尔滨理工大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《ZK60 镁合金波纹件 SPF/DB 成形数值模拟与实验研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨理工大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文研究工作做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：冯娟 日期：2010年3月19日

哈尔滨理工大学硕士学位论文使用授权书

《ZK60 镁合金波纹件 SPF/DB 成形数值模拟与实验研究》系本人在哈尔滨理工大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨理工大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨理工大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门提交论文和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权哈尔滨理工大学可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于

保 密 在 _____ 年解密后适用授权书。

不保密

(请在以上相应方框内打√)

作者签名：冯娟 日期：2010年3月19日

导师签名：于晓宇 日期：2010年3月19日

ZK60 镁合金波纹件 SPF/DB 成形 数值模拟与实验研究

摘要

镁合金是常用金属材料中最轻的一种，它具有密度小，良好的电磁屏蔽性、导热性，易回收性等一系列优点，因此被广泛的应用于航空航天、汽车、通讯和电子工业。超塑成形/扩散连接(SPF/DB)组合工艺是利用材料在超塑性状态下良好的固态粘合性能而发展起来的一种组合工艺技术，它能在零件进行超塑成形的同时完成零件某些部位的扩散连接，从而得到形状十分复杂的高性能整体构件。该技术的实现降低了零件整体重量，使复杂薄壁零件整体化，缩短了制造周期，提高了零件整体性能。

本文用有限元分析软件 MSC.MARC 对 ZK60 镁合金波纹件超塑成形过程进行了数值模拟。在粘塑性有限元法的基础上采用罚函数方法，模拟得到波纹件在不同成形阶段的成形规律以及壁厚分布规律，并对波纹件在成形过程中潜在危险区域进行了预测。采用正交试验方法，对波纹件成形工艺参数中的温度、应变速率和摩擦系数进行了优化，得到了优化的加压曲线。

研制了 N11 型气化剂，结合数值模拟得到的优化胀形加压曲线，进行了 ZK60 镁合金波纹件的 SPF/DB 成形实验，得到了胀形试样的壁厚分布规律。同时与数值模拟结果进行了对比，结果表明实验和模拟所得的波纹件壁厚分布规律在趋势上具有良好的一致性。对模拟和实验间的误差原因进行了分析，从而为控制波纹件的成形质量和预测成形缺陷提供了理论依据。

对波纹件从压边、侧壁、底部、角部四个区域进行取样，分别得到各个区域的金相组织，得到了晶粒尺寸与应变量之间的关系。对不同区域的空洞尺寸和体积分数进行了观察和统计，得出了空洞尺寸和体积分数与应变量之间的关系。并对波纹件进行了透射电镜分析，研究了波纹件超塑成形的机理，观察了扩散连接处的微观形貌，结果表明波纹件的扩散连接非常充分。

关键词 镁合金；波纹件；SPF/DB；数值模拟

Study on Numerical Simulation and Experiment of SPF/DB for ZK60 Magnesium Alloy Corrugated part

Abstract

Magnesium alloy is one of the lightest of those alloys used as the basis of constructional materials. Its density is small and excellent in electromagnetic shielding, thermal conductivity, and easy recovery. Magnesium is widely used in the fields of aerospace, automotive, communication and electronic industry. Superplastic forming/diffusion bonding is a combination technology developed on good solid-state bonding performance of superplastic material. It can not only superplastic forming but also diffusion bonding at the same time to produce high performance integer part with complicated shape part. Implementation of the technology reduces the overall weight of the parts, makes integral parts of thin-walled complicated parts, shorten the integrative manufacturing cycle, improved the overall performance.

With finite element software MSC.MARC, the SPF/DB process of ZK60 magnesium alloy corrugated part was simulated by three-dimensional finite element model in this paper. Penalty function method based on rigid/visco plastic finite element method was applied to obtain the forming law and thickness distribution law at different forming stages of corrugated part. The location of risky point during the forming process of corrugated part was predicted. Using orthogonal test method, the corrugated part forming parameters of temperature, strain rate and the friction coefficient were optimized, the optimized pressure curve was obtained.

Developed N11 gasification agent, combined the optimized pressure curve obtained from the numerical simulation, the SPF/DB experiment of ZK60 magnesium alloy corrugated part was carried out successfully and the thickness

distribution law were compared with the results from the SPF/DB simulation, finding these two kinds of results in good agreement with each other. The causes of error were analyzed, which provided theoretical basis on control the forming quality of corrugated part and predict forming defects.

The corrugated part microstructures of different areas blank hold, side, bottom, and corner were observed respectively to get the relationship of grain size and strain. The cavity size and cavity volume fraction of different areas were observed and calculated in order to obtain the relationship of cavity size, cavity volume fraction and strain. TEM photographs of corrugated part were analyzed to study the mechanism of superplastic forming. The micro-morphology of diffusion bonding part was observed, the results showed that the diffusion bonding was very good.

Keywords magnesium alloy, corrugated part, SPF/DB, numerical simulation

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 镁合金发展概述.....	1
1.2 金属镁及其合金特性.....	1
1.3 超塑成形/扩散连接工艺概况.....	3
1.3.1 超塑成形/扩散连接国内外发展现状.....	6
1.3.2 气化剂作为加压介质的 SPF/DB 技术简介.....	9
1.3.3 有限元模拟概述.....	9
1.4 课题意义及主要研究内容.....	10
第 2 章 气化剂作为加压介质的 SPF/DB 技术原理.....	12
2.1 引言.....	12
2.2 气化剂作为加压介质的超塑成形原理.....	12
2.3 气化剂的选择原则.....	13
2.4 N11 气化剂作为加压介质的 SPF/DB.....	14
2.4.1 N11 型气化剂主要成分简介.....	14
2.4.2 气化剂的分解过程及影响因素.....	15
2.5 气化剂作为加压介质进行超塑成形的热力学模型.....	21
2.6 本章小结.....	21
第 3 章 ZK60 镁合金波纹件 SPF/DB 成形数值模拟.....	22
3.1 引言.....	22
3.2 超塑成形有限元数值模拟基础理论.....	22
3.3 有限元法求解的基本步骤.....	23
3.4 ZK60 镁合金波纹件 SPF/DB 成形数值模拟.....	24
3.4.1 模型建立.....	24
3.4.2 数值模拟设置.....	25
3.4.3 波纹件成形模拟结果与分析.....	26
3.5 ZK60 镁合金波纹件 SPF/DB 工艺参数优化.....	31
3.5.1 模拟正交表的建立.....	31

3.5.2 模拟结果与分析.....	34
3.6 本章小结.....	37
第 4 章 气化剂作为加压介质的 ZK60 镁合金波纹件 SPF/DB 实验	38
4.1 气化剂作为加压介质的 ZK60 波纹件 SPF/DB 成形实验	38
4.1.1 ZK60 镁合金实验板材	38
4.1.2 实验模具及设备.....	39
4.1.3 波纹件 SPF/DB 实验过程	41
4.1.4 实验结果及分析.....	42
4.2 ZK60 镁合金波纹件微观组织实验	44
4.2.1 ZK60 波纹件金相实验	44
4.2.2 ZK60 镁合金波纹件金相组织分析	45
4.2.3 ZK60 镁合金波纹件透射电镜分析	49
4.3 本章小结.....	52
结论.....	53
参考文献.....	55
攻读硕士学位期间发表的学术论文.....	59
致谢.....	60

第1章 绪论

1.1 镁合金发展概述

航空、航天、电子产业、军事产业的迅猛发展带来了轻合金材料研究的热潮。轻合金由于其优良的使用性能在各个领域逐渐取代了传统材料，成为新型绿色工程材料。

镁合金作为结构材料具有比强度高、比模高、阻尼性好、良好的铸造性能，易回收性等特点被广泛的应用在航空、航天、交通工具、军事、3C(Computer\Communications\Consumer electronics)领域，被誉为“21世纪绿色工程材料”^[1-5]。随着科技的发展创新，镁合金产业技术日趋完善，迅速扩大了其在汽车及电子产品领域的使用量^[6]。镁合金应用和研究重点开始从宇航和兵工等领域扩展到民用高附加值产业。镁合金以其优良的性能和应用潜力使得世界上许多国家包括中国对镁合金产生了浓厚的兴趣，加大了对镁合金的研究开发力度，倾注了大量的人力和财力^[7]。我国镁资源储量世界第一，是世界上最大的镁生产国和出口国。目前我国已占全球镁生产能力的 3/4，产量的 2/3^[8]。利用我国在镁资源方面的优势，发展镁合金产业形成具有竞争力的行业，将其应用在各个领域，实现镁资源强国战略^[9,10]。

1.2 金属镁及其合金特性

镁是最轻的工程材料之一，其密度只有 1.7g/cm^3 。镁在地球表面含量非常丰富，约占金属矿的 2.3%，名列第三。此外，镁在海水、盐湖卤水中的含量也很高。每立方米海水中就含 6×10^{16} 吨镁，按我国每年 50 万吨的镁生产能力计算，可维持 1200 亿年的用量。加快镁合金的研究发展对应对金属矿源枯竭问题具有至关重要的意义^[11, 12]。镁在 1775 年被发现，1808 年，Humphrey Davy 利用蒸馏方法，从氧化镁和氧化镁制成的汞齐中将镁提炼出来。法国学者 Deville 和 Caron 在 1863 年发明了还原法制镁，他们利用钠将无水氯化镁和氟化钙，从此拉开了镁的大规模工业制造序幕。我国自 20 世纪 90 年代初开始出口金属原镁，21 世纪初我国原镁的生产量和出口量就已经在世界上排名第一位^[13]。

镁合金是一种轻合金材料,能够满足各个工程领域的需求,拥有极为光明发展前景。与常用的工程材料对比,镁合金制品的主要优越性基本体现在以下的几个方面^[14-20]:

1. 重量轻:镁合金的比强度要高于铝合金、钢和铁,但略低于比强度最高的纤维增强塑料;其比刚度与铝合金、钢和铁相当,但却远远高于纤维增强塑料。在实用金属工程材料中具有最小比重。

2. 吸震、减震和阻尼性能高:镁合金吸收能量的能力极好,能够吸收噪音和震动,保证工作设备能安静运行。一般将其应用在设备机壳上用来降低噪音,预防因凹陷产生的损坏。

3. 抗压缩、抗冲击性能良好:和塑料相比,镁合金抗冲击性能是其 20 倍左右;当冲击镁合金零件时,只造成比铁和铝都小的表面疤痕。同时镁合金的吸收弹性能可以组合出优良的压缩强度与冲击强度。

4. 尺寸稳定性好:温度在 100℃ 以下时,镁合金工件可以保持其尺寸的长时间稳定性(实际上工件尺寸的变化几乎观察不到);镁合金尺寸稳定性最大的特点就是无需消除应力和退火就可以得到。

5. 优良的切削加工性:镁合金的切削阻力是钢的 1/10,铝的 1/3,因此切削速度远远大于别的金属,用于切削的时间少;进行切削加工容易且加工费小,需要的能量是铝的七成。

6. 耐蚀性好:放置在空气中时,与铁相比,其耐蚀性较好。提高镁合金的耐蚀性的方法可是通过加铍和钙^[21, 22]。

7. 良好散热性:由于镁合金的散热性能高,被广泛用来制作元件密集的电子产品。

8. 良好的电磁干扰屏障:镁合金具有优于铝合金的磁屏蔽性能、更良好的阻隔电磁波功能,更适合于制作发出电磁干扰的电子产品。

8. 电磁屏蔽性能良好:镁合金相比于铝合金,具有优良的阻隔电磁波作用、更优越的磁屏蔽性能,因此,在生产发出电磁干扰的电子产品领域有很好的应用。

9. 热容量较低:由于镁合金的热容量低估,不易在模具上粘烧,可以延长模具使用期。

10. 可再生性:在今天环保意识全球高涨的大环境下,镁合金由于其较低的熔化潜热和能量消耗具有良好的可回收性,所有目前使用的镁合金均可回收。比回收性差的碳纤维塑料、耐火塑料占尽了优势,是新型环保绿色材料。

1.3 超塑成形/扩散连接工艺概况

20 世 80 年代，对结构质量的减轻及航天部件制造费用的降低的要求，使航天工业展开了一场革命，集成结构逐步取代了由许多部分组成的聚合结构。高品质精密铸造和高速铣削对实现这种轻质结构制造技术做出了突出贡献，不久，这种意识在制造业变成了一种普通定律，汽车、建筑、民用、和制造业掌握了这种规律，预见超塑材料时代的到来^[23]。

超塑成形被认为是一种集成结构成形技术，并且是生产复杂形状金属板材的重要制造过程。材料在完全成形中的超塑性使得复杂零件在很少的浪费条件下几步就能制造出来。工艺制订比传统制造工艺要复杂。从力学方面说，超塑性材料以高应变速率敏感性和低应力为特性。超塑成形生产零件要求工艺保证最佳超塑条件。

超塑性呈现出很大的延伸率 $>500\%$ 。然而，很大的延伸率只能在低应变速率 $10^{-5}-10^{-3}s^{-1}$ 下得到，这个范围对于结构材料的大规模成形和传统超塑成形商业生机来说很窄。因此，它的应用有限。然而，超塑性的新发展开发出一个高应变速率超塑性新领域。高应变速率超塑性对于商业应用有很大吸引力。因为这种成形方法能够提高复杂形状零件的制造生产率。高应变速率超塑性分别在 1984 年复合材料 SiCw/2124，1886 年力学合金 IN9021 中被发现。自 1990 年，人们研究了许多基于铝的高应变速率超塑性。对于多数金属来说，在相对较高的应变速率 $10^{-2}s^{-1}$ 会产生超塑行为。这个应变速率对于传统的超塑性材料的典型成形速率来说是较高的，和大规模热加工速率 $10^{-1}-10^{-2}s^{-1}$ 很接近。在 JIS7007 中，日本标准协会定义高应变速率超塑性是指，应变速率大于 $10^{-2}s^{-1}$ 的超塑性。大多数高应变速率材料是基于铝和钛的材料。图 1-1 显示了传统的和超塑铝试样拉伸结果的对比。



图 1-1 铝试样传统拉伸和超塑拉伸对比图

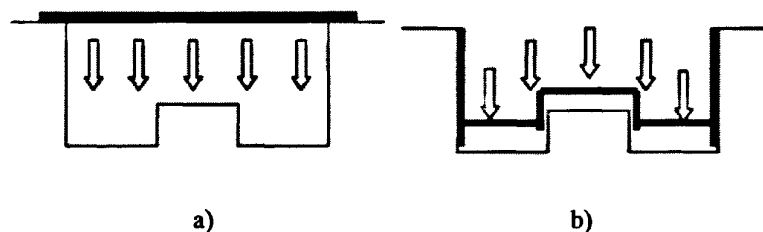
Fig. 1-1 Comparison of conventional and superplastic tensile testing

在世界范围的制造领域中，超塑性已经是一个普通的制造工艺。超塑性是

一个热伸延过程即超塑性会在内部气体如氩气的高压下被压入一个凹模的过程。这种成形过程通常称做凹模成形。如图 1-2 所示。凹模成形使得车身板材、大的火车部件、建筑复合板料等的生产工艺更加完美。另一种超塑成形叫做气胀成形。气胀成形适用于小的复杂成形特别是对厚度特性起决定性作用的材料，或者需要深成形时。这种工艺通常用在电子包装，航天零件及特殊应用上。在这种方法中，模具以固定的形状把超塑合金压入凹模中。一个相反的应力使成形板材脱离模具。

关于超塑性，铝和钛已经发现它们的领域，所以被广泛的应用在航空和汽车工业中。这此合金取代了许多其他材料。由于它们的轻质率、抗腐蚀性、抗高温性，并且它们不需要后变形热处理。它们还有好的超塑性，使得它们在应用和成形工艺中是理想的。超塑成形在制造工业赢得了广泛的应用由于以下几方面原因

1. 能用金属板材生产出不需要组装的复杂的 3D 形状
2. 单一表面工具降低了工具费用
3. 板材厚度的不同范围能成形各种部件
4. 成形条件可以进行优化以减少制造时间
5. 如果成形过程得到优化，成形有很小的重复性及零回弹



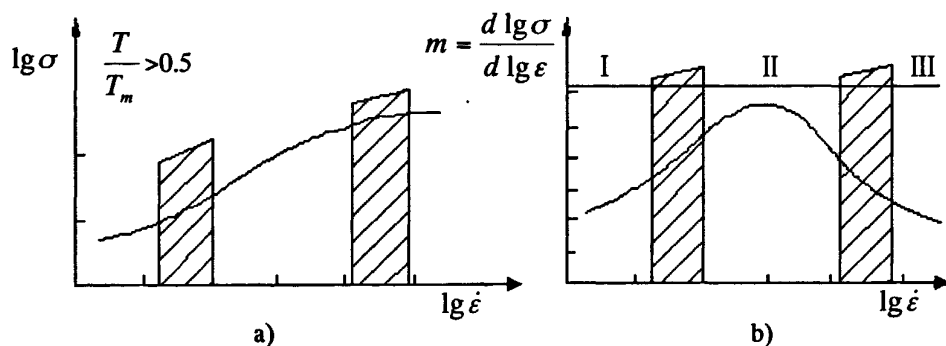
a) 原始状态 b)成形状态

图 1-2 凹模成形示意图

Fig. 1-2 Concept of cavity forming

超塑成形过程中应力和应变速率关系曲线如图 1-3 所示。其特点是两条曲线呈双对数关系。根据应变速率和应变速率敏感指数的关系将曲线划分成三个区间。超塑性一般在 II 区出现^[24]。

扩散连接(Diffusion Bonding)是指两个或两个以上板材在真空状态下加压加热，板材接触后界面上局部产生塑变形，原子通过相互扩散在界面处形成新的金属键的连接工艺。



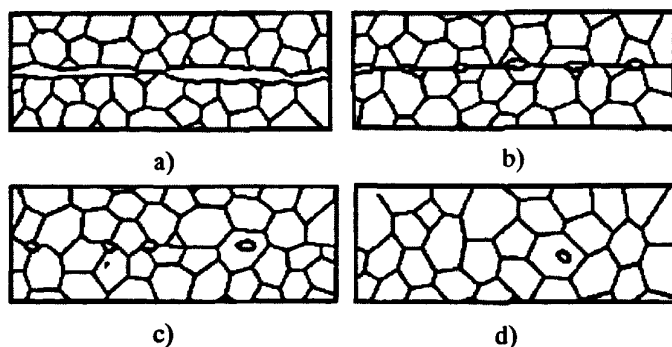
a) 应力与应变速率关系的示意图

b) 应变速率敏感性指数与应变速率关系图

图 1-3 应力和应变速率敏感性指数与应变速率关系示意图

Fig. 1-3 Relationship of stress and strain rate sensitivity index with strain rate

对于扩散连接过程来说通常分为三个阶段见图 1-4。第一个阶段为物理接触阶段，板材在压力作用下发生塑性变形，使微观下凹凸不平的表面逐渐接触，随着时间的进行最终达到紧密结合，当原子开始相互扩散时就进入了第二个阶段即表面扩散接头形成。第一阶段的塑性变形中的组织缺陷的积和高温为原子储存了较多的能量，处于高度激活状态，很容易越过界面形成金属键，晶界发生迁移，形成新的界面，但此时的金属键并不够牢固。第三阶段是界面消失。对扩散后的板材保温保压一段时间，通过后续扩散，晶粒长大，气孔消除使金属键变成牢固的连接^[25-28]。



a) 室温装配状态 b) 第一阶段 c) 第二阶段 d) 第三阶段

图 1-4 扩散连接过程三阶段示意图

Fig. 1-4 Sketch maps of the three stages of diffusion bonding process

当材料的超塑成形和扩散连接的温度在同一温度区间时，可以将其同时进行，部分板材完成超塑成形，部分板材进行扩散连接，这就是超塑成形/扩散

连接组合工艺原理。这种技术可以制成薄壁结构件，减轻零件重量，节省工时，节省原料，提高生产效率，减少后续装配和焊接等优点在航空航天领域得到了成功的应用。通过这种组合工艺得到的零件可减轻质量 30%，降低 50% 的成本，提高 20 倍的生产效率，具有巨大的优越性，被认为是最有发展前途的制造工艺之一。SPF/DB 的三种典型结构^[29]如图 1-5 所示。

图 1-5 a) 为单层板加强结构。可以先进行超塑成形后进行扩散连接，也可以反过来进行，在需要加强的部位放置板材。图 1-5 b) 为双层板结构。这种结构通过改变阻焊剂的位置就可以成形出不同形状的构件，模具工艺都非常简单。图 1-5 c) 为多层板结构。与双层板成形原理一样需要在成形部份涂阻焊剂，其余部分发生扩散连接成形出整体构件。这三种常用结构在航空航天方面都有着广泛的应用。例如加强肋、舱门、发动机叶片等等。

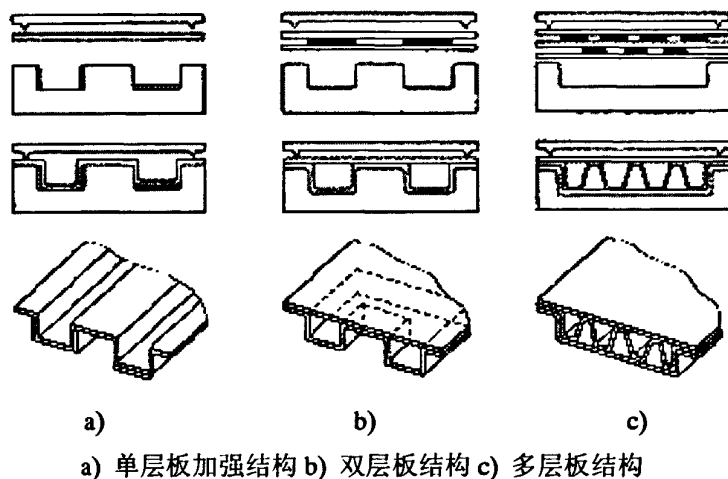


图 1-5 典型 SPF/DB 结构件

Fig. 1-5 Typical SPF/DB structures

1.3.1 超塑成形/扩散连接国内外发展现状

20 世纪 70 年代，美国洛克威尔公司最先将超塑成形和扩散连接技术组合到一起，研发了超塑成形/扩散连接复合工艺(SPF/DB)。此后，法国、德国、英国、日本和前苏联都陆续开始了这项技术的研究。这种技术特别适用于制造形状复杂的构件，如航天发动机上使用的风扇叶片、机翼等。目前为止，SPF/DB 复合工艺已广泛应用在航空航天领域并获得了可观的经济效益^[30]。

美国多家公司已具备利用 SPF/DB 工艺生产钛合金结构件的能力，如麦道

公司所产的 SPF/DB 的结构件有就多达 100 种，诺斯诺普公司针对 F-18 战斗机结构性能所生产的 28 个 SPF/DB 结构件，罗尔公司所生产的型号哦 CF6-80 的发动机上 SPF 或 SPF/DB 钛合金结构件也多达 7000 个^[31]。

以德国、法国、日本及俄罗斯等国为代表，SPF/DB 工艺的研究与开发利用已取得的成果最为显著。如法国的 ACB 公司、达素集团、哈夫集团和德国的 MBB 股份公司等都具备很强的轻合金 SPF/DB 产品的生产实力。俄罗斯在轻合金 SPF/DB 工艺的研究已具有多年经验，其科研规模之大是前所未有的。日本在 SPF/DB 的研究与应用发展速度迅猛，目前，F-15 战斗机及日本自行开发研制的战机上都装有日本自行研究生产的钛合金 SPF/DB 结构件。国外轻合金 SPF/DB 结构件的发展状况如表 1-1^[32]。

表 1-1 国外 SPF/DB 结构件的应用情况

Table 1-1 Structural components manufactured by SPF/DB in foreign countries

应用领域	应用部位	主要经济指标
BAe125/800 行政机	应急舱门	减重 10%，降低成本 30%
EAP 战斗机气道	前缘缝翼、进后机 身下整流片	减重 10%~20%
Mirage-2000	垂直尾翼、机翼 前缘延伸边条	减重 12.5%
A300、A310/320	前缘缝翼收放机构外罩	减重 10%
A330、A340	机翼检修口盖、驾驶舱顶 盖、缝缘传动机构、密封 罩、管形件、尾翼	减重 46%
雅客 42 客机	发动机检修舱门	减重 1.2kg，降低成本 53%
BAe ATP 飞机	检修舱门	降低成本 40%
三菱重工	隔框、龙骨舱门壁板	
阵风战斗机	前缘缝翼	减重 45%，降低成本 40%
狂风战斗机	机身框架、发动机止推座、 隔热罩热交换导管	降低成本 30%~70%
F-15 战斗机	隔热板、后机身上部钛外 壳、起落架舱门	降低成本 40%， 减重 10%
PW4084 发动机	空心叶片 200 件	

英国也是世界上研究 SPF/DB 工艺较早的国家之一，目前已建造了标准化的生产车间，承担各种国内外订货。英国的 Superform 集团、TKR 集团、Rolls-Royce 集团、宇航集团和 IEP 集团都具备非常雄厚的钛合金 SPF/DB 工件的生产实力。罗罗公司利用 SPF/DB 工艺已成功研制出轻合金宽弦空心风轮叶片，位于世界领先水平。

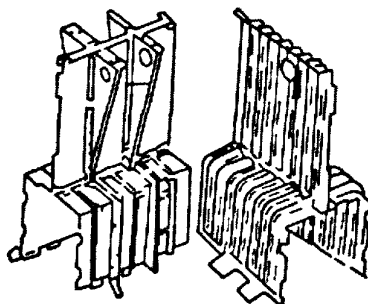
我国 SPF/DB 工艺的研究与应用起步比较晚，始于上世纪 70 年代末，到目前为止，已完成了基础工艺测试、模具性能测试、特殊工件研制、质量检测与控制、性能校核测试等方面的尝试，成功开发出某战机风动泵舱门、隔断、电瓶罩盖、发动机维修舱盖、干扰弹发射筒等飞机部件，同时，在铝合金 SPF/DB 及 SPF/DB 的数值分析方面也获得了一系列可喜的研究成果。我国自主研发的钛合金装机结构件的应用实例如表 1-2 所示。

图 1-6 为 F-15 型飞机的原装配式龙骨结构件，上有 75 个零件，1420 个铆钉，需十几套模具、2 套装配夹具。后改用 SPF/DB 结构件，只需 4 个零件，71 个连接件，2 套模具，无需夹具。整体结构重量减轻 25%，总成本降低 77%，包括降低工具成本 16%^[33]。

表 1-2 我国 SPF/DB 结构件的应用情况

Table 1-2 Structural components manufactured by SPF/DB in our country

构件名称	构件特点	主要经济指标
某机框锻件	SPF/DB 代替热成形工艺	减重 8.8%，降低成本 47%
某机舱门	SPF/DB 件代替铆接件，零件数由 52 减至 22，紧固件从 840 个减至 103 个	减重 15%，降低成本 53%
某机电瓶罩	钛合金 SPF/DB 件代替不锈钢件	减重 47%，降低成本 50%
某新型发动机维护口盖	钛合金 SPF/DB 件代替铝合金铆接件	减重 20.5%，降低成本 55%
某机整段框(主承力框)	框分为 6 段，全部 SPF/DB	减重 12%，降低成本 30%



a) 原结构 b) SPF/DB 结构
a) 原结构 b) SPF/DB 结构

图 1-6 SPF/DB 的 F-15 飞机龙骨复板与现行用龙骨的比较

Fig. 1-6 Comparison of F-15 keels made by SPF/DB to that of the present type

1.3.2 气化剂作为加压介质的 SPF/DB 技术简介

气化剂作为加压介质的 SPF/DB 组合工艺过程是根据板材超塑性的特点,选择一种化学物质,这种物质在板材超塑性温度附近发生化学反应,同时生成物中伴有大量的气体。在封闭的空间内,这些气体在一定的条件下达到平衡,此时会产生一定的气体压力,利用这种气压进行超塑成形,而未放置气化剂的区域发生扩散连接的工艺^[34]。

日本的 Satoshi Furihata、Hiroaki Ohsawa 及哈尔滨工业大学的张凯锋教授等在成形加压介质方面进行了有益的研究。Satoshi Furihata 把水作为气体发生剂,用 SPZ1 成形了圆形顶罩,把 5-P 粉末作为气体发生剂,把 SPZ1 和 A1050 板材通过轧制连接的方法制出了三层板结构件^[35]。哈尔滨工业大学的吴为对气化剂作为加压介质的成形原理进行了深入研究,采用 TB2 钛合金板材进行了实验,同时开发了 ARVIP-3D 软件对非对称双室盒形件成形过程进行了模拟^{[34]89-101}。

1.3.3 有限元模拟概述

有限元分析方法(finite element method)是计算各种复杂物理数学工程问题的重要方法,是解决各类复杂工程问题的重要研究方法,同时是开展科学研究的常用工具。应用和实现这种方法主要包括以下三个方面:计算理论、计算机硬件、计算机软件。这三个部分之间互相关联,缺一不可。随着计算机技术的应用发展,有限元法得到了广泛的应用和普及,成为了分析问题的常用工具。至今,国际上超过90%的机械零件和工程装备都是利用有限元进行计算,修改和优化。事实上,有限元分析作为数值化的“虚拟实验”成功替代了大部分实际实验。结合有限元的分析与典型的验证性试验能够提高效率降低成本^[36]。

作为国际上主要的研究问题之一,板料的超塑成形模拟分析主要领域是汽车、航天航空等生产制造业。初始时期,数值模拟被认为是金属领域的帮助工具,目地是为了提高认识方面的水平。在有限元方法出现以前,开发一个新产品不仅周期较长,而且对零件的质量检测完全依靠实际经验,这种方法难以保证质量的程度。自从板料有限元法应用于实际工作中后,传统制造业的产生效率和质量得到明显的提高。经过许多专家发展完善后,板材有限元分析已经能成功预测产品的成型过程,计算成形过种中的应力,应变,成形后的温度场,应力场分布,同时分析出产品的缺陷位置,通过优化工艺进行改善为实际生产

奠定理论基础和指导方法^[37]。

有限元法按分析的对象可分为专用程序和通用程序两类^[38]。专用程序的特点是专门为一类问题编写，相对通用程序来说适用面较窄；例如空间问题的专用程序。再如土木问题专用程序，还需要另加一些特殊运算。与专用程序不同，通用程序尽力适用于各类问题分析。按分析的问题的性质可以分成动力分析、静力分析、温度场分析、稳定性分析等类程序。有些程序只具有静力分析功能，有些只具有动力分析功能，也有些两者都具备。按组成分析模型的材料性质和变形量的大小可以划分成塑性结构分析、非线性结构分析、线弹性结构分析、及大变形、粘弹性、大应变和蠕变分析等。板材超塑成形数值模拟一般采用刚粘塑性有限元法。通过模拟分析可以得到板材在成形过程中的贴模情况和壁厚变化情况，得到优化的时间压力曲线，还能对成形中的工艺参数进行优化。

1.4 课题意义及主要研究内容

镁合金由于其优良的性能，丰富的资源具有广阔的前景，但由于其密排六方结构，滑移系较少，常温时进行塑性成形较困难，一直制约着镁合金的发展，通过升温开动镁合金的滑移系，降低流变应力，使之具有一定的超塑性，提高镁合金的塑性成形能力对扩大镁合金的应用范围有重要意义。

利用材料在超塑成形的同时进行扩散连接，可以成形出复杂的整体构件，这项技术对于生产航空航天大部份轻质构件来说，既能减轻整体重量，又能减少后续加工，提高生产效率，对生产制造业有巨大影响^[39]。目前该技术已成功的运用在钛合金，铝合金中，对于镁合金来说还不够成熟，因此本文选择常用结构中的双层板结构镁合金波纹件进行一些研究。

主要研究内容有：

1. 对 ZK60 镁合金波纹件进行 SPF/DB 成形模拟，分析成形规律及壁厚分布规律，预测波纹件成形缺陷。
2. 利用正交实验对波纹件成形工艺参数中的温度、应变速率和摩擦系数进行优化，得到优化的 P-T 曲线来指导实验。
3. 研制气化剂，进行 ZK60 镁合金 SPF/DB 工艺实验，验证气化剂作为加压介质的 SPF/DB 工艺，并将模拟和实验结果进行对比，分析产生误差的原因。
4. 对波纹件进行金相分析，探讨晶粒尺寸、空洞与应变量之间的关系，通

过透射分析总结细晶镁合金超塑成形/扩散连接过程的变形机理和成形规律。

第2章 气化剂作为加压介质的 SPF/DB 技术原理

2.1 引言

传统的 SPF/DB 工艺的加压进气方式为,在板间焊管,通入惰性气体进行成形如图 2-1 所示^[40]。采用 SPF/DB 组合工艺成形大型多层结构零件时,加压气路部分十分复杂。而且对气压表、气压阀等承受气压部件都提出了很高的要求。采用气化剂作为加压介质的 SPF/DB 技术,减少了与焊管进气加压相关的气管(通常为不锈钢管)、高压气源、测压表等装备,并且与传统工艺相比主要是改变了成形的方式,无论是板材的加压进气方式,还是成形过程都与传统的方式有所不同^{[34]21}。

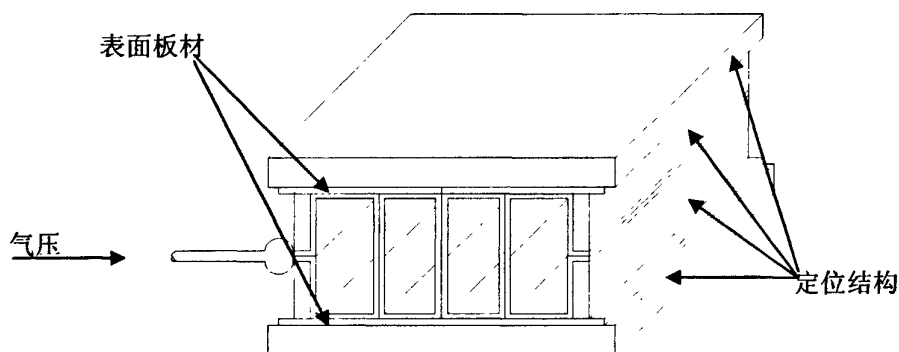


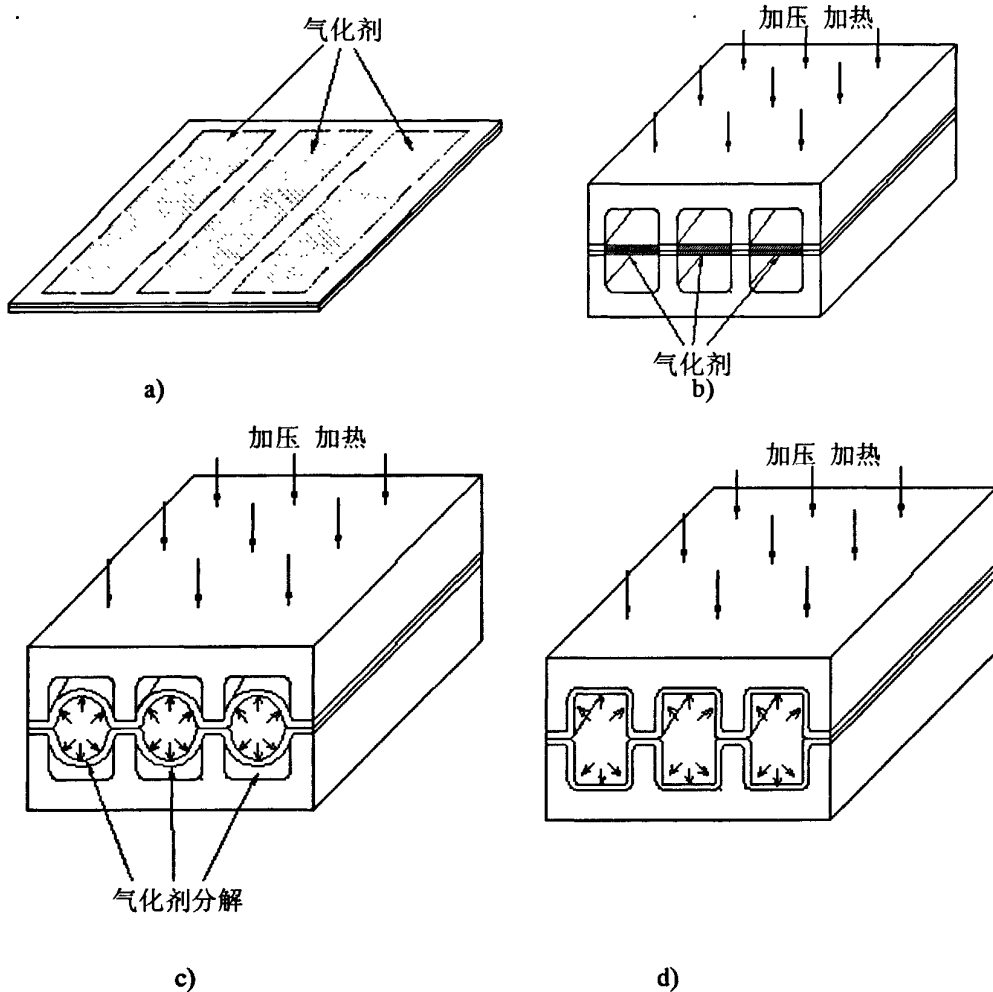
图 2-1 传统四层板结构 SPF/DB 示意图

Fig. 2-1 Schematic representation of the SPF/DB of conventional four-layer plates

2.2 气化剂作为加压介质的超塑成形原理

气化剂作为加压介质的超塑成形原理是:根据成形板材性质选择一种化学物质,这种物质在被加工材料的超塑温度附近发生化学反应,反应结果产生大量气体。气体在模具型腔封闭的空间内,在一定的条件下达到平衡,产生一定的气体压力,利用这种通过化学反应的生成物得到的气压进行超塑成形^{[34]22},如图 2-2 所示。根据型腔板材确定气化剂量,在相应型腔部份放置气化剂,在

加热加压条件下气化剂发生分解生成气体进行超塑成形，未放置气化剂部份在加热加压条件下进行扩散连接。



a) 放置气化剂 b) 加热及压实阶段 c) 超塑成形与扩散焊阶段 d) 成形结束

图 2-2 气化剂作为加压介质的 SPF/DB 示意图

Fig. 2-2 Schematic plan of SPF/DB with gasification agent as pressure medium

2.3 气化剂的选择原则

研制合理的气化剂对于超塑成形过程非常重要，要在气化剂尽量少的情况下让板材顺利成形。根据实际情况对气化剂的选择应考虑以下几方面^{[34]29}：

1. 气化剂的分解温度受到材料的超塑性温度和扩散温度的制约，通常材料的超塑性的温度范围与其扩散焊温度范围差别不大，因此气化剂应在材料的最佳超塑成形温度附近，最好高于材料的最佳扩散焊温度。

2. 气化剂的反应分解率尽量高，从面仅用少量的气体发生剂即可产生很高的内压，同时不会明显增加构件的重量。

3. 气化剂的分解反应过程是可逆可过程，其反应分解速率可通过升温速度加以调节，从而控制 P-T(压力-时间)曲线，达到控制应变速率的目的。

4. 气化剂分解产生的气体与构件不应发生不良反应，或者可以采取相应的措施避免反应气体与构件的不良反应。

5. 气化剂最好为固态，便于封装填放。

6. 气化剂及其分解产生的气体应为无毒物质，对人体无毒害。

对于 SPF/DB 工艺，其超塑变形通常不大，所以气体发生剂不一定严格地在超塑成形的最佳温度分解。对于 SPF，SPF/DB 工艺，水，碳酸盐，有机物等都是可选择的气体发生剂。本文根据镁合金的特点研制了以碳酸氢钠为主要成份辅助其他化学物质的 N11 型气化剂，该试剂常温下为白色固体粉末，微溶于水，可与水发生水解反应。

2.4 N11 气化剂作为加压介质的 SPF/DB

2.4.1 N11 型气化剂主要成分简介

N11 型气化剂以碳酸氢钠为主要成份。 NaHCO_3 为白色晶体，比重 2.159。无臭、味咸，可溶于水，其水溶液因水解而呈微碱性，受热易分解，在 65°C 以上迅速分解，在 270°C 时完全失去二氧化碳。用作食品工作的发酵剂、汽水和冷饮中二氧化碳的发生剂、黄油的保存剂，其分子三维结构图如图 2-3 所示。图中红色原子代表氧原子，黑色原子代表碳原子，蓝色原子代表钠原子。氧原子和一个碳原子以双键形式相连，同时和另外两个碳原子以单键相结合。钠原子和碳氧根以共用电子云的金属键相结合。

碳酸氢钠的制备有两种方法：一种方法是气相碳化法。将碳酸钠溶液，在碳化塔中通过二氧化碳碳化后，再经分离干燥，即得成品。另一种方法是气固相碳化法。将碳酸钠置于反应床上，并用水拌好，由下部吹以二氧化碳，碳化后经干燥、粉碎和包装，即得成品。

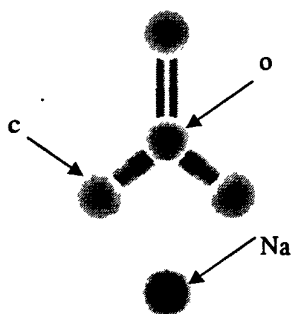


图 2-3 碳酸氢钠三维结构图

Fig. 2-3 Three-dimensional diagram of sodium bicarbonate

化学反应的微观实质是由粒子有效碰撞而导致的旧化学键断裂，新化学键形成的过程。使化学键断裂的本质是使公用电子对分开，通过升温使电子获得足够的能量，使其得以翻跃断裂能垒，因此在旧化学键断裂的同时，新化学键就会形成。

NaHCO_3 在 270°C 时分解产生 CO_2 和 H_2O ，具体反应方程式如式 2-1，图 2-4 为生成的碳酸钠的三维结构示意图。

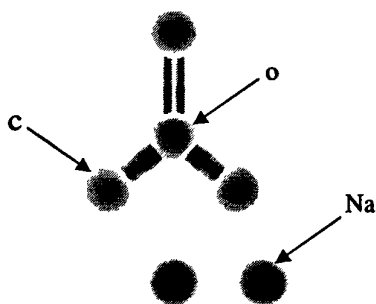
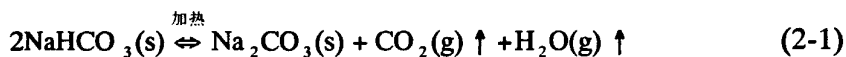


图 2-4 碳酸钠的三维结构示意图

Fig. 2-4 Three-dimensional diagram of sodium carbonate

2.4.2 气化剂的分解过程及影响因素

气化剂作为加压介质的超塑成形是一个涉及到可逆反应分解平衡的物理化

学反应过程，哈尔滨工业大学的吴为利用可逆反应过程中的平衡常数与范德霍夫等温方程推导出了气化剂分解过程中气体压力与温度变化之间的关系及影响平衡移动的化学因素，推导了气化剂作为加压介质进行超塑成形的热力学模型^{[31]22-27}，为实际生产提供了科学依据，其具体推导过程如下：

气化剂作为加压介质的 SPF/DB 过程，从实质上说是一个封闭体系从环境吸收能量，并对环境做功的过程。由于超塑成形对于应变速率比较敏感，所以必须控制该反应过程中的反应速度，因此可将该反应过程视为准静态过程，同时由于成形是在真空环境中进行，由于在模具的内表面涂有润滑涂层，对于成形板材与模具之间的摩擦很小，反应气体在反抗外力膨胀做功时可以近似认为没有摩擦力的存在，所以该反应为可逆反应。

化学物质在发生可逆化学反应的时候，最终要达到一种平衡状态，如图 2-5。平衡状态时反应物与生成物之间的浓度或压强的比值为—常数，称为浓度平衡常数 K_C 或压力平衡常数 K_p 。根据化学平衡定律，达到化学平衡时，化学反应的正反应与逆反应的速度相等 $V_+ = V_-$ ，对反应



其中平衡常数可以表示为

$$k_p = \frac{k_+}{k_-} = \frac{p^c(c)p^d(d)}{p^a(a)p^b(b)} \quad k_c = \frac{k_+}{k_-} = \frac{c^c(c)c^d(d)}{c^a(a)c^b(b)} \quad (2-3)$$

任意情况下，各种物质的分压或浓度用 P 或 [] 表示，并令：

$$Q_p = \frac{p^c(C)p^d(D)}{p^a(A)p^b(B)} \quad Q_c = \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b} \quad (2-4)$$

分别称 Q_p 和 Q_c 为压力商和浓度商。当可逆反应处于平衡时，各种物质的 $P=p$ 或 $[] = c$ ，因此， $Q_p = K_p$ 或 $Q_c = K_c$ ；如果 $Q_p \neq K_p$ 或 $Q_c \neq K_c$ ，说明反应未达到平衡。

化学平衡常数只与反应物本身和化学反应的温度有关，与反应物、生成物的浓度，是否有催化剂无关。

影响化学平衡的因素主要有反应物、生成物的分压或浓度、化学反应的温度。化学催化剂只影响化学反应的速度而不影响化学反应的最终平衡常数。在这两类主要的影响中，对化学反应平衡影响最为显著的是化学反应温度的影响。

根据热力学的基本定律，可逆反应的最终程度可以由式求得：

$$\lg K \approx \frac{-(\Delta H_{298} - T\Delta S_{298})}{19.15T} \quad (2-5)$$

式中： K 为平衡常数； ΔH_{298} 为室温时的焓变； ΔS_{298} 为室温时的熵变； T 为发生可逆反应时的温度。

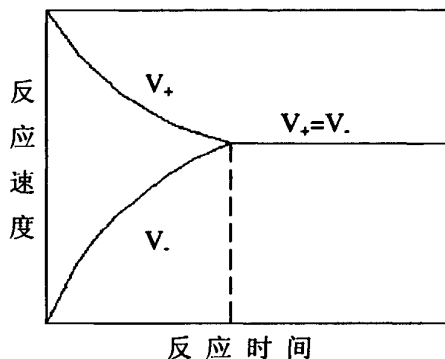


图 2-5 化学平衡建立示意图

Fig. 2-5 Schematic plan of establishment of chemical equilibrium

通过合理选择加压介质，由式(2-2)~(2-4)就可以计算特定温度下的反应物和生成物的混合气体平衡压力，如图 2-6。

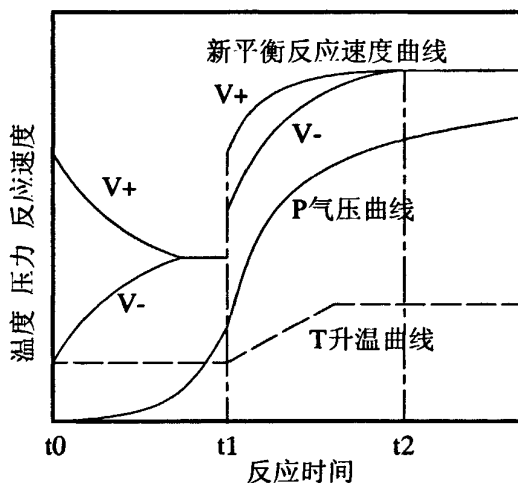


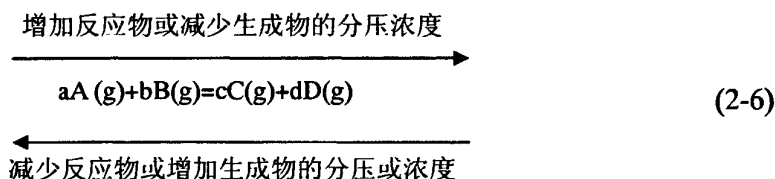
图 2-6 温度升高后反应速度和气压曲线

Fig. 2-6 Curves of reaction velocity and pressure after the increment of temperature

化学反应中各种反应物的分压或浓度的改变往往有两种情况，一种是体积

不变, 改变反应物或减少生成物的分压或浓度; 别外一种是改变反应体系的体积。

对于第一种情况, 平衡移动的情况见式(2-6)



对于第二种情况, 设平衡后, 将反应体系的体积改变为原来的 $1/m$ 倍, 则反应体系的总压、各物质的分压或浓度变为原来的 m 倍, 对式(2-2)的反应来说, 此时

$$Q_p = \frac{P^c(C)P^d(D)}{P^a(A)P^b(B)} = K_p m^{[(c+d)-(a+b)]} \quad (2-7)$$

$$Q_c = \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b} = K_c m^{[(c+d)-(a+b)]} \quad (2-8)$$

对(2-7)(2-8)进行分析, 可得表 2-1

通常情况下, 加压介质发生的化学反应多为吸热且生成物浓度和气体压力明显升高的可逆化学反应。图 2-7 反映了气压升高 a)、温度升高 b)和生成物浓度升高 c)加压介质可逆化学反应方向的影响。可见, 生成物的气体压力的升高和浓度的升高都会使化学平衡向逆反应方向移动, 从而使气体压力和生成物的浓度有所降低; 而温度的升高又会使平衡向正反应方向移动, 从而使气体压力升高。

表 2-1 总体积或总压力改变对平衡的影响

Table 2-1 Equilibrium influence of change for total volume or total pressure

	$m > 1$ 总体积缩小, 总压增加	$m < 1$ 总体扩大, 总压减小
$c+d=a+b$	$Q=K$ 平衡状态维持不变	$Q=K$ 平衡状态维持不变
$c+d > a+b$	$Q > K$ 平衡沿逆反应方向移动	$Q > K$ 平衡沿正反应方向移动
$c+d < a+b$	$Q < K$ 平衡沿正反应方向移动	$Q < K$ 平衡沿逆反应方向移动

平衡常数 K 不能用于反应方向的判断, 而在具体反应条件(温度、压力、

浓度)下的自由能 ΔG_T ，可以判断反应进行的方向。 ΔG_T 由吉布斯-赫尔姆霍茨方程(Gibbs-Helmholtz equation)求得：

$$\Delta G_T = \Delta G_T^\circ + RT \ln Q \quad (2-9)$$

$$\Delta G_T^\circ = \Delta H_T^\circ - T\Delta S_T^\circ \approx \Delta H_{298}^\circ - T\Delta S_{298}^\circ \quad (2-10)$$

式中： Q 为压力商。

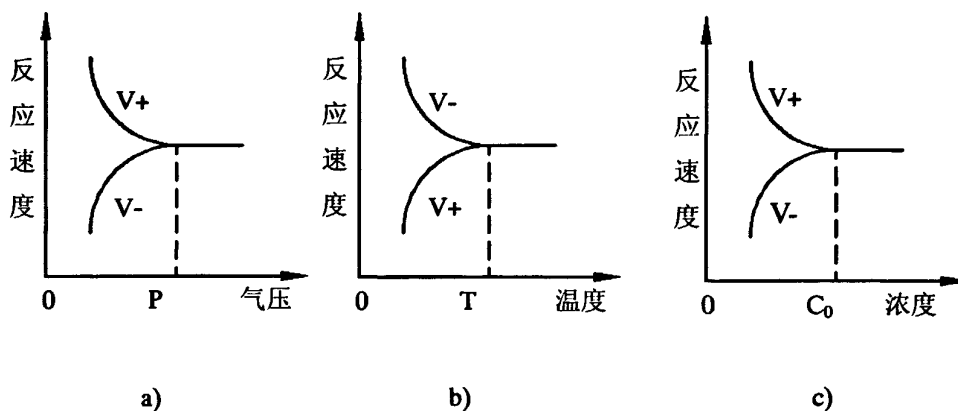
当 $Q < K$ ，即 $\frac{Q}{K} < 1$ 时，反应正向进行，此时 $\Delta G_T < 0$ ，对外做功，其最大

值为 $|\Delta G_T|$ ；

当 $Q > K$ ，即 $\frac{Q}{K} > 1$ 时，反应逆向进行，此时 $\Delta G_T > 0$ ，外界要对其做功，

其最小值为 $|\Delta G_T|$ ；

当 $Q = K$ ，即 $\frac{Q}{K} = 1$ 时，反应正向进行，此时 $\Delta G_T = 0$ ，既不对外做功，也不要求外界对其做功。



a) 气压对可逆反应的影响 b) 温度对可逆反应的影响 c) 浓度对可逆反应的影响

图 2-7 各种因素对可逆反应的影响

Fig. 2-7 Influences of different elements to the reversible reaction

可以借助式(2-9)、(2-10)对确定所选气化剂的分解温度。而通常所指的物质的分解温度是 $\Delta G_T^\circ = 0$ 时的分解温度。

图 2-8 是碱土金属碳酸盐分解反应的 ΔG_T° 随 T 改变的函数图形，它表明，不同金属的同一含氧酸盐在热分解时， ΔH_T° 是决定其热稳定性强弱的主要因素。 ΔH_T° 越大， ΔG_T° 越大，分解温度就越高，热稳定性越强。

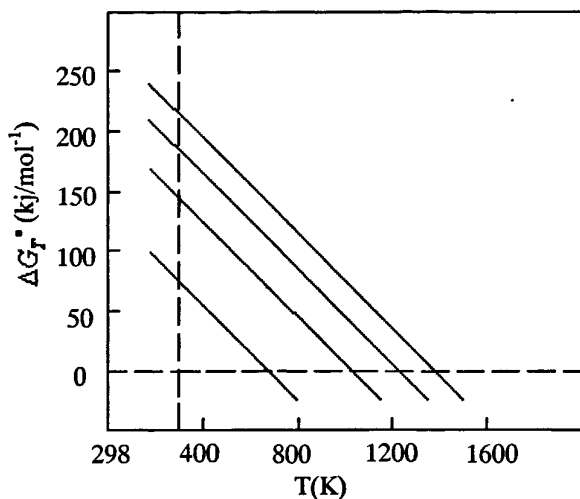


图 2-8 碱金属碳酸盐分解反应的 ΔG_r^0 -T 图

Fig. 2-8 ΔG_r^0 -T diagram of decomposition reaction for alkali metal carbonate

由超塑状态下材料的本构关系(Backofen 方程)可知:应变速率的升高使材料的变形抗力增加,而要使变形抗力已增大的材料继续变形,必须在更高的气体压力下才能达到;而升高的气体压力又使化学平衡向逆反应方向移动,从而使气体压力降低,以保持平衡状态。这个过程可以由图 2-9 来近似描述。

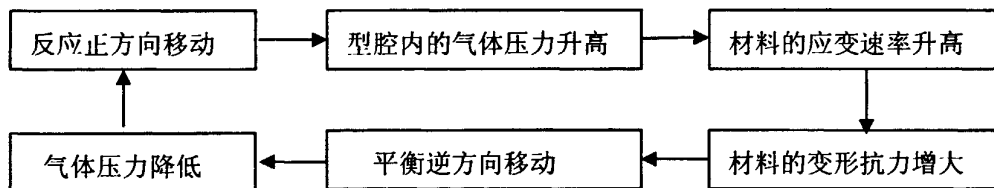


图 2-9 在自由胀形阶段模具型腔内部平衡示意图

Fig. 2-9 Equilibrium schematic of within the mold cavity of free bulging

如果将温度升高的过程,分成无数小的区间,那么气化剂作为加压介质的超塑成形过程就是在温升的各个阶段,气化剂的分解反应是一个达到平衡-平衡被破坏-再次达到平衡的过程。在这个过程中,如果容积不变,则加压介质分解产生的气压将不断增大在。而实际上,由于气压的作用,板材在不断变形,所以容积也在不断增大,而容积的增大又是使气压减小的因素。因此,根据成形温度、模具型腔的容积选择气化剂的种类和用量是必须的。

综上所述,在合理选择加压介质化学成分的前提下,只要控制好加压介质的反应温度,就可以使介质气压保持在一定的平衡状态下,从而使成形过程在

给定的气体压力或材料的最佳应变速率条件下完成超塑成形过程。张怀的超塑胀形实验也证明了这一点^[41]。

2.5 气化剂作为加压介质进行超塑成形的热力学模型

在采用气化剂作为加压介质的超塑成形过程中，气压的形成与气化剂在模具的型腔内部发生复杂的化学和物理变化有关^{[32]28}。对实际情况的模拟是相当困难的，必须对该过程进行必要的和合理的简化。以圆形的模具型腔为例，由外向内的传热过程是一个非稳态的导热过程，可以根据实际情况简化为一个准稳态导热过程，单位时间由外向内的导热流量为：

$$Q = \beta \cdot \frac{2\pi(t_2 - t_0)}{\ln(l_0/l_1)/\lambda_1 + \ln(l_1/l_2)/\lambda_2} \quad (2-11)$$

式中： Q 为单位时间导热流量； l_0 为等效模具外表面至型腔中心线距离； l_1 为等效模具内表面至型腔中心线距离； β 为与具体的工艺过程有关的系数； t_0 为炉腔温度； t_1 为介质表面温度。

型腔内部的瞬时气压可以由以下公式得出：

$$P = 0.1\eta_H\eta_G \cdot \frac{0.0224QTS/q + V_0}{\alpha V_0} P_0 \quad (2-12)$$

式中： q 为每摩尔化学物质维持反应所需热量(W/mol)； η_H 为模具热损耗指数； η_G 为有用气体指数； α 为模具型腔体积增长指数； P_0 为初始气压； S 为传热面积； V_0 为单元法向应变速率。

2.6 本章小结

1. 研究了气化剂作为加压介质的 SPF/DB 成形原理，气化剂的选择原则。
2. 研制了以碳酸氢钠为主要成份辅助其他化学物质的 N11 型气化剂，分析了气化剂分解随温度变化的规律，为实验提供了理论依据。
3. 分析了影响气化剂分解平衡的因素，推导出气化剂作为加压介质的超塑成形的热力学模型。

第3章 ZK60 镁合金波纹件 SPF/DB 成形数值模拟

3.1 引言

有限元法是适应电子计算机的使用而发展起来的一种比较新颖和有效的数值计算方法。这种方法起源于 20 世纪 50 年代航空工程中飞机结构的矩阵分析。1960 年飞机结构工程师 Clough 在他的论文中第一个采用有限元这一术语,并用有限元的思想求解了平面弹性问题。在国内,20 世纪,60 年代,中科院计算所的冯康教授独立推导了有限元计算的数学过程,70 年代中期,复旦大学教授与江南造船场合作,将有限元法应用于船舶计算,使有限元法已成为工程设计中不可或缺的一种重要方法,在大型结构作用力分析、变形分析、失效分析、传热分析等方面扮演着越来越重要的角色^[42]。

3.2 超塑成形有限元数值模拟基础理论

不同种类的超塑性材料有许多基本模型^{[23][47]}。模型必须有足够的复杂度,才能提高分析的精度和效率。同时可以提供材料特性方面有用的信息。任何基本超塑模型中最重要方面是应变速率相关性,温度影响、晶粒尺寸影响、能量蠕变定律、流动扩散和摩擦。细晶超塑性材料在常规观察时具有超细晶粒微结构。通常,平均晶粒尺寸应小于 $10\text{-}15\mu\text{m}$,在一定的超塑成形温度下,应变速率在 $10^{-5}\text{-}10^{-2}\text{s}^{-1}$ 之间。超塑变形的特点为极大的延伸率(范围在 $1000\text{-}2000\%$),应力($<10\text{MPa}$),对流动应力 s_f 和应变速率 ξ 的高应变速率敏感性。后者被定义为应变速率敏感指数

$$\sigma = K\dot{\epsilon}^m \quad (3-1)$$

式中: K 为材料常数。

当应变速率间隔较小时,它能解释超塑性的流变状态。因此,对于非均匀应力—应变速率来说,这个公式可以写成张量形式。

由先前的超塑成形研究中得到应力偏量和应变速率偏量成比例关系。除了温度影响外,最重要的就是超塑材料的应变速率相关性及晶粒尺寸影响和它复合力学性能例如非线性蠕变形为和流动扩散。考虑这些后上述等式改写成:

$$\sigma = K\dot{\epsilon}_{\text{eq}}^m \epsilon_{\text{eq}}^n g^p \quad (3-2)$$

式中： K 、 m 、 n 、 p 为材料的各处参数。由 Ghosh 和 Hamilton 得到的实验结果。我们得到

$$\sigma = K(g)\dot{\varepsilon}_{eq}^{m(g)} \quad (3-3)$$

在这个等式中，力学因子 K 和应变速率敏感指数 m 不是常数。而是受晶粒尺寸影响的变数。利用流动应力是应变速率和等效塑性应变的函数来简化上述公式。我们可以得到

$$\sigma = K\dot{\varepsilon}_{eq}^m \varepsilon_c^n \quad (3-4)$$

超塑板材模型被定义为非线性粘弹麦克斯韦材料。有如下基本等式：

1. 高温变形能被分解成弹性和塑性部分即

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{el} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{pl} \quad (3-5)$$

2. 柯西应力张量能被分解成应力偏张量和静力学部分即

$$\sigma_{ij} = S_{ij} + \sigma_H I \quad (3-6)$$

其中

$$S_{ij} = 2\mu\dot{\varepsilon}_{ij}^{pl} \quad (3-7)$$

$$\sigma_H = \lambda\dot{\varepsilon}_{kk}^{el} \delta_{ij} \quad (3-8)$$

式中： λ 是不定常数； $\dot{\varepsilon}_{ij}^{pl}$ 是应力应变张量。能由下式得到

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{pl} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\dot{\varepsilon}_{kk} \delta_{ij} \quad (3-9)$$

流动粘性 μ 可由下式得到

$$\mu = \frac{1}{3}K\dot{\varepsilon}_{eq}^{m-1} \quad (3-10)$$

3.3 有限元法求解的基本步骤

有限元分析可分成三个阶段，前处理、求解计算和后处理。对于不同物理性质和数学模型的问题，有限元求解法的基本步骤是相同的，只是具体公式推导和运算求解不同。有限元求解问题的基本步骤如图 3-1 所示^[43]。

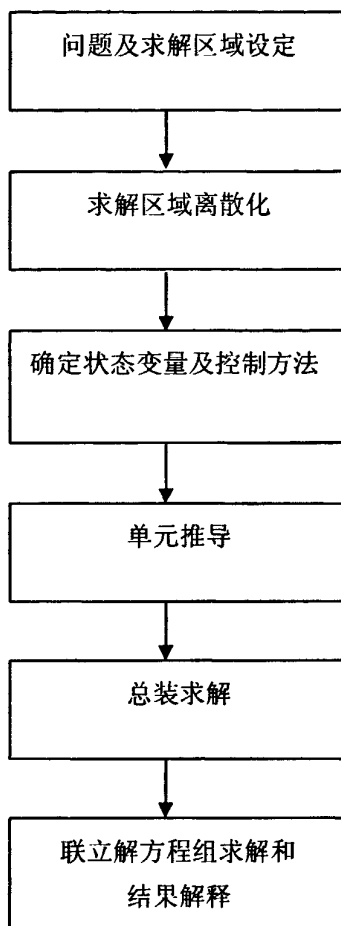


图3-1 有限元求解步骤

Fig.3-1 Solution step of FEM

3.4 ZK60 镁合金波纹件 SPF/DB 成形模值模拟

3.4.1 模型建立

ZK60镁合金波纹件具有三个尺寸相同且上下对称的凹槽，凹槽上下边缘具有倒圆角，波纹件实体图如图3-2所示，工程尺寸如图3-3所示。由于波纹件的对称结构，本文取波纹件的六分之一在截面上划分为压边、侧壁、角部和底部四个区域，如图3-4所示。

利用 PRO/E 软件建立波纹件凹模模型，并以 IGES 标准数据格式导入有限

元分析软件 MSC.MARC 中。用直接建模法生成 ZK60 镁合金板材的有限元模型如图 3-5 所示。初始板材尺寸为 90mm×65mm，板厚 1mm，采用标准四节点四边形三维薄膜单元(membrane)划分网格后，模型具有 10000 个单元，10201 个节点。



图3-2 波纹件实体图

Fig. 3-2 Stereogram of corrugated part

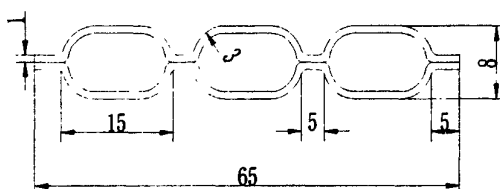


图3-3 波纹件工程图

Fig. 3-3 Schedule drawing of corrugated part

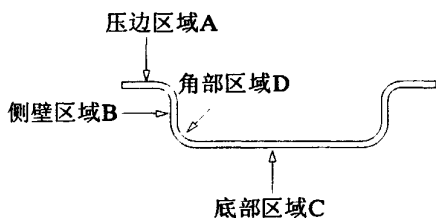


图3-4 波纹件截面区域示意图

Fig. 3-4 Cross section of corrugated part



图3-5 波纹件有限元模型

Fig. 3-5 FEM model of corrugated part

3.4.2 数值模拟设置

假定板材的压边区域，在高温高压下受三向压应力状态而只产生平面应变，并未考虑板材间的原子扩散作用以及原子扩散对板材厚度的影响。当模型建好后，首先分别为板材和凹模定义变形体和刚体接触条件，取摩擦系数为 0.3；由于在超塑成形和扩散连接过程中，波纹件的压边部分受压力机压头和模具的双重作用，因此设置板材周边所有节点各方向位移均为零，压边部分在板材法向上位移为零；同时在板材单元面上加载气体压力载荷，载荷方向垂直于板材并指向模具(见图 3-5)，载荷大小由用户自定义的 fortran 函数控制；由前期的拉伸实验可知 ZK60 镁合金超塑变形条件为温度为 350℃，应变速率敏感指数 $m=0.54$ ，最佳应变速率 $\dot{\epsilon} = 5.56 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ，在材料特性中设定板材厚度为 1mm。设置相关求解参数后进行计算，退出号显示 3004，表明计算按设定条件完成。

3.4.3 波纹件成形模拟结果与分析

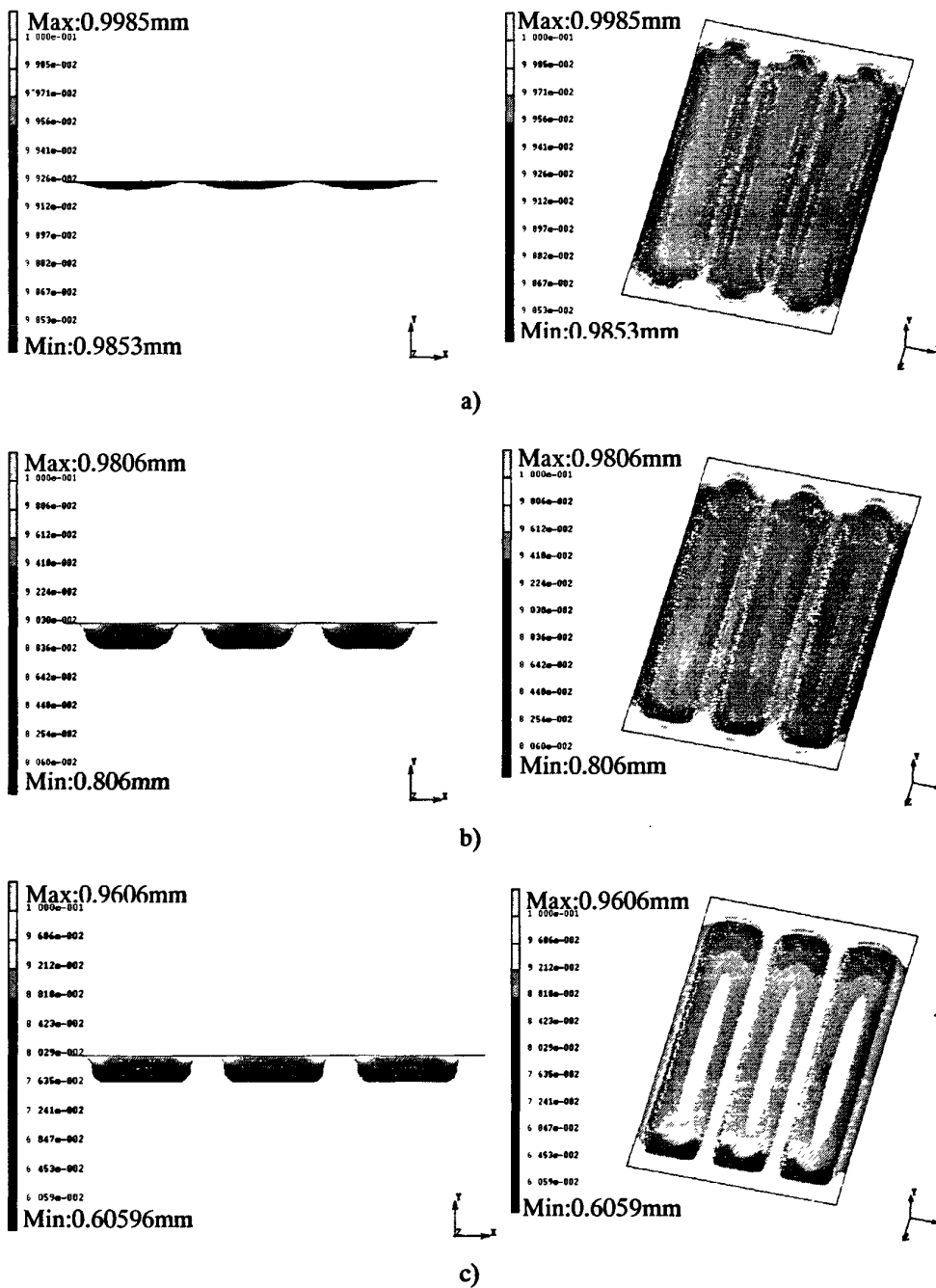
气胀成形是在超塑条件下,将毛坯周边压紧,然后通过流体压力使毛坯变薄而成形的一种成形工艺。在胀形过程中,由于周边材料被模具压紧不参与变形,零件面积增加完全由材料的变薄来实现,同时应力和应变场分布不均匀造成了零件最终壁厚的明显差异,即使对应变速率敏感系数 m 值接近于 1.0 的高硬化材料也难以避免厚度分布明显不均的问题,它直接关系零件能否满足设计要求,因而是限制该工艺应用和发展的关键问题之一^{[43]21-22}。

图 3-6 给出了波纹件在 15、35、47 步时的壁厚变形云图。利用颜色的变化来表示厚度的分布。黄色为厚度较大,蓝色为厚度值较小。从图中可以看出,随着变形量的增大,波纹件的壁厚开始减薄,导致零件的整体壁厚分布不均匀。

按图 3-7 所示的取样位置,将各载荷步下波纹件模型沿纵截面取样得到不同阶段壁厚分布曲线如图 3-8 所示。

可以看出波纹件的成形过程分为自由胀形,贴模胀形和角部填充三个阶段。胀形时,型腔区域板材(B, C, D)在气体压力作用下自由胀形,此时应变速率较低,板材不受模具表面摩擦力影响,具有较好的塑性流动性和变形协调性,因而壁厚减薄量较小,壁厚分布均匀,平均壁厚减薄量为 1.3% 见图 3-6 a)。随着变形的继续,角部区域 D 和底部区域 C 壁厚继续减薄,侧边区域 B 因受凹模圆角摩擦力的作用,变形速率减缓,壁厚分布曲线在凹模圆角处出现明显的转折见图 3-8 中 step35;而当载荷步增至 47 时,底部区域 C 也逐渐贴模,变形速率因摩擦力减慢,壁厚减薄趋势也因此减缓,平均壁厚为 0.764mm,而角部区域 D 在气压载荷下继续变形,而与之相邻的侧边区域 B 和底部区域 C 因模具摩擦作用塑性流动性降低,大大削弱了板材在角部区域的变形协调性,致使角部区域壁厚减薄量急剧增加,在厚度分布云图中明显出现了颜色差异如图 3-6 c),在图 3-8 中壁厚分布曲线出现了尖点是在角部区域,尖点壁厚值为 0.6059mm,壁厚减薄率高达 39.41%。由此看出成形过程中,压边区域壁厚减薄量变化不大,平均减薄量为 4.9%,而角部区域变形量最大,是容易破裂的危险区域。

图 3-9 是波纹件变形过程中不同阶段的应变曲线图。其中横坐标代表取样点位置,纵坐标代表应变变量。图中四条曲线分别显示了波纹件在 0、15、35、47 步时的等效应变变量。



a) 增量步为15 b) 增量步为35 c) 增量步为47

图3-6 两种视角不同增量步时的壁厚分布图

Fig. 3-6 Thickness distribution at different steps of two views

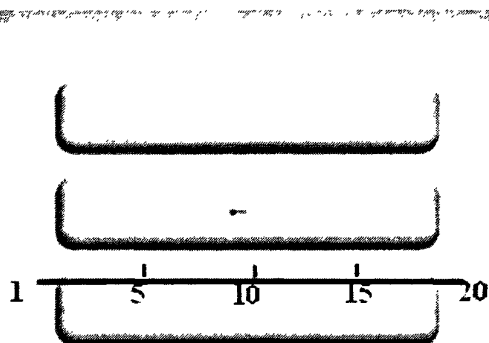


图3-7 波纹件纵截面示意图

Fig. 3-7 Vertical section of corrugated part

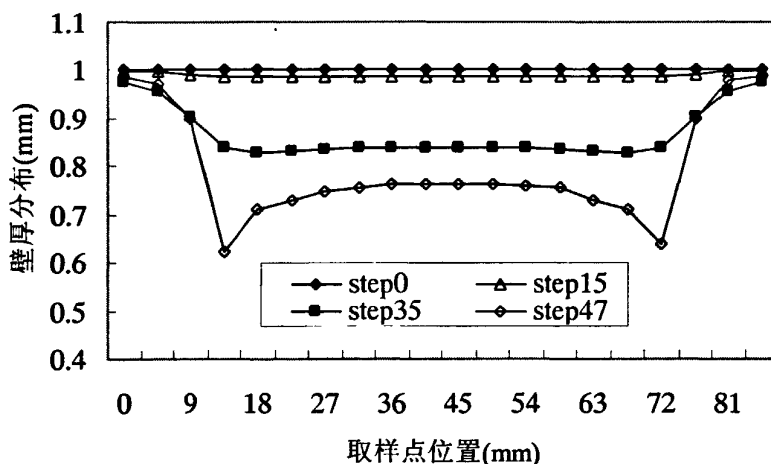


图 3-8 波纹件不同成形阶段的壁厚分布曲线

Fig. 3-8 Curves of thickness distribution of different steps

从图 3-9 波纹件不同成形阶段的等效应变分布曲线中可以看出：当载荷步为 15 时 ZK60 镁合金板的应变分布较均匀，平均应变为 0.104；当载荷步为 35 时，板材的底部区域和角部区域应变值显著增加，且曲线在侧边区域曲率明显增大，等效应变达到 0.201；而当载荷步进一步增至 47 时，侧壁区域的曲线曲率进一步增大，且在角部区域出现等效应变最大值 0.496。对比图 3-8 可知，壁厚减薄规律与应变变化规律是一致的，即随着应变量的增大，壁厚逐渐减薄，底部区域因受模具表面摩擦力的影响变形不大，而角部区域由于应变较大，壁厚减薄最多，也是容易破裂的危险区域。这说明波纹件成形过程中的填

充阶段是十分重要的，零件外形设计时应尽量避免小尺寸的角部区域。

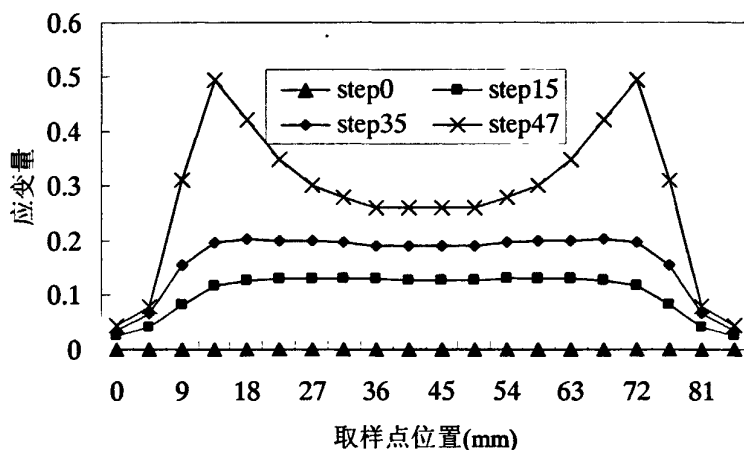


图 3-9 波纹件不同成形阶段的应变量分布曲线

Fig. 3-9 Curves of equivalent strain under different steps of corrugated part

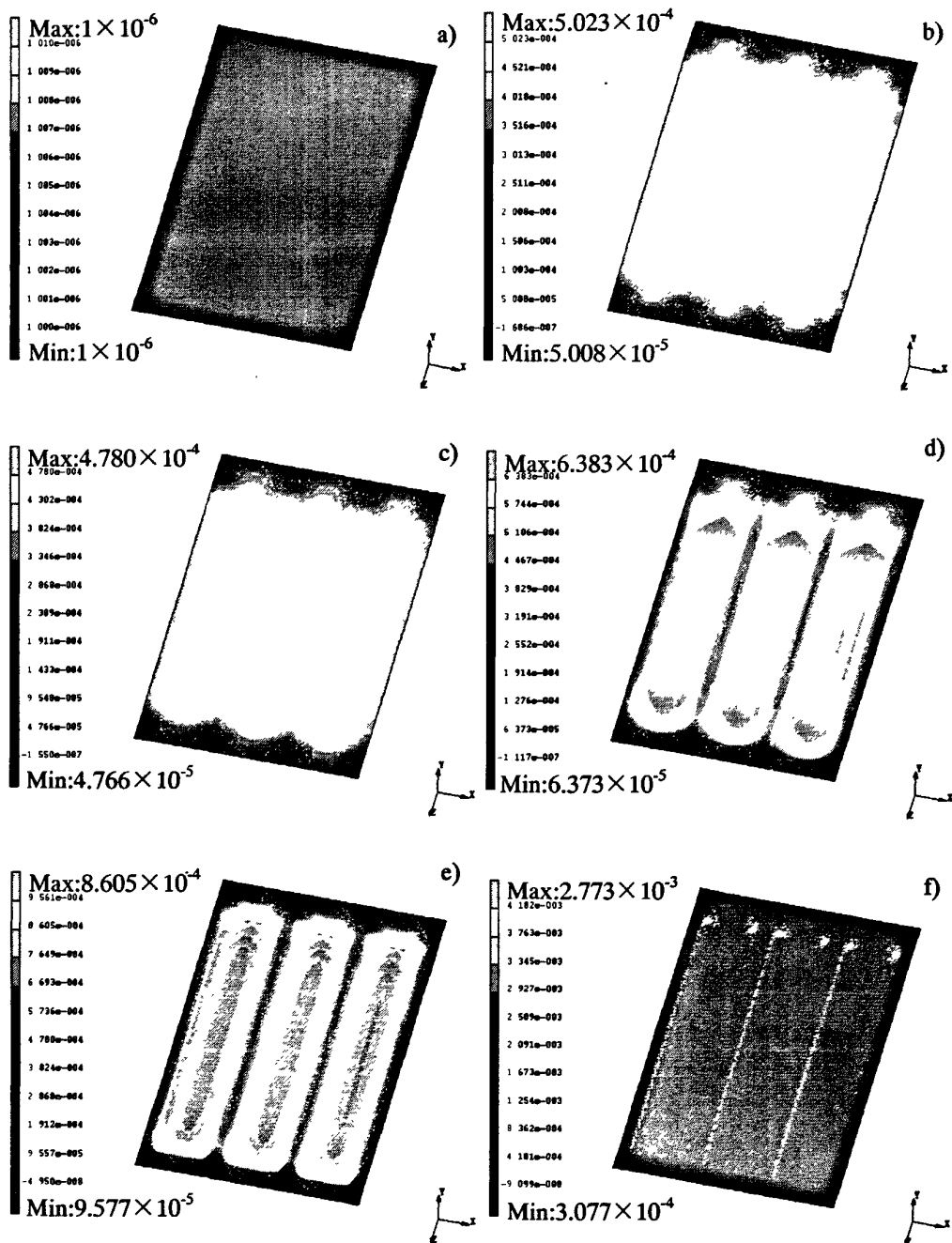
由于应变速率对超塑成形影响较大，只有在合理的应变速率范围内才能使超塑成形顺利进行。因此对各个增量步时波纹件不同区域平均应变速率进行了统计见表 3-1。

表 3-1 波纹件不同增量步时平均应变速率

Table 3-1 Average strain rate of different steps for corrugated part

项目 \ 增量	Step0	Step10	Step20	Step31	Step40	Step47
平均应变速率 mm/s ⁻¹	1 × 10 ⁻⁶	2.755 × 10 ⁻⁵	2.622 × 10 ⁻⁵	3.505 × 10 ⁻⁵	5.218 × 10 ⁻⁵	0.168 × 10 ⁻⁶

图 3-10 是波纹件成形过程中的应变速率分布图。图中颜色的深浅来表示应变速率的大小，颜色深表明应变速率较小，颜色浅表明应变速率较大。从图中可以看出板材在压力作用下，应变速率不同。开始成形时见图 3-10 b)，侧壁应变速率较大，随着侧壁区域的贴模，由于摩擦作用应变速率变小。底部区域成为应变速率最大的区域，随着时间的进行底部区域在贴模后不在变形，应变速率逐渐降低见图 3-10 c)、d)。这时板材底部圆角区域由于未贴模而继续发生变形，所以应变速率继续增大见图 3-10 e)，完全贴模后板材应变速率分布云图如图 3-10 f)所示，从图中可以看出应变速率最大的区域是波纹件底部的角部区域。从统计表中可以总结出，波纹件成形过程中应变速率整体分布均匀，维持在目标应变速率左右。



a) 增量步为0 b) 增量步为10 c) 增量步为20 d) 增量步为31 e) 增量步为40 f) 增量步为47

图 3-10 波纹件成形过程中不同增量步时应变速率分布图

Fig. 3-10 Strain rate distribution under different step of corrugated part

3.5 ZK60 镁合金波纹件 SPF/DB 工艺参数优化

3.5.1 模拟正交表的建立

镁为密排六方晶格，室温变形时只有单一的滑移系，因此镁的塑性比较低，通过升温使镁的其他滑移系开动提高镁的塑性，使其获得一定的超塑性，从而成形较复杂形状的镁合金零件，对扩大其实际应用范围，将有较大的经济意义。通常影响超塑胀形零件壁厚分布的主要工艺参数有：温度(T)、应变速率($\dot{\epsilon}$)和摩擦力(F)。本文通过正交试验来确定波纹件超塑成形过程中的合理的工艺参数。

正交试验法是解决处理多因素实验的最科学最有效的方法。在实际生产和科学研究中，出于新产品开发需要或是为了确定最好的生产工艺需要进行工艺优化时，往往要做很多实验^[44]。当实际需要考虑的因素较多时，要顾及全面实验往往会出现实验次数太多的问题，虽然从理论上讲可以用全面试验来确定。但是全面试验的设计非常耗时、要花费很多人力物力，在实际执行时有一定困难。正交试验可以通过有限的试验次数而覆盖全面试验的结果，是解决这种问题的合理方法。通过正交试验选择相应的因素、水平，建立正交表，通过目标函数选出对结果影响较大的因素和水平，就可以确定相应的参数。正交试验法在全世界都得到了广泛的应用，对经济发展起了很好的促进作用，是经济发展的很好的服务工具。

正交试验设计一般需要以下几个步骤：

1. 分析问题，确定实验目的。利用正交实验确定 ZK60 镁合金超塑成形时优化工艺参数，设定超塑成形后波纹件的壁厚分布方差为其考察指标。

2. 确定因素，选择水平，制定因素水平表。通过实际经验确定影响目标函数的因素、从因素的变化范围里选择因素的水平，制定出相应的因素水平表。本次试验因素为影响超塑成形零件的温度，应变速率，摩擦力。

镁合金超塑成形过程中，温度的升高促进了晶界滑移和晶界扩散的能力，提高了原子的自由能，使软化机制得到了增强，温度的升高还增加了原子晶界的活跃性，增强了原子的扩散性，提高了镁合金超塑变形的协调性，从而增加了材料的超塑性。许多材料的超塑性都在一定的温度范围内出现，当温度高于某一个临界值的时候，晶粒发生严重长大，降低了晶界的滑移和协调性。图 3-11 为 ZK60 镁合金单向拉伸实验得到的温度与 m 的关系曲线图，从图中可以

看出 ZK60 镁合金的最佳超塑温度范围为 300~400℃。

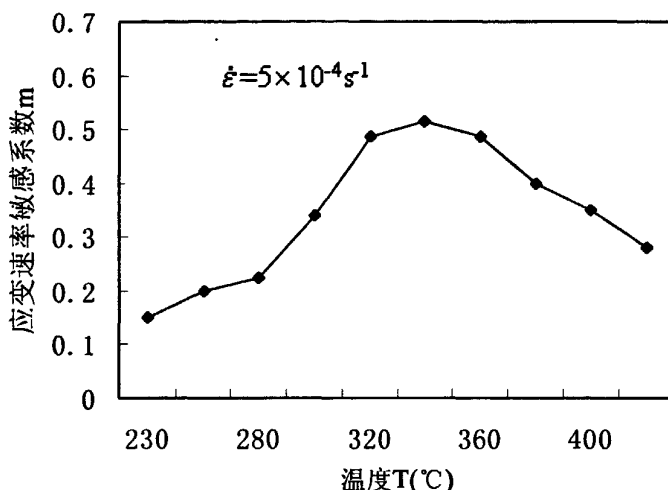


图3-11 应变速率敏感系数与温度关系曲线

Fig. 3-11 Curve of strain rate sensitivity index and temperature

超塑性变形的应变速率通常较低，从图 1-1 a)图可以看出，在过高或过低的应变速率下，材料都不会具有超塑性。当应变速率较低时，占主导作用的是扩散蠕变机制，由应力状态决定的空位势能高低分布不均，导致晶粒发生定向长大，并且应变速率较低使晶界滑移难以发挥作用，致使材料的塑性较差。当应变速率较大时，由于成形过程时间较短，位错运动和晶界原子扩散不能够及时释放晶界处的应力集中，因此在高应变速率超塑变形过程中，位错运动和晶界扩散等协调机制对晶界滑移的贡献很小，导致晶粒的变形协调性较差，使得材料的塑性下降。本文取为 $5 \times 10^{-2} \text{s}^{-1} \sim 5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 。

在镁合金的超塑成形中，板材和模具接触表面之间存在着摩擦，这是影响超塑成形过程的关键因素之一。在高温塑性变形过程中，摩擦的影响变得更加突出和明显。在超塑成形过程中，摩擦能够改变变形体的应力状态，增加变形抗力，同时还会引起不均匀变形。当零件板材和模具的结构(形状)一定时，影响成形件壁厚分布的主要因素包括：(1)零件和模具间的摩擦系数。(2)零件的加载方式。在实际实验和数值模拟中，可以通过适当的加载方式来进行超塑成形。当加载方式一定时，摩擦系数就成为影响零件厚度分布的唯一因素^[45]。本文中选定摩擦系数范围为 0.1~0.5。

根据上述原则将胀形温度，应变速率，摩擦系数 3 个主要因素分别划分了如表 3-2 所示的 3 个水平。

表3-2 影响波纹件组织因素的水平表

Table 3-2 Factors level table of impacting corrugated part microstructure

水 平	因 素		
	成形温度/°C	应变速率	摩擦系数
1	300	$5 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$	0.1
2	350	$5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$	0.3
3	380	$5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$	0.5

3. 选正交表，进行表头设计。根据上一步制定出的因素水平表选用如表 3-3 所示的 L9(3³)正交表。

表 3-3 模拟方案选定的正交表

Table 3-3 Orthogonal table of simulation scheme

试验编号	因素 A	因素 B	因素 C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

4. 确定试验方案，做实验。根据选用的正交表、因素及水平确定的模拟试验方案如表 3-4 所示，共进行 9 次模拟。

表 3-4 超塑成形模拟设计表

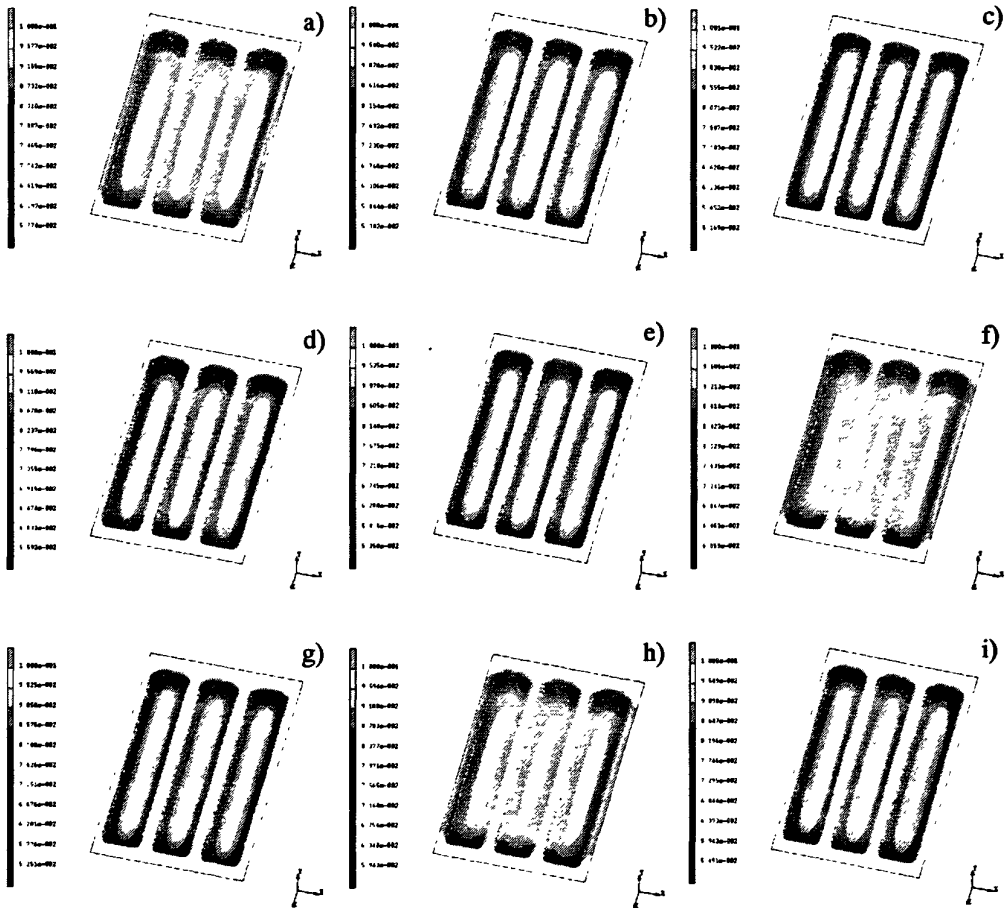
Table 3-4 Design table of superplastic forming simulation

模拟编号	成形温度/°C	应变速率	摩擦系数
SPF -1	300	$5 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$	0.1
SPF -2	300	$5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$	0.3
SPF -3	300	$5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$	0.5
SPF -4	350	$5 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$	0.3
SPF -5	350	$5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$	0.5
SPF -6	350	$5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$	0.1
SPF -7	380	$5 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$	0.5
SPF -8	380	$5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$	0.1
SPF -9	380	$5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$	0.3

正交表建立好后，按相应参数进行数值模拟设置完成模拟计算。

3.5.2 模拟结果与分析

图 3-12 为表 3-3 设计的 9 次模拟试验波纹件壁厚分布图。从图中可以看出模拟参数不同时，波纹件成形后不同区域壁厚分布不同，但整体趋势相同即：波纹件的压边区域在模具压力作用下，最先贴模，壁厚减薄很小，侧壁和底部区域在压力作用下，继续贴模，成形后壁厚减薄较多，而角部区域由于最后贴模持续变形壁厚减薄最多(图中蓝色区域)。



a) SPF-1 b) SPF-2 c) SPF-3 d) SPF-4 e) SPF-5 f) SPF-6 g) SPF-7 h) SPF-8 i) SPF-9

图3-12 波纹件不同成形条件下壁厚分布图

Fig. 3-12 Thickness distribution under different forming condition of corrugated part

图3-13为波纹件9组模拟实验中最小壁厚分布柱状图。从图中可以看出 SPF-6最小壁厚为0.6059mm，是所有组合中最小壁厚最大的一组。超塑成形过

程中温度升高流动应力 s 大大下降， d 值大大提高，同时应变速率较低使得晶界滑移和扩散蠕变能够充分进行，增大了材料的塑性。

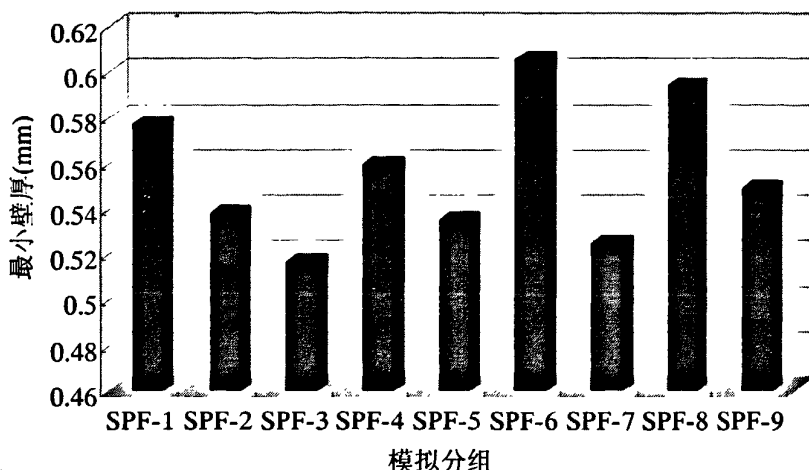


图3-13 波纹件不同成形条件下最小壁厚柱状图

Fig. 3-13 Thinnest thickness histogram under different forming conditions of corrugated part

此外，大量实验数据表明，利用均匀厚度的超塑性板材进行成得到的胀形件厚度分布不均匀，其不均匀程度与零件的变形量和零件的形状复杂程度成正比。因此为了提高超塑性镁合金的应用范围，研究提高超塑性板材的厚度分布均匀性很重要。因此我们在此处定义评价函数为胀形件的壁厚均方差 S 。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{T}_i - \bar{T}_{av})^2}{N}} \quad (3-49)$$

式中： N 为不同壁厚值个数； \bar{T}_i 为不同的壁厚值； \bar{T}_{av} 代表壁厚的平均值。则 S 代表了壁厚分布的不均匀程度， S 越小表明波纹件壁厚分布越均匀。

图 3-14 为波纹件壁厚分布标准差柱状图。当应变速率较低时，晶界处的应力集中可以通过位错运动和晶界的原子扩散来缓解，位错运动和晶界扩散机制对晶界滑移起的协调性较好，提高了晶粒的变形协调性，温度的升高，使原子的自由能升高，原子处于活跃状态，晶界滑移和晶界扩散发挥较充分，导致变形时流动应力下降，使得材料塑性增加。摩擦系数小使得板材贴模后继续变形阻力小，零件壁厚分布更均匀。从图中可以看出模拟编号 SPF-6 的 S 值最小，并且最小壁厚最大，说明这组模拟得到的波纹件的壁厚分布最均匀且壁厚减薄率最小，因此最佳工艺参数为 SPF-6 方案：温度为 350°C ，应变速率为 $5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ，摩擦系数为 0.1。

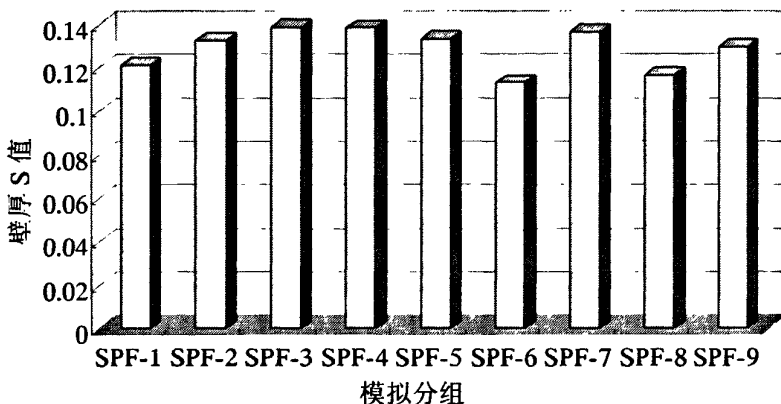


图3-14 波纹件不同成形条件下壁厚分布标准差柱状图

Fig. 3-14 Standard deviation histogram under different forming conditions of corrugated part

图3-15为SPF-6方案下得到的波纹件的壁厚分布曲线。图中横坐标为波纹件取样点位置，纵坐标为相应的壁厚值。从图中可以看出，波纹件最大壁厚值在1mm左右，最小壁厚在0.6mm左右，整体壁厚分布较均匀，尺寸及性能都能够达到波纹件的使用要求。

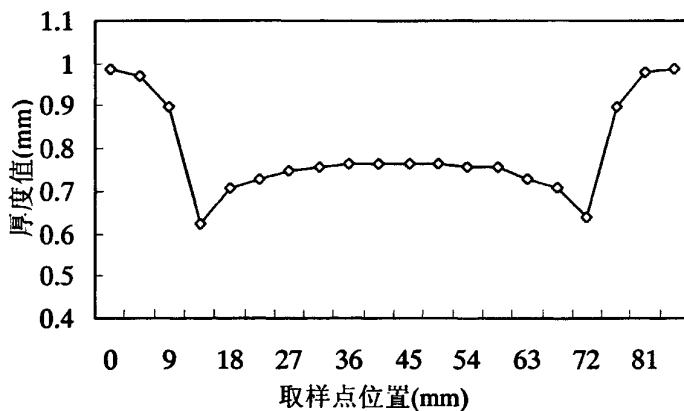


图3-15 SPF-6组合波纹件壁厚分布曲线

Fig. 3-15 Thickness distribution curve of model SPF-6

图3-16为SPF-6方案下得到的优化的时间/压力曲线。图中横坐标为胀形时间，纵坐标为相应的压力值。由于模拟实验中此方案的模拟结果最好即：模拟得到的波纹件具有最小厚度减薄率，且壁厚分布最均匀。因此可以将其用来指导超塑胀形实验，以获得性能良好的波纹件。

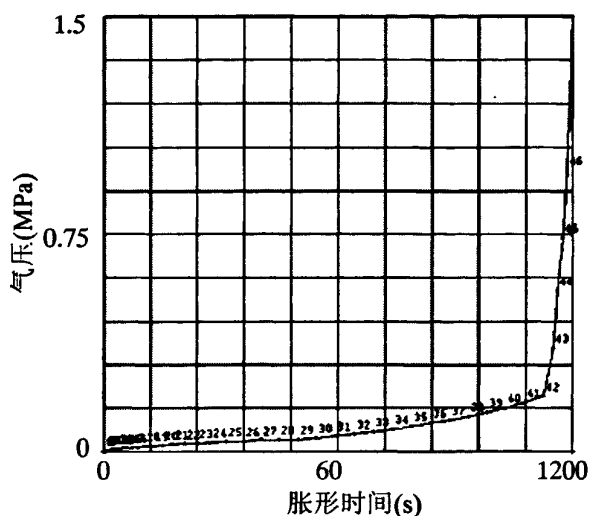


图3-16 SPF-6组合的时间/压力曲线

Fig. 3-16 Time/pressure curve of model SPF-6

3.6 本章小结

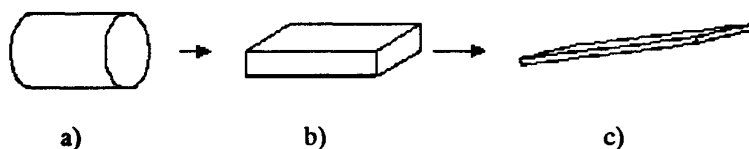
1. 分析了超塑成形的有限元法基本方程，给出了有限元求解的基本步骤。
2. 在粘塑性有限元法的基础上采用罚函数方法对波纹件成形过程进行了数值模拟，得到了波纹件的成形规律即：波纹件的成形过程可以分为自由胀形，贴模胀形和角部填充三个阶段。按压边、侧壁、底部、角部区域的顺序依次贴模，相应的应变变量依次增大，壁厚减薄依次增多，平均最小壁厚依次为0.961mm、0.823mm、0.744mm、0.626mm。波纹件角部区域由于最后贴模，持续变形壁厚减薄量最大，是成形过程中的危险区域。
3. 分析了波纹件不同成形阶段应变速率变化情况。结果表明波纹件成形过程中各区域成形时应变速率较大，贴模后在摩擦力的作用下减小，变速率整体应变速率分布情况良好，在所要求的应变速率范围之内。
4. 对波纹件成形工艺参数中的温度，应变速率、摩擦力进行了优化。利用正交实验方法制定了模拟方案，选择最小壁厚及壁厚分布均匀情况为评价函数。结果表明方案 SPF-6 最小壁厚最大且壁厚分布最均匀，为最佳成形方案，具体工艺参数为：温度为 350℃，应变速率为 $5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1} \text{mm/s}^{-1}$ ，摩擦系数为 0.1。得到了优化的时间压力曲线，用来指导波纹件的成形实验。

第4章 气化剂作为加压介质的 ZK60 镁合金波纹件 SPF/DB 实验

4.1 气化剂作为加压介质的 ZK60 波纹件 SPF/DB 成形实验

4.1.1 ZK60 镁合金实验板材

本实验选用 ZK60 镁合金板材。其加工过程为：由直径为 60mm 的 ZK60 棒材经过挤压预成形为板厚为 15mm 的板坯，通过轧制获得最终实验板材，其厚度为 1mm。其具体加工流程如图 4-1 所示。



a)

b)

c)

a) 棒材 b) 板坯 c) 板材

图 4-1 实验板材加工图

Fig. 4-1 Processing schematic of experiment sheet

利用光学显微镜观察了轧制后的板材的显微组织如图 4-2 所示，从图中可以看出，晶粒呈等轴状态，平均晶粒尺寸为 $7.9\mu\text{m}$ ，大小均匀具备超塑成形性能，其力学性能见表 4-1。

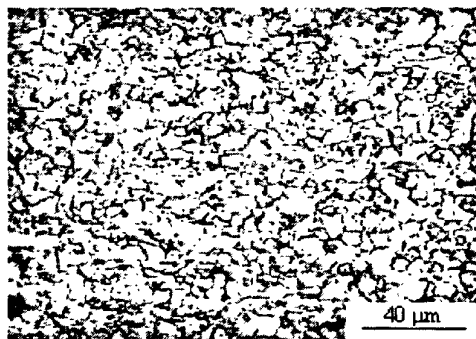


图 4-2 ZK60 镁合金板材金相图

Fig. 4-2 Metallograph of ZK60 magnesium alloy sheet

表 4-1 ZK60 镁合金室温机械性能

Table 4-1 Mechanical property of ZK60 magnesium alloy at room temperature

加工状态	板材厚度	力学性能		
		σ_b /MPa	τ /MPa	δ /%
轧制	1.0	270	90	8

4.1.2 实验模具及设备

成形波纹件是工艺应用的典型例子。它的传统连接方法是铆接和胶接。本课题采用双层板实验，用气化剂作为加压介质，使成形过程在扩散连接中完成超塑胀形。

4.1.2.1. 模具设计 图 4-3 为波纹件的模具爆炸图。其设计要点如下：

1. 由于模具在高温条件下工作，其条件非常恶劣，因此要求材料具有良好的耐热性及抗疲劳性，以保证模具在冷热交替的条件下工作时具有较长的寿命。同时，材料应有较好的耐回火性能，使得模具在工作时不因受热而导致硬度降低；结合以上考虑，模具材料选用 4Cr5MoSiV1^[46]。

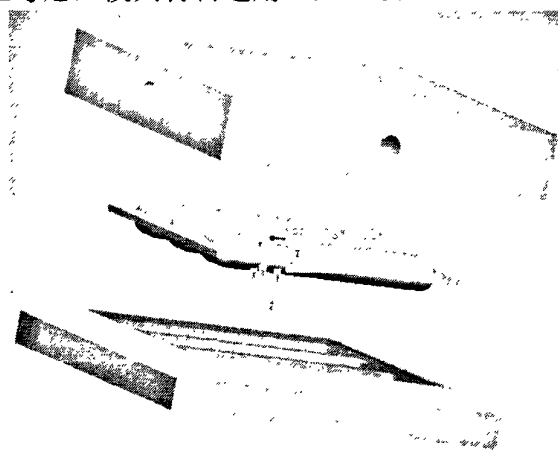


图 4-3 波纹件 SPF/DB 成形模具爆炸图

Fig. 4-3 Exploded figure of corrugated part die

2. 对模具的定位装置设计尤为重要，它设计的正确与否直接关系到零件成形精度，利用上下模的凸台和凹槽进行定位，将凹槽的部分作为上模，这样可以防止在下压过程中，金属碎削掉入模具当中，可以对模具起到保护作用。

3. 温度对镁合金超塑成形至关重要，因此在该模具中设计一对成 90°的直径为 8mm，深为 12mm 的圆孔热用来放置电偶来测量坯料的温度，这样我们

可以很快掌握模具横向及纵向的温度，很好的控制成形过程的温度。

4. 波纹件成形前模具内部的空气通过模具上的排气孔排出，由于波纹件角部区域的空气最后被排出，为了保证空气排净；在上下模角部区域设计 12 个对称的排气孔。

4.1.2.2. 成形设备 本次波纹件超塑成形实验是在哈尔滨工业大学完成的。图 4-4 为实验中的超塑成形机，其最大压力为 5MN，机身配有 18KW 加热系统。模具和超塑成形机之间具有隔热系统和冷却系统，在工作时能保持模具温度，工作后具有冷却功能。

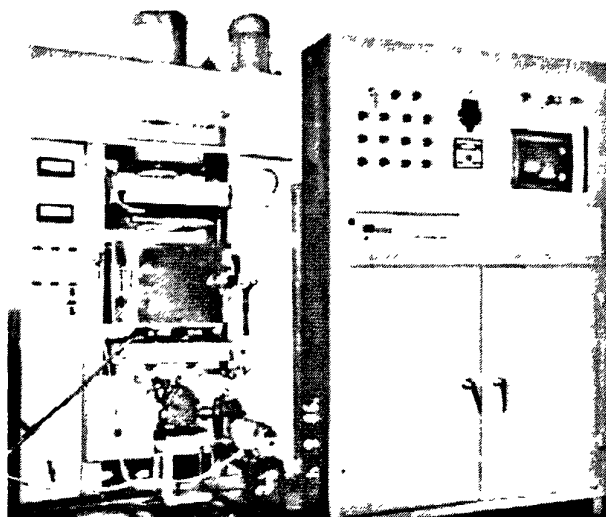


图4-4 超塑成形机

Fig. 4-4 Superplastic forming machine

1. 加热装置 温度对板材的超塑性影响较大，高温会使板材晶粒长大严重，晶界的协调性变差，低温会使板材的变形抗力较大，都会使零件在完全贴膜前破裂。因此，超塑成形过程中，模具和板材的温度都应控制在一定的超塑范围之内。可以通过热电偶来观测模具温度，利用控制系统进行温度调节。成形后利用水冷对模具降温。

2. 加压系统 气体的压力决定了零件的成形速度。本次实验是在扩散连接过程中完成镁合金波纹件的超塑胀形，在一次热循环中完成两道工序，因此需要一个较大的预压力，使扩散连接区域形成一个封闭的空间，防止材料在连接过程中被氧化。关且要连续加压，尤其在气体发生剂发生反应的温度区间，保证不漏气。早期预压力可以保证板材及时紧密接触，氧化膜破裂，封闭空穴形成，使新界面贴和，确保界面之间的相互扩散。

4.1.3 波纹件 SPF/DB 实验过程

N11 气化剂在 400℃时完全分解，1mol 气化剂能产生 10mol 气体。由理想气体状态方程可以得出：

$$n = \frac{PV}{RT} \quad (4-1)$$

式中： P 是气体压力； V 是气体体积； n 是摩尔数； T 是绝对温度； R 是通用气体常数 8.314J/mol·K。

由于气化剂在密闭的小空间内受热分解，随着分解反应的进行，压力逐渐增大，导致分解反应越来越困难。所以，在实验基础上，对计算结果进行加权，对气体发生剂的实际填充量进行修正，即：

$$N = C \cdot N_0 \quad (4-2)$$

$$N_0 = n \cdot m \quad (4-3)$$

式中： N 是气化剂实际填充量； N_0 是气化剂计算填充量； C 是考虑实际形状的参数 $C=1-2$ ，形状复杂时取较大值； m 是气化剂的分子量。考虑镁合金波纹件的型腔体积、超塑成形压力和成形零件形状等因素，本次实验研究中 C 取 1.4。

对模型 SPF-6 得到的优化的压力/时间曲线进行分段处理，利用范特霍夫等温方程和平衡常数之间的关系进行换算得到相应的升温曲线，如图 4-5 所示。

具体实验步骤如下：

1. 去除连接表面的氧化膜。采用清水，砂纸，铬酐溶液对板材表面进行反复清洗，打磨，保证板材表面的氧化膜全部清除。

2. 将清洗完的板材吹干，把气化剂按胀形位置放置在两板中间，移入成形模具中。模具装配好后放置 Ni-Cr、Ni-Al 热电偶，然后装模具放入超塑成形机中。

3. 对模具进行加热，加压使模具与板材紧密接触。当温度达到 473K 时，按得到的升温曲线进行加压，ZK60 镁合金板材开始胀形，未放置气化剂部份开始扩散连接。

4. 随着温度的升高，气体逐渐增多，板材在气体压力作用下逐渐贴模，继续升温至 623K，保温 30min，此时成形压力最终完成波纹件的成形过程，扩散连接也进行得比较充分。

5. 最后利用循环水将模具冷却至室温，开模取出成品。

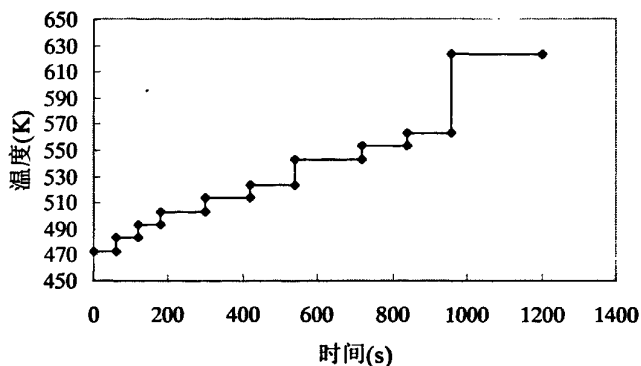


图 4-5 胀形实验升温曲线图

Fig. 4-5 Heating up curve of air-bulging experiment

4.1.4 实验结果及分析

图 4-6 为 ZK60 波纹件 SPF/DB 图片。从图中可以看出，波纹件的表面质量良好，连接层边界各处质量基本均匀一致。

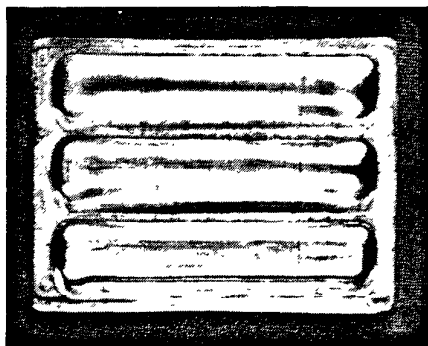


图 4-6 ZK60 镁合金波纹件 SPF/DB 零件

Fig. 4-6 SPF/DB corrugated part of ZK60 magnesium alloy

用壁厚测量仪测量波纹件上各取样点厚度，取样位置示意图如图 3-7 所示。利用取样点壁厚数据绘制出波纹件壁厚分布曲线，并与模拟结果进行对比，如图 4-7 所示。结果表明：实验结果与模拟结果吻合良好，证明了模拟的正确性，对实际工艺具有指导作用，但也存在一定偏差，尤其是板材的压边区域和角部区域偏差较大，最大偏差值约为 0.1mm，角部区域最小壁厚达到 0.5259mm。

由于板材在数值模拟中并未考虑到板材间的原子扩散以及此扩散连接对板

材厚度的影响，所以波纹件压边区域壁厚比数值模拟偏低。这一方面由于原子扩散增加了板材在成形过程中的塑性流动，另一方面由于对气压载荷的近似处理，使得板材在成形过程中的应变速率具有一定误差。此外由于板材与模具间摩擦力偏差的存在，波纹件在底部区域和压边圆角区域由于摩擦力减缓了板材的流动趋势，使板厚有所偏高。而对于角部区域则正好相反，由于摩擦力阻碍了板材的塑性流动，使角部区域板材的局部变形增大，壁厚相应减薄。同时，变形量最大的角部区域也是空洞尺寸和体积分数最大的区域，这影响了波纹件在高温成形过程中的力学性能。

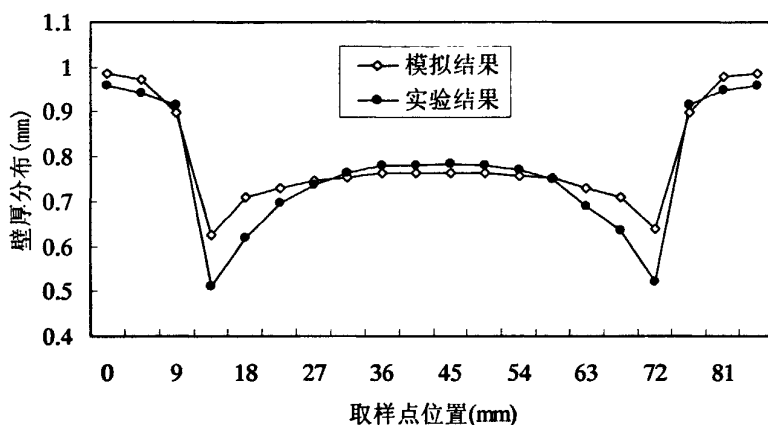


图 4-7 实验与模拟厚度分布曲线

Fig. 4-7 Thickness distribution curves of experiment and simulation

图 4-8 是从波纹件扩散连接处取样，利用扫描电镜进行观察，结果表明连接处的组织很均匀，不存在空隙及氧化物。



图 4-8 波纹件连接处断面形貌

Fig. 4-8 Section pattern at bonding of wave component

板材的扩散连接一般要经历三个阶段：板材接触-界面扩散-界面消失。板材开始接触时，在压力作用下，两块板材开始变形，导致各种组织缺陷堆积，界面的能量较大，温度较高使原子处于活跃状态，能量较高。随着时间的进行，变形增大，原子发生迁移界面开始扩散进入第二个阶段，由于前期储存的能量较多，原子扩散较快，形成了金属键，但此时两界面并没有完全消失。随着保温的进行，组织继续扩散，大量缺陷得到消除，两界面均匀化，最终界面消失，组织呈均匀状态。

4.2 ZK60 镁合金波纹件微观组织实验

4.2.1 ZK60 波纹件金相实验

利用金相实验来检测金属材料内部的微观组织是进行金属材料研究的常用方法之一。其原理是通过定量金相学理论，通过计算二维金相试样的组织成份来确定三维的立体形貌，进而确定金属的成分和各自含量以及力学性能。

利用计算机进行信息的处理，统计，可以提高工作效率。计算机在进行金相分析时可以方便的计算出试样中目标组织的含量，百分比及平均尺寸，同时还可以分析出它们的分布状态及变化趋势，最终通过图像和曲线的形式呈现出来。利用计算机得到的数据真实可靠，效率高，为人们进行材料测试和评价提供了有力的帮助。

本实验金相样品的制备包括取样-磨光-抛光-腐蚀等几个步骤。

1. 取样 由于波纹件具有对称结构，因此取中间结构作为取样位置如图 4-9 所示。具体取样点位置由图 3-3 可知分别为压边区 A、侧壁区域 B、底部区域 C、角部区域 D。

2. 磨光 本实验磨光时采用的金相砂纸依次为 400、600、800、1200 号(注意：磨试样时要经常敲打掉砂纸上的砂粒，减少磨光时试样表面产生的划痕，防止砂粒划伤试样)。

3. 抛光 利用柔性抛光工具和磨料颗粒将试样表面细小的磨痕除掉，获得光滑的表面用来进行显微组织观察。抛光时利用高速旋转的抛光轮(圆周速度在 20m/s 以上)压向工件，使磨料对工件表面产生滚压和微量切削，从而获得光亮的加工表面，表面粗糙度一般可达 $Ra0.63\sim 0.01$ 微米。抛光还可以提高工件的尺寸精度。

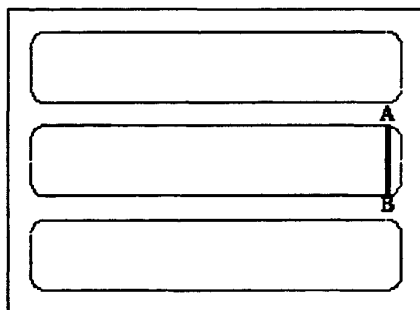


图 4-9 波纹件金相观察取样示意图

Fig. 4-9 Metallography sampling schematic plan of corrugated part

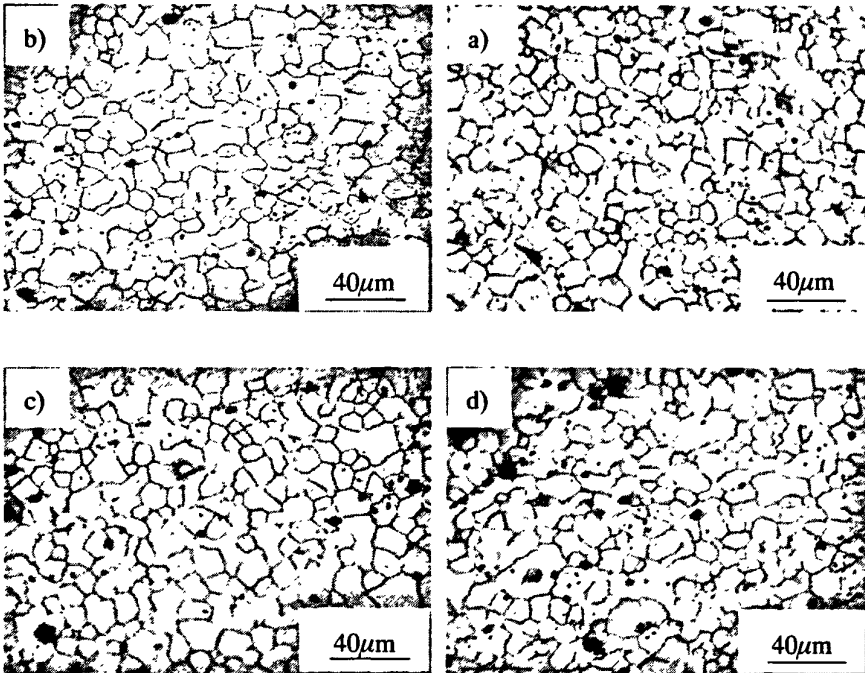
4. 腐蚀 腐蚀是利用化学试剂将制备好的试样进行一定程度的腐蚀以获得试样内部金相组织。通常有化学腐蚀和电腐蚀两种方法。将试样用清水冲净，利用棉球沾取配制好的腐蚀剂擦拭试样表面，腐蚀好后用清水洗净吹干。波纹件金相样品制作完成后，采用数码金相显微镜对其进行观察。

4.2.2 ZK60 镁合金波纹件金相组织分析

4.2.2.1 波纹件晶粒尺寸分析 图 4-10 为波纹件不同区域的金相组织。从图中可以看出，在经历了较大的塑性变形后各区域晶粒均为等轴晶，这是由于在较低的应变速率下成形使得晶界扩散充分，动态再结晶程度较高，增加了材料的变形协调能力。获得的等轴晶可以降低材料在变形过程中的剪应力，提高板材的超塑性能，同时说明 ZK60 镁合金具有良好的超塑变形能力，并且镁合金超塑性变形机理主要为晶界滑移。波纹件在高温下成形，板材受到双向拉伸的平面应力导致晶粒尺寸在一定程度上有所长大，且晶粒的长大开始于超塑变形的中间阶段。

采用直线截距的方法测定了各取样点的平均晶粒尺寸。得到晶粒尺寸与变形区域的关系，如图 4-11 所示。从图中可以看出，由于变形时间长，变形温度高给晶粒长大提供了更多的能量，导致波纹件角部区域平均晶粒尺寸最大达到 $13.8\mu\text{m}$ ，底部区域次之为 $11\mu\text{m}$ ，接着是侧壁区域平均晶粒尺寸为 $9.6\mu\text{m}$ ，晶粒相对最小的是压边区域为 $8.2\mu\text{m}$ 。镁合金的变形过程是晶粒长大和细化彼此竞争的过程，其与变形量、变形温度和变形速率等条件密切相关。通常认为超塑性变形中的这种组织粗化是一种有害的现象，因晶粒尺寸的增大势必使超塑性流变应力增大，即硬化趋势的增强。然而，晶粒尺寸的增大同时也能抑制

孔洞、微裂纹等的扩展，提高材料的抗颈缩能力。可见，晶粒长大对超塑性变形有着双重的影响^[47]。



a) 压边区域 b) 侧壁区域 c) 底部区域 d) 角部区域

图 4-10 波纹件不同区域金相图

Fig. 4-10 Metallography diagrams of different areas of corrugated part

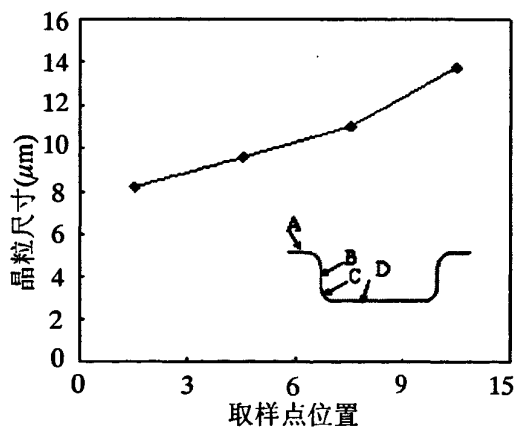
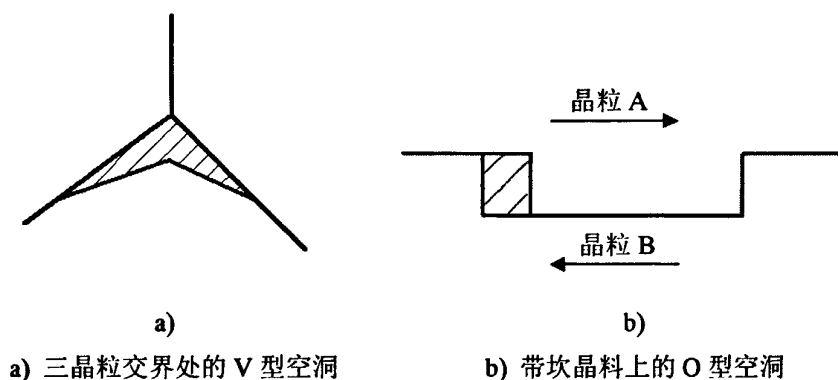


图 4-11 波纹件不同区域平均晶粒尺寸

Fig. 4-11 Curve of average cavity size of different areas for corrugated part

4.2.2.2 空洞观察与分析 材料在超塑成形过程中会出现空洞现象。空洞对于超

塑成形具有两方面的影响。在超塑变形前期，空洞的存在可以协调晶界滑移，保证成形的连续性。随着成形的进行，空洞会发生连接聚集长大现象，当成形零件中空洞的尺寸和百分比达到一定比例后，会影响零件的力学性能，造成损失。空洞按形状可以分为 V 形空洞图 4-12 a) 和 O 形空洞图 4-12 b) 两类。V 形空洞多在三个晶粒晶界的交汇处产生，是应力集中的产物，O 形空洞则多在晶界处发现形状接近圆形，是由于空洞过饱和而流向晶界处汇集形成的。V 形空洞常出现在高应力状态下，O 形空洞常出现在低应力状态下^[48]。



a) 三晶粒交界处的 V 型空洞 b) 带坎晶料上的 O 型空洞

图 4-12 超塑成形中的空洞分类

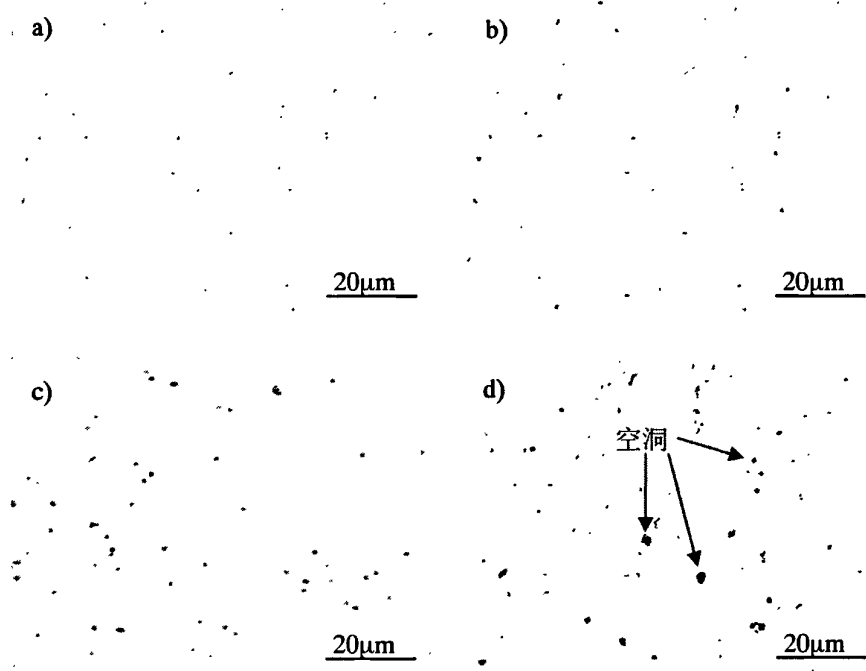
Fig. 4-12 Cavity categories in the superplastic forming

空洞对超塑变形的影响有两方面，一方面如果材料内部空洞较多，尺寸较大，就会存在较多或较强的应力集中区。这些应力集中在得不到及时的松弛情况下，就会降低表征应力松弛能力的 m 值，从而大大限制了材料的变形能力。另一方面，成形后如果材料内部存在大量空洞，特别是较大的 V 形空洞时，会严重地削弱材料的强度性能，尤其是材料的断裂性能，因此会给成形零件的使用可靠性带来巨大的威胁^[49]。

图 4-13 是波纹件不同区域的空洞图。波纹件超塑成形过程中，壁厚减薄最大的部位，也是易于空洞聚集和长大的部位，由于四个区域的应力状态和应变量的不同，空洞的数量和尺寸存在较大的差异。

从图中可以发现，压边区域 A 变形量小，空洞多处于形核阶段，尺寸较小，分布较分散见图 4-13 a)。随着变形量的增加侧壁区域 B 空洞尺寸有所增大见图 4-13 b)，而底部区域 C 由于变形量的进一步增大，空洞进一步长大，部分空洞连接聚集，形成较大空洞见图 4-13 c)。角部区域 D 由于受双向平面拉应力状态，且最后贴模，变形量最大，可以观察到板材中新空洞的不断形核出现，同时已有空洞发生了明显的聚集长大，空洞尺寸显著增加见图 4-13 d)。

空洞形核于晶界处，尤其是三叉交界的位置，这是由于超塑性变形的机制为晶界滑动，形核初期空洞较小，其长大主要是通过扩散长大机制实现。随着变形程度的增加，空洞长大的机制转化为由基体超塑性变形控制的机制。空洞的增大一方面降低了板材的塑性流动性，使板材的变形协调性减弱，另一方面会因板材的局部减薄使得该区域成为潜在危险区域。



a) 压边区域 b) 侧壁区域 c) 底部区域 d) 角部区域

图 4-13 波纹件不同区域的空洞金相图

Fig. 4-13 Cavity metallographs of corrugated part of different areas

对波纹件四个区域的金相图片进行观察和分析，对不同区域的平均空洞尺寸和空洞体积分数进行了计算、统计和分析，表 4-2 为波纹件不同区域空洞尺寸及空洞体积分数统计表。随着应变量的增加，波纹件成形过程中的空洞体积分数和平均空洞尺寸都近乎线性增大，压边区域由于变形量小，空洞尺寸和体积分数都较小，分别为 $0.01\mu\text{m}$ 和 1.4%，侧壁区域空洞尺寸和体积分数有所增大为 $0.038\mu\text{m}$ 和 3.3%，底部区域空洞发生部分连接长大尺寸和体积分数分别为 $0.071\mu\text{m}$ 和 6.2%，角部区域空洞尺寸和体积分数最大，分别为 $0.09\mu\text{m}$ 和 7.7%，是波纹件潜在危险区域。同时将结果以采样点的应变量为函数绘制成曲线如图 4-14 所示。

表 4-2 波纹件不同区域空洞数据统计表

Table 4-2 Cavity statistic table of different areas of corrugated part

项目 \ 名称	压边区域	侧壁区域	底部区域	角部区域
空洞尺寸/ μm	0.01	0.038	0.071	0.09
体积分数/%	1.4	3.3	6.2	7.7

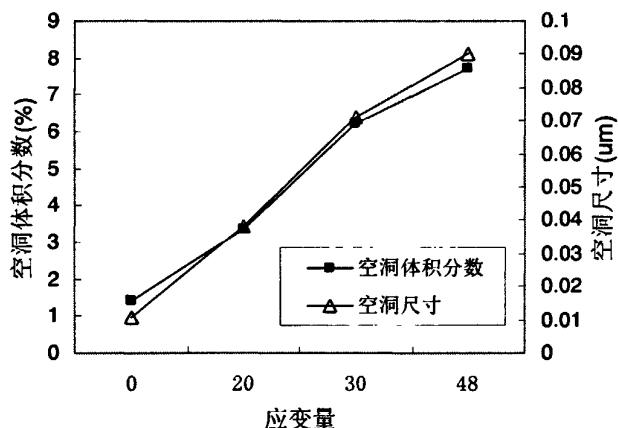


图 4-14 平均空洞尺寸与空洞体积分数随应变变化曲线

Fig. 4-14 Curves of average cavity size and cavity volume fraction under different strain

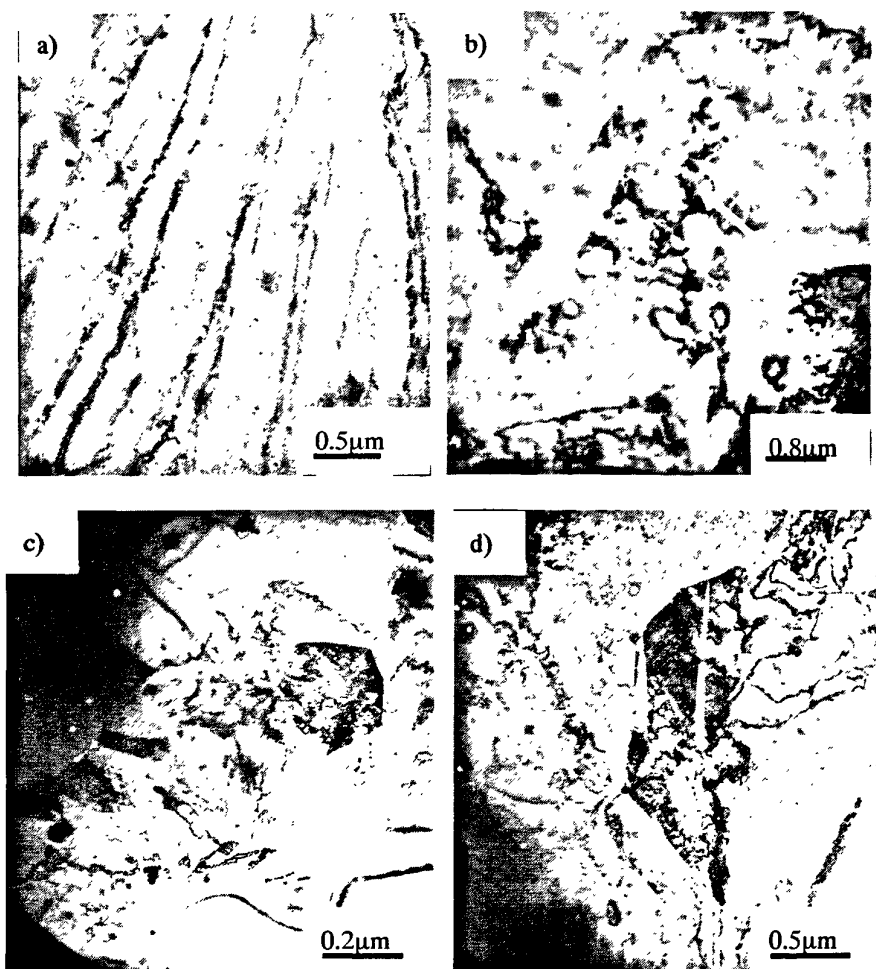
波纹件角部区域由晶界滑移引起的应力集中为空洞形核提供了足够的能量，在较多位置超过形核的临界应力，空洞形核较多，并且部分空洞发生连接长大，导致该区域空洞尺寸和体积分数都较大。由于镁合金的变形对应变速率十分敏感，在相同温度不同应变速率条件下，体积分数随应变速率而变化。因此可以通过提高变形温度和应变速率来抑制空洞的形核与长大，保证材料的成形性能和成形后的使用性能。波纹件的变形过程、壁厚分布以及危险区域位置是一致的，都与板材在 SPF/DB 成形过程中的空洞机制紧密联系。

4.2.3 ZK60 镁合金波纹件透射电镜分析

为了更深入地观察 ZK60 镁合金波纹件的微观组织，分析波纹件超塑成形机理，对波纹件进行了透射电镜分析。图 4-15 为波纹件胀形处的透射电镜形貌。

镁合金变形后晶粒仍保持等轴说明晶界滑移是超塑性的主要变形机理见图 4-15 a)。晶界滑移导致晶界存在一定的空隙，需要扩散蠕变来弥合，当弥合速

度跟不上空隙发展的速度时，就会在晶界处产生空洞。上文中空洞的存在表明镁合金超塑成形中发生了扩散蠕变，它也是镁合金超塑变形中的一种协调机制。



a) 晶界滑移 b) 孪生 c) 位错 d) 动态再结晶

图 4-15 波纹件胀形处 TEM 形貌

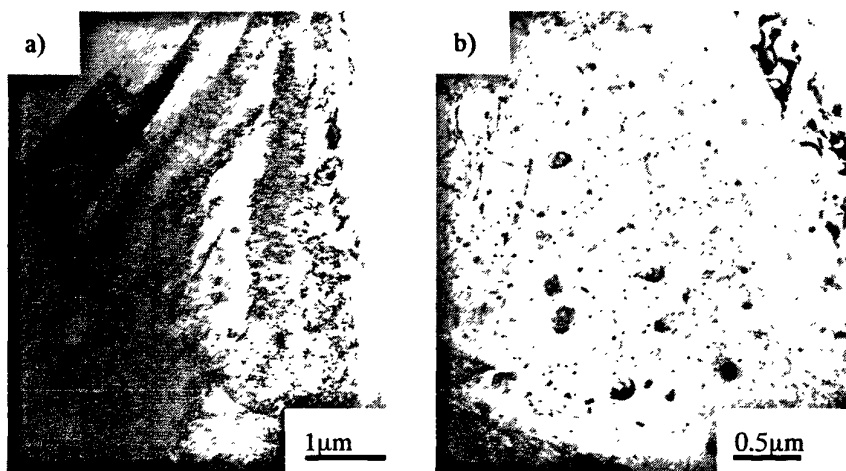
Fig. 4-15 TEM appearance of corrugated part

从图4-15 b)中发现在晶粒内部有少量孪晶现象，再次说明晶界滑移为镁合金超塑变形主要机理。在超塑性变形的初期，在较高的应变速率下，不同的晶粒取向的晶粒导致了孪晶的产生，T1方向和T2方向的孪晶发生交错，表明在ZK60镁合金波纹件变形中的孪生是异向孪晶交错的复合孪生。

观察到晶界处存在大量的位错见图 4-15 c)。位错是镁合金超塑变形中晶界

滑移的协调机制。由于晶粒尺寸小，因此在不大的外应力下，晶内部产生位错源的可能性很小，同时由于晶界存在大大小小的“坎”，在应力集中时同样可以发生位错。在应力作用下，位错在晶界处滑移，当滑移位错遇到阻碍时，互相缠结成为晶胞的壁。这些晶胞壁之后可以“多边形化”形成亚晶界的壁。慢慢积累的位错可以导致亚晶的晶界无序化，最终超越了取向的限制，从低角度晶界转化成高角度晶界，于是形成了新的“晶粒”，并再结晶见图 4-15 d)。整个过程是在变形过程中发生的，因此称之为“动态”，并且由于结果是晶界取向逐步从低到高进行转变，而不是一个新的多边形的晶界，因此称之为“连续”过程。再结晶可使内部有畸变的晶粒变为无畸变的晶粒，从而消除应变硬化。综上所述，ZK60 镁合金波纹件超塑变形的机制是：以晶界滑移为主要变形机制，以晶界扩散蠕变和晶界位错为协调机制的综合变形机制。动态连续再结晶是镁合金获得超塑性的软化机制和晶粒稳定机制。

从波纹件连接处取样，观察了其透射形貌如图 4-16 所示。



a) 位错 b) 位错空洞堆积

图 4-16 波纹件连接处 TEM 形貌

Fig. 4-16 TEM appearance of bonding area of corrugated part

波纹件大的塑性变形增加了基体中位错密度，使原子能量升高，有利于连接的进行见图 4-16 a)。各种组织缺陷(晶格畸变、位错和空洞)在超塑变形过程中大量堆积见图 4-16 b)，增大了界面区域能量，使原子处于高度激活状态，原子在扩散连接的迁移非常迅速，很快形成了以金属键为主要连接形式的接头。同时大的厚向应变破碎了坚韧的氧化膜，使连接处露出新鲜的基体，使连接产生。压力机的压力确保了试样连接过程中不被氧化^[50]。得到的波纹件组织均

匀，不存在空隙及氧化物，说明扩散连接非常充分。

4.3 本章小结

1. 按优化的加压曲线，对 ZK60 镁合金波纹件进行了 SPF/DB 实验。得到的波纹件表面质量良好，连接层边界各处质量基本均匀一致。测量了波纹件的壁厚分布并与模拟得到的结果进行了对比，结果表明两者吻合良好。波纹件最小壁厚为 0.5259mm。分析了模拟和实验产生误差的原因主要为对原子扩散的忽略及对压力曲线的近似处理。

2. 对波纹件的不同区域取样进行了金相组织分析。波纹件成形后晶粒仍保持等轴晶表明超塑成形的主要变形机理为晶界滑移。测定了不同区域的晶粒尺寸。结果表明，变形温度高给晶粒长大提供了更多的能量，随着变形量的增加晶粒尺寸逐渐增大。

3. 利用金相软件测量了波纹件不同区域的空洞尺寸和体积分数。结果表明，随着应变量的增加，波纹件成形过程中的空洞体积分数和平均空洞尺寸都近乎线性增大，角部区域空洞尺寸和体积分数最大，分别为 $0.09\mu\text{m}$ 和 7.7%，是波纹件潜在危险区域，空洞的生产表明镁合金超塑变形中扩散蠕变是一种协调机制。

4. 对波纹件进行了透射电镜分析。结果表明，得到的波纹件组织均匀，不存在空隙及氧化物，说明扩散连接非常充分。ZK60 镁合金波纹件超塑变形的机制是：以晶界滑移为主要变形机制，以晶界扩散蠕变和晶界位错为协调机制的综合变形机制。动态连续再结晶是镁合金获得超塑性的软化机制和晶粒稳定机制。

结论

本文研究了气化剂作为加压介质的超塑成形/扩散连接成形原理。对 ZK60 镁合金波纹件 SPF/DB 成形过程进行了数值模拟。对波纹件成形工艺参数中的温度、应变速率、摩擦系数进行了优化。进行了 ZK60 镁合金波纹件的 SPF/DB 成形实验。对波纹件进行了金相实验，得到了晶粒尺寸与变形量之间的关系。分析了空洞体积分数和尺寸与应变量的关系。通过透射电镜分析了波纹件 SPF/DB 成形机理。研究工作中得到以下结论：

1. 在粘塑性有限元法的基础上采用罚函数方法对波纹件成形过程进行了数值模拟，得到了波纹件的成形规律即：波纹件的成形过程可以分为自由胀形，贴模胀形和角部填充三个阶段。按压边、侧壁、底部、角部区域的顺序依次贴模，相应的应变量依次增大，壁厚减薄依次增多，平均最小壁厚依次为 0.961mm、0.823mm、0.744mm、0.626mm。波纹件角部区域由于最后贴模，持续变形壁厚减薄量最大，是成形过程中的危险区域。波纹件成形过程中整体应变速率分布情况良好，在所要求的应变速率范围之内。

2. 利用正交实验方法对波纹件成形工艺参数中的温度、应变速率、摩擦系数进行了优化，结果表明方案 SPF-6 最小壁厚最大且壁厚分布最均匀，为最佳成形方案，具体工艺参数为：温度为 350℃，应变速率为 $5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ，摩擦系数为 0.1。得到了优化的时间压力曲线，用来指导波纹件的成形实验。

3. 进行了 ZK60 镁合金波纹件 SPF/DB 实验。得到的波纹件表面质量好，连接层边界各处质量基本均匀一致。波纹件模拟壁厚分布和实验壁厚分布吻合良好。波纹件最小壁厚为 0.5259mm。误差的原因主要为对原子扩散的忽略及对压力曲线的近似处理。

4. 通过金相组织分析显示波纹件成形后晶粒仍保持等轴晶表明超塑成形的主要变形机理为晶界滑移。随着变形量的增加晶粒尺寸呈长大趋势。不同区域的空洞尺寸和体积分数随变形量的增加近乎线性增大，角部区域空洞尺寸和体积分数最大，分别为 $0.09 \mu\text{m}$ 和 7.7%，可以通过提高变形温度和应变速率抑制空洞的形核与长大，保证材料的成形性能和成形后的使用性能。

5. 对 ZK60 镁合金波纹件进行了透射电镜分析。结果表明，得到的波纹件组织均匀，不存在空隙及氧化物，说明扩散连接非常充分。ZK60 镁合金波纹件超塑变形的机制是：以晶界滑移为主要变形机制，以晶界扩散蠕变和晶界位错为协调机制的综合变形机制。动态连续再结晶是镁合金获得超塑性的软化机

制和晶粒稳定机制。

参考文献

- [1] 张士宏, 许沂, 王忠堂. 镁合金成形加工技术[J]. 世界科技研究与发展, 2007, 23(6): 18-21.
- [2] 王渠东, 丁文江. 镁合金及其成形技术的国内外动态与发展[J]. 世界科技研究与发展, 2004, (6): 39-41.
- [3] POLMEAR I J. Magnesium Alloy and Application[J]. Mater Sci Techn, 1994, (1): 1-5.
- [4] IDIS M H. Processing and Evaluation of Investment Cast Magnesium-Base Alloy [J]. AFS Trans, 2006, (104): 237-238.
- [5] 郭学锋, 魏建锋, 张忠明. 镁合金与超高强度镁合金[J]. 铸造技术, 2003, 23(3): 134-135.
- [6] 黄光胜, 汪凌云, 范永革. AZ31B 镁合金挤压工艺研究[J]. 金属成形工艺, 2002, 20(5): 11-13.
- [7] 刘正, 张奎, 曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 202-207.
- [8] 师昌绪, 李恒德, 王淀佐, 等. 加速我国金属镁工业发展的建议[J]. 材料导报, 2005, 15(4): 5-6.
- [9] 李元东, 郝远, 阎峰云, 等. 铸造镁合金及其研究进展[J]. 材料导报, 2002, 16(6): 24-27.
- [10] 乐启炽, 张新建, 崔建忠. 镁合金及其成形工艺与应用状况[J]. 材料导报, 2006, 16(12): 12-15.
- [11] 丁文江. 镁合金科学与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1-3.
- [12] 宋光玲. 镁合金腐蚀与保护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 2-6.
- [13] 潘复生, 韩恩厚. 高性能变形镁合金及加工技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 4-5.
- [14] 李宁, 黎德育. 镁合金压铸件的性能及表面处理[J]. 电镀与涂饰, 2002, 21(4): 39-40.
- [15] 卢晨, 卫中山. 镁合金的研究与应用进展[J]. 汽车工艺与材料, 2005, (9): 1-2.
- [16] 许小忠, 刘强, 程军. 镁合金在工业及国防中的应用[J]. 华北工学院学报, 2003, 23(3): 190-191.

- [17] 邓玉勇, 朱江, 李立. 新型金属材料镁合金的发展前景分析[J]. 科技导报, 2003, (10): 37-38.
- [18] 叶久新, 陈明安, 周健, 等. 镁合金及其成型技术在工业中的应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2002, 29(3): 112-113.
- [19] 张诗昌, 段汉桥, 蔡启舟, 等. 主要合金元素对镁合金组织和性能的影响[J]. 铸造, 2001, 50(6): 310-311.
- [20] 翟春泉, 曾小勤, 丁文江, 等. 镁合金的开发与应用[J]. 机械工程材料, 2004, 25(1): 6-7.
- [21] TAKATA M. Magnesium Dies Dasting Alloy[J]. Journal of the Surface Finishing Society of Japan, 2003, 44(11): 890-891.
- [22] 王怀国, 张景新, 张奎, 等. 高硅镁合金的制备工艺及显微组织分析[J]. 稀有金属, 2003, 27(4): 500-501.
- [23] YARLAGADDA P, GUDIMETLA P, ADAM C. Finite Element Analysis of High Strain Rate Superplastic Forming(SPF) of Al-Ti Alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 131: 469-476.
- [24] 吴诗惇. 金属塑性变形理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 3-4.
- [25] 邹家生. 材料连接原理与工艺[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005: 24-28.
- [26] YAO W, WU A P, ZOU G S, et al. Formation Process of The Bonding Joint in Ti/Al Diffusion Bonding[J]. Mater Sci EngA, 2008, 480: 456-460.
- [27] LEE H S, YOON J H, YI Y M. Fabrication of Titanium Parts by Massive Diffusion Bonding[J]. J Mater Proc Techn, 2008, 201: 280-290.
- [28] HEFTI L D. Innovations in the Superplastic Forming and Diffusion Bonded Process[J]. J Mater Eng Perform, 2008, 17: 178-180.
- [29] 王哲. 钛合金超塑成形/扩散连接技术在飞机结构上的应用[J]. 钛工业进展, 1999, (3): 23-25.
- [30] SANDER D G, RAMULU M. Examination of Superplastic Forming Combined with Diffusion Bonding for Titanium Perspective from Experience[J]. Mater Eng Perform, 2004, 13: 744-750.
- [31] 文九巴, 杨蕴林, 杨永顺, 等. 超塑性应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 62-66.
- [32] 丁桦, 张凯锋. 材料超塑性研究的现状与发展[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(7): 1059-1061.

- [33] HAN W B, ZHANG K F, WANG G F. Superplastic Forming and Diffusion Bonding for Honeycomb Structure of Ti-6Al-4V Alloy[J]. MaterProc Techn, 2007, 183: 450-452.
- [34] 吴为. 气化剂作为加压介质的 SPF/DB 工艺研究及有限元模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学(博士学位论文), 1999: 21-29.
- [35] FURIHATA S, OHSAWA H. Roll Bonding/Superplastic Forming(RB/SPF) of Superplastic Aluminum Alloy[J]. The Institute of Materials, 1995, 12: 196-303.
- [36] 曾攀. 有限元分析及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 3-4.
- [37] BALDO O, DIAZ J. Numerical Simulation of Superplastic Forming/Diffusion Bonding Process[J]. The Institute of Materials, 1995, (23): 235-252.
- [38] 李运兴. 材料参数对板材胀形过程的综合影响的数值模拟研究[J]. 固体力学学报, 1993, 14(1): 25-27.
- [39] 施晓琦. 钛合金超塑成形/扩散连接组合工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学(硕士学位论文), 2007: 4-6.
- [40] JACOBS J A, KILDUFF T F. James Engineering Materials Technology Structures[M]. America: Prentice Hall, 1997: 295-297.
- [41] 张怀. 新型加压介质超塑成形过程的有限元模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学(硕士学位论文), 1997: 56-58.
- [42] 李人宪. 有限元法基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 1-2.
- [43] 陈建维. TC4 钛合金深筒形件的超塑成形及其精度控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学(硕士学位论文), 2007: 20-22.
- [44] 包国勇, 王探. 正交试验设计在机械设计中的应用实例分析[J]. 金华职业技术学院学报, 2005, 1: 12-14.
- [45] 蒋少松. TC4 钛合金超塑成形精度控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学(博士学位论文), 2009: 20-22.
- [46] 陈昌平. AZ31 镁合金心形件超塑气胀成形数值模拟与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学(硕士学位论文), 2009: 49-50.
- [47] 赵文娟, 丁桦, 曹富荣, 等. Ti-6Al-4V 合金超塑性变形中的组织演变及变形机制[J]. 中国有色金属学报. 2007, 17(12): 1973-1980.
- [48] 芮玉龙. Al-Mg-Sc 合金超塑性能及其胀形工艺仿真的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学(硕士学位论文), 2006: 58-59.
- [49] 于彦东. MB15 镁合金超塑性成形和扩散连接研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学(博士学位论文), 2003: 26-27.

- [50] 张杰, 周友龙, 牛济泰. LF6 铝合金的超塑性/扩散连接组合工艺试验及理论研究[J]. 材料工程. 1995, 37(8): 37-39.

攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1] 于彦东, 冯娟, 吕新宇, 等. 镁合金双层板结构的超塑成形/扩散连接工艺及数值模拟[J]. 材料科学与工艺, 2009(已录用).
- [2] 于彦东, 冯娟, 江鹏, 等. ZK60 合金单向拉伸过程中空洞行为的数值模拟[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2009, 14(5): 1-3.
- [3] YU Y D, JIANG P, FENG J, et al. Property and Microstructure Analysis of ZK60 Alloy Superplastic Sheet[J]. Journal of Harbin Institute of Tecnology, 2009(accepted).

致谢

本文是在导师于彦东教授的悉心指导下完成的。在论文的选题、理论解析、模拟方案、模具设计、实验的指导与实施、论文的构思与写作等方面得到了导师耐心细致地指导和热情帮助。于老师严谨求学的科研精神、敏锐超前的学术意识、崇高的人格以及丰富的阅历深深感染了我，从于老师身上我不但学到了丰富的专业知识，而且还学到很多做人的道理，使我受益匪浅，终身受用。值此论文完成之际，谨向培养、教育我的导师致以最崇高的敬意和深深的谢意！

在整个研究过程中，得到了李超老师、李彩霞老师的有益帮助，在此致以诚挚的谢意！感谢师兄陈昌平在课题研究及论文撰写中给予的大量帮助，感谢周浩及实验室的兄弟姐妹，两年多来，我们互相探讨学业、探讨人生、互帮互助，度过了一段令人难忘的美好时光。还要感谢我的男朋友纪执政在生活上给予我的支持和鼓励，感谢李萍、刘晓艺、刘俊、高明明、罗脆锐等同学在学习和生活和学习中的帮助，是他们给了我一个和睦而融洽的学习生活环境，谢谢他们并祝他们学业有成！

特别要感谢我的家人，他们的理解和支持是我得以完成学业的坚实后盾！

最后，向所有曾在学习、生活中给予关心、支持和帮助的老师、同学和朋友们表示衷心的感谢！