

程俊伟 著
夏巨湛 审

复杂铝合金零件 精密模锻技术

Precision Die Forging
Technology of
the Complicated Al-alloy Parts

华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

复杂铝合金零件精密模锻技术

程俊伟 著
夏巨谔 审

华中科技大学出版社
中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

复杂铝合金零件精密模锻技术/程俊伟 著. — 武汉:华中科技大学出版社,2008年2月

ISBN 978-7-5609-4505-7

I. 复… II. 程… III. 铝合金-零部件-模锻 IV. TG316.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第058542号

复杂铝合金零件精密模锻技术

程俊伟 著

责任编辑:万亚军

封面设计:刘一卉

责任校对:朱一霞

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:星明图文工作室

印 刷:武汉中远印务有限公司

开本:889mm×1259mm 1/32 印张:6.75

字数:100千字

版次:2008年2月第1版

印次:2008年2月第1次印刷

定价:18.00元

ISBN 978-7-5609-4505-7/TG·81

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

作者简介

程俊伟,工学博士,2006年毕业于华中科技大学材料加工专业,现任郑州航空工业管理学院机电工程系材料加工研究所所长,多年来一直从事金属材料的精密塑性成形及模具 CAD/CAM/CAE 方面的教学和研究,主持负责和参与完成了中高硅铝合金零件的精密模锻技术、多层杯筒形零件的流动控制成形技术、长杆件端部局部镦粗成形技术、长厚壁管端部局部镦粗成形技术等多个项目的研究。

内 容 简 介

本书在简要介绍高强度铝合金零件成形工艺的种类、内涵、特点、应用和发展趋势的基础上,运用理论分析、有限元模拟技术和工艺实验相结合的方法,分别论述了轿车安全气囊高强度铝合金 7075 壳体零件和压盖零件的流动成形工艺、机匣体类零件的多向模锻工艺,以及轿车空调压缩机高硅铝合金零件的精密模锻工艺。

本书可供从事高强度铝合金零件精密模锻技术及模具 CAD/CAM/CAE 研究的高等学校教师、科研人员及工程技术人员阅读,也可作为研究生的教材。

前 言

随着能源和环境问题的日益突出及人们对轿车安全性、可靠性、舒适性等要求的不断提高,各大汽车制造商都在努力从改善汽车的结构设计和寻找新的替代材料两个方面减轻汽车的重量,并通过不断改进和采用新的零件制造工艺以提高产品的质量。铝合金具有一系列优良性能,如密度小、比强度和比刚度高、抗冲击性良好、耐腐蚀、耐磨损及再生性强等,被认为是实现轿车轻量化的首选材料。近年来,铝合金零部件在轿车零部件中所占的比重不断增加,具有很大的开发潜力。

研究高强度铝合金零件的精密模锻工艺是提高产品质量、实现轿车与武器装备轻量化的有效途径。目前高强度铝合金模锻件主要应用于航空航天领域,并且主要采用效率较低的等温模锻工艺生产制造。由于在液态下铝合金流动性好,人们基本上采用各种铸造工艺制造汽缸体、汽缸盖、离合器壳等非承力的壳体类零件;受力复杂的承力零件,基本上还是采用钢质模锻件制造。高强度铝合金模锻件由于比强度高,综合力学性能好,可以部分代替钢质零件,或者代替铸造铝合金零件,由此提高了产品整体质量。随着我国汽车工业的发展,汽车轻量化进程不断推进,研究复杂高强度铝合金零件的精密模锻工艺具有重要的现实意义和经济效益。

本书作者围绕轿车零件 7075 高强度铝合金多层杯筒形零件、机匣类零件和 SC100-T6 中高硅铝合金活塞尾的精密塑性成形新工艺的研究,采用塑性成形理论、有限元模拟和工艺试验相结合的方法,做了一系列的工作,成功地开发出安全气囊关键零件的流动控制成形工艺和活塞尾精密热模锻工艺。

本书的研究内容主要有以下三个方面:

(1) 分析了轿车安全气囊气体发生器关键零件——壳体和压盖的结构和形状特征,设计了两种闭式反挤压成形工艺,并分析了它们的异同;提出了应用以闭式挤压为变形特点的流动控制成形工艺时金属最后充满模腔部位的判据和流动控制成形力的计算模型,并建立了成形力的计算公式;对壳体锻件流动控制成形过程进行了有限元模拟,分析了成形过程中的应力场、应变场、速度场的分布及力-行程曲线的变化,提出了两种挤压凸模设计方案,并对壳体的冷挤压工艺和热挤压工艺进行了对比,指出了它们的优缺点和应用范围;在理论研究的基础上,对壳体和压盖进行了工艺试验,得到了优质精密锻件。

(2) 分析了 7075 高强度铝合金零件——机匣体和下机匣体的结构和形状特征,通过理论分析和计算,在高强度铝合金热模锻推荐的约束值范围内得到了机匣体和下机匣体的肋的高宽比,验证了采用多向热模锻工艺的可行性;制订了零件的模锻工艺路线,并进行了成形力的计算;采用刚黏塑性与热力耦合的有限元模型,对机匣体和下机匣体的精密模锻成形过程进行了有限元数值模拟,分析了成形过程中的应力场、应变场、速度场及温度场的变化对模锻成形过程的影响;在理论研究和有限元数值模拟的基础上对零件进行了工艺试验,其研究结果可为机匣体类零件精密模锻生产提供指导和参考。

(3) 应用 Gleeble-1500 热力学模拟试验机对不同的温度和变形速率下的 SC100-T6 中高硅铝合金进行等温压缩试验,得到了合金的流动应力与成形温度、应变速率的变化规律,并应用最小二乘法建立了该种合金的本构方程;分析了活塞尾锻件的结构和形状特征,设计了两种预锻毛坯方案。采用刚黏塑性与热力耦合的有限元模型,对两种预锻成形及其相对应的终锻成形进行了数值模拟,对成形过程中的应力场、应变场、速度场及温度场的分布进行了分析和对比,指出优化的楔形预锻毛坯有利于终锻成形。根据模拟的结果,设计了预锻模、终锻模和切边模,并进行了工艺试

验,得到了高质量的精密锻件。最后,对铝合金材料 SC100-T6 进行了金相组织观测,其中材料锻造前块状的初晶硅零散分布于 α -Al 中,在锻造后呈细小颗粒状均匀分布。这充分验证了精密模锻可显著提高锻件的综合力学性能的结论。

气体发生器精密锻件经山西锦恒汽车零部件有限公司的水爆试验表明,其技术指标达到了美国的技术标准;该项成果已被温州市科技局列为产业化开发项目。壳体和压盖反挤压模具已被申请实用新型专利,专利名称为“金属挤压模锻成形模具”,专利号为 ZL03235597.1,作者为第四设计人。活塞尾精密锻件超过日本同类锻件的水平。这表明,这两项成果已达到了实用化水平,并将创造出显著的技术经济效益。

全书内容共分为 6 章。第 1 章介绍了高强度铝合金零件精密模锻工艺在实现轿车轻量化、提高产品质量的现实意义和作用,并介绍了国内外铝合金零件模锻工艺的发展概况及变形铝合金零件的成形工艺。第 2 章主要介绍了刚塑性有限元和刚黏塑性有限元的理论基础。第 3 章介绍了 7075 高强度铝合金的高温流变性能,应用热力学模拟实验机研究了 SC100-T6 中高硅铝合金的高温流变性能。第 4 章主要介绍了多层杯筒形零件——压盖和壳体流动成形工艺、下机匣体和机匣体零件的多向模锻工艺,以及活塞尾锻件的精密模锻工艺。第 5 章对壳体零件、机匣体和下机匣体零件及活塞尾零件的模锻工艺进行了有限元模拟,并对其成形工艺进行了优化,验证了精密模锻工艺分析的正确性。第 6 章对壳体和压盖零件、机匣体零件和活塞尾锻件进行了模锻工艺试验,得到了合格的模锻零件。

感谢导师夏巨湛教授多年来的悉心指导,感谢胡国安老师对本书中工艺试验工作的指导和大力支持,感谢吕春龙硕士、张亚蕊硕士对本书中的研究工作的支持与帮助,感谢本书参考文献的作者们。本书的出版得到了郑州航空工业管理学院博士专著出版基金的大力资助,郑州航空工业管理学院科研处的领导、老师及专著

评审委员会的领导、老师对本书的出版给予了诸多指导,在此一并表示感谢,并对华中科技大学出版社的热情支持表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在错误与不妥之处,敬请广大读者批评指正。

著 者

2007 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 变形铝合金的塑性成形技术	(2)
1.3 铝合金在轿车上的应用.....	(10)
1.4 国内外铝合金精锻技术的发展概况.....	(14)
1.5 复杂铝合金零件精密模锻技术研究的目的和意义	(18)
第 2 章 热耦合有限元模拟基本理论	(21)
2.1 金属塑性成形有限元模拟概述.....	(21)
2.2 刚塑性有限元理论.....	(24)
2.3 刚黏塑性有限元理论.....	(31)
2.4 耦合热变形分析.....	(36)
第 3 章 高强度铝合金流变性能研究	(44)
3.1 引言.....	(44)
3.2 铝合金 SC100-T6 的化学成分	(45)
3.3 铝合金 SC100-T6 的热力学压缩试验	(46)
3.4 铝合金 SC100-T6 的本构方程	(51)
3.5 高强度铝合金 7075(LC4)的热力学流动应力特征	(55)
第 4 章 复杂铝合金零件精密模锻工艺分析	(58)
4.1 壳体零件流动控制成形工艺分析与成形力的计算	(58)

4.2	活塞尾精密模锻成形工艺分析与成形力的计算	(70)
4.3	机匣类零件的结构特点分析及成形工艺方案的制订	(76)
第5章	复杂铝合金零件精密模锻过程的有限元模拟	(87)
5.1	安全气囊壳体零件流动控制成形过程的有限元模拟	(87)
5.2	活塞尾模锻成形过程的有限元模拟	(115)
5.3	机匣体多向模锻的热力耦合数值模拟	(158)
第6章	高强度铝合金精密模锻成形工艺及模具试验	(169)
6.1	壳体、压盖的流动控制成形工艺及模具的试验	(169)
6.2	活塞尾模锻成形工艺及模具的试验	(173)
6.3	机匣体成形工艺及模具的试验	(183)
第7章	总结与展望	(187)
7.1	总结	(187)
7.2	展望	(188)
参考文献		(190)

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

能源、环境和安全是当今世界各国极为关注的三大问题,汽车工业的发展和轿车进入家庭同这三大问题密切相关。多年来,汽车行业内的专家和研究人員一直在汽车产品的结构设计、材料选用和生产工艺等方面开展了卓有成效的试验研究工作。要努力开发安全可靠、高速舒适、节能环保的现代汽车,首先要解决的问题就是汽车轻量化。轻质材料在汽车上的应用是实现汽车轻量化的重要途径,并推动了汽车轻量化进程。增加铝合金锻件在轿车零部件中的比重,能显著减轻汽车自重,降低能源消耗,从而减轻对大气的污染,改善环境质量,这将会带来巨大的经济效益和社会效益。铝合金被世界汽车行业公认为促进汽车轻量化最有效的材料之一^[1]。铝合金以优良的特性、良好的加工成形性和高的材料再生性,在汽车工业上获得了广泛应用,并成为制造现代轿车的重要材料。

按照成形方式,铝合金通常分为变形铝合金和铸造铝合金两类。铝合金熔点低,在液态下容易流动、充型,轿车铝合金壳体类非承力结构件,如发动机缸体、缸盖、变速箱壳体、轮毂等,就是采用重力铸造、压力铸造或者低压铸造等工艺生产的,高强度铝合金模锻件在铝合金零部件总质量中所占的比重较少。在航空航天领域和汽车工业,承力件和有特殊要求的高强度铝合金结构零件,如直升机上机匣,轿车安全气囊气体发生器多层杯筒形零件——壳体、压盖零件,轿车空调压缩机的活塞尾、活塞体等零件,其材料分别为高强度铝合金(如 7075、LY12)和中高硅高强度铝合金(如

LD11、SC100-T6),为了保证其质量和使用的安全性,均要求采用精密模锻工艺生产。这类零件形状复杂,技术要求(如晶粒度、强度、硬度和金属的流线分布等)较高。随着市场竞争的加剧,生产高质量的产品成为提高市场竞争力的内在要求。为此,研究开发高强度铝合金复杂零件的精密模锻成形工艺,成为当今复杂铝合金零件制造领域新的研究热点。

精密塑性成形技术是现代制造技术中非常活跃和重要的发展方向,是先进制造技术的重要组成部分,其主要特征是:材料利用率高,后续加工量小,能耗低;金属流线沿锻件的外形轮廓分布,晶粒细小,热处理后锻件的力学性能得到了很大提高;锻件的形状和尺寸可达到或接近最终的形状和尺寸^[2]。近年来,精密塑性成形已突破了主要提供毛坯的范畴,向部分取代切削加工、直接生产半成品或成品零件的方向发展,且具有生产效率高、零件质量好、生产成本低、节约原材料和能源等优点,已成为塑性成形技术中极为重要的一个研究领域。

随着计算机技术的发展,CAD/CAM/CAE 技术在塑性成形工艺和模具设计过程中得到了广泛应用。应用计算机对金属成形过程进行数值模拟,可以全面地了解其在变形过程中的应力、应变分布,预测锻件成形缺陷的发展趋势;通过模拟热成形和温成形的模锻工艺,还可以了解锻件和模具的温度场的变化和分布规律,掌握温度的变化对金属流动的影响。这些手段,为设计者提供了进行工艺和模具优化设计的合理依据,从而可以提高工艺和模具设计的合理性,缩短模具的设计、制造周期,增强产品的竞争力。

1.2 变形铝合金的塑性成形技术

1.2.1 铝合金塑性加工的方法

铝合金的塑性成形就是利用铝合金的塑性,在一定的温度、速

度条件下,施加各种形式的外力,使其产生塑性变形,得到各种形状、尺寸和组织性能的铝合金型材或锻件等的加工方法^[3]。铝合金的塑性成形方法主要有挤压成形、模锻成形、流动控制成形、半固态成形及液态模锻成形等。

1. 挤压成形

挤压成形是将金属毛坯放入模具型腔内,在强大的压力作用下,以一定的速度迫使金属从模腔中挤出,从而获得所需的截面形状、外形尺寸及具有一定力学性能的挤压件。建筑、汽车等行业用的装饰型材及各种棒材,均是用挤压成形工艺制造的。随着社会经济的发展和科学技术的进步,铝型材正在向大型化、扁宽化、薄壁化、高精度化、复杂化、多用途、多功能、多品种等方向发展^[3]。

根据挤压时金属流动方向与凸模运动方向之间的关系,可将常见的挤压成形方法分为正挤压、反挤压、复合挤压和径向挤压^[2,4]。

(1) 正挤压:金属的流动方向与凸模的运动方向一致。正挤压又分为实心件正挤压(见图 1.1(a))和空心件正挤压(见图 1.1(b))。挤压的截面形状可以是圆形、椭圆形、矩形或棱柱形,也可以是非对称的等截面。

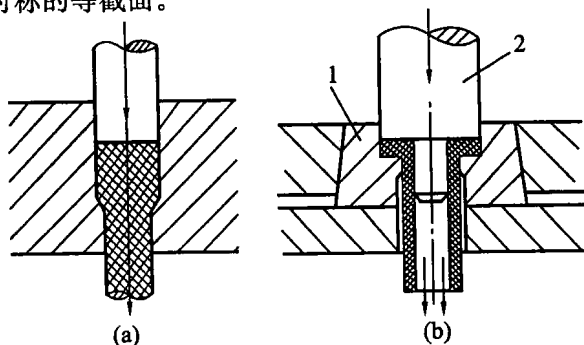


图 1.1 正挤压

(a) 实心件正挤压; (b) 空心件正挤压

1. 凹模; 2. 凸模

(2) 反挤压: 金属的流动方向与凸模的运动方向相反, 如图 1.2 所示。反挤压工艺适用于制造截面为圆形、正方形、矩形、“山”形、多层圆筒形和多层盒形的空心件。

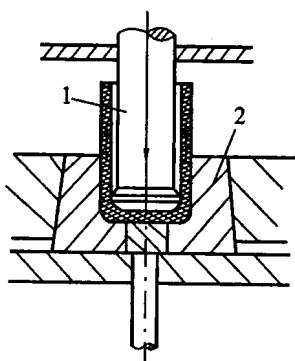


图 1.2 反挤压

1. 凸模; 2. 凹模

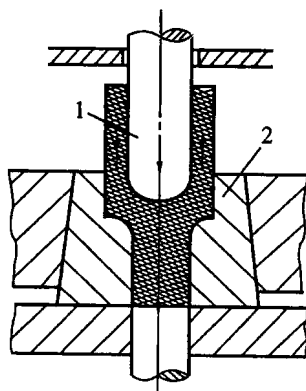


图 1.3 复合挤压

1. 凸模; 2. 凹模

(3) 复合挤压: 挤压时, 毛坯一部分金属的流动方向与凸模的运动方向相同, 另一部分金属的流动方向与凸模运动方向相反, 如图 1.3 所示。复合挤压适用于制造杯杆类零件。

(4) 径向挤压: 挤压时, 金属的流动方向与凸模的运动方向垂直, 如图 1.4 所示。径向挤压又分为分流式径向挤压和汇集式径向挤压两种。径向挤压适用于制造十字轴、T 形接头、小模数的直齿齿轮和斜齿齿轮等。

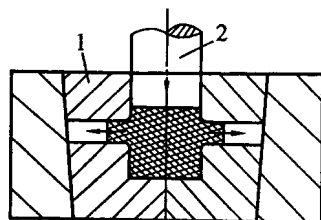


图 1.4 径向挤压

1. 凹模; 2. 凸模

2. 模锻成形

模锻成形是在锻压设备动力作用下, 金属在锻模型槽中被迫塑性流动, 从而获得比通过自由锻获得的锻件的质量更高的锻件的加工方法^[2]。图 1.5 所示为华中科技大学模具国家重点实验室研制成功的温精密模锻成形的复杂锻

件,图 1.6 所示为其研制成功的冷精锻锥形齿轮。模锻生产率高、锻件尺寸稳定、材料利用率高,易于实现机械化和自动化生产,适合成批或大量生产。中小型锻件的净成形(net-shaping)和近净成形(near net-shaping)是今后锻造领域的主要研究和发展方向^[2]。

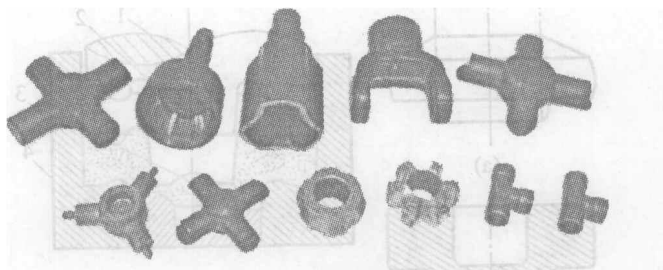


图 1.5 温精密模锻件

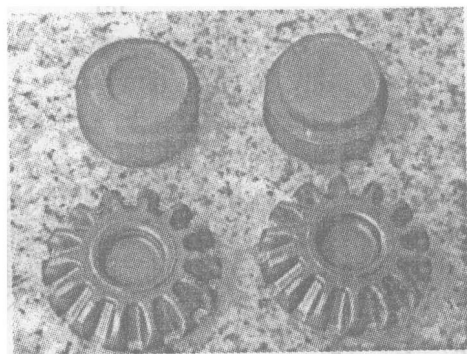


图 1.6 冷精锻锥形齿轮

3. 流动控制成形

流动控制成形(flow control forming,简称 FCF)是近年来由德国和日本率先开发的精密模锻成形新技术,其实质是闭塞锻造,其主要特点是:可以精确控制金属材料的非均匀塑性流动,提高其成形性能,可实现更加复杂的结构件的精密成形;能有效避免折叠、充不满等缺陷的产生,使锻件金属流线连续致密、分布合理,大大提高了产品的力学性能。分流降压腔有不同的结构形式,如侧

缝隙式、纵向缝隙式、中心孔式和窗框式等。图 1.7 所示为带有中心孔的圆盘类锻件的中心孔式分流降压的精密模锻示意图,图1.8 所示为圆柱齿轮的流动控制成形模锻过程^[4]。

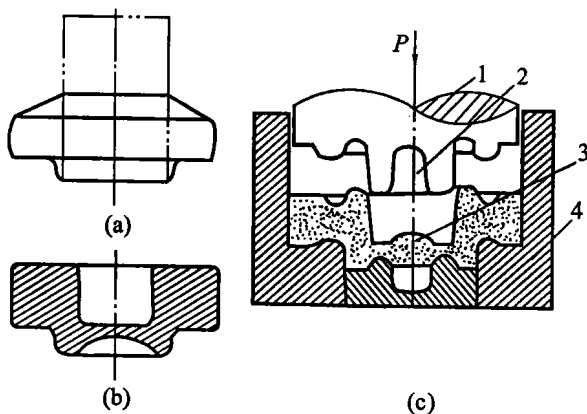


图 1.7 带连皮的闭式精密模锻

(a) 锻粗; (b) 冲孔; (c) 终锻

1. 冲头; 2. 补偿空间; 3. 连皮; 4. 下模

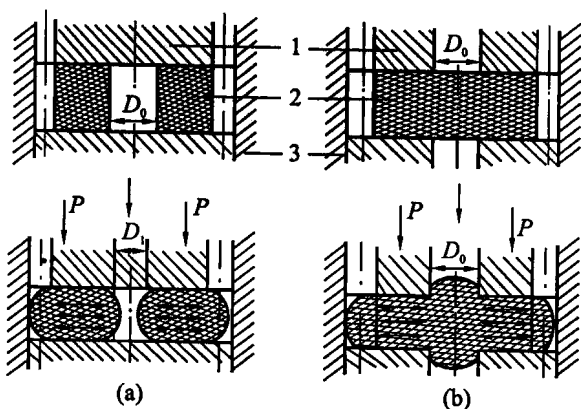


图 1.8 圆柱齿轮流动控制成形过程

(a) 减压孔流动原理; (b) 减压轴流动原理

1. 冲头; 2. 毛坯; 3. 挤压筒