

精密锻造技术的研究现状及发展趋势

王忠雷^{1,2}, 赵国群¹

(1. 山东大学模具工程技术研究中心, 济南 250061; 2. 山东建筑大学机电工程学院, 济南 250101)

摘要: 综述了精密锻造成形技术的研究与应用现状, 介绍了冷精锻、热精锻、温精锻及复合精锻工艺的应用现状和发展方向; 分析了精密锻造设备的特点及应用现状; 总结了精密锻造模具的特点, 介绍了模具弹性补偿、高速切削、模具补焊等先进的模具设计、制造技术; 从数值模拟和反向模拟两个方面综述了成形过程模拟技术在精密锻造工艺中的应用情况及存在的问题; 介绍了精密锻造工艺优化技术的研究现状。最后对精密锻造成形技术发展方向进行了展望。

关键词: 精密锻造工艺; 设备; 模具; 数值模拟; 反向模拟; 工艺优化

中图分类号: TG316 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2009)01-0032-07

Recent Condition and Developing Trends of Precise Forging Technology

WANG Zhong-lei^{1,2}, ZHAO Guo-qun¹

(1. Engineering Research Center for Mould & Die Technology, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Institute of Electrical and Mechanical, Shandong Architectural University, Jinan 250101, China)

Abstract: In this paper, the current status of study and application of precise forging technology is reviewed and analyzed. The current status of application and developing direction of precise forging process including hot forging, cold forging, warm forging, compound forging is introduced. The characteristic and present application status of precise forging equipment is analyzed. The characteristic of precise forging mould is summarized and some advanced designing and manufacturing technologies for mould are introduced. The application and existing problems of numerical simulation on forming in precise forging is reviewed from forward simulation and backward simulation. The present research status of process optimization for precise forging is introduced. Finally the trends of precise forging technology are presented briefly.

Key words: precise forging technology; equipment; mould; simulation; backward simulation; process optimization

精密锻造成形技术(净成形)是指零件锻造成形后,只需少量加工或不再加工即符合零件要求的成形技术。精密锻造成形技术是先进制造技术的重要组成部分,也是汽车、矿山、能源、建筑、航空、航天、兵器等行业中应用广泛的零件制造工艺。精密锻造成形技术不仅节约材料、能源,减少加工工序和设备,而且显著提高生产率和产品质量,降低生产成

本,从而提高产品的市场竞争能力。经过30多年的发展,精密锻造成形技术得到了飞速发展,取得了众多的研究成果。文中从工艺方法、设备、模具、成形过程模拟和工艺优化等5个方面,总结近年来精密锻造成形技术的发展状况,并对精密锻造成形技术未来的发展方向进行了展望。

收稿日期: 2009-06-14

作者简介: 王忠雷(1977-),男,山东烟台人,博士研究生,讲师,主要研究方向为金属塑性成形工艺有限元模拟与软件开发。

1 精密锻造工艺方法

目前已应用于生产的精密锻造工艺很多。按成形温度不同可以分为热精锻、冷精锻、温精锻、复合精锻、等温精锻等。

1.1 热精锻工艺

锻造温度在再结晶温度之上的精密锻造工艺称为热精锻。热精锻材料变形抗力低、塑性好,容易成形比较复杂的工件,但是因强烈氧化作用,工件表面质量和尺寸精度较低。热精锻常用的工艺方法为闭式模锻,由于下料不准,模具设计、制造精度不够等原因,闭式模锻最后合模阶段变形抗力很大,对设备和模具造成较大的损害。解决该问题常用的方法是分流降压原理,即在封闭型腔最后充满的地方设置形状与尺寸大小合理的分流降压腔孔。当型腔完全充满后坯料的多余金属从分流腔孔挤出,这样既解决了坯料体积与型腔体积不能严格相等的矛盾,同时又降低了型腔的内部压力,有利于提高模具寿命。

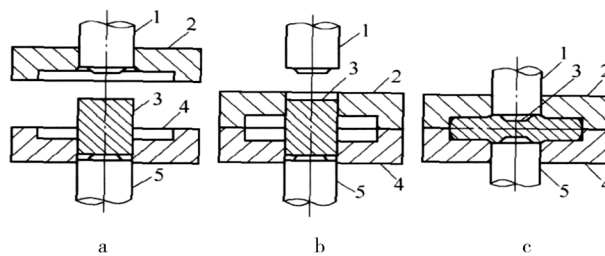
早在20世纪50年代,由于缺乏足够的齿轮加工机床,德国人开始用闭式热模锻的方法试制直齿锥齿轮。热精锻齿轮技术的开发应用在我国起步于20世纪70年代初期,成熟于20世纪80年代中后期。1970年上海机械化工工艺研究所和上海汽车齿轮厂合作,对美国大道奇T234汽车差速器行星齿轮进行热精锻工艺成形试验,并于1973年投资建立精锻车间,进行批量生产^[1];20世纪80年代,山东大学开展了伞齿轮精密锻造工艺研发,并实现了产业化。由于经济效益显著,近年来热精锻工艺获得了广泛的应用。

1.2 冷精锻工艺

冷精锻是在室温下进行的精密锻造工艺。冷精锻工艺具有如下特点:工件形状和尺寸较易控制,避免高温带来的误差;工件强度和精度高,表面质量好。冷锻成形过程中,工件塑性差、变形抗力大,对模具和设备要求高,而且很难成形结构复杂的零件。为克服冷精锻成形工艺变形抗力大、填充效果差的问题,相继开发了一些新的工艺方法,主要包括闭塞锻造、浮动凹模锻造、预制分流锻造等。

闭塞锻造是在封闭凹模内通过1个或2个冲

头,单向或对向挤压金属一次成形。闭塞锻造加工技术中所使用的上、下模具都是组合件,分别由上凹模、上冲头、下凹模、下冲头组成。在锻造成形过程中,先将上、下凹模闭合,形成封闭模腔,同时对其施加足够的压力,然后用上、下冲头对模腔内的坯料进行挤压成形(如图1所示)。在锻造过程中坯料处于强烈的三向压应力状态,塑性好,可以一次成形复杂形状的零件,生产效率高,而且金属流线沿锻件外形连续分布,锻件的力学性能好。



1. 上冲头 2. 上模 3. 毛坯 4. 下模 5. 下冲头

图1 闭塞锻造加工技术原理示意^[2]

Fig.1 The schematic diagram of closed-die forging principle

浮动凹模锻造技术中的凹模不是固定的,会随着锻造过程进行发生浮动。这种设计降低了凹模与金属变形体间的相对速度,减小了接触面上摩擦力的影响,锻件充填性能获得较大提高,变形抗力大大下降。

分流锻造法通过在锻件某一位置设置溢流口,使材料在充填型腔的过程中始终有自由流动的余地,从而提高型腔填充性,降低变形阻力和加工载荷。为了改善直齿圆柱齿轮精密锻造的充型情况,张清萍等提出了预制分流孔—分流锻造的工艺方法。该工艺方法预锻时上模与下模带有凸台,在坯料两端中心部分锻造出分流区;在终锻时,中心分流区起到分流材料的作用,改善了材料的流动状态,从而降低成形载荷,改善坯料充填性^[3]。

近年来,冷锻工艺在国内获得一定的发展,江苏太平洋精密锻造公司引进日本小松公司的冷锻机和先进的模具加工设备,是中国目前冷锻设备条件最好的企业。江苏大丰森威集团汽车精锻件厂是目前中国最大的专业化冷锻厂,年产汽车、摩托车各类精密冷、温锻件总产量达4000 t。一些典型的高难度冷锻件如轿车等速万向节外套、星形套、变速箱传动轴等,在该厂均已实现批量生产^[4]。

1.3 温精锻工艺

温精锻是在再结晶温度之下某个适合的温度下进行的精密锻造工艺。温锻精密成形技术既突破冷锻成形中变形抗力大、零件形状不能太复杂、需增加中间热处理和表面处理工步的局限性,又克服了热锻中因强烈氧化作用而降低表面质量和尺寸精度的问题。它同时具有冷锻和热锻的优点,克服了二者的缺点。但是温精锻工艺锻造温度低、锻造温度范围狭窄且对其锻造范围要求较为严格,需要高精度专门的设备,而且对模具结构和模具材料有较高的要求。

1.4 复合精锻工艺

随着精锻工件的日趋复杂以及精度要求提高,单纯的冷、温、热锻工艺已不能满足要求。复合精锻工艺将冷、温、热锻工艺进行组合共同完成一个工件的锻造,能发挥冷、温、热锻的优点,摒弃冷、温、热锻的缺点。表1为采用3种不同的工艺方法生产的直齿锥齿轮的技术性能比较,从表中可以看出,复合精锻工艺生产的工件其机械性能、尺寸精度、表面粗糙度与其它2个工艺相比,都有所提高^[1]。因此,复合精锻工艺是目前精锻工艺发展的一个重要方向。

表1 不同工艺直齿锥齿轮的技术性能比较

Table1 Comparison of technical characteristics among three types of straight bevel gear manufactured by different processes

加工方法	弯曲载荷比较 /%	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	摩擦扭矩 M /(N·m)	精度 DIN 3695/级
机械加工	100	2.0	3.7	9
热锻	110	3.2	2.5	10
复合精锻工艺	140	0.3	1.7	7

在国外,温锻+冷精整成形工艺以德国蒂森克虏伯公司为代表,他们的复合成形工艺代表了世界的领先技术。在国内,蒋鹏^[5]和张峥嵘^[6]等分别对热、冷和温、冷复合成形进行了研究。上海铁福传动轴公司用温锻/冷整形工艺大批量生产轿车等速万向节外星轮,江苏太平洋精锻公司采用热(或温)锻/冷整形大批量生产齿轮等精锻件。

1.5 等温精锻工艺

等温精锻是指坯料在趋于恒定的温度下模锻成形。为了保证恒温成形的条件,模具也必须加热到与坯料相同的温度。等温模锻常用于航空航天工业中的钛合金、铝合金、镁合金等难变形材料的精密成形,近年来也用于汽车和机械工业有色金属的精密成形。

等温锻造主要应用于锻造温度较窄的金属材料,尤其是对变形温度非常敏感的钛合金。等温锻造的零件一般具有薄的腹板、高筋和薄壁,此类零件坯料热量很快被模具吸收,温度迅速下降,采用普通锻造方法,不仅需大幅度提高设备的吨位,而且也易造成模具的开裂。

1.6 精密锻造工艺的发展趋势

随着制造业的发展,对精锻成形零件的要求越来越高,也对精密锻造工艺的研究和发展提出了更高的要求,目前精密锻造工艺研究的主要方向有以下几方面。

1) 持续不断的工艺革新。为了满足成形零件的要求,降低生产成本,需要不断的开发成形精度高、模具寿命长、生产效率高的精密锻造成形新工艺。

2) 复合工艺的开发。随着成形零件工艺要求的不断提高,单一的精密锻造很难满足要求,这就需要开发复合成形工艺,将不同温度或不同工艺方法的锻造工艺结合起来,取长补短共同完成一个零件的加工制造。也可以将精密锻造工艺与其它精密成形工艺如精密铸造、精密焊接等工艺进行组合,提高精密成形工艺的应用范围和加工能力。

3) 基于知识的工艺设计。随着精密锻造工艺的不断发 展,工艺设计日趋复杂,为了提高工艺设计的可靠性和高效性,开发基于知识的专家系统是未来精密锻造工艺设计的重要研究方向。

2 精密锻造设备

为了满足精密锻造工艺的要求,精密锻造设备需要具备如下特点。

1) 具有较好的刚性,使变形过程中机器本身的变形较小,保证锻造工件的尺寸精度。

2) 具有精密的导向机构,保证模具的合模精度。

3) 具有多缸的动作能力,实现精密锻造多个模具运动的要求。

4) 具有生产工序的自动监控和检测功能等。

对于热精密锻造常用的设备包括高能螺旋压力机、电液锤、热模锻压力机等,冷精密锻造成形常用的设备包括冷锻压力机、冷挤压机、冷镦机、冷摆辗机等。我国早期采购精密锻造设备主要有2个途径:从国外知名的公司例如瑞士 Hatebur 公司、英国 Hewelco 公司、意大利 SACMA 公司、日本小松公司、德国舒勒公司、美国 National 公司等进口精锻设备或生产线^[7];对国内的通用锻造设备进行改造。由于进口设备价格昂贵,而改造设备其精度和可靠性较差,因此迫切需要研究和开发国产的精密锻造设备,近年来国产精密锻造设备获得很大发展,其中北京机电研究所^[4]、济南第二机床厂、上海锻压机床厂、天津锻压机床厂^[7]、青岛锻压机床厂^[8]等研究单位和企业,成功研制和开发了系列精密锻造设备,并已投入工程应用。

3 精密锻造模具

与普通锻造成形相比,精密锻造成形变形抗力更大,模具的工作状态更恶劣,因此精密锻造模具的综合机械性能要求更高。同时,在精密锻造中,模具的尺寸精度和表面粗糙度将直接传递给锻件,为了保证锻件的尺寸精度和表面粗糙度,要求精密锻造模具具有较高的尺寸精度和表面粗糙度。为了满足精密锻造成形对模具的要求,模具设计和制造时,要选择合理的模具结构、模具材料、加工方法及热处理方法,以保证其精度和机械性能。近年来为了进一步提高模具的精度和使用寿命,模具弹性补偿、高速切削、模具补焊等一些新的模具设计、制造技术在精密锻造模具中得到应用。

3.1 模具弹性形变的补偿

锻造成形过程中,在变形抗力及摩擦力等因素的作用下,模具将发生一定的弹性变形,这一变形使得模腔轮廓由正常形状向一个与载荷分布相关的形状变化,金属的成形也将不再以模腔原始轮廓为依

据^[9]。很多锻造工艺与模具设计时往往忽略由此产生的工件表面几何精度误差,但对于精密锻造工艺却是一个非常重要的和不容忽视的问题。解决的方法一般是通过计算或者模拟的方法对模具弹性变形进行分析计算,并在模具型腔设计时,提前进行形状补偿。

3.2 模具的高速切削

传统制模工艺需要在加工出型腔后进行淬火处理,以提高模具硬度,由于存在着热处理变形,势必影响模具及锻件精度。解决热处理变形对精锻模具精度影响的方法主要有两种:减少热处理的变形,选择热处理性能较好的材料,制定合理的热处理工艺,该方法可以减少热处理变形,但是不能完全消除其影响;采用高速切削技术加工模具,高速切削可以直接加工淬火硬度达 HRC50 的锻模型腔,可以先淬火后加工,以减小热处理的变形,提高模具精度,同时该技术还能缩短制模周期。

3.3 模具补焊技术

精密锻造工艺一般变形抗力较大,模具寿命较低,为了提高模具的重复使用寿命,模具补焊技术在精密锻造成形中得到了广泛应用。补焊的焊条材料为高合金钢,补焊后的模具材料硬度可达 HRC60。根据国内某企业的试用结果,补焊后镶块式连杆锤锻模的平均寿命提高了 1.63 倍^[10]。

4 精密锻造成形过程数值模拟

对于精密锻造成形,成形工艺与模具设计往往依靠一些经验和直觉作为设计准则,在经过一次次试模、修正和改进后,才确定正确的工艺参数。这种常规方法具有很大的盲目性和试探性,并带来设备、材料和时间的浪费。这种缺乏科学性的经验方法,因其周期长、成本高、精度低,已不再适应现代制造业生产的发展要求。

目前锻造成形过程的计算机数值模拟得到广泛应用,利用数值模拟方法,可方便地确定塑性成形过程各个阶段所需的变形功和载荷,获得工件的内部应力、应变、温度分布和金属流动规律,获得模具的应力、应变、温度分布,预测工件的成形状况、残余应力、缺陷、晶粒的粒度和取向分布,为精密锻造成形

过程的模拟与优化设计提供了强有力的工具。将数值模拟方法运用于精密锻造成形分析,主要有正向模拟技术和反向模拟技术等2种方式。

4.1 正向模拟技术

正向模拟是从坯料开始,模拟工件在模具作用下的整个成形过程,以获得工件的变形情况和各种场变量的分布。数值模拟方法中较为精确且被广泛使用的方法为有限元法。当前已有一些大型的通用数值模拟商品化软件,如 DEFORM、AUTO-FORGE、FORGE3 等,为工业界提供了可靠的模具设计验证工具。应用这些分析工具对成形工艺过程进行模拟,使设计者可以分析模具形状、工艺参数等与产品性能之间的关系,观察成形情况以及是否产生内部或外部的缺陷,进而修改工艺及模具直到满意状态,从而在保证产品质量、减少材料消耗、提高生产率及缩短产品开发周期等方面显示了显著的优越性。

数值模拟方法在实际精密锻造成形中得到了广泛的应用。通过数值模拟研究了链轨节多工位连续锻造成形过程模具设计和坯料的初始位置定位,以减小终锻成形的飞边^[11];对叶片精锻过程进行了三维刚粘塑性有限元模拟^[12];对直齿圆柱齿轮精锻成形过程进行了模拟和工艺改进优化^[13];对汽车发电机磁极精锻成形过程进行了模拟及其成形工艺优化^[14];采用多场耦合技术分析了 TC4 叶片精锻成形的微观组织的演变^[15]。以三维镦粗为例对其微观组织的演化进行了实验和数值模拟研究^[16]等。随着有限元分析软件的发展,精密锻造成形有限元模拟由二维向三维发展,由宏观向微观发展,由单一场向多场耦合发展,取得了长足进步。然而精密锻造成形有限元模拟要实现真正的工程应用,仍有一些问题有待提高和完善。

1) 分析效率的提高。复杂锻造成形过程分析效率较低,其中一个主要的原因是分析过程中,由于网格畸变导致的网格再划分。其有效的解决方法是采用抗畸变能力较强的六面体网格替代目前常用的四面网格,开发基于六面体网格有限元分析程序。

2) 分析内容的扩展。目前,大多数的有限元分析软件对于工件几何形状、应力应变场分布等力学参数的计算已经比较成熟,但是对于材料的微观组织演变分析还处于起步和探索阶段。而材料微观组织的演变对工件的机械性能影响显著,也是工艺

和模具设计关注的重要问题。因此,材料的微观组织演变分析将是锻造成形有限元分析软件一个重要的研究和发展方向。

4.2 反向模拟技术

自 20 世纪 80 年代中期,Kobayashi^[17]等提出了一种有限元反向跟踪(反向模拟)方法,并应用于实际锻造成形问题的预成形设计。这种反向跟踪方法是从完全充满终锻模腔的终锻件形状出发,以逆向变形方式模拟材料变形规律,按照规定的边界条件控制准则,通过解除边界节点的约束条件而得到任意时刻的预成形件形状。以该预成形形状为成形起点可以成形形状精确的工件,因此该项技术可以应用于精密锻造成形的工艺设计中。

Han^[18]等将优化方法应用于有限元反向跟踪和预成形设计,从而寻求在这种特定边界条件下的预成形设计。赵国群^[19-20]等根据工件形状复杂程度建立了有限元逆向仿真的边界条件控制准则和相应的预成形设计方法。Kang^[21]还用刚塑性有限元反向模拟方法对挤压进行了预成形设计,以使挤出件具有平端头,并用实验验证了设计结果。Gao^[22]等对叶片成形过程进行了反向模拟,获得理想的预锻件形状。

反向模拟方法依赖于边界条件的控制准则。由于材料成形路径的多样化,建立通用的或者最佳的边界条件控制准则,仍存在较大的困难。而且通常反向模拟得到的预成形件的形状过于复杂,很难锻造成形,这又增加了预成形模具设计的难度。

5 精密锻造工艺优化

无论是正向模拟还是反向模拟,都可归结为利用数值模拟技术进行设计结果验证的试错法。其基本思路仍与传统的试错法一样,只不过所用的验证手段不同,对不合理设计的修改还需要由设计者根据经验提出,设计过程的自动化程度还很低。为了提高精密锻造工艺和模具设计的效率和可靠性,近年来国内外学者对精密锻造过程工艺与模具的优化设计进行了大量研究,并取得了较大进展。

精密锻造过程工艺与模具的优化设计,一般以工艺参数或模具的形状为设计变量,以工件的形状

或物理性能为目标函数,以有限元法方法为目标函数的计算器。采用高效的优化算法,实现工艺参数与模具形状的自动优化。目前,常用到的优化方法包括:基于梯度的灵敏度分析优化算法,以及基于全局寻优的遗传算法。

5.1 灵敏度分析法

基于灵敏度分析的优化方法将精密锻造过程的预成形设计和模具设计问题处理为优化问题,用严密的数学公式进行描述,将优化问题的目标函数定义为一组给定设计变量中所希望的最终状态和数值计算状态之间的误差的某种程度。灵敏度分析的方法需要计算目标函数对预成形参数的灵敏度信息(导数),然后采用高效的优化算法进行优化设计。

Zabaras^[23-24]等对灵敏度方法在锻造成形工艺优化中的应用进行研究,采用该方法进行了预成形形状、模具设计、零件的微观组织等多个问题进行了研究。赵国群等^[25-26]以实际终锻件形状与理想终锻件形状不重合区域的面积作为目标函数,以预成形模具的B样条控制点作为优化设计变量,对预锻模具的形状进行了优化。Gao^[27-28]将灵敏度分析法推广到了锻造过程的微观组织方面,以减小整个锻件上平均晶粒尺寸的平均值为目标,提出了一种基于灵敏度分析的用于优化锻造过程中微观组织的新算法。

灵敏度分析的优化方法效率高、收敛快,在锻造工艺和模具优化设计中得到了广泛的应用,并取得了很好的效果。由于灵敏度分析方法,需要用严密的数学公式对优化模型进行描述,并求解计算目标函数对预成形参数的灵敏度信息。对于三维复杂的锻造过程来说,计算过程异常复杂,给程序设计带来困难,同时也降低了计算的效率。因此,目前灵敏度分析的优化方法主要应用于平面和轴对称问题的分析。

5.2 微观遗传算法

遗传算法是一种全局优化算法,它借鉴生物界自然选择和进化机制发展起来的高度并行、随机、自适应搜索算法,它通过自然选择、遗传、变异等作用机制,实现了各个个体的适应性的提高,并逐步使种群进化到包含近似最优解的状态。遗传算法仍属随机型算法范畴,与多数随机型方法不同的是,它仅搜

索那些最有可能找到优化方案的局部区域,效率较高。由于精密锻造过程的优化的目标函数,通过有限元模拟进行求解,效率很低。因此,一般选择群体规模较少的微观遗传算法作为优化算法。

罗仁平等采用微观遗传算法对平面应变方坯锻粗和轴对称H型截面零件的锻造进行了预成形优化设计^[29-30];管婧以锻件形状和锻件微观组织分布均匀性为优化目标,采用微观遗传算法对锻造成形过程进行多目标优化研究,取得了良好的效果^[31]。

遗传算法稳定性、可收敛性强,对问题的复杂程度不敏感,理论上可以用于任何的精密锻造工艺与模具的优化设计。由于其收敛速度慢,而优化的目标函数求解困难、效率低,造成了优化过程的计算时间过长,影响了其在工程实践中的应用。

两种算法的比较来看,基于灵敏度的优化方法比遗传算法收敛快,但是程序设计复杂。灵敏度的优化方法对模型的复杂程度比较敏感,因此在模型简单、明确时选用基于灵敏度的优化方法,模型复杂、不明确是选用遗传算法。

6 精密锻造发展趋势的展望

精密锻造成形作为一种高效、节材的加工方法受到越来越多企业的重视,随着制造业的飞速发展,以及制造业企业市场竞争的日趋剧烈,企业对于精密锻造工艺的要求越来越高,也对精密锻造成形技术的研究提出了新的挑战,未来对于精密锻造成形的研究主要包括如下几个方面。

6.1 工件质量的进一步提高

为了进一步降低成本,目前精密锻造成形已经由精化毛坯的准净成形向直接生产零件的净成形发展。提高工件的尺寸精度是精密锻造成形工艺研究的重点方向,研究的内容主要包括如下几个方面。

1) 锻造系统的弹性补偿。精密锻造过程中,变形抗力较大,模具、设备和以及工件本身不可避免的发生弹性变形,并直接影响锻件的精度。对整个锻造系统的弹性补偿是进一步提高精密锻造成形精度的关键问题,也是一个难点问题。

2) 复合工艺方法的开发。随着成形零件工艺要求的不断提高,单一的精密锻造很难满足要求,这就需要开发复合成形工艺,将不同温度或不同工艺

方法的精密成形工艺结合起来,取长补短共同完成一个零件的加工制造,提高精密成形工艺的加工精度和应用范围。

6.2 多元化材料的应用

随着制造业的发展,材料应用由传统的黑色金属向多元化材料发展。例如在汽车、航天、能源领域大量应用各种高强度的合金钢和特殊材料,如钛合金等;在高速列车、大型飞机等制造领域,大量应用性能质量比较高的轻质合金,如铝合金、镁合金等。特种材料的精密成形是今后精密锻造成形的研究热点。

6.3 多尺度工件的加工

随着制造业的发展,机械零件向着极端化方向发展。例如近年来,以形状尺寸微小或操作尺度极小为特征的微机电系统,受到人们的高度重视,精密仪器、生物医疗等领域广泛应用,而由于“尺寸效应”的影响,关于微塑性成形技术的研究已经成为各国学者关注的焦点和学科的前沿。同样由于国家建设的需要,近年来出现了大量的大型机械零件,它们的精密锻造成形也是研究的热点问题。

6.4 设计周期的缩短

随着经济全球化的进一步发展,制造业企业的竞争日趋激烈,产品更新换代速度加快,要求企业缩短产品的设计、制造周期,对于精密锻造成形也是一样。提高精密成形工艺的设计效率主要依靠先进的CAD,CAM,CAE系统,以及智能化的工艺优化设计系统。CAD,CAM,CAE技术及其在精密锻造成形中的应用已经相对成熟,而智能化的工艺优化设计系统,目前处于研究和探索阶段,是今后研究的主要方向。

参考文献:

- [1] 赵军华,莫江涛,成国发,等.直齿锥齿轮精锻技术现状和发展[J].金属加工(热加工),2008,(17):15-18.
- [2] 王以华,张海英,周焯,等.典型精锻模设计实例第一讲精锻模设计基础(3)[J].金属加工(热加工),2008(9):72-75.
- [3] 张清萍,赵国群,栾贻国.直齿圆柱齿轮精锻成形工艺改进及模拟分析[J].锻压技术,2004,29(4):11-13.
- [4] 谢谈,贾德伟,蒋鹏,等.精密塑性成形技术在中国的应用与进展[J].机械工程学报,2001,37(7):100-104.
- [5] 蒋鹏.热锻、冷锻复合塑性成形技术[J].金属成形工艺,2000,18(1):27-29.
- [6] 张峥嵘,肖红生,尹平,等.温、冷精锻综合成形关键技术及其发展趋势[J].锻压装备与制造技术,2004,39(5):19-21.
- [7] 胡亚民,郑光泽,车路长.精密体积成形技术的现状及其发展[J].重庆工学院学报,2001,15(2):65-68.
- [8] 朱元胜,栾新民.常用模锻设备的结构性能特点及应用发展趋势[J].锻压装备与制造技术,2007,42(5):22-27.
- [9] ROSOCHOWSKI A. Die Compensation Procedure to Negate Die Deflection and Component Spring Back [J]. Journal of materials processing technology, 2001, 115: 187-191.
- [10] 王强,雷家,毛胜如.欧洲锻造工业的新进展[J].锻压机械,2001,36(3):3-5.
- [11] 赵国群,阮雪榆.多工位连续金属体积成形过程有限元模拟[J].锻压技术,1992,17(2):2-5.
- [12] YANG He, ZHAN Mei, LIU Yu-li. A 3D Rigid-viscoplastic FEM Simulation of the Isothermal Precisionforging of a Blade with a Damper Platform[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 122: 45-50.
- [13] 张清萍,赵国群,栾贻国,等.直齿圆柱齿轮精锻成形工艺及三维有限元模拟[J].塑性工程学报,2003,10(1):13-16.
- [14] 高永超,华林,赵玉民,等.汽车发电机磁极精锻成形三维有限元模拟和工艺优化[J].中国机械工程,2005,16(12):1110-1113.
- [15] 刘君,刘郁丽,杨合,等.基于多场耦合分析的TC4叶片精锻成形的微观组织模拟[J].塑性工程学报,2007,14(4):64-68.
- [16] LIN Yong-cheng, CHEN Ming-song. Numerical Simulation and Experimental Verification of Microstructure Evolution in a Three-dimensional Hot Upsetting Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 4578-4583.
- [17] KOBAYASHI S, OH SI, ALTAN T. Metal Forming and the Finite Element Method[M]. London:Oxford University Press, 1989.
- [18] HAN C J, GRANDHI R V. Optimum Design of Forging Die Shapes Using Nonlinear Finite Element Analysis [J]. AIAA J, 1993, 31: 774-781.

(下转第83页)

加工变形,拉伸强度会大幅提高、冲击值会大大降低。奥氏体不锈钢在冷加工时容易产生上述缺陷。

有晶间腐蚀的钢,稍受力即沿晶界开裂或粉碎开裂,晶间腐蚀后进行了弯曲试验,弯曲部分未出现上述现象,说明热煨后的组织结构得到充分软化,并具有很好的延展性,其应力也得到了很好的消除。

在感应热煨过程中,由于在碳化铬最容易产生的450~870℃范围内加热、冷却时保持的时间非常短,使处于固溶状态的不锈钢组织来不及析出碳化铬。另外,加热温度达到了1050~1150℃,加热后急速冷却,和固溶处理的条件相似,不会发生晶间腐蚀现象,上述结果也证明了这一结论。

3 结论

采用感应加热技术弯曲变形加工,在极短的时间(约几十秒左右)内将处于固溶状态的奥氏体不

锈钢加热到1050~1150℃,并急速冷却(如图2所示),各项力学性能和组织没有发生太大的变化,直接使用不会发生晶间腐蚀或者晶界断裂现象,可以不进行固溶或消除应力等处理。

由于感应加热时间非常短,致使感应热煨加工的弯管表面氧化层很薄,非常容易进行酸洗。而且由于感应加热径向加热温度均匀,使热煨后弯管各部分的性能相差很小。

采用感应加热技术,管内不会出现由于填沙等造成的异物附着现象,具有良好的外观和形状。

参考文献:

- [1] 史美堂,席聚奎,杨慧心,等. 金属材料及热处理[M]. 上海:上海科学技术出版社,1993:103-104,160.
- [2] GB/T 14976-2000,流体输送用不锈钢无缝钢管[S].
- [3] GB/T 4334.5-2000,不锈钢硫酸-硫酸铜腐蚀试验方法[S].
- [19] ZHAO Guo-qun, WRIGHT E. Computer Aided Preform Design in Forging Using the Inverse Die Contact Tracking Method [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1996, 36(7):755-769.
- [20] ZHAO Guo-qun, ZHAO Zheng-duo. Preform Design of a Generic Turbine Disk Forging Process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 84:193-210.
- [21] KANG B S, LEE J H. Development of a Methodology to Form Net-shape Nosing Shells by the Backward Tracing Scheme of the Rigid-plastic FEM [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1997, 137:737-750.
- [22] GAO Tao, YANG He, LIU Yu-li. Backward Tracing Simulation of Precision Forging Process for Blade Based on 3D FEM [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16:639-644.
- [23] ZABARAS N, GANAPATHY SUBRAMANIAN S, LI Qing. A Continuum Sensitivity Method for the Design of Multi-stage Metal Forming Processes [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2003, 45:325-358.
- [24] GANAPATHY SUBRAMANIAN S, ZABARAS N. The Continuum Sensitivity Method for the Computational Design of Three-dimensional Deformation Processes [J]. Comput Methods Appl Mech Engrg, 2006, 195:6822-6842.
- [25] ZHAO Guo-qun, WRIGHT E, GRANDHI RV. Forging Preform Shape Design Using Optimization Method [J]. International Journal For Numerical Methods In Engineering, 1997, 40:1213-1240.
- [26] ZHAO Guo-qun, WRIGHT E, GRANDHI RV. Sensitivity Analysis Based Preform Die Shape Design for Net-shape Forging Using Finite Element Method [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1997, 37:1251-1271.
- [27] GAO Zhen-yan, GRANDHI RV. Sensitivity Analysis and Shape Optimization for Preform Design in Thermo-mechanical Couple Analysis [J]. Int J Numer Meth Engng, 1999, 45:1349-1373.
- [28] GAO Zhen-yan, GRANDHI RV. Microstructure Optimization in Design of Forging Processes [J]. Int J Machine Tools & Manufact, 2000, 40:691-711.
- [29] 罗仁平. 金属体积成形过程预成形计算机辅助优化设计研究[D]. 上海:上海交通大学博士学位论文, 1999.
- [30] 罗仁平, 姚华. 预锻模形状设计优化的新方法——微观遗传算法[J]. 中国机械工程, 2001, 12(2):202-204.
- [31] GUAN Jing, WANG Guang-chun, GUO Tao, et al. The Microstructure Optimization of the H-shape Forgings Based on Preforming Die Design [J]. Materials Science Engineering A, 2009, 499:304-308.

(上接第38页)