

航空发动机塑性成形技术的应用与展望

Application and Prospect of Aeroengine Plastic Forming Technology

西安交通大学金属材料强度国家重点实验室
中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司

邵清安
李治华 孙立群 李晓光 杨 踊 周浩浩



邵清安

研究员级高级工程师,中航工业发动机模锻技术首席技术专家,主要从事航空发动机锻造技术研究工作,在国内外核心期刊发表论文多篇。

先进航空发动机结构和工艺特点

航空发动机作为飞机的“心脏”,是决定飞机性能的主要因素之一。人类在航空领域取得的每一次重大的

以科学的工艺管理理念为指导,以先进的工艺装备为支撑,不断提高我国航空发动机塑性成型工艺技术水平,逐步形成独具特色的,既满足行业需求,又能带动国民经济发展的工艺体系,必将成为我们新一代塑性成型技术研究相关领域技术工作者共同的追求。

革命性进展,无不与航空动力技术的突破和进步相关,航空发动机已成为一个国家科技水平、军事实力和综合国力的重要标志之一。随着航空科技的迅速发展,面临不断提高的国防建设要求,航空发动机必须满足超高速、高空、长航时、超远航程的新一代飞机的需求,航空发动机的结构越来越复杂,精度要求越来越高。涡轮风扇发动机一直处于航空发动机的技术前沿,已成为歼击机和民用干线飞机的主要动力。

在欧美等发达国家,推重比 10 的发动机已装备部队;推重比 12~15 的发动机有望在 2020 年左右完成型

号研制;推重比 15~20 的发动机和新概念航空发动机已经开始预研。

为了确保发动机的可靠性和提高推力,高性能发动机研制采用大量新材料、新结构,对制造工艺的要求也进一步提高。为此也相继研发了一系列高性能航空发动机关键制造技术,比如:

(1)轻量化、整体化结构件制造技术。

轻量化、整体化结构件制造技术包括整体叶盘制造技术及大小叶片、带冠复合材料风扇转子制造技术。

(2)宽弦风扇叶片制造技术。

F119 和 EJ200 等推重比 10 一

级的发动机均采用宽弦风扇叶片。F119的3级风扇叶片均为宽弦叶片。目前正在研究推重比15~20高性能发动机的复合材料风扇叶片,它是一种空心的、用连续碳化硅纤维增强的钛金属基复合材料(MMCS)制造成的叶片,是用超塑成形/扩散连接工艺制造的轻质量、高刚度、高耐冲击破坏强度的空心风扇叶片,可使发动机结构重量减轻14%。

(3)整体叶环制造技术。

推重比15~20高性能发动机,如某发动机的核心机第3、4级压气机为整体叶环转子结构。该整体叶环转子及其间的隔环采用TiMC金属基复合材料制造。目前,正在研究整体叶环结构制造技术是一种用单长丝缠绕金属基复合材料结构的制造技术。未来发动机的低压压气机叶片和静子叶片、压气机和涡轮整体叶环,以及涡轮轴、压气机机匣也将广泛采用这种复合材料制造。

(4)燃烧室新技术。

陶瓷基复合材料发汗式冷却火焰筒平均出口温度2000K,碳化硅基复合材料火焰筒壁温1480℃,瓦片式内壁燃烧室。

(5)高功率涡轮及转子制造技术。

碳化硅-碳复合材料涡轮导向器;整体式陶瓷材料JTAGG涡轮叶片;碳基复合材料涡轮部件;陶瓷基复合材料,尼卡隆/碳化硅纤维加强,涡轮间过渡段机匣;钼基和铌基合金材料。

(6)热障涂层技术。

高推重比发动机结构中将大量采用以热障涂层技术为代表的先进涂层技术。热端部件采用热障涂层以提高结构强度,其中有陶瓷涂层和多层隔热层。陶瓷热障涂层需在零件表面喷涂MCrALY底层,以提高结合强度。多层复合隔热涂层是在基体金属表面钎焊一层柔性金属纤维结构(HFe22.5Cr5.5Si00.1C

材料),可减少冷却气流80%。涡轮工作叶片和导向器的隔热涂层采用低压等离子喷涂涂敷,也可以采用电子束物理气相沉积(EB-PVD)涂敷。

采用以上的先进结构,可大大减轻发动机重量,从而进一步提高发动机推重比。而这些先进结构的制件均采用了先进的塑性成形技术。当然,材料的突破性发展以及设计与其相适应的结构也是非常重要的。

先进航空发动机对关键材料的需求

发动机高速高温的严酷使用条件、长寿命和高可靠性,把对材料的要求“逼到”了极限。国内外航空发动机行业公认,先进航空发动机推重比的提高,50%~70%的贡献需由材料及其制备技术承担;美国空军研究认为,材料对燃气涡轮发动机的竞争力起关键作用,21世纪的高推重比航空发动机“材料驱动因素”的贡献高达78%。

F-22战机用材中钛合金和复合材料约占整机重量的70%左右,而与其配套的F119发动机采用的高温合金和钛合金约占发动机重量的80%左右,发动机用部分关键结构材

料见表1。

随着航空发动机的发展,各种材料在发动机中的用量不断变化。总的趋势是从钢、铝逐渐转化成以钛、镍为主。未来的趋势是部分地被树脂基、金属基、陶瓷基复合材料和金属间化合物所取代。

先进航空发动机对新材料、新结构和新工艺的需求,必将对我国先进塑性成形技术提出新的挑战,为塑性成形新工艺、新设备的发展提供强大的原动力和空前的机遇。

塑性成形技术在航空发动机上的应用

塑性成形技术是指包括锻造、冲压、挤压、轧制及其他以材料发生永久变形为特点的材料成形方法,具有高产、优质、低耗等显著特点,已成为当今先进制造技术的重要发展方向,已广泛应用于航空发动机制造领域。本文主要从锻造技术和冲压技术两方面简单介绍塑性成形技术在航空发动机上的应用。

1 锻造技术在航空发动机上的应用

锻造技术作为一种传统的制造技术,已经在工业生产中发挥了重要作用,至今仍是一种不可替代的加工方法,锻造成形技术不但可以节材、

表1 发动机用部分关键结构材料明细

关键结构材料	钛合金	550℃阻燃钛合金机匣
		600℃高温钛合金双性能整体叶盘
		650℃高温钛合金整体叶盘
		Ti3Al及Ti2AlNb基合金环件
	高温合金	第三代单晶高温合金DD9
		IC9单晶Ni3Al金属间化合物材料
		第三代粉末高温合金双性能粉末涡轮盘
		粉末高温合金双辐板结构涡轮盘
		双合金整体结构涡轮叶盘
		Nb-Si系超高温燃烧室用结构材料
		IN718plus、720LI等系列改进盘合金
		800℃低膨胀合金环件
	复合材料	耐350液体成型聚酰亚胺复合材料研究
		二维整体编织液态成型复合材料整体化机匣
		三维整体编织复合材料

节能,缩短产品制造周期,降低生产成本,而且可以使金属流线沿零件轮廓合理分布,获得更好的材料组织结构与性能,从而可以减轻制件的重量,提高产品的安全性、可靠性和使用寿命,在我国获得了广泛的工业应用。

(1) 高温合金压气机盘和涡轮盘锻造技术。

高温合金压气机盘、涡轮盘的冶金质量是航空发动机研制的重中之重。热工艺参数和设备能力是影响盘件组织和性能非常重要的因素。常用的成形方法有:液压机和打击锤常规锻造(高强、直接时效);等温锻造、螺旋压力机常规锻造,图1所示为盘类锻件。

(2) 钛合金锻件锻造技术。

锻造工艺不仅可以使锻件在外形和尺寸上接近成品,对于改善钛合金组织以及提高其性能也有着重要的作用^[1]。钛合金锻件已经广泛应用于航空航天制造业中。在飞机发动机中,钛合金锻件也是不可或缺的材料,主要用于使用温度在853K以下的风扇和压缩机零件。典型的使用部位有风扇叶片、外壳、盘件、压气机叶片、盘件、短轴、外壳等。常用的成形方法有:钛合金制造风扇盘、压气机盘常规模锻;整体盘轴、整体叶盘等温模锻;整体机匣轧制、模锻、等温锻。

(3) 钛合金叶片无余量精密锻造技术。

叶片精锻技术是在三代机研制中发展起来的一种先进的叶片锻造技术,采用高精度的锻造设备、完善的检测和辅助处理工艺,可使叶片型面及缘板面达到无余量状态。该技术的应用可提高锻件尺寸精度,保证叶片内部金属流线的完整性,提高产品可靠性,同时降低叶片加工成本,提高叶片的生产效率。

国外成熟应用叶片精锻技术的企业主要有美国的普惠、英国的罗

罗、德国的蒂森等公司,国内西航公司具备较强的叶片精锻技术能力,某些机种的叶片已较成熟地应用了精锻技术。

(4) 环形件精密轧制技术。

矩形截面和异型环件轧制技术是目前我国生产航空发动机高温合金和钛合金机匣、火焰筒或安装边等无缝环件普遍采用的工艺方法。

国外薄壁类环件零件用毛坯的成形采用精密轧制加胀形技术,锻件形状与零件非常接近,材料利用率很高。而国内环件零件用毛坯大部分采用矩形截面的轧环,材料利用率很低,特点是机匣类零件材料利用率不足10%。目前虽有部分锻件已采用异形截面的轧环,但无论从形状相近程度还是余量上均与国外存在着很

大的差距。

目前,国内正在针对钛合金、高温合金、金属间化合物和阻燃钛合金等新材料开展径轴双向轧制技术研究,突破矩(异)形截面机匣小余量(单面1.5~3mm)轧制成形技术,同时进行环件胀形工艺研究,提高环件锻件的表面质量和尺寸精度(高温合金环件见图2)。

(5) 锻造过程数值模拟技术。

数值模拟技术是利用高速发展的现代计算机技术,对金属热态塑性变形过程和热处理过程进行数值分析。将传统的“反复现场试验”搬到计算机中进行。详细揭示各个工艺参数的影响规律,从而达到“先验、可视、高效、细致”的效果,可以极大地提高工艺设计的科学性。



图1 高温合金盘类锻件



图2 钛合金、高温合金环形件

(6) 叶片精密冷辊轧技术。

精密冷辊轧技术不仅使加工技术简化,更重要的是可使叶片的机械性能、产品质量和使用性能得到提高,有利于叶片材料潜在性能的发挥。

冷辊轧技术在国际上得到广泛重视,美国采用辊轧工艺制造 17-4PH、AM-350 型小尺寸钢叶片和 Inconel 型低合金叶片,GE 公司在压气机上采用辊轧技术大约降低成本 30% 左右。俄罗斯成功地研制出 Э П 718 高温合金冷辊轧叶片,已将辊轧技术应用于三代机高温合金压气机叶片制造 20~30 年。

“十一五”期间,我国已采用冷辊轧技术成功研制了某合金的转、静子叶片,其中静子叶片已在发动机上应用。

2 冲压技术在航空发动机上的应用

冲压技术应用范围十分广泛,在国民经济各个工业部门中,几乎都有冲压加工或冲压产品的生产。由于冲压加工具有节材、节能和生产效率高的突出特点,决定了冲压产品成本低廉,效益较好,在航空发动机制造中占有重要地位。

(1) 不锈钢、高温合金、钛合金板料冲压成形工艺。

不锈钢、高温合金、钛合金板料冲压成形工艺包括弯曲、拉深、胀形、翻孔、翻边、热成形等,旋压校正零件型面,聚氨酯软凸模成形校正。

(2) 不锈钢钛合金高温合金导管成形工艺。

不锈钢钛合金高温合金导管成形工艺包括拉弯、压弯等,基于不同连接方式的需要,管端有扩口、翻边、扩径、缩径、压筋等成形加工。

(3) 板料特种成形工艺。

钣金冲压件以其独特的优点在航空发动机制造中占有非常重要的地位,应用范围十分广泛。从发动机最前端的整流罩到最末端的尾喷口,随处都有冲压件,据统计,冲压件数

量能占到 30% 以上。为了满足航空发动机钣金冲压件形状复杂、超高精度的要求,需要大力发展充液成形、冲压成形仿真、温热成形、超塑性成形等精密冲压成形技术,并开展各种技术的集成应用研究。

(4) 导管特种成形工艺。

导管因为能够满足轻量化、强韧化和低消耗等方面的要求,在航空、航天、船舶、化工、建筑等方面获得了广泛应用^[2],这些导管外部承受高温、变形以及高频振动,内部要承受流体的脉动冲击,工作条件相当苛刻。因此,只有控制和提高导管的成形精度与加工质量,才能满足严格的使用要求。

常用的导管特种成形工艺有:常温及高温数控弯曲技术,异型管、小弯曲半径弯头的推弯、内高压成形技术,无扩口内滚压连接技术。

(5) 其他成形技术。

板料高效连续落料技术、高温合金板材激光弯曲技术、钛合金机匣热胀型技术及 SPF-DB 超塑成形-扩散焊技术。

国内航空发动机塑性成形技术总现状:叶片精锻和精密辊轧、整体叶盘等应用不足,复杂整体模锻构件较少,闪光焊机匣、高性能挤压制坯模锻粉末盘未应用;管材弯曲、钣金机匣冷温胀型、扩散焊技术还不成熟。大型冲压、模锻设备数量较少,装备的数字化自动化程度低,模具寿命低。

塑性成形技术发展趋势

1 锻造技术发展趋势

锻件是构成飞机骨架的主要承力构件,是发动机转子中的主要组成部分,其制造水平对飞机和发动机所能达到的最高性能水平、可靠性寿命和技术经济效益有重大影响。精密锻造成形工艺和锻造成形装备的数字化、自动化、精密化、专门化和绿色化是精密锻造成形技术以后发展

的重要内容。

(1) 高温合金粉末盘制造技术。

第 2 代涡轮盘粉末 Ni 基合金于 20 世纪 80 年代研制成功,包括 Rene88DT (1988)、DTP IN100、N18 RR1000、Э П 962 П、Э П 975 П 与 Э П 962 Н П。

其成分特性是:降低了 Al、Ti 与 Nb 的含量,从而降低了 γ' 相含量;提高了 W、Mo 与 Co 的含量,加强了固溶强化效果,弥补了由 γ' 相含量低引起的强度下降;增加了 Cr 含量,提高了抗氧化性。

其性能特点是:与第 1 代粉末 Ni 基合金相比,抗拉强度降低,蠕变强度、抗裂纹扩展与抗损伤能力提高,工艺性能改善,设计的使用温度达到 700℃,实现了由高强度型向耐损伤型的转变。

采用的工艺主要包括 AA 制粉+(HEX)+ITF 工艺和双重热处理工艺 (DTP)。

这代合金已经应用于 CF6-80E1、CFM56-5C2、GE90、F120、F119、F135 和 M88 发动机高压和低压涡轮盘上。

第 3 代涡轮盘粉末 Ni 基合金于 20 世纪 90 年代研制,包括 CH99、C498、ME3、Alloy10、LSHR、NR3、NR4、NR6 与 HSR-EPM。

其成分特性是:对合金成分进行重新设计、组合和采用精益的特殊工艺,改进合金成分和显微组织特性。

其性能特点是:抗拉强度高于第 2 代,低于第 1 代;裂纹扩展速率低于第 2 代合金;使用温度超过 750℃;使用寿命长;固溶温度低;可加工性强。

采用的工艺主要包括双重热处理、真空定向热处理、双显微组织热处理 (DMHT)、选择性热机械处理等。

ME3 已经应用于 GE90 和 GP7200 发动机第 1 级高压涡轮盘上。

(2) 单合金双性能粉末涡轮盘制造技术。

PW 公司将双重热处理的 IN100 单合金双性能粉末盘成功地应用于 F119 发动机的单级高、低压涡轮上。该轮盘轮缘损伤容限能力提高, 适应榫槽可能出现的微裂纹; 轮毂部分强度提高, 满足强度和低循环疲劳的要求。

PW 公司还将 AF2-1DA 合金粉末经热等静压、挤压制坯和超塑性锻造成盘件, 再进行真空定向热处理, 采取控制温度梯度的方法, 在轮缘和轮辐部分获得不同的晶粒尺寸和性能。

在 (UEET) 计划下, NASA Glenn 研究中心研究了 Alloy10 双显微组织涡轮盘的可行性。

(3) 金属间化合物锻造技术。

在美国 IHPTET 研究计划下开展的“部件和发动机结构评估研究”(CAESAR) 分研究计划下, 对 γ TiAl 材料完成了结构评估试验。在联合攻击战斗机和 F-22 战斗机的发动机试验环境下, 证实了其部件的耐久性。

在配装 XTC66/SC 核心机的 F119 发动机上, 验证了采用 γ -TiAl 材料制造的第 6 级压气机转子叶片和采用 α -2 Ti3Al 材料制造的第 5 级压气机转子叶片的性能, 同时验证了为这些叶片的设计、制造和试验所建立的新设计准则。

TiAl 转子叶片在 GE 公司 CF6-80C2 发动机的第 5 级低压涡轮上完成了试验验证, 并已经应用到 GENx 发动机低压涡轮上。

据 NASA 估计, 到 2020 年, TiAl 材料有望占航空发动机材料总量的 20%~25%。

(4) 环件精密轧制技术。

环件精密轧制技术是机械零件制造技术与轧制技术交叉复合而成的环形零件连续局部塑性成形新技术, 它具有省力、节能、节材、生产率

高、生产成本低、产品范围广等显著特点。目前, 国内拥有环件轧制设备的厂家主要生产的产品毛坯大部分为矩形截面环件。对于非矩形截面的环件轧制, 因设备本身存在的特点和截面的复杂程度不同, 在我国还很少有人研究。国外已经采用环件轧制方法来生产薄壁环件。环件精确辗轧技术具有精化程度高、整体成形等优点。美国 IN718 合金高筒薄壁环: 晶粒度达到 ASTM-8 级以上, 材料利用率 25%~30%, 尺寸精度为外径的 1/1000。

随着数控技术和模拟技术在生产中的广泛应用, 轧制环件也逐步向新材料、高筒壁、大尺寸异形薄截面等高难度工艺发展, 环件的组织性能逐步提高, 进一步向低应力、长寿命阶段发展。采用轧制新工艺技术将大幅度提高生产效率、产品质量及材料利用率, 降低能源消耗, 改善劳动条件。钛合金环轧件如图 3 所示。

(5) 闪光焊环胀形技术。

为提高航空发动机性能, 降低零件重量, 设计上现已广泛采用钛合金、高温合金大型薄壁机匣结构。难加工材料的广泛应用以及机匣结构的先进, 迫使机匣件制造过程中, 引进了许多先进的制造技术。闪光焊环胀形技术是将闪光焊技术及胀形技术应用于大型薄壁机匣的成形, 该

技术可有效简化工艺流程, 大大提高材料利用率。国外某大型薄壁机匣闪光焊接生产工艺流程: 挤压型材→型材弯曲→闪光对接焊→焊后热处理→胀形。

2 冲压技术发展趋势

新型航空发动机钣金冲压件呈现出以下趋势: a. 形状更复杂; b. 尺寸和形位精度要求更高; c. 材料更薄; d. 新材料使用多; e. 要求表面完整性好、抗疲劳性能好。这些都对板材冲压成形技术提出新的挑战。

随着数字化技术、信息技术、自动化技术、测控技术等的发展, 在新材料、新结构、高技术含量的钣金冲压件研发需求拉动下, 冲压成形技术在深度和广度上都取得了前所未有的发展。特别是特种冲压成形技术取得更大的进步, 一些特种成形技术在航空发动机上的应用也取得较大发展。

(1) 基于知识的冲压成形模拟仿真技术。

在现代冲压生产中采用计算机仿真技术指导生产, 可使技术人员非常直观地在计算机屏幕上观察到工件材料的变形和金属流动的情况, 获得在冲压成形过程中工件的位移、应力、应变的分布, 并通过观察位移后工件的变形情况, 预测可能产生的缺陷, 如: 破裂、起皱、颈缩等, 以及在

成形过程中所需的载荷以及工件成形后的回弹、残余应力的分布。从而根据已有的专业知识和生产经验实时调整模具参数和成形工艺。降低物耗、节约生产成本、减少新产品的开发时间, 提高产品的质量, 增强产品的市场竞争能力。采用计算机仿真技术是



图3 环件精确辗轧技术

技术人员进行模具及加工工艺设计的有力工具^[3]。

(2) 热介质成形技术与充液成形技术。

热介质成形技术是 21 世纪初期提出的一种先进的柔性成形技术^[4-6]。该技术利用高温橡胶等粘性介质、液态的等离子水和高温高压油、固态的特种粉末等作为软凸(凹)模,再配合刚性凹(凸)模,在热介质的作用下使板材成形。该技术可显著提高材料的成形性能;可以完成常温下难以成形材料的加工;材料加热条件下变形抗力小,可以降低成形设备吨位;减小复杂零件的加工难度等优点,可应用于汽车等民用领域、航空航天精密复杂构件、有特种功能和轻量化要求的军事装备等零件的加工^[7]。

充液成形是利用液体压力使工件成形的一种塑性加工工艺。按使用坯料形式的不同,可以分为 3 种类型: 板材充液成形、壳体充液成形和管材充液成形。板材和壳体充液成形使用的成形压力一般较低,而管坯充液成形使用的压力较高,故也称内高压成形。

充液成形技术具有以下突出优点: a. 大大提高成形极限,减少拉深次数; b. 抑制内皱产生; c. 提高零件的形状和尺寸精度; d. 零件表面精度高; e. 厚度分布均匀; f. 简化模具结构、降低模具成本、缩短模具制造周期; g. 成形零件可以很复杂。该技术非常适用于航空发动机零件超复杂、高精度、高性能等要求,因此在航空发动机制造领域具有非常广阔的发展前景。目前应用该技术已成功制造出航空发动机用薄壁微截面精密钣金件等。

(3) 橡皮成形技术。

橡皮成形技术属于金属板材塑性成形范畴,是指用橡皮垫或液压橡皮囊作为通用凸模或凹模,将金属板材按照刚性凸模或凹模加工成形的

方法。橡皮囊成形以其高度的柔性及高精度,已经广泛应用在飞机制造领域。橡皮复合成形采用聚氨酯橡胶制造凸模或凹模,还可以通过灵活增加或撤销橡皮垫能够实现零件的成形。该技术在航空发动机制造领域应用较广,主要应用于薄壁回转体零件的精密校形。

(4) 复合成形技术。

塑性加工业是制造业的重要组成部分,它的进步表现在由过去单一塑性成形发展为现在的复合塑性成形,塑性加工业的复合化一直是技术创新的一种手段。

复合塑性成形是将不同种类的塑性加工方法加以组合或是将其他塑性成形方法与塑性加工方法相结合,达到显著节能、节材效果的一种加工新方法、新技术;复合塑性成形方法很多,如较早的有液态模锻和粉末锻造;热、冷锻复合技术;冲压冷锻复合技术;精密辊锻精锻技术;铸、锻复合技术;半固态成形技术。

复合塑性成形技术是将原来塑性体积成形技术的加工对象由棒料扩展到热锻件、冲压件、压铸件、半固态金属、液压金属或粉末金属材料,并将其不同的工艺特点加以有效地利用,从而能获得良好的经济技术效果。复合成形技术“扩展了塑性加工领域”给研究发展塑性加工新技术提供了更加广阔的舞台。

(5) 薄壁冲压件/管件抗疲劳制造技术。

根据国外的统计,在现代工业各个领域,大约有 80% 以上的结构强度破坏是由于疲劳破坏造成的。因此,机械零件的抗疲劳制造已成为现代工业生产中的重要课题。

冲压件/管件以其独特的优点在航空发动机中占有非常重要的地位,应用范围十分广泛。从发动机最前端的整流罩到最末端的尾喷口,随处都有冲压件/管件。为了适应航空发动机零件高性能、高可靠性和

长寿命要求,需要开展冲压成形件抗疲劳制造技术研究。

结束语

先进制造技术是高性能航空发动机技术发展的基础,发动机技术的发展越来越依赖于材料和工艺的进步。同时,高性能航空发动机的需求和发展又促使制造技术迈向更高的水平。下大力气开展高性能航空发动机制造技术研究,特别是塑性成形技术的研究,在消化吸收国际先进经验的基础上,结合我国航空发动机行业发展的实际需要,开展自主工艺创新。以科学的工艺管理理念为指导,以先进的工艺装备为支撑,不断提高我国航空发动机塑性成形工艺技术水平,逐步形成独具特色的,既满足行业需求,又能带动国民经济发展的工艺体系,必将成为我们新一代塑性成形技术研究相关领域技术工作者共同的追求。

参考文献

- [1] 张行健,吕宏军,王琪,等. 钛合金模锻工艺的研究进展. 材料导报,2007, (21): 95-98.
- [2] 杨合,孙志超,林艳. 面向 21 世纪的先进塑性加工技术与管成形研究发展. 中国科学协会第二届学术年会文集,北京: 科学技术出版社,2000.
- [3] 龚红英,何丹农,张质良. 计算机仿真技术在现代冲压成形过程中的应用. 锻压技术,2003(5):35-38.
- [4] Zhang S H, Danckert J. Development of hydro mechanical deep drawing. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 83 (3): 14-25.
- [5] Zhang S H, Lang L H, Kang D C, et al. Hydromechanical deep-drawing of aluminum parabolic work pieces—experiments and numerical simulation. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(10): 1479-1492.
- [6] 刘合军,郎利辉,李涛,等. 高强度铝合金板材的温热介质充液成形研究. 塑性工程学报,2009,16(1):31-36.
- [7] 杨潘. 液压成形技术在汽车轻量化中的应用. 模具制造,2009(5):14-18.

(责编 小城)