

DOI: 10.11973/jxgccl202010002

# 应用于装备轻量化铝合金构件液态模锻成形技术的研究进展

张 新<sup>1</sup>,陈 刚<sup>2</sup>,李宏伟<sup>3</sup>,陈 彤<sup>1</sup>,王长顺<sup>3</sup>,徐兰军<sup>1</sup>,杜之明<sup>4</sup>,秦绪坤<sup>1</sup>

1. 新兴际华集团有限公司技术中心/研究总院,北京 100070;

2. 哈尔滨工业大学(威海)材料科学与工程学院,威海 264209;

3. 北京北方车辆集团有限公司北京市特种车辆关键部件制备与评估工程技术研究中心,北京 100072;

4. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院,哈尔滨 150001)

**摘要:**在轻量化需求日益提升的大背景下,具有优良成形性能的液态模锻成形技术得到广泛的关注。总结了装备轻量化设计准则以及轻量化设计的关键要点,介绍了液态模锻成形铝合金在装备中的应用,从工艺原理与特点、成形材料、成形模具、成形设备等方面对液态模锻成形铝合金技术的研究进展进行了综述,最后提出了该技术今后的研究发展方向。

**关键词:**装备轻量化;铝合金构件;液态模锻成形技术**中图分类号:** TG379      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3738(2020)10-0006-06

## Research Progress on Liquid Die Forging Technique of Aluminum Alloy Components for Lightweight Equipment

ZHANG Xin<sup>1</sup>, CHEN Gang<sup>2</sup>, LI Hongwei<sup>3</sup>, CHEN Tong<sup>1</sup>, WANG Changshun<sup>3</sup>,  
XU Lanjun<sup>1</sup>, DU Zhiming<sup>4</sup>, QIN Xukun<sup>1</sup>

1. Technology Center/Central Research Institute, Xinxing Cathay International Group, Beijing 100070, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Harbin University of Technology (Weihai), Weihai 264209, China;

3. Technology Center of Special Vehicle Manufacture and Evaluation Engineering of Beijing,

Beijing North Vehicle Group Co., Ltd., Beijing 100072, China;

4. School of Materials Science and Engineering, Harbin University of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Under the background of increasing demand for lightweight, liquid die forging technique with excellent formability has been widely concerned. The lightweight design criteria and key points of lightweight design of equipments are summarized, and the application of liquid die forging aluminum alloy in equipments is introduced. The research progress on liquid die forging technique of aluminum alloy from the aspects of process principle and characteristics, forming materials, forming die and forming equipment is reviewed. Finally, the research and development direction of this technique in the future is put forward.

**Key words:** equipment lightweight; aluminum alloy component; liquid die forging technique

## 0 引言

轻量化是机械、武器、航空、应急救援等装备的发展方向<sup>[1-2]</sup>。装备轻量化技术是一个系统工程,与

装备整体性能密切相关,追求装备质量、性能和成本等因素的综合优化效果。轻量化技术依靠轻量化设计、轻量化材料和轻量化制造技术等多项技术的集成优化与应用得以实现,其中轻量化材料的研究、开发与应用是轻量化技术中最容易实现且成本最低的研究方向,成为装备轻量化发展的主方向<sup>[3-4]</sup>。

轻量化材料一般包括铝、镁、钛和钢质差厚板等材料<sup>[5]</sup>,其中铝合金性能优良,在密度、比强度、比刚

收稿日期:2019-10-21;修订日期:2020-08-17

基金项目:北京市科技计划项目(Z191100001419014,Z11111005530000);

新兴际华集团公司重点研发计划项目([2018]7001)

作者简介:张新(1980—),男,江苏丰县人,研究员,博士

度、电磁屏蔽及抗阻尼性能等方面具有较大的优势,是优良的结构和功能材料,成为轻量化材料的首选而大量应用在各种装备关键零部件上。铝合金关键零部件的轻量化成形工艺主要包括液态模锻、挤压铸造、重力铸造、锻造以及近几年发展起来的3D打印、多点成形工艺等,所成形的结构件具有较广的应用范围,如飞机结构件,汽车的轮毂、方向盘与摆臂,坦克负重轮,火车气缸与活塞裙,以及一些端盖件、连杆等<sup>[6-7]</sup>。随着轻量化技术的发展,一些铝合金结构件的结构变得更加复杂,性能要求更高,传统的铸造、锻造等成形方法已无法满足其要求。在轻量化需求日益提升的大背景下,具有优良成形性能的液态模锻成形技术日益受到关注<sup>[8-9]</sup>。

铝合金构件液态模锻轻量化成形技术涉及到铝合金装备结构设计、铝合金制备技术、液态模锻成形技术、合金组织与缺陷控制技术、热处理技术、模具设计与制造技术等多项技术,其研究对于装备轻量化技术的发展有着重要的意义。为了给相关研究人员提供参考,推动和促进液态模锻轻量化成形技术的发展,作者对铝合金构件液态模锻轻量化成形技术的研究进展进行了探讨,并展望了该技术的发展趋势。

## 1 轻量化设计准则

装备轻量化主要包括整体结构轻量化设计、新材料与新工艺的轻量化应用两种方法<sup>[10-11]</sup>。新材料、新工艺的轻量化方面主要采用以铝代钢、以铝代铜等方法,并探索更优化的成形方法。装备结构轻量化设计是轻量化关注的重点,主要方法有尺寸优化、形状优化、拓扑优化及多学科、多目标优化等<sup>[12-13]</sup>。在装备结构轻量化设计中,装备零部件一般按强度设计准则设计,受力状态不同,其强度设计准则也不同。在轻量化设计时需要同时关注以下几个因素:(1)材料抗弯强度与抗拉强度比例系数的影响;(2)抗弯截面系数或抗扭截面系数的影响;(3)材料表面处理工艺的影响;(4)应力状态、失效模式和抗力指标等主要因素以及应用环境指标参数的影响<sup>[14]</sup>。

## 2 液态模锻成形铝合金在装备中的应用

钟群鹏等<sup>[15]</sup>在对铁、镍、钛、铝、镁和钴等几种典型结构材料进行轻量化结构设计时发现,铝合金在材料研究基础、工艺成形技术和经济性等方面具

有较大的优势,这也是铝合金成为轻量化结构首选材料的主要原因。国内外相关学者对液态模锻成形用铝合金进行了一系列研究,以期寻求与该成形技术匹配的铝合金系列,从而推动装备轻量化的发展。DU等<sup>[16]</sup>采用简单加载和复合加载两种方式对2A50铝合金进行负重轮液态模锻成形,成形件性能达到了要求,应用到装备上后,装备轻量化效果明显,装备的机动性能得到大幅提升。王长顺等<sup>[17]</sup>针对某重型装备轻量化的需求,对ZL205A高强铸造铝合金进行了液态模锻成形,成形件的各项性能均达到了设计要求,装备整体轻量化效果明显。此外,A356、A357、ZL105、7055、7075等铝合金也适用于轻量化构件的液态模锻成形<sup>[18-19]</sup>。

提高铝合金强度为装备的进一步轻量化提供了空间,其中应用较为广泛的铝合金为2A50和ZL205A铝合金,但在液态模锻成形过程中表现出成形性能差、热裂倾向大、铜元素偏析严重等缺陷,因此难以实现液态模锻铝合金构件的进一步轻量化。为了进一步提高铝合金液态模锻成形件的性能和应用范围,需要开发一系列新型液态模锻用高强高韧铝合金。周泽军等<sup>[20]</sup>结合铸造铝合金ZL205A与变形铝合金2A16的特点,设计出了一种新型高强高韧液态模锻Al-Cu合金,其化学成分(质量分数/%)为0.7~1.2Si,0.7Fe,1.8~2.6Cu,0.4~0.8Mn,0.4~0.8Mg,0.10Ni,0.3Zn,0.15Ti,新Al-Cu合金液态模锻成形件的性能优良、组织均匀,达到了设计要求,为实现装备的进一步轻量化提供了基础。李天生等<sup>[21]</sup>采用多因素正交试验对一种适合液态模锻成形的铝合金的化学成分进行了优化,优化后的成分(质量分数/%)为3.0Mg,0.3Si,1.2Cu,0.7Zn;在120 MPa压力下液态模锻成形并进行相关热处理后,在合金 $\alpha$ (Al)相基体上析出了S(CuMgAl<sub>2</sub>)相以及具有强时效效应的 $\eta$ (MgZn<sub>2</sub>)相与T(Mg<sub>3</sub>Zn<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>)相,成形件的抗拉强度大幅提高,硬度升高。

随着轻量化要求的不断提高,在液态模锻成形技术和铝合金制备技术发展的基础上,适用于液态模锻成形用铝合金不断出现,促进了液态模锻成形和轻量化技术的发展。徐纪平<sup>[22]</sup>发明了一种圆锥齿轮用高强度液态模锻成形锌铝合金;马春江<sup>[23]</sup>发明一种重载汽车用铝合金车轮液态模锻成形专用铝合金及成形方法;高士学<sup>[24]</sup>以6061铝合金为基础,调整合金成分,设计了一种流动性较好、适合液态模

锻成形的铝合金。

国内外学者也对铝合金复合材料液态模锻成形技术进行了相关研究。贾海萌<sup>[25]</sup>制备了液态模锻成形 SiC<sub>p</sub>/2A50 复合材料履带板,经 T6 处理后,履带板的力学性能和摩擦磨损性能均得到显著提高,为装备履带式行走系统的轻量化提供了较大空间。曹健峰等<sup>[26]</sup>通过熔体反应法-液态模锻成形技术成功制备了(Al<sub>3</sub>Zr+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/A356 复合材料,该复合材料的性能优于金属型成形的复合材料。

### 3 液态模锻成形技术的原理与研究进展

#### 3.1 工艺原理和特点

液态模锻成形工艺是指在成形时将定量的金属熔融液浇注入模腔内,然后在较高压力下进行凝固、二次挤压成形,从而获得无铸造缺陷的液态模锻制品。该工艺综合了铸造与锻造成形技术的优点,成形件既具有铸造件的结构复杂的特点,也具有锻造件性能优良的特点,同时该工艺还具有省力、节能、材料利用率高等优点<sup>[27]</sup>。洪慎章<sup>[28]</sup>采用液态模锻、压力铸造、普通锻造工艺生产了各种铝合金零件,通过对比发现液态模锻成形技术是装备轻量化最经济、最有效的成形技术。

#### 3.2 研究进展

##### 3.2.1 国外研究进展

20世纪30年代,前苏联科学家乌里托夫斯基最先提出了液态模锻成形方法,起初用于铜合金轴承套的液态模锻成形,随后其产品类型和生产规模都得到极大扩张,产品质量得到进一步验证,工业化应用得到迅速扩展。随后的30多年,前苏联液态模锻成形厂家已达150家,相关产品约200多种。专著《液态金属模锻》的发表使液态模锻成形技术得到确立,但是随后液态模锻成形技术的发展比较缓慢。

近几十年来,随着装备制造业和轻量化技术的发展,液态模锻成形技术,尤其是以铝合金为代表的有色金属液态模锻成形技术得到迅速发展,并扩展到多种类型的产品,例如:美国M101式炮在采用液态模锻成形铝合金制造大架、摇架、前座板、左右耳轴托架等构件后,火炮质量由轻量化前的3.7 t降到1.4 t,射程提高了35%~40%;美国M777 155 mm大口径火炮中大量采用液态模锻成形铝合金结构件,轻量化效果明显,实现了直升机空运空投,大大提高了战斗力;采用液态模锻成形铝合金制造的军方装备,轻量化效果非常明显。因此,液态模锻成形

技术已经成为装备轻量化的一大主流技术。

国外对液态模锻成形技术的研究较多。RAJAGOPAL<sup>[29]</sup>探讨了合金液、成形控制、模具结构和温度等参数对A356合金液态模锻成形件组织与性能的影响规律,总结出A356合金液态模锻成形的技术要点。JOLLY<sup>[30]</sup>结合液态模锻成形和无机纤维与晶须预制等技术得到了选择性增强铝基复合材料制件,该制件的力学和物理性能得到明显改善。日本丰田公司与宇部公司联合研发了垂直压射系统(VSC),所得液态模锻成形铝合金轮毂的孔洞缺陷数量显著减少,同时轮毂的组织、力学性能和疲劳性能得到较大改善。SARFRAZ等<sup>[31]</sup>研究了挤压压力、熔体温度和模具温度对铸态和原位热处理液态模锻 Al-3.5%Cu 合金铸件抗拉强度、断后伸长率和硬度的影响,发现挤压压力是最重要的输入变量,其次是模具温度,熔体温度的影响最小。

国外还对铝基复合材料液态模锻成形技术进行了研究和应用。日本丰田公司开发了金属基纤维增强发动机活塞液态模锻成形技术,成形后活塞的膨胀性、耐磨性能等均得到显著改善<sup>[32]</sup>。ASANO<sup>[33]</sup>采用液态模锻成形技术对不连续碳纤维增强纯铝和高硅铝合金进行了研究,发现纤维的随机排列导致了复合材料的各向异性;在平行方向上的纤维增强材料可提高复合材料的热导率,而在垂直方向上的则降低了热导率;碳纤维增强纯铝的验证应力随补强而增大,特别是平行方向的验证应力,而碳纤维增强高硅合金的验证应力随补强而减小。SRINIVASAN等<sup>[34]</sup>采用液态模锻成形工艺制备了混杂金属铝基复合材料(HMMCs),其中ZrO<sub>2</sub>陶瓷颗粒用于提高铝基复合材料的抗拉强度,而碳用于改善传热性能,研究表明ZrO<sub>2</sub>和碳颗粒在铝基复合材料中分布均匀,晶粒细小,材料的抗拉强度和硬度得到显著提高。

日本宇部公司在液态模锻成形设备研制方面,不论是提高设备成形效率还是降低设备使用成本均走在了世界前列,其研制的HVSC 和 VSC 两种系列的液态模锻机将液态模锻成形方式和设备水平推到了一个新的高度<sup>[35-36]</sup>。随后,欧美等国家相继对液态模锻成形方式和成形设备进行了改进,大大推动了液态模锻成形技术的发展和液态模锻设备的应用。瑞士布勒公司率先通过低速充型、实时控制的方法在卧式压铸机上实现液态模锻成形,同时开发了新一代实时压射控制机构,不仅能避免气体的卷

人,同时还能对速度和最终压力曲线进行编程,从而实现液态模锻成形的过程质量控制。荷兰 Prince Machine 公司、法国 JL 公司以及美国 Grandville 和 Michigan 公司基于液态模锻成形技术联合开发了“满料筒”成形技术。近现代以来,随着计算机控制技术的发展,新型智能化液态模锻设备不断涌现,定量浇注技术、机器人操作臂、自动化热处理等先进技术的发展促进了液态模锻成形技术的进步,实现了自动化液态模锻生产,大大提高了生产效率<sup>[37-38]</sup>。

### 3.2.2 国内研究进展

随着产品性能和轻量化需求的提高,国内液态模锻成形技术也有了长足的进步,从最初的模态模锻逐步发展到半固态液态模锻成形技术,并在液态模锻成形过程中应用数理统计方法、智能控制以及振动、超声等先进技术,建立了液态模锻成形的物理模型,研究了金属液凝固和塑性变形机制,提出了工艺参数优化和确定的准则,并对成形材料和成形设备进行了深入研究。

国内在液态模锻成形技术与成形理论方面都取得了一定的进步。计国富等<sup>[39]</sup>发明了一种铝合金车轮液态模锻及旋压加工系统,包括液态模锻、热处理装置、机加工装置以及旋压装置,由液态模锻机生产出的铝合金车轮毛坯依次经过热处理、机加工以及旋压加工过程;该发明利用液态模锻提升轮辐性能,利用旋压加工提升轮辋性能,从而提升车轮产品的整体性能,降低废品率,降低成本,提升整体的生产效率。刘忠锁<sup>[40]</sup>发明了一种应用于商用车轮毂的 A357 铝合金液态模锻工艺,通过优化合金成分,结合液态模锻工艺制备出车用轮毂,轮毂的显微组织得到明显改善,缩孔、疏松、气孔、裂纹等内部缺陷数量明显减少;该工艺具有生产效率高、流程短、工艺成本低、节能、环境污染少、经济效益和社会效益明显等优点。王尔德等<sup>[41]</sup>将金属的凝固理论与塑性变形理论相结合,首次给出了液态模锻谐调方程,从理论上指出压下速度的作用及液态模锻对设备工作速度的要求,这对液态模锻成形技术的实践具有重要意义。罗守靖等<sup>[42]</sup>利用金属塑性加工理论,结合液态模锻成形的特点,系统给出了液态模锻组合体模型、液态模锻的主要塑性流动公式与比压值的理论推导、液态模锻协调方程中的塑性变形与凝固之间的定量关系。陈刚<sup>[43]</sup>通过复合加载技术和补缩技术改善了液态模锻成形过程中凝固成形的应力场,获得组织与性能均匀的制件;该技术先后在铝合

金活塞、特种车辆履带板、铝合金轮毂模等特种车辆轻量化零部件上得到了应用,解决了成形件组织与性能不均匀的难题。郭潇群等<sup>[44]</sup>在电磁泵式输送技术的基础上采用质量法定量控制浇注,并进行液态模锻定量浇注系统的设计和制造;成形件尺寸精度和表面质量的控制主要与合金液的熔炼质量和浇注质量的精确控制有关。DU 等<sup>[45]</sup>研究发现,采用复合加载-局部补缩技术可消除典型半固态触变模锻成形件中的微裂纹等缺陷,实现制件组织和性能的均匀化控制。

杜之明等<sup>[46]</sup>采用液态模锻成形技术制备了特种车辆履带板用  $\text{Al}_2\text{O}_{3\text{sf}}\text{-SiC}_p$  纤维与颗粒混杂增强铝合金复合材料,发现其耐磨性能与钢质履带板材料 Mn13 钢的相当,且履带板的质量大幅减轻。陈平和<sup>[47]</sup>采用液态模锻成形技术成功制备了东风 140 复合材料铝活塞,并完成了工程化应用。

杜之明等<sup>[48]</sup>设计了特种车辆负重轮与履带板成形专用模具,并在模具中增加了水冷循环系统,解决了模具热疲劳问题,延长了模具的使用寿命。徐纪平<sup>[49]</sup>设计了一种可更换模的液态模锻成形齿轮模具,满足齿轮液态模锻件外表轮廓清晰、成形精度高、内部组织致密、力学性能好的成形要求,可用于锌合金、铝合金、铜合金齿轮的成形。徐国兴等<sup>[50]</sup>设计了一种用于生产铝合金轮毂坯料的整体铝合金轮毂的液态模锻空冷模具,上、下模分别采用分体结构,不仅便于模具的修复和更换,而且提高了模具的使用寿命,减少了维修费用。

我国液态模锻设备的研制起步晚,但发展比较迅速。我国台湾地区率先开发了久大立式液态模锻机,并逐渐演变为 1 500~12 000 kN 等 6 种系列的液态模锻成形设备<sup>[51]</sup>。苏州三基铸造装备股份有限公司设计生产了最大合模力为 10 000 kN 的 MLC-1000 型卧式轻合金铸造机,在液态模锻设备领域取得突破性进展,显著提高了我国液态模锻行业的整体水平<sup>[52]</sup>。

## 4 结束语

随着装备轻量化、零部件设计、铝合金材料等方面的发展、新兴成形技术的出现、表面处理技术的进步、记忆塑性成形理论与凝固理论的完善,铝合金液态模锻成形技术将面临更严格的技术挑战。铝合金液态模锻成形技术需要在以下几个方面进行不断的完善和发展。

(1) 目前有关液态模锻成形技术的研究主要集中在各种材料的应用以及复杂结构的成形等方面, 虽然在液态模锻力学成形理论、液态模锻谐调方程、塑性成形理论以及液态模锻模具热应力等方面也取得一定成果, 但是进展缓慢, 在铝合金轻量化液态模锻成形的需求上仍存在较大缺口。这些成形理论的研究以及液态模锻成形理论体系的建设与完善将是今后的重点研究方向。

(2) 铝合金液态模锻成形技术的研究主要集中于铝合金材料方面, 有关陶瓷颗粒、晶须、纤维增强和混杂增强铝基复合材料及其成形工艺的研究相对欠缺。铝基复合材料在性能、特定条件应用等方面具有较大的轻量化优势, 但是成形工艺的复杂性限制了其研究与应用。因此, 铝基复合材料液态模锻成形也是今后研究的重点和难点。

(3) 流变模锻成形工艺、复合加载液态模锻工艺、复合加载-局部补缩消除金属制件裂纹的工艺、铸锻复合一体化成形工艺、半固态充填-塑性变形一体化模锻工艺以及金属液态填充、塑性流动复合模锻工艺等复合成形技术与工艺及其工艺参数的优化将成为今后重点研究方向。

(4) 随着人工智能和大数据技术的发展, 铝合金液态模锻成形研究将面临新的发展机遇, 数据挖掘与信息融合技术、智能一体化技术、人工神经网络技术、自动寻优技术等将在轻量化零部件设计和生产中发挥更大的作用。

#### 参考文献:

- [1] 谢然, 兰凤崇, 陈吉清, 等. 满足可靠性要求的轻量化车身结构多目标优化方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(4): 117-124.
- [2] 冯怡然, 金志远, 陶学恒, 等. 机动车载消防救援装备系统研发[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(3): 405-407.
- [3] 李中权, 肖旅, 李宝辉, 等. 航天先进轻合金材料及成形技术研究综述[J]. 上海航天, 2019, 36(2): 9-21.
- [4] 中国工程院. 中国材料发展现状及迈入新世纪对策咨询项目: 航空航天材料咨询报告[R]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [5] 郑艳琴, 向敢, 刘建华, 等. 特种装备专用应急起重装置轻量化设计[J]. 轻工机械, 2012, 30(4): 104-107.
- [6] 龙江启, 兰凤崇, 陈吉清. 车身轻量化与钢铝一体化结构新技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 27-35.
- [7] 李永兵, 陈长年, 郎利辉, 等. 汽车铝车身关键制造技术研究[J]. 汽车工艺与材料, 2013(3): 50-58.
- [8] 邢书明, 鲍培玮. 金属液态模锻[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [9] 韦丽君, 马风雷, 李任江. 液态模锻在铸铝合金中的应用研究[J]. 材料工程, 2003, 31(7): 40-42.
- [10] 杨世强, 王蓓蓓. 轻型机械臂的轻量化结构设计优化方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(19): 2575-2580.
- [11] 卢天健, 张钱城, 金峰. 轻质多孔材料与结构研究的最新进展[J]. 中国材料进展, 2012, 31(1): 13-25.
- [12] 张磊, 单红波, 葛铠, 等. 超重型底盘分动器齿轮优化方案设计和疲劳试验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(10): 182-187.
- [13] 范例, 谢里阳, 张娜. 重卡驱动桥壳疲劳稳健性与轻量化设计[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 365-369.
- [14] 钟群鹏, 有移亮, 张峰, 等. 机械装备构件轻量化主要技术途径的探讨[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 2-6.
- [15] 许珞萍, 邵光杰, 李麟, 等. 汽车轻量化用金属材料及其发展动态[J]. 上海金属, 2002, 24(3): 1-7.
- [16] DU Z M, CHEN G, HAN F, et al. Homogenization on microstructure and mechanical properties of 2A50 aluminum alloy prepared by liquid forging [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(11): 2384-2390.
- [17] 王长顺, 李宏伟, 陈利华, 等. 特种车辆新型高强韧铝合金负重轮液态模锻工艺成型研究[J]. 新技术新工艺, 2013(7): 88-90.
- [18] 王刚. 液态模锻 7055 铝合金的组织与力学性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [19] 李顺, 李宏伟, 张新, 等. 高性能铝合金结构件液态模锻技术研究[J]. 新技术新工艺, 2015(6): 129-134.
- [20] 周泽军, 王长顺, 李有祥, 等. Al-Cu 合金液态模锻成形组织及力学性能研究[J]. 西安工业大学学报, 2016, 36(4): 283-289.
- [21] 李天生, 徐慧, 朱福顺, 等. 液态模锻用铝合金成分优化[J]. 热加工工艺, 2009, 38(1): 23-25.
- [22] 徐纪平. 高强度锌铝合金圆锥齿轮液态模锻成形技术和用途: 1546254A[P]. 2004-11-17.
- [23] 马春江. 一种重载汽车用铝合金车轮液态模锻成型专用铝合金材料及成型方法: 201310442417.9 [P]. 2013-12-25.
- [24] 高士学. 一种液态模锻铝合金的组织、性能与应用研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2016.
- [25] 贾海萌. SiC<sub>p</sub> 增强铝基复合材料履带板成形的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [26] 曹健峰, 戴起勋, 李桂荣, 等. (Al<sub>3</sub>Zr + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/A356 复合材料液态模锻的研究[J]. 铸造技术, 2006, 27(11): 1185-1187.
- [27] 孙跃军, 高艳静, 崔泽文, 等. 固溶处理对液态模锻 6061 铝合金显微组织的影响[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(2): 82-87.
- [28] 洪慎章. 铝合金液态模锻的应用及发展[J]. 精密成形工程, 2012, 4(3): 64-66.
- [29] RAJAGOPAL S. Squeeze casting: A review and update[J]. Journal of Applied Metalworking, 1981, 1(4): 3-14.
- [30] JOLLY M R, HAOUR G. Fibre reinforcement of aluminium by squeeze casting: A summary of the state of the art[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 1988, 3(2): 172-178.
- [31] SARFRAZ S, JAHANZAIB M, WASIM A, et al.

- Investigating the effects of as-casted and in situ heat-treated squeeze casting of Al-3.5% Cu alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(9/10/11/12): 3547-3561.
- [32] FRANKLIN J R, DAS A A. Squeeze casting—A review of the status[J]. British Foundryman, 1984, 77(3): 150-158.
- [33] ASANO K. Thermal conductivity and mechanical properties of pitch-based carbon fibre reinforced aluminium composites fabricated by squeeze casting[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2018, 31(1): 29-36.
- [34] SRINIVASAN R, SHRINIVASAN B H, PRASATH K J, et al. Experimental investigation of aluminium hybrid metal matrix composites processed through squeeze casting process [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 27 (2): 1821-1826.
- [35] 齐丕骥. 我国挤压铸造机的现状与发展[J]. 特种铸造及有色金属, 2010, 30(4): 305-308.
- [36] 周晓文. 挖掘机斗齿液态模锻技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [37] 齐丕骥. 挤压铸造生产技术进展[J]. 铸造技术, 2007, 28 (7): 13-17.
- [38] 宋双双. 6300KN 多向液态模锻液压机机架热-结构耦合分析及其立柱的疲劳寿命研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [39] 计国富, 王纪刚, 邱立宝, 等. 一种铝合金车轮液态模锻及旋压加工系统: 201410802298.8[P]. 2015-04-29.
- [40] 刘忠锁. 应用于商用车轴头的 A357 铝合金的液态模锻工艺法: 201610932177.4[P]. 2017-02-15.
- [41] 王尔德, 任学平, 霍文灿. 液态模锻过程的谐调方程[J]. 机械工程学报, 1987, 23(1): 35-41.
- [42] 霍文灿, 李贺军. 液态模锻力学成形理论的研究[J]. 锻压技术, 1995, 20(5): 34-40.
- [43] 陈刚. 高强变形铝合金触变成形及缺陷控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [44] 郭潇群, 毛红奎, 徐宏, 等. 铸造浇注系统辅助设计平台的研究与开发[J]. 特种铸造及有色合金, 2018(2): 146-149.
- [45] XU H, ZHANG X, LIU Y P, et al. Mechanical and corrosion behaviors of SiC<sub>p</sub>/2A50 composite materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 6: 452-459.
- [46] 杜之明, 程远胜, 罗守靖. 压力下浸渗-半固态致密法制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sub>sf</sub> · SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14 (12): 2079-2084.
- [47] 陈平和. 用液态模锻法制备铝基复合材料的研究: 东风 140 复合材料铝活塞[D]. 武汉: 武汉交通科技大学, 1995.
- [48] 杜之明, 陈刚, 柳君, 等. 特种车辆铝基复合材料履带板半固态成形方法及其成形模具: 101880789A[P]. 2010-11-10.
- [49] 徐纪平. 一种可更换模的液态模锻成形齿轮的模具: 200320122261.8[P]. 2005-03-16.
- [50] 徐国兴, 徐敬捷. 整体铝合金轮毂的液态模锻模具: 200920180979. X[P]. 2010-10-06.
- [51] 李超. 7075 铝合金端盖件液态模锻成形工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [52] 李娇. 45 号钢支座液态模锻及其组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

(上接第 5 页)

- [27] TAO Z, WANG X Q, HASSAN M K, et al. Behaviour of three types of stainless steel after exposure to elevated temperatures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 152: 296-311.
- [28] 黄子东, 林俊铭, 江乙達, 等. 敏化处理后 304 不锈钢的电化学腐蚀性能[J]. 机械工程材料, 2018, 42(9): 55-60.
- [29] SWAMINATHAN J, SINGH R, GUNJAN M K, et al. Sensitization induced stress corrosion failure of AISI 347 stainless steel fractionator furnace tubes [J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(8): 2211-2221.
- [30] PARVATHAVARTHINI N, MUDALI U K. Electrochemical techniques for estimating the degree of sensitization in austenitic stainless steels[J]. Corrosion Reviews, 2014, 32(5/6): 183-225.
- [31] LIU X F, XU M J, LU S X, et al. Corrosive effects of smoke with different concentrations from PVC on 304 stainless steel and 6061 aluminium alloy[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2018, 53(2): 141-152.
- [32] DELLA ROVERE C A, CASTRO-REBELLO M, KURI S E. Corrosion behavior analysis of an austenitic stainless steel exposed to fire[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 31: 40-47.
- [33] AQUINO J M, DELLA ROVERE C A, KURI S E. Intergranular and pitting corrosion susceptibilities of a supermartensitic stainless steel weldment [J]. Corrosion, 2010, 66(11): 116001.
- [34] PEACOCK R D, CLEARY T G, RENEKE P A, et al. A literature review of the effects of smoke from a fire on electrical equipment: NUGEG/CR-7123[S]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2012.
- [35] NEWMAN J S, YEE G G, SU P, et al. Smoke damage potentials in industrial fire applications[J]. Fire Technology, 2014, 50(6): 1437-1458.
- [36] PATTON J S. Fire and smoke corrosivity of metals[J]. Journal of Fire Sciences, 1991, 9(2): 149-161.
- [37] PATTON J S. Fire and smoke corrosivity of structural materials[J]. Journal of Fire Sciences, 1992, 10(4): 294-322.
- [38] 刘絮霏. 火灾烟气对金属材料的腐蚀作用和评估模型研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [39] KOLLI, JAVAHERI, KÖMI, et al. On the role of grain size and carbon content on the sensitization and desensitization behavior of 301 austenitic stainless steel[J]. Metals, 2019, 9 (11): 1193.