

MIANXIANG ZHINENG ZHIZAO DE
JINGMI DUANZAO JISHU

Di 7 Jie Quanguo Jingmi Duanzao Xueshu Huiyi Lunwenji

面向智能制造的 精密锻造技术

——第7届全国精密锻造学术会议论文集

中国机械工程学会塑性工程分会 编

主 编 蒋 鹏 夏汉关

副主编 陈文琳 贺小毛

江苏太平洋精锻科技股份有限公司
江苏太平洋齿轮传动有限公司



合肥工业大学出版社
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

—第7届全国精密锻造学术会议论文集—

中国机械工程学会塑性工程分会 编

主 编 蒋 鹏 夏汉关

副主编 陈文琳 贺小毛



合肥工業大學 出版社

合肥工業大學出版社

内 容 提 要

本书为第7届全国精密锻造学术研讨会论文集。全书分为八个部分:第一部分为综述,主要介绍了近年来国内精密锻造技术的发展现状、存在问题以及今后的发展方向;第二部分为精密锻造自动化与智能化专题,以中国制造2025为指导,介绍了大数据、视觉引导定位等智能化技术在精密锻造中的应用以及一些零件的锻造自动化实现;第三部分为热成形技术,介绍了一些黑金属材料的热精锻工艺设计、基于有限元模拟验证和工艺优化方法以及实际生产中出现的技术问题及解决办法等;第四部分为冷温成形技术,介绍了齿轮滚轧成形工艺、带法兰筒形件旋压成形工艺、中间轴冷挤压工艺研究等新工艺;第五部分为轻合金成形技术,介绍了近年来铝合、钛合金等轻合金的轻量化成形新工艺;第六部分为锻造模具技术,介绍了锻模强化、锻模模膛与金属变形的关系,在锻造过程中模具磨损,精锻模具和切边模架等技术;第七部分为精密锻件组织性能与质量控制,这一部分内容比较丰富,也表明锻件组织性能控制越来越重要;第八部分为锻造装备技术,介绍了800MN模锻压力机的设计和快速换模和自动夹紧技术在锻造设备上的应用等。

本书可以作为从事金属塑性加工领域工程技术人员和大专院校学生的参考资料,也可以作为对金属塑性成形有兴趣人士的阅读书籍。

图书在版编目(CIP)数据

面向智能制造的精密锻造技术:第7届全国精密锻造学术会议论文集/中国机械工程学会塑性工程分会编. —合肥:合肥工业大学出版社,2018.6

ISBN 978-7-5650-4016-0

I. ①面… II. ①中… III. ①精密锻造—学术会议—文集 IV. ①TG316-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 118579 号

面向智能制造的精密锻造技术

——第7届全国精密锻造学术会议论文集

中国机械工程学会塑性工程分会 编

责任编辑 马成勋

出版 合肥工业大学出版社

地址 合肥市屯溪路193号

邮编 230009

电话 理工编辑部:0551-62903200

市场营销部:0551-62903198

网址 www.hfutpress.com.cn

E-mail hfutpress@163.com

版次 2018年6月第1版

印次 2018年6月第1次印刷

开本 787毫米×1092毫米 1/16

印张 30.25

字数 730千字

印刷 安徽昶颜包装印务有限责任公司

发行 全国新华书店

ISBN 978-7-5650-4016-0

定价:98.00元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换

精密锻造学 指导委员会 学术委员会

(2017年调整后)

陆 辛 夏巨谔 徐祥龙 王以华 梁丰收
严建文 叶 永 陈 强 王玉珏 周岩涛
薛克敏 钟志平 金 红 吴顺达 朱世明

顾问

主任委员

副主任委员

蒋 鹏 北京机电研究所有限公司

夏汉关 江苏太平洋精锻科技股份有限公司

赵 震 上海交通大学

王新云

王 欣 苏州汉金模具技术有限公司

委员(秘书)

曹 飞 北京机电研究所有限公司

委员

主 任 蒋 鹏 夏汉关

副主任 陈文琳 贺小毛

委 员 孙 勇 翟 华 陶善虎 许 强

陈文琳 赵 震 王新云 王 欣 李森泉

李洪波 张宝红 吴玉坚 张如华 王广春

钟志平 郑光文 程 明 施卫兵 张长龙

车路长 张海英 成希锋 樊晓光 郑英俊

寇淑清 曹 飞 陈忠家 李 萍 韦 韩

徐成新 周乐育 王 冲 李 灿 王占军

韩鹏彪 李江国 元 莎 王耀祖 田海燕

许 强 中机第一设计研究院有限公司

吴玉坚 东风锻造有限公司

张如华 南昌大学

王广春 山东大学

黄廷波 江苏飞船股份有限公司

宋继顺 天津理工大学

吴顺达 中国锻压协会

郑光文 安徽工业大学

精密锻造学术会议常设学术委员会

(2017 年调整后)

顾问	夏巨谌	徐祥龙	王以华	郭成
主任委员	蒋鹏	北京机电研究所有限公司		
副主任委员	夏汉关	江苏太平洋精锻科技股份有限公司		
	赵震	上海交通大学		
	王新云	华中科技大学		
	王欣	苏州汉金模具技术有限公司		
委员(秘书)	曹飞	北京机电研究所有限公司		
委员	李森泉	西北工业大学		
	徐成林	中国第一汽车股份有限公司		
	张宝红	中北大学		
	陈文琳	合肥工业大学		
	李洪波	燕山大学		
	钟志平	太仓久信精密模具有限公司		
	车路长	中国兵器工业第五九研究所		
	寇淑清	吉林大学		
	徐戊矫	重庆大学		
	韩鹏彪	河北科技大学		
	许强	中机第一设计研究院有限公司		
	吴玉坚	东风锻造有限公司		
	张如华	南昌大学		
	王广春	山东大学		
	黄廷波	江苏飞船股份有限公司		
	宋继顺	天津理工大学		
	吴顺达	中国锻压协会		
	郑光文	安徽工业大学		

编 者

2018 年 6 月

孟宪举	山东建筑大学
程 明	中国科学院金属研究所
施卫兵	江苏森威精锻有限公司
郝占湖	中煤张家口煤矿机械有限责任公司
孙红星	郑州机械研究所
张长龙	中机锻压江苏股份有限公司
张海英	上海汽车变速器有限公司
成希锋	中国重汽济南铸锻中心
李 峰	哈尔滨理工大学
臧顺来	西安交通大学
袁 林	哈尔滨工业大学
韩星会	武汉理工大学
樊晓光	西北工业大学
郑英俊	太仓久信精密模具有限公司
王广斌	天津市天锻压力机有限公司
陶善虎	安徽省合肥汽车锻件有限责任公司
王 冲	桂林电器科学研究院有限公司
王广良	广东省中山市大地金属有限公司

前 言

中国机械工程学会塑性工程分会自 2000 年以来 2~3 年召开一次全国精密锻造学术研讨会,到目前为止已经举办过六届:第 1 届于 2001 年 11 月 25—26 日在江苏南京召开,第 2 届于 2005 年 7 月 24—29 日在山西太原与第九届全国锻压学术年会同时以单设分会场的形式召开,第 3 届于 2008 年 12 月 3—5 日在江苏盐城召开,第 4 届于 2010 年 6 月 26—28 日在湖北武汉召开,第 5 届于 2013 年 3 月 23—25 日在山东济南召开,第 6 届于 2016 年 6 月在江苏泰州召开。根据 2018 年中国机械工程学会工作计划,经与合肥工业大学协商,第 7 届全国精密锻造学术研讨会于 2018 年 6 月 27—29 日在安徽合肥召开。

本次会议论文以面向智能制造的精密锻造技术为主题,征集论文涵盖以下范围:热成形、冷温成形、锻造自动化和智能化以及轻合金成形技术的有关研究,包括有限元模拟技术、成形新技术、自动化智能化的开发与应用、各种典型零件的成形工艺;模具的设计、制造技术,以及模具寿命、模具新材料的研究,精密锻造装备技术应用等。在秘书处的积极努力和各位作者特别是本届精密锻造专业委员会各位委员的大力支持下,征文工作得以顺利完成,本书就是本次会议的论文集。

本书集中收录了 55 个单位 178 位作者的 57 篇论文(含国外合作作者),内容较为丰富,包括了精密锻造技术的一些综合评述,自动化和智能化技术的研究,热成形和冷温成形的研究与开发,轻合金成形技术的研究与应用,精密锻造模具技术,精密锻造件的组织性能和质量控制,精密锻造装备技术等精密锻造的主要技术领域,是我国近期精密锻造技术研究与应用成果的一次集中展示,也对面向智能制造的精密锻造技术的发展方向进行了初步的探讨。

本书由蒋鹏、夏汉关主编,陈文琳、贺小毛为副主编。编辑委员会成员是本书收录论文的主要撰稿者。

第 7 届全国精密锻造学术研讨会将由中国机械工程学会塑性工程分会主办,合肥工业大学、北京机电研究所有限公司、精密成形国家工程研究中心联合主办,合肥工业大学工业与装备技术研究院、合肥合锻智能制造股份有限公司承办,中机第一设计研究院有限公司、安徽省合肥汽车锻件有限责任公司、重庆恒锐机电有限公司、中机锻压江苏股份有限公司、安徽省机械工程学会锻压专委会协办。

特别感谢江苏太平洋精锻科技股份有限公司为本书的出版提供经费支持。

我们期望第 7 届全国精密锻造学术研讨会能够取得圆满成功,更希望会议的举办和本书的出版能够对国内精密锻造技术的发展起到促进作用。

由于时间仓促,本书中也可能存在一些疏漏与错误之处,敬请各位同行批评指正,我们会认真总结经验,吸取教训,接受批评,争取下次做得更好。对于本次出现的问题,也请各位读者给予理解和谅解。

编 者

2018 年 6 月

目 录

1 综述

闭式精锻理论基础及其关键技术的研究与应用	夏巨谥 张 茂 金俊松 邓 磊 王新云	(001)
----------------------	------------------------------	-------

近期国内热模锻生产技术进展与发展趋势	蒋 鹏 夏汉关 韦 韡 王 冲 周乐育 贺小毛 吴顺达	(014)
--------------------	--------------------------------------	-------

汽车零部件冷温精密成形技术的发展及展望	张 晖 章立预 徐祥龙 郑英俊 胡红旗 钟志平	(034)
---------------------	----------------------------------	-------

汽车精锻车间规划设计探讨	许 强 王 阳 崔双斌	(047)
--------------	-------------------	-------

玻璃防护润滑剂在金属锻造和挤压工艺中的应用	段素杰 冯 驰	(052)
-----------------------	---------------	-------

2 专题:精密锻造自动化与智能化技术

基于大数据的锻造过程中质量数据分析方法	孙 勇 邓盛彪 蒋 鹏 凌云汉 鄧亚楠	(060)
---------------------	------------------------------	-------

热成形专用高速伺服液压机研究与实践	张长龙 蒋 鹏	(066)
-------------------	---------------	-------

第三代前轮毂自动化锻造	吴玉坚 吴建彬	(077)
-------------	---------------	-------

基于机器视觉引导定位的机器人自动上料系统	凌云汉 周 明 孙 勇 蒋 鹏 刘 波 赵一冰 安思健	(083)
----------------------	--------------------------------------	-------

基于西门子 T-CPU 和 S120 的输送机构同步控制系统的设计与实现	鄧亚楠 孙 勇 刘 波 李亚楠	(091)
--------------------------------------	--------------------------	-------

汽车前轴锻件高温在线自动化三维测量与精度检测技术	韩利亚 张金钢 周发明 李中伟 钟 凯 江 浩	(100)
--------------------------	----------------------------------	-------

快速换模和自动夹紧系统在锻造生产线上的应用	付殿禹 蒋 鹏 贺小毛 谷泽林 朱晨轶	(108)
-----------------------	------------------------------	-------

3 热成形技术

- Cr4Mo4V 钢圆筒形锻件锻造过程的数值模拟 孙利星 李森泉 (114)
- 起落架外筒锻件局部控流及全流程成形工艺设计 姜 静 邓 磊 王新云 李建军
李蓬川 (123)
- 半轴套管多工位挤压自动化生产线中冲连皮缺陷产生机理及参数优化分析 李 硕
徐春国 郭永强 任广升 乔 健 (130)
- 凸轮块在高速热锻机上的精密锻造工艺及应用 施卫兵 (137)
- 摩托车下联板锻造工艺及试验研究 杨 勇 蒋 鹏 郑远夫 郑元衡 (142)
- 汽车离合器盘毂精密成形工艺研究 白凤梅 郭中亮 朱陈树 郑光文 (146)
- 履带板锻造工艺与模具设计 江荣忠 王志录 韩志飞 崔俊华 张元东
武敦南 (151)
- 拖钩锻造成形工艺改进 李 灿 陈文琳 雷 远 (158)
- 花键接头的平锻模飞边槽的设计 成希锋 吴万心 许忠良 张振水 刘文新 (164)
- 基于模拟软件的转向节裂纹分析与改进 张振水 吴万心 刘文新 成希锋 (170)
- 曲轴类产品锻造过程特性浅析 李 帅 吴万心 成希锋 张振水 (177)
- 锻造仿真优化技术最新发展和最佳实践 晏建军 (181)
- 下料精度对无飞边锻造耐磨钢球形状误差的影响分析 陈 浩 张长龙 蒋 鹏
郭亚兰 侯佳欣 李 灿
..... (190)
- 火车轮液压机精密模锻 郭玉玺 (201)

4 冷温成形技术

- 新型齿轮滚轧方法及其成形工艺研究 王广春 吴 涛 闫 轲 (215)
- 某汽车变速器倒挡从动齿闭式温锻缺陷分析及工艺优化 吴先洋 张海英 周 煊
陈伟文 陈 锐 (222)
- 带底部法兰筒形件旋压成形工艺研究 刘发美 金俊松 王新云 邓 磊 (233)
- 基于 DYNAFORM 的桥壳内高压预成形工艺优化研究 戴晨光 郑英俊 翟月雯
钟志平 王立忠 (241)
- 汽车等速万向节三销滑套成形工序的改进及数值模拟 龚爱军 李明明 倪亚玲
杨山岭 杨 益 袁海兵
..... (252)

轿车变速器中间轴的冷挤压成形技术研究 桂安朋 刘 念 吴 搏 (259)

5 轻合金成形技术

动涡旋盘背压挤压成形工艺分析 李 萍 段自豪 吴 涛 汪长开 薛克敏 (266)

铝合金汽车轮毂的发展与工艺方法 元 莎 袁海伦 蒋 鹏 元亚莎 贺小毛 (275)

铝合金车轮锻造成形工艺研究 王丹晨 张承基 边 翊 胡明伟 孙伟领 高丙坤 (285)

不同预变形量下 ZK60 镁合金挤压棒材组织性能研究 丁春园 陈忠家 王梓杰 王雪英 (293)

中间锻造工艺对高强铝合金剥落腐蚀性能的影响 牛龙飞 陈忠家 谢元福 施娟娟 (301)

用钛合金板材等温气胀半球形气瓶 陈 岩 陈修琳 梁必成 王以华 (309)

6 锻造模具技术

谈谈锻模模膛与变形金属的不贴合 张如华 周 烨 吴 泽 (314)

闭塞精锻模具设计及应用 林 栋 倪增相 董 亮 王以华 (322)

轴类锻件的切边校正复合模架设计 谷泽林 蒋 鹏 刘永跃 侯惠敏 朱晨轶 (334)

W6Mo5Cr4V2 盐浴碳化钨覆层的制备与性能 高 野 王华君 李 秋 牛龙飞 惠有科 (341)

热作模具钢离子氮氧共渗工艺研究 王会珍 刘 燕 翟月雯 刘桂华 徐跃明 (347)

铜合金加工过程中模具钢的摩擦磨损行为研究 程 明 边 鸽 张士宏 (355)

7 锻件组织性能与质量控制

汽车前轴锻件淬火开裂原因分析 陶善虎 龚仁峻 (362)

免退火冷锻钢 SWRCH35KM 在线球化行为及组织演变 周乐育 李爱国 叶丽燕 赵恒良 吕 刚 涛 雅 (367)

多火次锻造对 1Cr12Ni3Mo2VN 叶片钢组织影响	贺小毛 李爱国 蒋 鹏 邓晓春	
3 热成形	陈 超	(373)
粉末锻造制备高性能铁基环形铸件	牛 彤 陈文琳 李 勇 周晓远	(381)
某型号转向弯臂断裂失效分析	李朝亮 郑明玉 朱 腾 陈文琳	(386)
转向直臂锻造晶粒演变数值模拟	陈 力 李朝亮 郑明玉 陈国强 陈文琳	(392)
基于相变动力学模型 XC45 钢锻后控冷的微观组织分析	姚源铎 胡成亮 赵 震	(400)
大型筋板构件局部加载坯料体积分配对材料流动及成形缺陷影响研究	魏 科 樊晓光	
	詹 梅 孟 森	(408)
基于压缩试验和 QForm 模拟的模锻件裂纹预测	刘寒龙 崔启玉 里斯基 卢卡什	(419)
真空高压淬火过程温度场和流场数值模拟	叶丽燕 翟月雯 王会珍 蒋 鹏	(426)
Cr5 钢碳化物类型及其转变热力学	元亚莎 石如星 于慎君 元 莎	(433)

8 锻造装备技术

800MN 大型模锻压机工程设计回顾	许 强 王 阳 崔双斌	(441)
拉杆预紧力和导轨间隙对 12500kN 冷锻压力机刚度的影响	侯佳欣 李江国 周乐育	
	蒋 鹏 陈 浩	(454)
作者单位索引		(462)
作者索引		(465)

4 冷锻成形技术

800MN 大型模锻压机工程设计回顾	许 强 王 阳 崔双斌	(441)
拉杆预紧力和导轨间隙对 12500kN 冷锻压力机刚度的影响	侯佳欣 李江国 周乐育	
	蒋 鹏 陈 浩	(454)
作者单位索引		(462)
作者索引		(465)
1 冷锻成形技术		(146)
1.1 冷锻成形技术概述		(146)
1.2 冷锻成形技术的发展		(146)
1.3 冷锻成形技术的应用		(146)
1.4 冷锻成形技术的展望		(146)
2 冷锻成形工艺		(146)
2.1 冷锻成形工艺概述		(146)
2.2 冷锻成形工艺的发展		(146)
2.3 冷锻成形工艺的应用		(146)
2.4 冷锻成形技术的展望		(146)
3 冷锻成形设备		(146)
3.1 冷锻成形设备概述		(146)
3.2 冷锻成形设备的发展		(146)
3.3 冷锻成形设备的应用		(146)
3.4 冷锻成形技术的展望		(146)
4 冷锻成形材料		(146)
4.1 冷锻成形材料概述		(146)
4.2 冷锻成形材料的发展		(146)
4.3 冷锻成形材料的应用		(146)
4.4 冷锻成形技术的展望		(146)

1 综述

闭式精锻理论基础及其关键技术的研究与应用

夏巨谥, 张茂, 金俊松, 邓磊, 王新云

(华中科技大学, 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 本文在论述了闭式精锻成形原理及其工艺特点的基础上, 首先论述了闭式精锻过程中锻件内部应力应变状态分析、应力球张量及应力偏张量计算公式以及两个应力与金属塑性、塑性流动变形的关系; 然后解释了应力球张量即静水压力越大, 金属塑性越好的机理等理论基础; 在阐述闭式精锻新工艺——流动控制成形原理的基础上, 着重研究了如何解决闭式精锻时金属流动方向、流动距离及成形力的控制方法三项关键技术; 最后介绍了采用闭式精锻理论基础与三项关键技术的应用实例及应用效果。

关键词: 闭式精锻; 成形理论; 流动方向控制; 流动距离控制; 成形力控制

Study of Forming Theory and Key Technology of Precision Forging

Xia Juchen, Zhang Mao, Jin Junsong,

Deng Lei, Wang Xinyun

(Huazhong University of Science and Technology,
State Key Laboratory of Materials Processing and
Die & Mould Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper mainly deals with the forming mechanism and process features of precision forging. The analyses of forging internal stress - strain states, calculation formulas of spherical stress tensor and deviatoric stress tensor, and the relationship between these two stress components, metal plasticity and plastic flow were conducted firstly. Then, the mechanism of the greater the spherical stress tensor (hydrostatic stress) the better the metal plasticity is explained. On the basis of elaborating the mechanism and features of the new precision forging process, i. e., flow control forming, three key techniques for the control of metal flow direction, flow distance and forming load were studied in emphatically studied. Finally, application examples of the precision forging theory and three key techniques were demonstrated.

Key words: precision forging; forming theory; flow direction control; flow distance control; forming load control

1 闭式精锻成形原理及闭式精锻的特点

闭式精锻是金属毛坯在凸凹模组成的封闭模膛内通过凸模施加作用力使其成形为形状及尺寸精度与零件非常接近甚至完全相同的锻件。闭式精锻时锻件周围不形成横向飞边，开式模锻时锻件沿分模面形成横向飞边，见图 1a。闭式精锻的主要成形方式如图 1b、c、d 所示，图 b 为整体凹模闭式精锻；图 c 为下凹模固定的可分凹模闭式精锻；图 d 为下凹模可浮动的可分凹模闭式精锻，即日本学者提出的闭塞锻造^[1]。

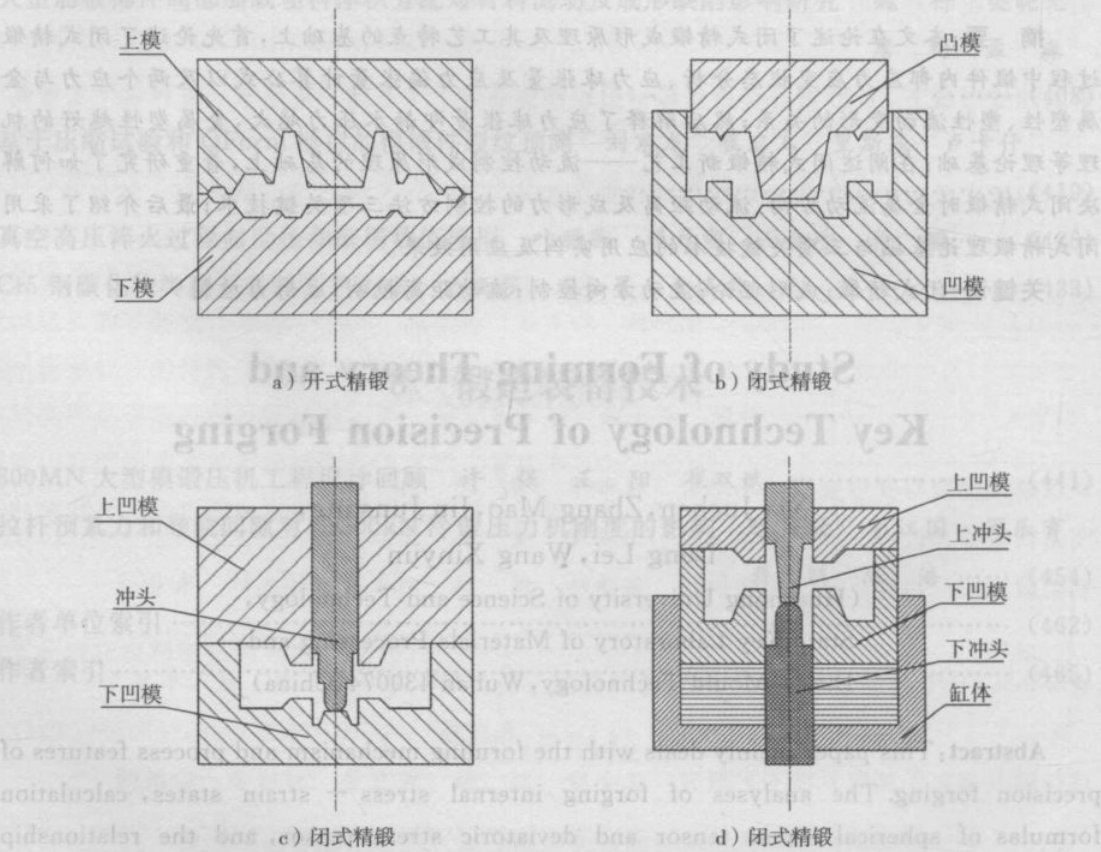


图 1 开式精锻与闭式精锻简图

闭式精锻的特点为：(1)金属材料利用率高；(2)提高劳动生产率；(3)提高锻件质量；(4)节约加热能耗。此外闭式精锻也是一种重要的轻量化制造工艺。

2 闭式精锻成形理论及其张量计算

2.1 闭式精锻成形过程及应力应变状态分析

闭式精锻按成形方式可分为锻粗式闭式精锻和挤压式闭式精锻，采用最多的锻粗式闭

面向智能制造的精密锻造技术

式精锻成形过程如图 2 所示^[2]。

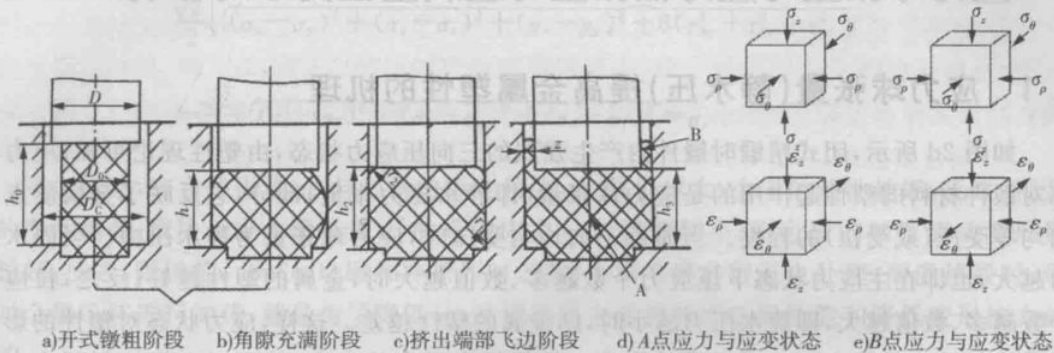


图 2 闭式精锻成形过程

由图 2d 可看出,锻件本体内单元体上的应力为三向压应力,其应变是轴向和径向压应变,切向为拉应变。由图 2e 可看出飞边内单元体内其切向、径向及轴向均为压应力,其应变是径向和切向为压应变,轴向为拉应变。

2.2 应力球张量与应力偏张量计算公式

由文献^[3]可知,应力张量 σ 的三个正应力之和是坐标变换下的不变量,设 σ_m 是三个正应力的平均值,在 $O-xyz$ 坐标中,得应力球张量(即静水压力)的计算公式为:

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3}(\delta_{ij}\sigma_{ij}) \tag{1}$$

式(1)中, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 是主应力。

应力偏张量 σ' 定义为:

$$\sigma' = \sigma - \sigma_m I, \sigma'_k = \sigma_{ki} - \delta_{ij}\sigma_m \tag{2}$$

设 μ 是应力张量 σ 的一个特征矢量, λ 是对应的特征值,则有

$$\sigma' \mu = \lambda \mu \tag{3}$$

由 $\sigma = \sigma' + \sigma_m I$ 可得

$$\sigma' \cdot u = \sigma \cdot u - \sigma_m I \cdot u = \lambda u - \sigma_m u = (\lambda - \sigma_m) u \tag{4}$$

式(4)表明,应力偏张量 σ' 与对应的应力张量有相同的特征方向,且 σ' 的特征值等于 σ 的对应特征值减去平均应力 σ_m 。应力偏张量的主值称为主偏应力。因此,应力偏张量与对应的应力张量有相同的主方向,且主偏应力等于对应的主应力减去 σ_m 。

因此,不难得出应力偏张量的三个不变量 J'_1, J'_2 及 J'_3 为

$$\left. \begin{aligned} J'_1 &= \sigma'_{11} + \sigma'_{22} + \sigma'_{33} = 0 \\ J'_2 &= -\frac{1}{2}(\sigma'_a\sigma'_{jj} - \sigma'_{ij}\sigma'_{ji}) \\ J'_3 &= \det(\sigma') \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

3 应力球张量与应力偏张量对金属塑性变形的影响

3.1 应力球张量(静水压)提高金属塑性的机理

如图 2d 所示,闭式精锻时锻件内产生强烈的三向压应力状态,由塑性理论可知,应力状态对锻件材料的塑性起作用的是应力球张量(即静水压力张量)部分,它反映了金属质点三向均等受压(或受拉)的程度。当质点三向均匀受压时,应力球张量为静水压力。当静水压力越大,也即在主应力状态下压应力个数越多、数值越大时,金属的塑性越好;反之,拉应力个数越多、数值越大,即静水压力越小时,则金属的塑性越差。这样,应力状态对塑性的影响就最终归结为其静水压力对塑性的影响。根据静水压力的大小,就可以方便地判断应力状态对塑性的影响^[3]。

静水压力越大,金属的塑性会越高,这可用下列理由来解释:

(1)拉伸应力会促进晶间变形、加速晶界的破坏;而压缩应力能阻止或减小晶间变形,随着静水压力的增大,晶间变形越加困难,因而提高了金属的塑性。

(2)三向压缩应力有利于愈合塑性变形过程中产生的各种损伤,而拉应力则相反,它促使损伤的发展。

(3)当变形体内原先存在着少量对塑性不利的杂质、液态相或组织缺陷时,三向压缩作用能抑制这些缺陷,全部或部分地消除其危害。反之,在拉应力作用下,将在这些地方产生应力集中,促进金属的破坏。

(4)增大静水压力能抵消由于不均匀变形引起的附加拉应力,从而减轻了附加拉应力所造成的拉裂作用。

3.2 Mises 屈服准则

在外力的作用下,质点由弹性变形状态进入塑性变形状态称为初始屈服,简称为屈服。质点发生屈服的力学条件,即它的各个应力分量之间应当满足的确定关系,称为屈服准则或塑性条件。对于各向同性材料,屈服准则与坐标系的选择无关,即屈服准则是应力不变量的函数。试验证明,平均应力 σ_m 对塑性变形状态没有影响,且 $J'_1=0$,因此屈服准则的数学表达式一般为

$$f(J'_2, J'_3) = f(\sigma_{ij}) = 0 \quad (6)$$

Mises 屈服准则是最常用的塑性条件,它的表述为:当质点的等效应力达到某一与应力状态无关的定值时,质点就屈服,即有

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3} J'_2 = C \quad (7)$$

设物体的单向均匀拉伸时的屈服应力为 σ_s , 即 $\sigma_1 = \sigma_s, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 则该式为 $\bar{\sigma} = \sigma_s = C$

于是, Mises 屈服准则的表达式为

$$\bar{\sigma} = \sigma_s \quad (8)$$

由此,在 $O-xyz$ 坐标系及应力主轴坐标系中,Mises 屈服准则为

$$\frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{(\sigma_x-\sigma_y)^2+(\sigma_y-\sigma_z)^2+(\sigma_z-\sigma_x)^2+6(\tau_{xy}^2+\tau_{yz}^2+\tau_{zx}^2)} = \frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2} = \sigma_s \tag{9}$$

综上所述,应力球张量 σ_m 与金属的塑性相关, σ_m 数值越大,金属的塑性越好,反之,则金属的塑性越差;取决于应力偏张量 J_2' 的等效应力 $\bar{\sigma}$,其数值越小,则金属的塑性流动变形性能越好,反之,则越差。所以,冷锻和冷挤压时,需对金属毛坯进行退火处理,而温热锻时,通过对金属毛坯进行加热,就是为了降低 σ_s ,达到提高金属的塑性变形性能和降低变形抗力的目的。

4 闭式精锻新工艺——流动控制成形

由上述分析和精锻工艺知识不难得出另一个结论,即在闭式精锻终了时,成形力会急剧增大,如图 3 所示。精锻成形力过大会使模具负荷过大导致模具磨损加快甚至破裂,同时也会使精锻设备损坏,此外,对于有窄而深的模膛,即使是强大的静水压也难使其充满。

流动控制成形(Flow Control Forming,FCF),是在常规闭精锻的基础上发展起来的一种无飞边或小飞边精锻新工艺,是常规闭式精锻与分流锻造技术相结合,可有效解决上述两大难题^[3-8]。

4.1 流动控制成形原理及特点

流动控制成形(Flow Control Forming,FCF),它是在常规闭式精锻基础上发展起来的一种闭式精锻新工艺。其变形原理及实质是,对于复杂难成形锻件,将毛坯置于封闭的模膛中,在凸模施加精锻力的作用下,在毛坯金属内产生强烈的三向压应力,通过静水压力水准的提高,来提高其塑性成形能力,同时,通过合理配置其流动控制方式,使得在模膛中最难充满成形的部位至模膛入口处,形成其绝对值由小到大的压应力梯度场,确保精锻过程中在其他部位充满的同时,最难充满的部位也完全充满,从而实现了流动方向的控制,故称闭式精锻流动控制成形。

流动控制成形的特点见相关文献^[4],此处不再赘述。

4.2 流动控制成形关键技术的研究

作者经过多年研究,并参考国内外相关研究,将流动控制成形的关键技术归纳为流动方向的控制,流动距离的控制和精锻成形力的控制等。下面将如何实现这三种控制的方法分别予以阐述^[5]。

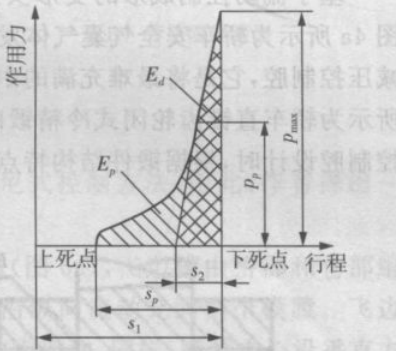


图 3 闭式精锻时的载荷-行程曲线

4.2.1 流动方向的控制方法

流动方向的控制方法有减压式与阻尼式两种^[10]。

1. 减压式控制方法

(1) 设计思路

减压式控制也称分流式控制,关键是分流控制腔的设计,其设计思路是^[5,6]:

① 确定模膛最后充满的部位。采用最小阻力定理和经验相结合的方法判断确定模膛中最后充满的部位,该部位即为分流控制腔的部位;

② 计算确定分流控制腔的大小。其计算公式如下:

$$V_a \geq 2 \times (V_b - V_f) \quad (10)$$

式(10)中:

V_a ——分流腔体积;

V_b ——坯料体积按坯料各公称尺寸的上偏差计算;

V_f ——锻件体积按各公称尺寸的下偏差计算。

③ 分流控制腔的形状。其设计原则是,当多余金属分流时,在模膛内产生的压力不应有明显的增大,其增加量一般不应超过模膛刚充满时所产生的单位压力的5%~8%。

(2) 结构形式

基于流动控制成形的变形实质,减压控制腔一般设置在模膛中最难充满部位的端部。图4a所示为轿车安全气囊气体发生器7A04超硬铝合金压盖的反向热挤压流动控制成形的减压控制腔,它是将最难充满的中间薄壁圆筒形型腔向上加深 h_i 的深度所得;图4b中“A”所示为轿车直锥齿轮闭式冷精锻的减压控制腔,它是分布在每个轮齿的大端。进行减压式控制腔设计时,根据锻件结构特点,遵循上述设计思路即三项原则,均可得到正确的结果。

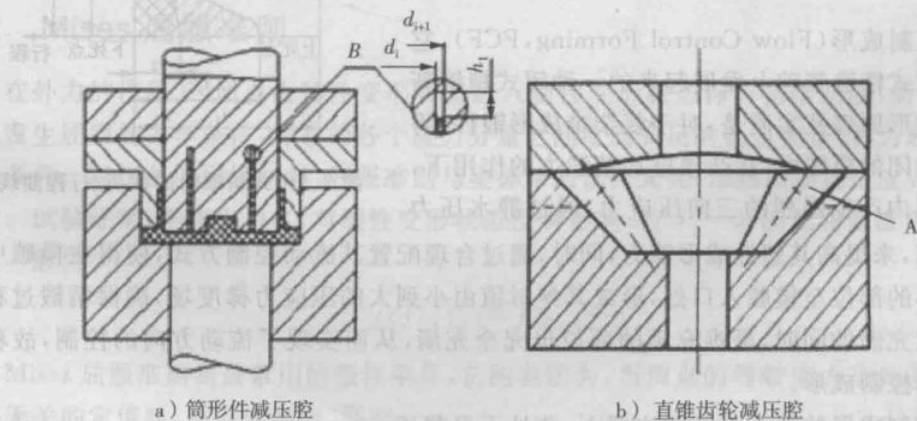


图4 减压式控制腔

2. 阻尼式控制方法

(1) 背压阻尼式控制方法

图5所示轿车无噪声空调压缩机铝合金涡旋盘带背压装置的正向挤,就是这种控制方