

锻造

“三环锻造”与“三环车桥”实现绿色锻造的几项技术措施

夏巨谌¹, 金俊松¹, 邓磊¹, 张茂¹, 张运军², 陈天赋²,
余国林², 朱国军³, 徐迪³

(1. 华中科技大学材料科学与工程学院材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074;

2. 湖北三环锻造有限公司, 湖北谷城 441700; 3. 湖北三环车桥有限公司, 湖北谷城 441700)

摘要:在简要介绍中重型高端商用车前桥部件的结构特点和功能以及湖北三环锻造有限公司、湖北三环车桥有限公司两家企业的基本情况的基础上, 介绍了绿色锻造的技术内涵, 并着重论述了实现绿色锻造的几项关键技术措施: 建立清洁环保型锻造车间; 研发前轴与转向节轻量化结构及小飞边精锻成形工艺, 通过大幅节材, 进而实现大幅节能、减排; 建立智能自动化精锻生产线, 大幅减小现场操作工的数量; 实现对精锻工艺流程与加热温度密切相关环节的精确控制; 热锻模 3D 打印制造与再制造, 通过显著节能而改善环保。实践表明, 这些措施通过节能降耗及环保进而体现绿色锻造, 行之有效, 所提出的用于实现绿色锻造的技术措施对于锻造生产企业具有重要参考意义。

关键词:绿色锻造; 轻量化; 前轴; 转向节; 小飞边精锻成形工艺

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.003

中图分类号: TG156.95

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 10-0017-06

Some technical measures to achieve green forging for “Tri-Ring Forging” and “Tri-Ring Auto Axle”

Xia Juchen¹, Jin Junsong¹, Deng Lei¹, Zhang Mao¹, Zhang Yunjun², Chen Tianfu²,
Yu Guolin², Zhu Guojun³, Xu Di³

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Tri-Ring Forging Co., Ltd., Gucheng 441700, China;

3. Hubei Tri-Ring Auto Axle Co., Ltd., Gucheng 441700, China)

Abstract: Based on a brief introduction of the structural features and functions of front axle components for medium-heavy high-end commercial vehicles and the fundamental states of two companies, including Hubei Tri-Ring Forging Co., Ltd. and Hubei Tri-Ring Auto Axle Co., Ltd., the technical connotation of green forging was illustrated, and some critical technical measures to achieve green forging were discussed emphatically, including the establishment of clean and environment-friendly forging workshop, the research and development of front axle and steering knuckle light-weight structures and small flash precision forging processes which realized the large-scale energy conservation and emission reduction by significant material conservation, the establishment of intelligent automatic precision forging production line to reduce the number of field operators drastically, the precise control of steps closely related to process flow and heating temperature of precision forging, and the 3D printing manufacturing and remanufacturing of hot forging dies which improved the environmental protection by significantly saving energy. Engineering practices show that these measures are feasible and effective to achieve green forging by saving energy, consumption reduction and environmental protection, which have important reference significance to forging enterprises.

Key words: green forging; light weighting; front axle; steering knuckle; small flash precision forging process

对于德国和美国戴姆勒公司生产的载重为 15 ~

30 t 的集装箱货运车、房车等高端商用车, 其左、右转向节被视为核心保安件。该转向节锻件的结构特点为: 锻件的尺寸精度和技术性能指标要求高, 以 144 型转向节为例, 要求杆部的伸长率 $A \geq 12\%$ 、断面收缩率 $Z \geq 50\%$; 结构复杂, 其复杂程度为锻件最高复杂程度的 4 级。高端商用车转向节部件的结构如图 1 所示, 由图 1 可知, 转向节锻件由转向

收稿日期: 2021-10-22; 修订日期: 2022-01-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB2010300)

作者简介: 夏巨谌 (1941-), 男, 学士, 教授

E-mail: xjc_hust@163.com

通信作者: 张茂 (1989-), 男, 博士, 副教授

E-mail: zhangmao@hust.edu.cn

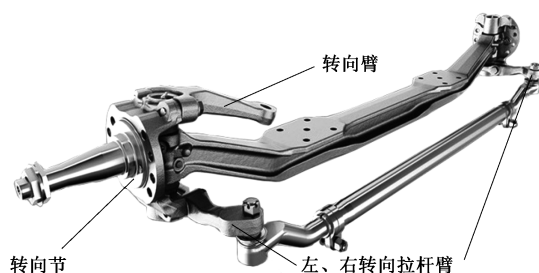


图 1 高端商用车转向节部件结构图

Fig. 1 Structure diagram of steering knuckle components in high-end commercial vehicles

节、转向臂以及左、右转向拉杆臂等零件构成。不难看出,前轴通过固定在其上的左、右两侧的叠形板簧同驾驶室及车身相连接,起承载作用;而转向节是利用关节式连接的左、右转向节的传动来实现汽车行驶方向的控制,同时起到支撑车身的作用,并将车身内的载荷以及车身后桥即主动桥传来的推力传递至前轮上,当制动时转向节还要起到承载制动力和制动力矩的作用^[1-2]。

湖北三环锻造有限公司(简称为三环锻造)与湖北三环车桥有限公司(简称为三环车桥),是国内最大的以生产中重型高端商用车转向节与前轴为主的钢质模锻件和有色金属锻件的专业化厂家之一,集模具设计制造、锻造、热处理、机械加工和装配于一体。两家公司现拥有以德国进口的 8000 和 6300 t 电动螺旋压力机和武汉新威奇科技有限公司制造的 2500、4000 和 6400 t 电动螺旋压力机为主机的 9 条前轴与转向节智能化精密锻造生产线;目前,正在建设由辊锻机、6000 t 国产热模锻压力机和两台武汉新威奇科技有限公司设计制造的 1600 t 数控电动螺旋压力机为主机的高端商用车前轴智能化精锻生产线^[3];以可控气氛网带式热处理炉为主体的 15 条热处理线;以德国、日本、韩国加工中心为主体的 27 条机加线和 19 条模具加工线。已具备年产锻件 10 万吨,主导产品汽车转向节 300 万件的生产能力,年产销规模超过 12 亿元,已成为戴姆勒奔驰卡车、荷兰 DAF 重卡安保件的供应商,所生产的汽车转向节、转向臂等产品出口至美国、德国、荷兰、韩国、印度和墨西哥等国家。2015 年以来,两公司同华中科技大学材料科学与工程学院建立了密切的产学研合作,并与华中科技大学材料科学与工程学院材料成形与模具技术国家重点实验室共同建立了“智能塑性近/净成形技术创新研发中心”,在高端商用车和房车前轴与转向节精锻技术及产品的研发方面处于国内外先进地位^[4-5]。

节能、减排、降耗是当前锻造行业实现技术升级改造和经济效益提升的关键途径之一,具有重要的经济与社会效益。两公司近年来投入巨资推行绿色锻造,通过研发轻量化结构和小飞边精锻成形工艺、采用 3D 打印进行热锻模制造与再制造、建立智能化精锻生产线和清洁环保型锻造车间,实现了大幅节材、节能、减排,同时显著改善了生产环境。

1 绿色锻造的技术内涵

众所周知,绿色原本是指天然的绿色,主要是指草原、森林与广袤大地上天然和人工种植的植被、田野上的水稻、小麦、大豆、高粱等在成长过程中的绿色,和城市周边与街道中间及两旁的树木、花草等的绿色。而绿色锻造则是相对传统锻造车间和专业化锻造厂而言应达到的目标。18 世纪末至 20 世纪初,英国发明了利用蒸汽作为动力的蒸气锤,以机器自由锻取代手工自由锻,并采用煤炭加热炉加热,这导致煤烟和蒸气的混合气体充满整个车间,不仅司炉工满身乌黑,而且司锤及锻工也满身乌黑,只能看到眼睛在动。当时,英国出版的专著《Drop Forging》(中文译名为《锤锻》)中将锻工称为黑色先生(Black Smith)。国内早期锻造行业的情况也基本相同,传统锻造车间中,在锻造设备周围往往存在高温辐射,在地面有氧化皮、润滑剂残渣及润滑油残液,并存在设备振动与噪声。在东风汽车公司锻造厂于 1979 年在国内首次采用中频感应加热之前,其他锻造厂和锻造车间普遍采用煤炭炉加热,在车间上空充满烟气与灰尘,造成环境污染,严重影响操作工及管理人员的身心健康^[6-7]。

绿色锻造主要是对这些造成环境污染的因素进行彻底或较为彻底的处理,采用必要的技术措施来予以解决,使车间内的空气等主要因素的质量达到国家或行业的相关技术指标,确保第一线操作和管理人员的身心健康^[8-9]。

2 实现绿色锻造的技术措施

2.1 建立清洁环保型锻造车间

武汉新威奇科技有限公司同三环车桥与三环锻造合作,根据前轴和转向节锻造工艺流程开发了以电动螺旋压力机为主机的环保型自动化精锻生产线和清洁型锻造车间,如图 2 所示。每台电动螺旋压



图 2 环保型电动螺旋压力机和精锻自动化生产线
Fig. 2 Environment friendly electric screw press and precision forging automatic production line

力机顶部的正反两侧均安装有强力抽风管道，最后汇集到一条主管道通至车间外。在模锻过程中，每次滑块带动下模回到上限位置且由顶杆顶出锻件后，自动润滑装置的喷嘴对上、下模进行润滑和冷却，所产生的含有石墨颗粒的水蒸汽被管道抽走，经过滤后排入车间顶部以上的空间，从而确保了车间场地干净，且有利于延长电气控制系统的使用寿命和灵敏度。

2.2 前轴与转向节轻量化结构设计与小飞边精锻成形工艺

2.2.1 轻量化结构设计

(1) 前轴的轻量化结构设计

朱国军等^[10]以 CAE 模拟结果为依据，实现了前轴的轻量化结构设计，即采用筋板薄壁镂空结构取代传统的厚壁工字形截面实心结构。图 3 为国外 7101 轻量化前轴，图 4 为国内 T45L0 老式前轴，前者质量为 72.8 kg，后者质量为 85.8 kg，经轻量化设计后质量减轻了 13 kg。



图 3 国外 7101 轻量化前轴
Fig. 3 Foreign-made 7101 light-weight front axle



图 4 国内 T45L0 前轴
Fig. 4 Home-produced T45L0 front axle

轻量化前轴的小飞边精锻成形工艺方案即工艺流程为：坯料加热→2~3 道次精密成形辊锻制坯→4000~6000 t 电动螺旋压力机上压弯→小飞边精压终成形→1600 t 电动螺旋压力机上切边、冲孔→

2000 t 精锻液压机上精压校正。所生产的前轴锻件周围的飞边宽度小、厚度薄，飞边体积仅为锻件体积的 8%~10%，而传统精锻工艺生产的前轴锻件的飞边体积通常会达到锻件体积的 30% 以上^[11]。

(2) 转向节的轻量化结构设计

以带臂转向节为例，其一体化锻件如图 5a 所示，现有工艺是将前臂与杆部和法兰分开锻造，经机加工后采用螺栓连接为一体（图 5b）。分体制造存在材料利用率低、加热能耗高、生产效率低、零件力学性能差等问题，而且难以实现轻量化。

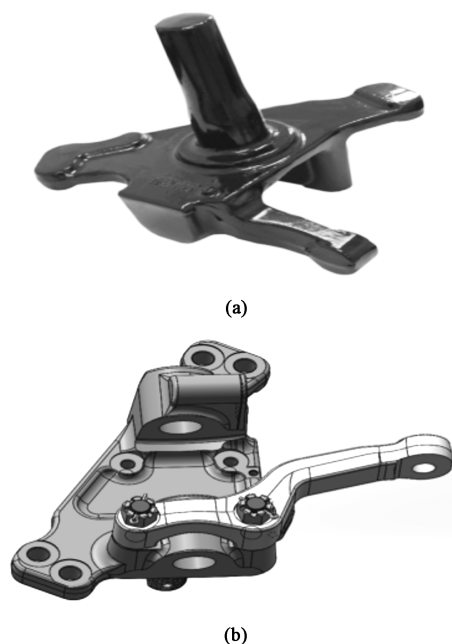


图 5 带臂转向节锻件
(a) 一体化锻件 (b) 分体锻件
Fig. 5 Forgings of steering knuckle with arms
(a) Integrated forgings (b) Separated forgings

针对这种转向节的结构特点及分体制造存在的问题，提出整体模锻工艺方案，并对其关键技术与装备进行了系统而深入的研究，成功应用于实际生产。经分析并参考已有经验，制定了如下的整体模锻工艺方案：下料→加热→压扁制坯→小飞边半闭式水平正反向挤压预锻→切边→水平可分凹模闭式侧向挤压成形。带臂转向节一体化锻件如图 5 所示，实现一体化后单个锻件减重 5 kg 左右。采用小飞边精锻成形工艺生产，其飞边体积仅为原工艺的 10% 左右，节材效果显著。

2.2.2 轻量化结构设计与小飞边精锻成形工艺的效果

(1) 节能、降耗、减排

采用轻量化结构设计使前桥部件减轻质量达

23 kg, 对整车运行时的节能、降耗、减排的贡献率大。据中国乘用车样本调查, 当车身质量降低 10% 时, 油耗可降低 2.5%~9.0%, 由此可根据商用车车重及其减重的百分比, 计算出减少油耗的百分比。

(2) 通过节材减少加热能耗, 进而减少对环境的影响

由上述分析可知, 采用轻量化结构减重和小飞边精锻成形工艺减少飞边体积, 共计可减少毛坯用量超过 16 kg, 按照一般结构钢加热至始锻温度 1200 ℃ 和 1 kg 钢材需加热电能 0.45 kW 计算, 则可节能 $16 \times 0.45 = 7.2$ kW, 这对于前轴和转向节两种锻件大批量生产时的节能和环保极为有效。

2.3 建立自动化精锻生产线

以转向节精锻成形为例, 由武汉新威奇科技有限公司同三环锻造合作, 根据高端商用车转向节的结构特点及批量供货要求, 在三环锻造建立了转向节智能化小飞边精锻生产线, 其精锻工艺流程为: 高速圆盘锯锯切下料→专用装置对棒料毛坯两端同时倒角→中频感应炉加热 ((1200±20) ℃) → 1000 t 电动螺旋压力机上锻粗去氧化皮→ 4000 t 电动螺旋压力机横向正反挤压小飞边预锻成形→ 6300 t 电动螺旋压力机上小飞边终锻成形→ 1200 t 闭式单点压力机上切边→激光快速在线精密检测→锻件码垛。所建立的转向节智能化精锻生产线布局如图 6 所示^[12-13]。

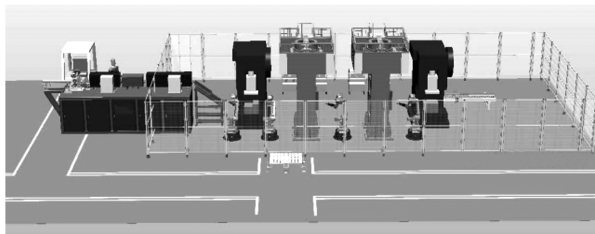


图 6 转向节智能化小飞边精锻生产线
Fig. 6 Intelligent and automatic precision forging production line with small flash for steering knuckle

该生产线的特点为: 采用线性化的物流规划和工艺流程优化布局, 使复杂程度最高且质量为 15~20 kg 的转向节锻件的生产流转周期由原来的 5 天缩短至 1 天, 显著提高了生产率。在三环车桥也建立了相似的、但流程更长的智能化小飞边精锻生产线。

2.4 实现对精锻工艺流程中与加热温度密切相关环节的精确控制

无论是哪种锻件的精锻工艺流程, 经观察不难

发现, 与加热温度密切相关的环节主要是始锻温度和终锻温度。对于一般的优质结构钢热模锻造, 其始锻温度通常定为 (1200±20) ℃、终锻温度定为 (800±10) ℃。

三环锻造和三环车桥生产中使用的数控电动螺旋压力机具有冲击载荷, 即锻造时其滑块以 $0 \rightarrow 700 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的加速度向下运行进行锻击, 同时, 在分模面周围形成的平面薄飞边不断增大的横向阻力的作用下, 在锻件内部造成强烈的金属流动而产生摩擦发热, 使锻件内部的温度不仅降低很小, 甚至略有上升。因此, 将材质均为 42CrMo 钢的前轴和转向节锻件的始锻温度定为 (1150±10) ℃、终锻温度定为 (800±5) ℃, 始锻温度由 1200 ℃ 减至 1150 ℃, 对于前轴而言, 则可节约加热电能 $72.8 \text{ kg} \times 0.45 \text{ kW} \cdot \text{kg}^{-1} \times 1150/1200 = 31.40 \text{ kW}$ 。此外, 两家公司采购钢材时均要求钢厂对轧制棒材表面进行精车, 其目的为: (1) 去掉表层氧化皮, 确保表面光洁; (2) 严格控制棒材直径精度, 使其在中频感应加热时, 棒料同炉膛内径之间的间隙小且均匀, 以利于提高电磁感应的加热效率, 进而提高加热温度和速度, 也在一定程度上起到了节能和环保的作用。

2.5 热锻模 3D 打印制造与再制造

热锻模 3D 打印制造与再制造方法的技术路线如图 7 所示^[14]。三环锻造针对电动螺旋压力机和模锻锤上锻模承受高温高压冲击载荷的特点, 在 5CrMnMo 钢和 5CrNiMo 钢模具基体上, 使用进口的

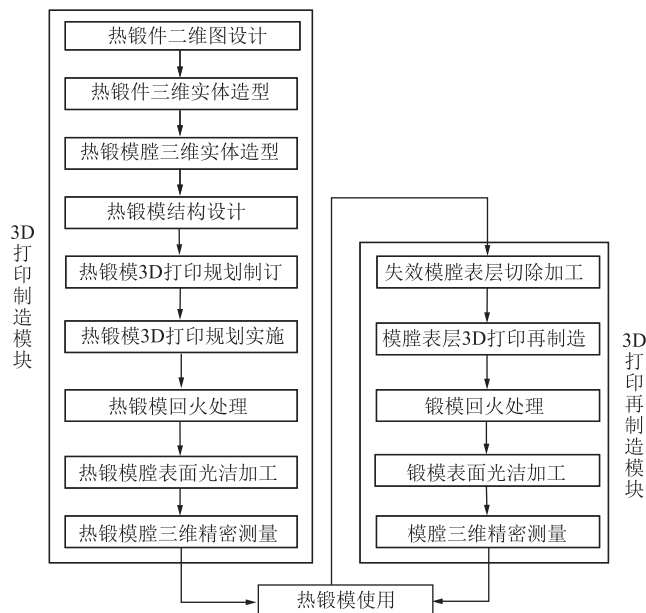


图 7 热锻模 3D 打印制造与再制造技术路线示意图
Fig. 7 Schematic diagram of technical routine for 3D printing manufacture and remanufacture of hot forging die

美国牌号分别为 725、455 和 750 的热锻模焊丝 (相应硬度分别为 25、35 和 40 HRC), 利用机器人自模具基体上逐层堆焊出模膛部分, 其堆焊工艺按照图 7 所示 3D 打印制造规划路线进行。

图 8 为平头鼓式转向节终锻模的修复效果。图 8a、图 8b 和图 8c 分别为传统堆焊修复与 3D 打印再

制造修复及光洁加工后的状态。据该企业统计, 与传统修复方法相比, 锻模的制造/再制造效率提高了 3.17 倍, 成本降低了 75%, 寿命提高了 4.47 倍, 明显降低了锻件的生产成本。不难看出, 该项技术的节材效果显著, 而节能、降耗、环保效果也非常显著, 在行业内被称为最为典型的绿色制造。

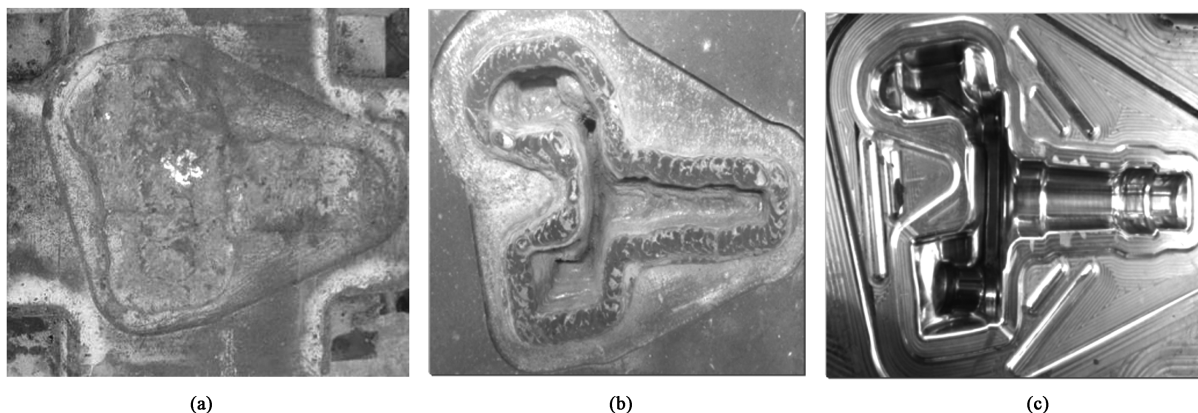


图 8 转向节终锻模的传统修复与 3D 打印再制造修复

(a) 传统堆焊工艺 (b) 3D 打印再制造工艺 (c) 光洁加工后的模具

Fig. 8 Traditional repair and 3D printing remanufacturing repair of final forging die for steering knuckle

(a) Traditional overlaying process (b) 3D printing remanufacturing process (c) Die after smooth processing

3 结论

(1) 提出了“建立清洁环保型锻造车间”、“研发前轴与转向节轻量化结构及小飞边精锻成形工艺”、“建立智能自动化精锻生产线”、“实现对精锻工艺流程与加热温度密切相关环节的精确控制”、“热锻模 3D 打印制造与再制造”这 5 项关键技术措施, 通过定性分析与定量计算相结合的方法, 实现了绿色锻造, 对于促进锻造行业的环境保护的效果显著。

(2) 本文的研究成果对于铸造、焊接、热处理乃至机械制造行业均具有一定的指导和参考意义。

参考文献:

- [1] 夏巨谔, 邓磊, 金俊松, 等. 房车转向节前臂弯曲工艺优化与模具装置研发及应用 [J]. 锻造与冲压, 2018, (17): 56-59.
Xia J C, Deng L, Jin J S, et al. Bending process optimization and die device research and application of recreational vehicle steering joint front arm [J]. Forging & Metalforming, 2018, (17): 56-59.
- [2] 张运军, 陈天赋, 杨杰, 等. 房车转向节整体模锻关键技术与模具装置研发 [J]. 中国机械工程, 2018, 29 (17): 2125-2130.
Zhang Y J, Chen T F, Yang J, et al. Development on key technologies and facilities of integral die forging for motorhomes steering

knuckles [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29 (17): 2125-2130.

- [3] 冯仪, 余俊, 夏自力, 等. 数控电动螺旋压力机与锻造自动化生产技术的发展历程 [J]. 锻造与冲压, 2020, (17): 69-71.
Feng Y, Yu J, Xia Z L, et al. Development of CNC electric screw press and forging automatic production technology [J]. Forging & Metalforming, 2020, (17): 69-71.
- [4] 夏巨谔, 邓磊, 王新云. 产学研紧密结合促进产业发展与人才培养 [J]. 锻造与冲压, 2020, (23): 18-21.
Xia J C, Deng L, Wang X Y. Close integration of industries, universities and research institutes to promote industrial development and personnel training [J]. Forging & Metalforming, 2020, (23): 18-21.
- [5] 龚攀, 王新云, 樊自田, 等. 材料成型及控制工程专业“导入式”生产实习的探索与思考 [J]. 中国现代教育装备, 2020, (9): 120-122.
Gong P, Wang X Y, Fang Z T, et al. Introduction production practice teaching method used in materials processing and control [J]. China Modern Educational Equipment, 2020, (9): 120-122.
- [6] 夏巨谔, 金俊松. 热精锻工艺及其装备的现状和发展趋势 (上) [J]. 锻造与冲压, 2015, (1): 20, 22, 24, 26, 28, 30.
Xia J C, Jin J S. Current situation and development trend of hot forging technology and equipment (I) [J]. Forging & Metalforming, 2015, (1): 20, 22, 24, 26, 28, 30.

- [7] 夏巨谌, 金俊松. 热精锻工艺及其装备的现状和发展趋势 (下) [J]. 锻造与冲压, 2015, (3): 29-32.
Xia J C, Jin J S. Current situation and development trend of hot forging technology and equipment (II) [J]. Forging & Metalforming, 2015, (3): 29-32.
- [8] 张茂, 张嘉城, 谈发堂, 等. 模具清洁热处理过程形性精确控制 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (9): 34-42.
Zhang M, Zhang J C, Tan F T, et al. Precise control on shape and performance during clean heat treatment process for die [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (9): 34-42.
- [9] 夏巨谌, 邓磊, 金俊松, 等. 闭式热精锻技术的新进展 [J]. 锻造与冲压, 2019, (9): 50-53.
Xia J C, Deng L, Jin J S, et al. New development of closed hot forging technology [J]. Forging & Metalforming, 2019, (9): 50-53.
- [10] 朱国军, 徐迪. 汽车前轴锻件轻量化设计方法 [J]. 锻造与冲压, 2018, (7): 28, 30, 32, 34.
Zhu G J, Xu D. Automotive front axle forgings lightweight design method [J]. Forging & Metalforming, 2018, (7): 28, 30, 32, 34.
- [11] 夏巨谌, 余国林, 詹金辉, 等. 可分式无飞边模锻的研发与应用 [J]. 模具工业, 2019, 45 (5): 52-57.
Xia J C, Yu G L, Zhan J H, et al. Development and application of flashless assembled forging die [J]. Die & Mould Industry, 2019, 45 (5): 52-57.
- [12] 夏巨谌, 邓磊, 包其华. 铝合金精锻技术和装备的发展 [J]. 锻造与冲压, 2020, (17): 50-53.
Xia J C, Deng L, Bao Q H. Development of aluminum alloy precision forging technology and equipment [J]. Forging & Metalforming, 2020, (17): 50-53.
- [13] 夏巨谌, 邓磊, 金俊松, 等. 精锻工艺数字化智能化方法探讨 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (7): 1-5.
Xia J C, Deng L, Jin J S, et al. Discussion on digitization and intelligentization method of precision forging process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (7): 1-5.
- [14] 夏巨谌, 胡洪斌, 赵海涛, 等. 热锻模 3D 打印制造与再制造技术及其装备的研发和应用 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (8): 1-5.
Xia J C, Hu H B, Zhao H T, et al. Development and application on 3D printing manufacturing and remanufacturing technology and equipment for hot forging mold [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 1-5.

(上接第 16 页)

- [3] Eivania A R, Rahimi F. Inhomogeneity in deformation, microstructure, tensile properties and damage development in AA1050 during multiple cycles of pure shear extrusion [J]. Material Science and Engineering: A, 2019, 745: 159-167.
- [4] Faraji G, Jafarzadeh H, Jeong H J. Numerical and experimental investigation of the deformation behavior during the accumulative back extrusion of an AZ91 magnesium alloy [J]. Materials & Design, 2012, 35: 251-258.
- [5] Vu V Q, Prokof'eva O, Toth L S, et al. Obtaining hexagon-shaped billets of copper with gradient structure by twist extrusion [J]. Materials Characterization, 2019, 153: 215-223.
- [6] Bagherpour E, Pardis N, Reihanian M, et al. An overview on severe plastic deformation: Research status, techniques classification, microstructure evolution, and applications [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100: 1647-1694.
- [7] Segal V. Review: Modes and processes of severe plastic deformation (SPD) [J]. Materials, 2018, 11 (7): 1175.
- [8] 王强, 张治民. 空心坯料反挤压省力成形方法及应用研究 [J]. 塑性工程学报, 2010, 17 (3): 22-26.
Wang Q, Zhang Z M. Investigation on backward extrusion of hollow billet with force saving [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 17 (3): 22-26.
- [9] 宋晓茜, 王强, 赵淑珍, 等. 基于上限理论的开口凸模旋转挤压力分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 240-245.
Song X Q, Wang Q, Zhao S Z, et al. Analysis on extrusion force of open punch rotary extrusion based on upper limit theory [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 240-245.
- [10] 张治民, 王强, 路光, 等. 重型车辆铝合金轮辋挤压成形技术及应用 [J]. 机械工程学报, 2012, 48 (18): 55-59.
Zhang Z M, Wang Q, Lu G, et al. Research on extrusion technology and application for aluminum alloy wheel rim of heavy vehicles [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48 (18): 55-59.
- [11] Wang Q, Zhang Z M, Li X B, et al. Development of a novel high straining backward extrusion process [J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 190: 06001.
- [12] Zaharia L, Comaneci R, Chelariu R, et al. A new severe plastic deformation method by repetitive extrusion and upsetting [J]. Mater. Sci. Eng. A, 2014, (595): 135-142.
- [13] 张治民, 于建民, 王强, 等. 一种大高径比镁合金棒料均匀镦粗成形方法 [P]. 中国: 201610274099.3, 2016-04-22.
Zhang Z M, Yu J M, Wang Q, et al. A uniform upsetting forming method for large aspect ratio magnesium alloy bar [P]. China: 201610274099.3, 2016-04-22.
- [14] Wang Q, Zhang Z M, Yu J M, et al. A novel backward extrusion process through rotating die and open punch [J]. Procedia Engineering, 2017, (207): 383-388.
- [15] 王强, 张治民, 于建民, 等. 一种铝镁合金杯形件旋转挤压成形方法 [P]. 中国: 201710544772.5, 2017-06-27.
Wang Q, Zhang Z M, Yu J M, et al. A rotary extrusion forming method for aluminium-magnesium alloy cup parts [P]. China: 201710544772.5, 2017-06-27.