

锻造

高端商务车铝合金转向节精密铸锻复合成形工艺优化

夏巨谌¹, 邓磊¹, 张茂¹, 张嘉城¹, 王新云¹, 冯仪², 余俊², 夏自力²

(1. 华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北武汉 430074; 2. 武汉新威奇科技有限公司, 湖北武汉 430074)

摘要: 以 A356 铝合金转向节作为典型案例, 详细分析了零件的材料、结构和性能特性, 以及现有生产工艺存在的不足之处。在对比分析 3 种铝合金挤压铸造成形工艺优缺点的基础上, 提出对精密挤压铸件进行小飞边精锻, 通过塑性成形来提高零件内部的致密度, 进而达到提高其力学性能和承载能力的目的。通过对精锻成形工艺的机理分析, 建立了工艺参数优化模型, 明确了转向节挤压铸造与小飞边精锻复合工艺流程。经过试产验证, 该工艺方案具有工艺流程短、节材、节能、制件质量高、生产成本低、经济效益好等特点, 受到国内外高端客户的欢迎。

关键词: 铝合金转向节; 挤压铸造; 精密铸锻; 复合成形; 小飞边精锻

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.08.001

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 08-0001-05

Optimization on precision casting and forging composite forming process for aluminum alloy steering knuckle of high-end business vehicle

Xia Juchen¹, Deng Lei¹, Zhang Mao¹, Zhang Jiacheng¹, Wang Xinyun¹, Feng Yi², Yu Jun², Xia Zili²

(1. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Newwish Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: For A356 aluminum alloy steering knuckle, the material, structure and performance characteristics of the part and the shortcomings of the existing production processes were analyzed in detail. Based on the comparison and analysis of the advantages and disadvantages of three kinds of aluminum alloy extrusion casting processes, it was proposed to perform the precision forging with small flash on the precision extrusion casting parts, and enhance the internal density of parts by plastic forming to achieve the goal of improving their mechanical properties and load-bearing capacity. Furthermore, through analyzing the mechanism of precision forging process, an optimization model for process parameters was established, and the composite process flow of extrusion casting and precision forging with small flash for steering knuckle was clarified. The trial production verification shows that this process scheme has the characteristics of a short process flow, material saving, energy conservation, high quality of part, low production cost and good economic benefits, which has been well-received by high-end customers at home and abroad.

Key words: aluminum alloy steering knuckle; extrusion casting; precision casting and forging; composite forming; precision forging with small flash

新能源汽车因轻量化而节能、减排、绿色、环保, 受到用户的广泛欢迎。根据中国汽车工业协会预计, 2023 年全年, 中国新能源汽车销量为 940 万辆, 同比增长 36.5%^[1]。而在 2023 年 1 月~11 月, 中国新能源汽车出口 109.1 万辆, 同比增长 83.5%。中国在全球纯电动汽车中的市场份额最大, 达到 58%, 而美国

则以 12% 的市场份额位列其后^[2]。根据行业专家预测, 2024 年我国新能源汽车的产销规模有望达到 1300 万辆, 增速约为 40%, 其中海外销售规模将突破 180 万辆 (不含海外生产), 增速有望达到 50%^[3]。新能源汽车产业的快速增长, 带动了相关产业链的飞速发展。

铝合金是汽车轻量化中首选的轻金属材料。铝合金的密度即比重约为钢的 1/3, 其抗拉强度、抗冲击强度和屈服强度高, 不氧化, 经化学处理后色泽鲜亮; 铝金属是由铝矾土提炼的, 我国铝矾土藏量占世界的 70% 以上, 资源丰富, 且切边冲孔与不合格锻件均可回收, 重熔后可再次使用; 纯铝元素加上硅 (Si) 和其他元素可形成各种不同使用性能

收稿日期: 2024-01-04; 修订日期: 2024-04-10

基金项目: 湖北省自然科学基金面上项目 (2023AFB564)

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

的铝合金,以满足汽车、航空航天飞行器和常规兵器关键零部件制造的需求。

转向节是新能源汽车中技术难度高的关键零件。无论是商用车还是商务车,因转向节既要具有行驶方向的控制功能,又要承受拉、压、弯扭和冲击载荷,承载条件苛刻,故而被欧、美等高端客户视为关键保安件,对其质量要求极高,且转向节的难度系数 $m \leq 0.16$,是锻件中复杂程度最高的锻件。因此,生产这种锻件的技术难度高,极具研发与攻关意义。

1 A356 铝合金转向节的结构特点及性能分析

图1和图2分别为国外某型高档商务车铝合金

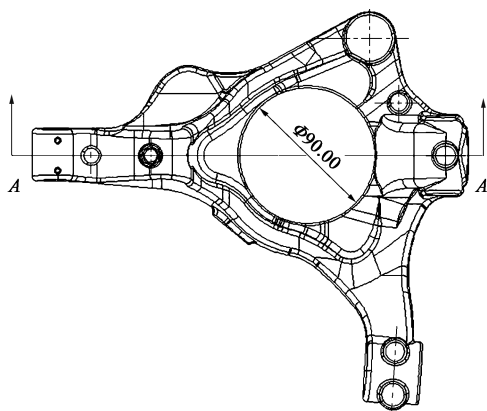


图1 转向节零件二维平面图

Fig. 1 Two-dimensional plane diagram of steering knuckle part

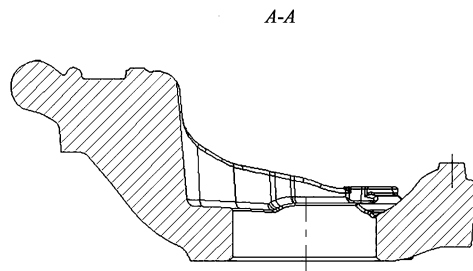


图2 转向节零件的三维实体模型

Fig. 2 Three-dimensional entity model of steering knuckle part

铝合金坯料进行热锻生产,必然导致工艺流程长,加热火次多、材料利用率低、生产效率低、零件生产成本低。所以,其传统生产工艺一直采用铸造工艺生产,其缺点为:容易产生内部裂纹、空洞和致密性差等缺陷,从而导致承载能力差的问题,难于满足国内外高端客户特别是国外高端客户的技术要求。

转向节的二维平面图和三维实体模型。零件的轮廓尺寸为 $290.98 \text{ mm} \times 264.3 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$,中间圆孔直径为 $\Phi 90.00 \text{ mm}$,零件上具有多个凸台和小圆孔,用于与其他零部件进行连接。该转向节零件的形状与一般载重车优质结构钢 42CrMo 转向节相似,结构复杂。零件材料为 A356 铝合金,其主要合金成分(质量分数)为 6.538% 的 Si 和 0.4% 的 Mg; T6 态下的主要力学性能指标分别为:抗拉强度 $R_m \geq 234 \text{ MPa}$ 、屈服强度 $R_{eL} \geq 165 \text{ MPa}$ 、伸长率 $A \geq 3\%$ 。

由上述可知,A356 铝合金的化学成分中含硅量(质量分数)为 6.538%,因含 Si 含量较高,所以,其抗变形强度指标较高,且材料内部的共晶 Si 呈脆性,塑性较差,但其在热态 ($330 \sim 380 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 下仍具有一定的塑性成形能力,能够采用热模锻或热旋压工艺成形^[4-6]。转向节结构复杂,若采用固态 A356

2 铝合金挤压铸造成形技术的演变过程及其优缺点分析

转向节结构复杂,且采用挤压铸造成形工艺生产的历史较长,并不断改进,故传统商务车铝合金转向节一般采用挤压铸造成形生产^[7-8]。华中科技大学兰国栋等^[9-10]提出:随着铝合金铸造技术的发展,其相应的工艺演变过程为:重力铸造→单冲头挤压铸造→双冲头间接挤压铸造→带储料室的双冲头挤压铸造,其相应的优缺点分析如下。

(1) 采用单冲头挤压成形的铸件存在缩孔、冷隔等缺陷。零件较薄部位先凝固,导致冲头挤压力传递受阻,而厚大部位后凝固且得不到补缩,会形成缩孔缺陷;此外,铝液直接浇入至模腔后停留时间过长,在模腔壁形成一层铝合金冷壳,且与后来

凝固的铝合金不能熔合。单冲头挤压成形的零件的缩孔、冷隔缺陷主要是由模具结构导致的, 调节挤压工艺参数无法消除缺陷。

(2) 对于双冲头挤压铸造, 小冲头的挤压深度直接影响中间厚大部位的缩孔。当上冲头挤入的深度较浅时, 中心出现较大缩孔; 但当孔深接近挤穿时, 剖面基本不会产生缩孔疏松等缺陷。小冲头的挤压深度是由开始挤压时间决定的。开始挤压时间越长, 合金液凝固越多, 冲头越难以向下挤压, 补缩作用就越弱。因此, 要把握好上冲头的挤压时间, 并在适当时机将小冲头抽回来。如果抽芯过早, 则会出现中心孔回缩现象, 影响补缩效果; 如果保压时间过长, 则上冲头与铸件粘接在一起, 造成脱模困难。因此, 在铝液刚充满型腔时, 上冲头开始挤压后保持 5~7 s 即可立即抽回, 能够基本消除铸件的缩孔缺陷, 脱模也很容易。

(3) 间接挤压铸造工艺方案由上模、中模和下模 3 部分组成, 并且在下模设计一个储料室, 仍然采用双冲头挤压。在挤压铸造过程中, 液态金属注入储料室后, 很快形成一层冷壳。当铝液充满型腔时, 外部的结壳和涂料等夹渣会阻止浇道外的流动。高温且质量较好的铝液通过直浇道, 在短时间内填满型腔, 避免了因不均匀冷却而产生的冷隔现象。剩余温度较低且含杂质较多的铝液凝固在料缸中形成料饼。采用该工艺方案铸件的表面平整、无冷隔缺陷, 但是制作出来的零件具有较长的浇道和较大的料饼, 导致工艺产率低下。

(4) 与间接挤压铸造方案相比, 带有储料室的双冲头挤压铸造工艺省去了狭长的直浇道。该

工艺在料室外部设置了一层保温套, 使得铝液在浇注时能够获得一定的保温效果, 并减小壳层形成的厚度。在下冲头推动下, 铝液充型过程平稳且卷气可能性大大降低。同时, 温度均匀的铝液能够快速填满型腔, 在较短时间内完成充型过程, 避免了低温模壁的不均匀激冷作用, 提高整体冷却均匀性, 并确保零件表面无冷隔、内部无缩孔疏松现象发生。

与间接挤压模铸造模具相比, 带储料室的双冲头挤压铸造模具操作更方便, 成形的铸件质量更好, 工艺出品率可以高于 90%。然而, 铝液充型时容易带入涂料等夹渣, 一定程度上影响铸件的力学性能。但是, 综合比较下, 双冲头挤压铸造较其他 3 种方案更具优越性。

3 A356 铝合金转向节精密铸锻复合成形工艺优化

图 3 为铝合金转向节小飞边精锻工艺示意图, 其中, 虚线为挤压铸件 2, 实线为锻件 4。小飞边精锻工艺的设计思路为: 在终锻过程中, 挤压铸件 2 主要是镦粗的变形过程。在截面 A-A 上, 转向节上任一垂直方向的铸件截面 (虚线) 与锻件截面 (实线) 及在可分凹模的分模面周围形成的小飞边的相互尺寸关系为^[11-12]:

$$A_1 = h_1 \cdot b_1 = A_2 + 2A_{\text{飞}} = h_2 \cdot b_2 + 2A_{\text{飞}} \quad (1)$$

式中: A_1 、 h_1 和 b_1 分别为挤压铸件的截面积、高度和宽度; A_2 、 h_2 和 b_2 分别为锻件的截面积、高度和宽度; $A_{\text{飞}}$ 为锻件两侧小飞边的截面积。

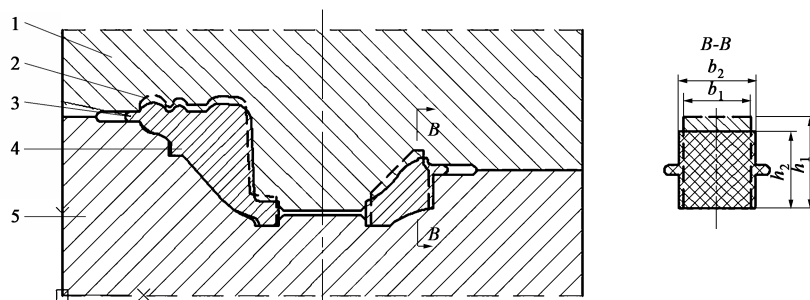


图 3 转向节小飞边精锻工艺示意图

1. 上模 2. 挤压铸件 3. 小飞边 4. 锻件 5. 下模

Fig. 3 Schematic diagram of precision forging process with small flash for steering knuckle

其优化设计思路即挤压铸件与锻件截面的高度、宽度尺寸的相互关系应当为: $h_1 > h_2$, $b_1 < b_2$ 。

h_1/h_2 或 (b_2/b_1) 的值是实现挤压铸造与小飞

边精锻工艺方案的关键, 即由挤压铸件变为精密模锻件的过程中, 镦粗压缩比同锻件的致密度和主要力学性能应当为正向线性比例关系, 可采用物理模

拟和有限元数值模拟方法得到^[13-14]。对于本文所研究的铝合金转向节产品,压缩比为 1.4~2.5 即可满足产品性能要求。采用小飞边精锻成形,其目的是通过锻件周围形成的薄飞边即厚度全部按飞边桥部的厚度设计,在精锻终成形时,实际形成的飞边宽度 b 超过飞边厚度 h 的 5 倍,即 $b/h \geq 5$ 时会产生强烈的三向压应力,通过提高塑性成形性能来提高锻件内部的致密度,进而达到提高其力学性能和承载能力的目的。

基于上述优化设计思路及方法,所设计的转向节挤压铸造与小飞边精锻工艺流程如下:

A356 铝合金铸锭熔化→挤压铸造成形→切除浇道冒口→预成件(挤压铸件)加热→小飞边精锻成形→切除小飞边→热处理→精密机加工,即将装配部位的轮廓尺寸加工至配合精度要求即可。

该方案有 4 个突出的优点:

(1) A356 铝合金在熔融状态下的流动性能好,可通过挤压铸造成形为形状复杂的转向节等枝叉类制件,进而通过小飞边精锻可有效消除铸件的内部缺陷,细化晶粒、提高其力学性能两种优点综合于一体;

(2) 挤压铸件切除浇道、冒口后,铸件的温度应仍保持在 450℃ 左右,可直接进行小飞边热精锻成形,减少一道加热工序,不仅可以节约加热能耗,还可提高生产效率,达到短流程、绿色铸锻的效果;

(3) 将铝合金熔化炉、挤压铸造压力机、数控电动螺旋压力机或其他模锻设备通过专用装置和机器人组成自动化生产线,不仅生产效率高,而且制件的几何形状、尺寸精度及内在质量的一致性高,这是国外高端客户最为关注的一点;

(4) 从铸件上切下的浇道、冒口和从锻件上切下的小飞边,可以熔化后再次利用,材料利用率显著提高^[15-16]。

锻造工艺通过大的变形量,压碎了铸造组织中的粗大晶粒,获得晶粒细小、均匀的组织,是生产高端商务车铝合金转向节及其相似的高质量零件的先进的工艺方法^[17-19]。精密铸锻复合成形工艺综合体现了铸锻两种精密成形工艺的优点,即工艺流程短、节材、节能、制件质量高、生产成本低、效益好。根据该技术方案采用武汉新威奇科技有限公司制造的 JK-58 型数控电动螺旋压力机生产出铝合金转向节样件(图 4),其性价比高,深受国内外高端客户的欢迎。



图 4 转向节样件

Fig. 4 Steering knuckle sample

4 结语

转向节是高端商务车上的关键零件,采用传统的挤压铸造工艺生产,因裂纹、空洞和致密度差等缺陷,很难满足国内外高端客户对承载能力强的使用要求。而采用精密铸锻复合成形,即在挤压铸造的基础上紧接着利用铸件的余热进行小飞边即闭式精锻成形,可以在强烈的三向压应力作用下有效提高制件的致密度,从而提制件的力学性能,可满足国内外高端客户特别是欧、美等国外高端客户的使用要求,而且综合了铸锻两种工艺的优点,工艺流程短、节材、节能,制造成本低,性价比高。

参考文献:

- [1] 孙桐桐. 新能源汽车渗透率首破 40% 二级市场回调较充分 [N]. 每日经济新闻, 2023-12-29 (T20). DOI: 10.28571/n.cnki.nmrjj.2023.004580.
Sun T T. The penetration rate of new energy vehicles exceeds 40% for the first time, with a significant correction in the secondary market [N]. Daily Economic News, 2023-12-29 (T20). DOI: 10.28571/n.cnki.nmrjj.2023.004580.
- [2] 李海楠. 电动汽车产业蜕变成中国制造“金名片” [N]. 中国经济时报, 2023-12-29 (001). DOI: 10.28427/n.cnki.njjsb.2023.002896.
Li H N. The electric vehicle industry's transformation into a "golden business card" of Chinese manufacturing [N]. China Economic Times, 2023-12-29 (001). DOI: 10.28427/n.cnki.njjsb.2023.002896.
- [3] 范文清, 顾雪琪. 汽车销量有望破 3000 万辆新能源车国际化将成亮点 [N]. 每日经济新闻, 2023-12-28 (006). DOI: 10.28571/n.cnki.nmrjj.2023.004545.

- Fan W Q, Gu X Q. Automobile sales expected to exceed 30 million units, with internationalization of new energy vehicles set to become a highlight [N]. Daily Economic News, 2023-12-28 (006). DOI: 10.28571/n.cnki.nmrj.2023.004545.
- [4] 曾胜, 常海平, 张金, 等. A356 铝合金的高温流变行为及本构模型研究 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (4): 242-248.
- Zeng S, Chang H P, Zhang J, et al. Study on high-temperature rheological behavior and constitutive model for A356 aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (4): 242-248.
- [5] 何维钧, 宋鸿武, 张立娟, 等. 铸造 A356 铝合金的高速热变形行为 [J]. 塑性工程学报, 2011, 18 (2): 71-76.
- He W J, Song H W, Zhang L J, et al. Hot deformation behaviors of cast A356 alloy at relatively high strain rates [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2011, 18 (2): 71-76.
- [6] 陈萌, 陈思悦, 裴小虎, 等. 轿车的后转向节零件铸锻复合成形工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32 (6): 518-521.
- Chen M, Chen S Y, Pei X H, et al. Casting and forging compound process for producing steering knuckles of car [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2012, 32 (6): 518-521.
- [7] 涂卫军, 王刚. 铝合金汽车转向节挤压铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2015, 64 (8): 740-743.
- Tu W J, Wang G. Study on squeeze casting processing for automotive al-alloy steering knuckle [J]. Foundry, 2015, 64 (8): 740-743.
- [8] 齐丕骧. 我国挤压铸造机的现状与发展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30 (4): 305-308.
- Qi P X. Present status and future of squeezing casting machine at home [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2010, 30 (4): 305-308.
- [9] 兰国栋. 高硅铝合金零件挤压铸造技术的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- Lan G D. Study of High Silicon Aluminum Alloy Squeeze Casting Parts [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [10] 兰国栋, 万里, 罗吉荣. 液态加压成形高硅铝合金 A390 的组织与力学性能 [A]. 第八届 21 省 (市、自治区) 4 市铸造学术年会论文集 [C]. 宜昌: 中国机械工程学会, 2006.
- Lan G D, Wan L, Luo J R. Liquid pressure forming of high silicon aluminum alloy A390: Microstructure and mechanical properties [A]. Proceedings of the 8th 21 Provinces (Cities, Autonomous Regions) 4 Cities Foundry Academic Annual Conference [C]. Yichang: Chinese Society of Mechanical Engineering, 2006.
- [11] 夏巨湛, 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] 陈天赋, 屈志远, 周杰, 等. 一种提高长轴类转向节锻件材料利用率的组合模具 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (8): 185-192.
- Chen T F, Qu Z Y, Zhou J, et al. A kind of combined mold on improving material utilization rate for long shaft steering knuckle forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (8): 185-192.
- [13] 王顺成, 蔡畅, 戚文军, 等. 锻压变形量对铸锻成形 A356 铝合金组织及性能的影响 [J]. 塑性工程学报, 2014, 21 (1): 58-64.
- Wang S C, Cai C, Qi W J, et al. Effects of forging deformation amount on microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy manufactured by casting-forging integrated technology [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 21 (1): 58-64.
- [14] 王以华. 锻模设计技术及实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- Wang Y H. Forging Die Design Technology and Examples [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [15] 夏巨湛, 邓磊, 王新云. 铝合金精锻成形技术及设备 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.
- Xia J C, Deng L, Wang X Y. Precision Forging Technology and Equipment for Aluminum Alloy [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019.
- [16] Deng L, Xia J C, Wang X Y. Precision Forging Technology and Equipment for Aluminum Alloy [M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022.
- [17] 程志强, 张远东, 韦升财, 等. 高强韧铝铸件铸锻一体技术及其应用 [J]. 铸造, 2023, 72 (4): 447-450.
- Cheng Z Q, Zhang Y D, Wei S C, et al. Integrated casting and forging technology of high strength and toughness frame aluminum castings and its application [J]. Foundry, 2023, 72 (4): 447-450.
- [18] 彭勇, 王顺成, 郑开宏, 等. 铸锻复合一体化成形 6061 铝合金的组织及力学性能 [J]. 中国有色金属学报, 2014 (2): 325-334.
- Peng Y, Wang S C, Zheng K H, et al. Microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy prepared by casting-forging integrated technology [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014 (2): 325-334.
- [19] 祝叶, 李爱. 锻压应力对铸锻复合成形加 Cr 的 6061 铝合金性能的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2021, 49 (2): 30-34.
- Zhu Y, Li A. Effect of forging stress on properties of 6061 aluminum alloy with added Cr in cast-forging composite forming [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2021, 49 (2): 30-34.