

大型零件高性能挤压铸造的难题与对策

邢书明¹ 高文静¹ 武彤¹ 赵必为¹ 刘鑫^{1,2}

(1.北京交通大学机械与电子控制工程学院; 2.北方车辆集团)

摘要 介绍了大型钢铁零件和铝合金零件高性能挤压铸造的最新进展及其卡脖子难题,提出了相应的对策和解决方案。针对大型斗齿、齿座,圆锥破碎机的轧臼壁、破碎壁以及重型车辆的主动轮等典型大型零件,进行了挤压铸造的技术经济可行性分析,指出大型零件挤压铸造的主要难题是浇注过程氧化吸气严重、壁厚效应突出以及工艺装备投资巨大,提出了解决这些难题的气-液送料、随动浇注、液-机联合锁模、多段分级加压等技术路线并分析其可行性。

关键词 大型零件;挤压铸造;偏析;壁厚效应

中图分类号 TG249.2 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.04.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Problems and Countermeasures of High-performance Squeeze Casting for Large-scale Parts

Xing Shuming¹, Gao Wenjing¹, Wu Tong¹, Zhao Biwei¹, Liu Xin^{1,2}

(1.School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University;
2.Northern Vehicle Group Co., Ltd.)

Abstract: The latest development of high-performance squeeze casting for large-scale steel parts and aluminum alloy parts as well as its key problem were introduced, and corresponding countermeasures and solutions were proposed. The technical and economic feasibility analysis of squeeze casting was carried out for typical large-scale parts such as large bucket teeth, tooth seats, rolling mortar walls and crushing walls of cone crushers, and capstan of heavy vehicles. The main problems of squeeze casting for large-scale parts were pointed out, including serious oxidation and gettering, prominent wall thickness effect and huge investment in process equipment during the pouring process. The technical routes to solve these problems were put forward, such as air-hydraulic pressure feeding, follow-up pouring, and the locking mold with uniting hydraulic pressure-mechanical force, and the feasibility of these technologies were analyzed.

Key Words: Large-scale Parts, Squeeze Casting, Segregation, Wall Thickness Effect

挤压铸造是一种综合了铸造和锻造的成形技术,具有高效、绿色、高性能的特点,且不受材料和零件尺寸限制。然而,该技术目前主要用于中小零件。大型零件的成形具有特殊性,普通铸造和锻造都受到了严重的挑战,对大型零件的挤压铸造成形的需求日益旺盛。受制于硬件条件,有关大型零件挤压铸造的研究与应用较少。在简要总结大型零件挤压铸造的研究进展的基础上,着重分析大型零件高性能挤压铸造的卡脖子问题,提出相应的解决方案,并以大型斗齿、轧臼壁以及重型机械主动轮等典型大型零件为例,分析大型零件挤压铸造的难题、对策和技术经济可行性。

1 大型零件挤压铸造的研究进展

1.1 大型轮形件的挤压铸造

铝合金铸件的高性能成形是挤压铸造技术应用最早也是最成功的领域之一。目前已经从最基本的直接挤压发展到了高效快捷的多腔间接挤压铸造,中小零件挤压铸造的应用范围急速扩大^[1-3]。大型铝合金件挤压铸造的研究应用总体进展缓慢,但是汽车车轮、战车车轮、传动机构的槽轮等轮形件挤压铸造的研究和应用却较多^[4-7]。陈炳光^[8]探讨了大型车轮挤压铸造的工艺,认为反向挤压是较好的工艺。本世纪初,北方车辆就

收稿日期:2022-09-08

基金项目:安徽省重点研发计划资助项目(202004a05020069)

第一作者简介:邢书明,男,1962年出生,教授,北京(100044),E-mail:smxing@bjtu.edu.cn

引用格式:邢书明,高文静,武彤,等.大型零件高性能挤压铸造的难题与对策[J].特种铸造及有色合金,2023,43(4):433-438.

XING S M, GAO W J, WU T, et al. Problems and countermeasures of high-performance squeeze casting for large-scale parts[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(4):433-438.

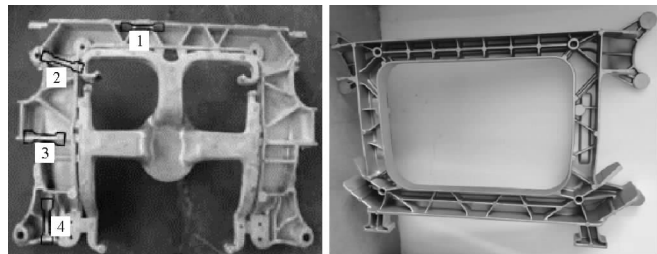
建成了一条重型车辆负重轮挤压铸造生产线,实现了变形铝合金挤压铸造和铝代钢铁轻量化升级^[9];2011年中集团在天津建成了挤压铸造汽车车轮的生产线,并投入了批量生产^[10];计鑫^[11]设计了一条挤压铸造车轮的数字化生产线,促进了轮形件挤压铸造的数字化。袁晓光等^[12]研究了挤压铸造 6061 铝合金轮毂组织及性能,确认了液锻件可与固态锻件性能接近。张立君等^[13]采用 RZU2000HC 挤压铸造液压机和反向挤压铸造工艺制备了外圆直径达 540 mm 的铝合金轮毂,母体取样测试了 ZL205A 铝合金及变形铝合金和 2A12、2A50、6061、7A04 重型车轮的组织性能,证明了铝合金可以通过挤压铸造获得细小的铸造组织,且通过随后的热处理实现强化。挤压铸造 ZL205A 轮毂 T5 处理后的性能优于铝铜合金差压铸造,达到甚至超过了变形铝合金 2A12、2A50、6061、7A04 模锻件的性能水平。同时发现,在轮缘与辐板交汇的热节部位存在明显的异常偏析和脆性化合物的偏聚。孟凡博^[14]利用 30 000 kN 液压机进行了 6061 铝合金轮毂的挤压铸造,发现挤压铸造 6061 铝合金轮毂存在偏析现象,偏析部位主要在轮辐的 R 连接处,呈团絮状和长条状分布,最大尺寸约为 10 mm。模拟研究指出,当偏析区的冷却速度大于 1.0 °C/s 时,偏析可以避免。MENG F S 等^[15]的研究也证实了挤压铸造大型轮毂的偏析行为非常复杂。侯立群等^[16]采用浮动阴模工艺显著减轻了车轮热节部位的缩松缺陷,这种缩松缺陷进一步与偏析耦合,很容易出现热裂缺陷。张占领等^[17]对反挤压铸造 $\phi 459$ mm 的镁合金轮毂的裂纹问题进行了研究。结果表明,浇注温度、充型速度以及液锻比压、保压时间都对裂纹缺陷存在明显影响。

综上,大型轮形件挤压铸造有明显的共同特点,采用立式液压机改制型液锻机反向直接挤压铸造方法成形,试图对标固态锻件的性能,也面临热节处缩松、偏析和组织性能不均匀性的难题。实现大型液锻件的均质化需要从材料、设备、模具、工艺四方面进行一体化综合设计和对液锻工艺进行多参数综合调控。

1.2 大型框架零件挤压铸造

大型框架结构件在众多行业都有重要需求。汽车副车架是大型框架型结构件的典型代表,也是大型框架零件挤压铸造的热点之一^[18]。2015 年,苏州三基与清华大学、苏州大学等高校合作,先后利用立式 SCV-2000^[19]、SCV-2500 型^[20]挤压铸造机进行了汽车副车架的间接挤压铸造,零件质量由 25 kg 减为 17.5 kg^[19]。在浇注温度为 690~710 °C、压射比压为 95 MPa、模具温度为 240 °C、保压时间为 20 s 时,铸件表面无铸造缺陷,内部组织致密。经 T6 处理后,母体取样抗拉强度

为 291 MPa,伸长率为 9.2%,硬度(HBW)为 96,达到了 A356 合金的静态力学性能要求。台架试验也证实挤压铸造汽车副车架疲劳性能也符合要求^[21]。最近,广州和德利用 25 000 kN 挤压铸造机成功开发了成形完整、表面光洁的副车架。两种副车架见图 1。



(a) 苏州三基试制的副车架

(b) 广州和德试制的副车架

图 1 挤压铸造副车架

Fig.1 Subframes by squeeze casting

副车架结构复杂,壁厚极不均匀,挤压铸造件的缩松、缩孔缺陷依然存在,通过局部加压和点冷措施可以在一定程度上减轻,但不能完全根除,这是大型框架类零件挤压铸造面临的共性难题。对某特种车辆大型复杂支架进行了挤压铸造。该件质量为 183 kg,最大壁厚为 80 mm,最小壁厚为 20 mm,最大外形轮廓尺寸为 800 mm×580 mm×520 mm,零件有一中心通孔和 4 个侧孔,还有加强筋、耳轴、凸台及支臂等复杂且不对称的结构,见图 2。要求组织致密、无明显缺陷、内腔表面光滑,铸件内部没有裂纹、气泡、气孔及缩松等缺陷。针对这一大型复杂结构件,邵明等^[22]采用立式液压机改制型液锻机、中心底注式气压密闭送液、液压压头压射充型,成功实现了挤压铸造,满足产品要求。



图 2 大型复杂支架

Fig.2 Large-scale and complex bracket

2 大型零件高性能挤压铸造的难题与对策

2.1 浇注过程的氧化和吸气

大型零件通常都有服役安全可靠要求,而夹杂和气孔直接降低服役安全可靠。据统计,70%以上的氧化物夹杂来源于浇注过程^[23]。现有挤压铸造技术装备是利用给汤机定量舀取熔制合格的金属液并翻转倾入料筒内,再由锤头(压头)压射进入型腔,该过程难免出

现氧化、卷气、卷渣现象,使熔制合格的金属液遭到夹杂“污染”。在小型零件挤压铸造中,可以在模具设计中设置“排溢”结构将夹杂与气体引出型腔,使夹杂卷气的问题得到较好的解决^[24]。对于大型零件,由于金属液流程长且壁厚差异大,这些污染物在充型过程的随流转移行为复杂多变,很难准确预测,仅靠排溢措施难以解决,危害更大。因此,大型零件挤压铸造中首要难题就是如何“无污染浇注”,实现洁净化成形。

解决这一问题的基本路线是无氧化浇注或保护浇注,这在钢铁工业中已经得到了充分研究与应用。文光华^[23]开展了无氧化浇注的连铸技术研究,提出了保护管法、高压箱法、保护气幕法等。胡泽东^[25]实现了连铸工序全程无氧化保护浇注,将这些技术措施集成到挤压铸造机上,同样可以达到保护浇注的目的。然而目前的铝合金挤压铸造机尚未实现这些功能。

近年来,将低压铸造的密闭气压升液技术与挤压铸造的高压充型技术相结合,提出了“气-液结合”无氧化浇注技术(SSMF技术)^[22,26]。与立式压铸类似,该技术利用气压将熔制合格的合金液直接压入料筒,再由液压压头将其推入型腔,进行挤压铸造,见图3。其变“舀取-倾倒”为气压直接密闭输送,从根本上杜绝了浇注过程的氧化污染。同时与挤压铸造机集成,可以在工业层面上解决大型铸件挤压铸造浇注过程氧化污染的问题。

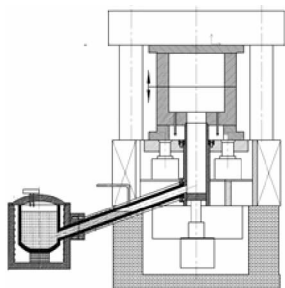


图3 无氧化浇注(SSMF)

Fig.3 Oxidation-free casting

2.2 偏析和组织性能的壁厚效应

壁厚效应的本质是厚壁处凝固速度缓慢、枝晶发达、枝晶间缩松和偏析加重,导致性能下降。一般来说,挤压铸造的高压作用可以减小这种壁厚效应,但是对于大型零件,由于压力传递路径复杂,这种高压作用的效果较差,厚壁处的性能会显著低于薄壁处。虽然已经揭示了大型车轮反向挤压的偏析规律^[4,27-28]和直接液锻的偏析规律^[29],但是如何消除这些偏析还缺乏行之有效的技术方案。

理论上,根据宏观偏析的判别式^[29]可知,要实现无宏观偏析,就要 $\bar{C}_s = C_0$,即 $q=1$,也就是垂直于等温面的局部流动速度 v_p 与凝固速度 u 的比值要满足 $\frac{v_p}{u} =$

$-\frac{\beta}{1-\beta}$ 的要求。在合金材料一定的情况下,凝固收缩系数 β (凝固收缩时取正值,凝固膨胀时取负值)为定值,通过调控垂直于等温面的局部流动速度 v_p 与凝固速度 u 的比值,使其等于 $\theta = -\frac{\beta}{1-\beta}$,即可做到无宏观

偏析。也就是说,只要 $\frac{v_p}{u}$ 不等于 θ ,就会出现宏观偏析。这从理论上说明了大型工件存在偏析的必然性。

$$\bar{C}_s = k_0 C_0 \frac{q}{k_0 - 1 + q}$$

式中, C_s 为固相溶质的含量; C_0 为合金溶质的平均含量; k_0 为溶质平衡分配系数。从凝固原理出发,对于 $k_0 < 1$ 的合金,提高冷却速度、降低液流速度和减小液相内的温度梯度,都可以减小偏析。因此,要根除偏析只有两个极端的技术方向,一是极大地提高冷速,实现稳定态凝固;二是极其缓慢地冷却,实现平衡凝固。虽然,这两个技术路线在实际中都几乎不可能实现,但指明了消除偏析的方向。按照稳定态凝固的技术路线,采用水冷铜模进行大壁厚工件的挤压铸造,可以显著抑制壁厚效应,减小偏析。此外,按照平衡凝固的技术路线,采用耐火材料制成的半永久型进行大轮廓薄壁结构件的挤压铸造,既可以保证完整成形,又可以防止通道偏析。

2.3 工艺装备的巨额投资

大型零件挤压铸造碰到的第3个卡脖子问题就是如何降低设备和模具的投资,实现低成本成形。目前压铸机改制型的中小型挤压铸造机获得广泛应用,利用这种设备生产壁厚大于4 mm的铝合金中小零件成功案例很多,体现了高性能成形的优势,但在生产效率、工艺出品率及产品品质的稳定性等方面与不断升级的压铸机相比优势不突出。在挤压铸造大型零件方面,工艺装备的缺乏成了限制环节。目前国内压铸机改制型的挤压铸造机最大公称力不超过50 000 kN,而大型零件投影面积大于3 000 cm²的锁模力需要在50 000 kN以上。公称力为50 000 kN的压铸机改制型挤压铸造机组的国内采购价高达数千万人民币,如果进口投资更大。巨大的设备投资限制了大型零件挤压铸造的推广应用。

采用油压机改制型的挤压铸造机或采用机械-液压联合锁模技术可以解决这一问题。油压机改制型的挤压铸造机主要以立式、框架型为主,在大型简单零件的直接挤压铸造中具有突出的优势,国内大型轮形件的挤压铸造机都采用这一技术路线。公称力为50 000 kN的油压机改制型的挤压铸造机订制价格只需数百万元,仅为相同吨位的压铸机改制型的挤压铸造机的1/10。

但是,这种挤压铸造机的系列化、标准化程度还不高,需要针对具体工件和工艺要求进行非标订制。

机械-液压联合锁模技术是解决大型零件挤压铸造工艺装备缺乏的最有效途径之一。在传统的挤压铸造技术概念中,锁模力完全由油缸来提供,而油缸力直接决定了液压机床机械部分的造价。“液机联合锁模”技术则可以显著减小液锻机的公称力^[26]。液机联合锁模技术的本质是将挤压铸造过程进行分级加压和分级。在充型阶段,需要的锁模力很小^[24],可以由油缸带动滑块提供;在补缩和塑变阶段,需要的锁模力要比充型阶段高数倍,这时将液压系统提供的合模压力转化为模具自身的锁模结构间的静摩擦力进行机械锁模。这种“液机联合锁模技术”可以使液锻机的公称力降至 10% 左右,大幅降低大型液锻机的造价。

上述两个技术途径进行综合应用,可以使大型液锻机的造价降低 2 个数量级,达到“大众化”接受的程度。例如,按传统设计需要 30 000 kN 的挤压铸造机,采用“液-机联合锁模技术”订制的油压机改制型液锻机公称力仅需 8 000 kN,造价不超过 150 万元。

3 典型大型零件的挤压铸造可行性

大型重要零件的智能化、绿色化和高性能整体成形是零件制造业未来发展的基本方向^[30-31]。采用传统铸造技术成形制造的大型零件都在寻求挤压铸造技术进行工艺与品质的升级。其中,大型工程机械配件、大型打磨设备配件以及大型汽车、摩托车零件在今后几年内都有可能逐步实现挤压铸造替代传统铸造。

3.1 大型斗齿和齿座挤压铸造

斗齿和齿座(也称齿根、压根)是挖掘机、推土机等矿山机械中的大宗消耗件,随着矿山机械大型化的发展,斗齿、齿座的大型化需求也日益旺盛。目前这些单重大于 60 kg 的斗齿和齿座只能采用传统的铸造方法成形,而铸件的“壁厚效应”导致断齿率较高,使用寿命较短。若采用挤压铸造生产,可以有效解决这一问题,实现品质升级。

大型斗齿与齿座挤压铸造需要对加压方式进行科学的选择:若采用直接挤压铸造,则对浇注量的精确定量要求很高,以保证斗腔尺寸精度。因此,应选用一模多腔(至少两件)的间接挤压铸造。这时,浇注量更大,浇注难度增加。可以配置具有工作台移出功能的立式挤压铸造机,实现机外底注包浇注,既能防止流槽浇注过程的氧化污染,又能安全稳定地实现定量浇注。

与砂型铸造相比,挤压铸造大型斗齿和齿座具有一系列优势。①高性能:“壁厚效应”得到明显抑制,内部组织致密、偏析减轻,其性能水平可接近固态锻造,断齿

率可以降至 2% 以下;②工艺流程简短,无废砂污染,符合绿色制造要求。

与锻造斗齿相比,挤压铸造大型斗齿和齿座也具有一系列优势。①没有材料限制 可以根据服役要求进行必要的成分调整。锻造斗齿的材料只能用市场上的棒料;②材料利用率高 锻造斗齿受工艺自身的限制,难以锻出复杂结构,加工余量和脱模斜度大,导致材料利用率不高,一般不足 70%。而挤压铸造大型斗齿,可以做到近净形成形,不需去除加工,材料利用率可接近 100%;③设备造价大幅降低 由于挤压铸造的成形温度高于固相线温度,材料的流变抗力比锻造温度范围小几个数量级,所以,成形设备吨位大幅减小,造价也低很多。

3.2 轧破壁挤压铸造

轧臼壁和破碎壁(合称轧破壁)是圆锥破碎机上的一对抗磨配件,其尺寸大、结构简单、规格多,需求量持续上升。目前这些易损配件几乎全部采用传统的铸造方法成形,其材质以高锰钢为主。高锰钢铸件的“壁厚效应”更加突出,其晶粒度一般在 2 级以下,抗磨性一直不能突破 10 个月,急需改进工艺,提升品质。挤压铸造是轧破壁工艺品质提升的一个有效途径。

轧破壁虽然大致属于轮形件,但其与车轮等典型轮形件不同,更像盆状件,尺寸大、壁厚大、单重大。挤压铸造是其工艺品质升级的方向之一。轧破壁的挤压铸造有 3 个难题:①吊环(吊钩)影响出件,成形困难;为此,有研究者采用镶铸方法成形吊耳,但不能解决如何出模的问题。可以采用活块技术,既能使吊钩成形,又可以顺利出模;②浇注量高达数百 kg,甚至数 t,浇注困难;这一难题同样可以通过采用移出工作台,实现机外浇注来解决;③反向挤压时,中心轴孔如何成形? 现有轮盘件的中心孔都不铸出,留作后续去除加工。这样工序增多、浪费材料。轧破壁是高锰系列材料,切削加工性能较差,应尽量减少切削加工。为此,可以采用浮动型芯技术将中心孔直接成形,即形成中心孔的型芯安装在凹模内,其长度超过浇注液面,相应地凸模上设有与其套接的通孔,这样在凸模加压时,型芯进入其套孔内,不阻碍凸模加压。

与砂型铸造相比,挤压铸造轧破壁具有一系列优势。①晶粒细小:加压凝固使轧破壁的凝固速度大幅提高,晶粒尺寸显著降低,晶粒度可达 3~5 级;②工艺流程简短,无废砂污染,符合绿色制造要求;③工艺出品率接近 100%,没有浇口、冒口,既节约了材料、降低能耗,又省去了浇冒口切割工序;④设备造价大幅降低。由于挤压铸造的成形温度高于固相线温度,材料的流变抗力比锻造温度范围小几个数量级,所以,成形设备吨位大幅减小,造价也显著降低。

3.3 铝合金重型机械主动轮挤压铸造

重型机械的负重轮挤压铸造已经研究很多,并实现了规模化应用,但是其主动轮还一直采用砂型铸造。重型机械的主动轮材质是 ZL205A,形状复杂,有上下两个轮盘、多个减重孔(通风孔)和中心轴孔。目前在砂芯制造中,采用了明冒口、暗冒口、冷铁等多种技术措施,实现致密化成形。但实际生产中,开裂、缩松等缺陷仍时有发生。采用挤压铸造技术生产主动轮成为挑战。

主动轮可以实现挤压铸造,但是要解决如下难题:第一,如何分模出件?因其结构类似于汽车车轮,有两个直径较大、壁厚也较大的轮缘,中间的轮辋直径较小,无法采用负重轮那样的凹凸模直接挤压。若采用车轮那样的锥形套锁模、下顶出 4 瓣开模方式,其中的通风孔不能铸出,需要后续加工。可以采用水平油缸驱动的侧滑块技术,配合下缸顶出。第二,如何加压确保致密无缺陷?主动轮的轮辋壁厚小,而轮缘壁厚大,轮缘与轮辋交汇处是热节位置,采用简单的反向挤压铸造方法,难以确保热节位置无热裂和致密。可以采用局部激冷消除下轮缘热节,配合分级挤压技术使热节上移至上轮缘,采用轮盘的一级挤压和上轮缘的局部挤压实现整个工件的致密化。第三,如何实现洁净无渣成形?轮盘件反向挤压铸造的难题之一就是浇入凹模的金属液表面有浮渣,通常可以采用“捞渣”方法将其减少。但是,捞渣操作会延长开始加压时间,使“重力铸造”的表面凝固层加厚,不利于整体提高性能。可以采取“封闭浇口、随动浇注”技术解决这一问题,即将金属液浇入储料腔而不是工件腔中,在浇注过程储料腔内始终保持一定的液面高度,使液态金属中的夹杂上浮。浇注完毕,夹杂和浮渣留在出料腔内形成料饼。这样,既保证了及时加压,又实现了“无渣充型”。第四,设备缺乏。目前大型液压机改制型的立式液锻机功能比较单一,难以满足该件工艺需要。可以增加一套辅助液压系统,补充侧抽、开合模等功能。

4 结 论

(1)大型零件挤压铸造的技术难点主要是浇注过程的氧化污染、厚壁效应导致的偏析与组织性能不均匀、变形以及工艺装备的巨额投资。

(2)突破大型零件挤压铸造难题的技术途径有“气-液结合的无氧化浇注技术”、“封闭浇口随动浇注技术”、“液-机联合锁模技术”以及“免热处理材料应用技术”。

(3)大型斗齿、齿座、圆锥破碎机的轧破壁和重型机械的主动轮都可以采用挤压铸造技术实现工艺与品质升级,具有良好的技术经济性。

参 考 文 献

- [1] FAN C H, CHEN Z H, HE W Q, et al. Effects of the casting temperature on microstructure and mechanical properties of the squeeze-cast Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Journal of Alloy and Compounds, 2010, 504: 42-45.
- [2] TAMULY R, BEHL A, BORKAR H, et al. Effect of addition of grain refiner and modifier on microstructural and mechanical properties of squeeze cast A356 alloy[J]. Transaction of the Indian Institute of Metals, 2022, 75: 2 395-2 408.
- [3] SUN Y G, QI Y S, LI J, et al. Fabrication and performance analyses of 45# steel supports using liquid forging[J]. Journal of Zhejiang University Science, 2020, A21(11): 908-922.
- [4] 邢书明,王永生,刘鑫,等.大型轮形件反向挤压铸造的杂质元素偏析行为研究[J].特种铸造及有色合金,2021,41(3):265-269.
- [5] CHRISTY J V, ARUNACHALAM R M, ABDEL-HAMID I, et al. Processing, properties, and microstructure of recycled aluminum alloy composites produced through an optimized stir and squeeze casting processes[J]. Journal of Manufacturing Process, 2020, 59: 287-301.
- [6] GOTO M, YAMAMOTO T, NISITANI H, et al. Fatigue behavior of smooth specimen cut from squeeze cast Al alloy car wheel and effect of stress change[J]. Journal of the Society of Materials Science, 2001, 50(11): 1 269-1 275.
- [7] 马春江,陈玖新,葛素静,等.挤压铸造重载汽车用铝合金车轮的组织及性能[J].特种铸造及有色合金,2014,34(10):1 063-1 065.
- [8] 陈炳光.铝合金车轮毛坯挤压铸造工艺方案探讨[A].中国压铸、挤压铸造、半固态加工学术年会论文集[C].山东烟台,2001.
- [9] 刘鑫,邢书明,武彤,等.挤压铸造 2A50 特种车辆轮盘冷隔缺陷的成因与防治[J].常州大学学报(自然科学版),2021,33(6):17-21.
- [10] 葛素静,宗福春,刘悦.轻合金轮毂挤压铸造技术及发展[J].热加工工艺,2014,43(7):13-16.
- [11] 计鑫.液态(半固态)模锻车轮数字化生产线[J].机械设计,2020,37(S1):126-129.
- [12] 袁晓光,孟凡博,林雪健,等.挤压铸造 6061 铝合金轮毂组织及性能[J].沈阳工业大学学报,2020,42(5):504-508.
- [13] 张立君,范云波,赵洁,等.挤压铸造重型车辆铝合金轮毂组织和性能研究[J].兵器材料科学与工程,2020,43(5):112-116.
- [14] 孟凡博.6061 铝合金的凝固特性及其挤压铸造轮毂成形性[D].沈阳:沈阳工业大学,2021.
- [15] MENG F S, MIN H N, ZHANG W. Research of element segregation to large wheel hub hardness and mechanical properties[J]. Advanced Materials Research, 2013, 711: 262-266.
- [16] 侯立群,邢志媛,乔小蒙,等.铝合金轮毂浮动阴模挤压铸造工艺研究[J].特种铸造及有色合金,2015,35(4):351-353.
- [17] 张占领,牛瑞利,曲全鹏,等.反挤压铸造工艺对镁合金轮毂铸件裂纹的影响[J].特种铸造及有色合金,2013,33(1):33-35.
- [18] 姜巨福,李明星,王迎.铝合金挤压铸造技术研究进展[J].中国有色金属学报.2021,31(9):2 313-2 329.
- [19] 杨青,姜银方,戴亚春.挤压铸造铝合金副车架的显微组织与力学性能[J].特种铸造及有色合金,2016,36(4):376-378.
- [20] 孙珏,许善新,汤杰,等.汽车铝合金副车架挤压铸造工艺设计和产品开发[J].铸造,2015,64(1):17-21.
- [21] 陈磊,程稳正,孙珏,等.铝合金铸造副车架开发[J].汽车技术,2015(2):58-61.
- [22] 邵明,张明伟,张大童,等.大型复杂零件的挤压铸造成形技术[J].华南理工大学学报(自然科学版),2015,43(10):95-99.
- [23] 文光华.无氧化浇铸技术的现状与发展[J].炼钢,1995(6):48-51.
- [24] 丁晓亮.挤压铸造铝合金悬垂线夹研究[J].河南科技,2020(8):50-52.
- [25] 胡泽东.含铝品种钢的无氧化保护浇铸技术创新与应用[J].河北冶金,2022(3):36-40.
- [26] 邢书明,闫光远,鲍培玮,等.挤压铸造高品质大型结构件[J].特种铸造及有色合金,2021,41(2):133-137.

压弯半径对 7A85 铝合金结构壁板尺寸与组织性能影响

樊振中^{1,2} 许 谊³ 彭石磊⁴ 杨 欢⁴ 林 磊⁴ 张 东⁵ 韩金全⁶ 陆 政^{1,2}

(1.中国航发北京航空材料研究院; 2.北京市先进铝合金材料及应用工程技术研究中心; 3.中船黄埔文冲船舶有限公司;
4.四川航天长征装备制造有限公司; 5.北京宇航系统工程研究所; 6.北京航空航天大学机械工程及自动化学院)

摘 要 以 7A85 铝合金结构壁板为研究对象,采用 ABAQUS 软件与材料组织分析手段,研究了压弯半径对其成形尺寸与组织性能的影响,并对比分析了结构壁板纵向(*L* 向)与横向(*T* 向)的力学性能。结果表明,壁板 T4 态 *L* 向与 *T* 向的强度基本相同,*LT* 向伸长率略低;内置加强筋条结构蒙皮与立筋压弯成形时的应力分布、理论型面高度误差与型面误差随压弯半径增加先下降后上升,外置时则随压弯半径增加连续上升,成形尺寸精度小于 1.6 mm。与常规 T6 处理相比,T4 态压弯成形+T6 处理 *L* 向与 *T* 向的强度一致,伸长率均大于 10.0%,纤维状晶粒组织转变为多边形状与短棒状,强化相的依次析出保证了合金的强度与塑性。

关键词 7A85 铝合金;压弯成形;压弯半径;力学性能;微观组织

中图分类号 TG166⁺3;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.04.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Bending Radius on Size, Microstructure and Properties of 7A85 Aluminum Alloy Panel

Fan Zhenzhong^{1,2}, Xu Yi³, Peng Shilei⁴, Yang Huan⁴, Lin Lei⁴, Zhang Dong⁵, Han Jinquan⁶, Lu Zheng^{1,2}

(1.Beijing Institute of Aeronautical Materials; 2.Beijing Advanced Engineering Technology and Application Research Center of Aluminum Materials; 3.CSSC Huangpu Wenchong Shipbuilding Co., Ltd.;
4.Sichuan Aerospace Changzheng Equipment Manufacturing Co., Ltd.; 5.Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering; 6.School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University)

Abstract: The influence of the bending radius on the forming size and properties was investigated by ABAQUS FEM software and microstructure analysis, and mechanical properties of panel along longitudinal(*L*) and transverse(*T*) directions were comparatively analyzed. The results indicate that the strength of panel under T4 state along *T* and *L* directions is basically the same, whereas that along *T* direction has a lower value of elongation. The stress distribution, theoretical profile height error and profile error are decreased firstly and then raised with the increase of bending radius for the internal strengthen rib structure, which has a monotonous upward trend for the extraposition structure, with a less than 1.6 mm forming dimensional accuracy. Compared with the conventional T6 treatment, the strength along *L* and *T* direction under T4 bending forming+T6 treatment are consistent, where the elongation is greater than 10.0%. Fibrous grain structure is transformed into polygonal and short rod shape, and sequential precipitation of reinforced phase effectively ensures the strength and plastic toughness of 7A85 aluminum alloy panel.

Key Words: 7A85 Aluminum Alloy, Bending Forming, Bending Radius, Mechanical Properties, Microstructure

收稿日期:2022-06-15;修改稿收到日期:2022-07-06
基金项目:结构舱段用高强高韧 7A85 铝合金宽幅薄壁高筋整体成形壁板研制
第一作者简介:樊振中,男,1985 年出生,高级工程师,北京(100095),E-mail:fanzenzhong2010@163.com
引用格式:樊振中,许谊,彭石磊,等. 压弯半径对 7A85 铝合金结构壁板尺寸与组织性能影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(4):438-446.
FAN Z Z, XU Y, PENG S L, et al. Effects of bending radius on size, microstructure and properties of 7A85 aluminum alloy panel[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(4):438-446.

[27] BRIMELL D J, NEAILEY K. Macrosegregation in thin walled castings produced via the direct squeeze casting process[J]. J. Mater. Process Technol., 2003, 138: 306-310.

[28] HIMADRI C. Simulation of transport processes in squeeze casting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 186: 174-178.

[29] 王志刚,孙红英,何强. 挤压铸造 Al-7.2Zn-2.2Mg-1.8Cu 合金的偏析[J].特种铸造及有色合金, 2017, 37(7): 747-749.

[30] 胡汉起. 金属凝固原理(第 2 版)[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.

[31] YOUN S W, KANG C G, SEO P K. Thermal fluid/solidification analysis of automobile part by horizontal squeeze casting process and experimental evaluation[J]. Mater. Process Technol., 2004, 146: 294-302.

(编辑:彭瑾)