

基于低压浇注及协调施压的车轮液态模锻模具设计

杨茜^{1,2}, 尹甜甜³

- (1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023;
2. 有色金属共性技术河南省协同创新中心, 河南 洛阳 471023;
3. 开封大学 机械与汽车工程学院, 河南 开封 475004)

摘要: 对汽车车轮的液态模锻工艺进行了分析, 针对由于壁厚不均匀导致热节而造成的局部疏松、冷隔、气孔及热应力等缺陷问题, 提出了一种协调施压成形方案, 并说明了模具的结构特征和工艺流程, 介绍了新工艺的特点和应用。通过对坯料分区施压, 实现了成形时模具压下量与坯料收缩量互相匹配, 提高了材料的组织均匀性; 利用低压浇注系统进行定容封闭浇注, 可简化工艺、优化工作环境、防止坯料氧化; 通过环槽配合结构和双弹簧封堵协调机构设计, 使施压零件和封堵零件兼具顶出功能, 实现了制件的可靠脱模, 并可降低对成形设备输出动作的要求。所制定的模具结构简单紧凑, 制件材料利用率高, 制件质量好, 适合车轮低压铸造工艺的升级换代, 具有较高的应用价值。

关键词: 液态模锻; 车轮; 定容浇注; 协调施压; 二次脱模

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.06.023

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 06-0171-05

Mold design on wheel liquid die forging based on low pressure casting and coordinated pressing

Yang Xi^{1,2}, Yin Tiantian³

- (1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;
2. Collaborative Innovation Center of Nonferrous Metals of Henan Province, Luoyang 471023, China;
3. School of Mechanical and Automotive Engineering, Kaifeng University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: The liquid die forging technology of automobile wheels was analyzed, and aiming at the defects of local porosity, cold shuts, pores and thermal stress caused by hot spots due to nonuniform wall thickness, a coordinated pressing forming scheme was proposed. Then, the structural characteristics and process flow of the mold were discussed, and the characteristics and application of the new process were introduced. Furthermore, by applying pressure to the billet in different zones, the mutual matching between mold pressing amount and billet shrinkage during forming was realized, and the uniformity of the material structure was improved. In addition, the use of a low-pressure pouring system for constant volume closed pouring could simplify the process, optimize the working environment and prevent the billet oxidation. Through the design of ring groove matching structure and dual spring sealing coordination mechanism, the pressure applying parts and sealing parts had both ejection function, which realized the reliable demoulding of parts and reduced the requirements for the output action of forming equipment. The results show that the formulated mold has a simple and compact structure, a high material utilization rate and a good product quality, which is suitable for the upgrading of the wheel low-pressure casting process and has high application value.

Key words: liquid die forging; wheel; constant volume casting; coordinated pressing; two-step demoulding

国家节能与新能源汽车产业政策的实施使得整车轻量化需求急剧增长, 车轮是汽车轻量化设计的重要部件之一^[1]。铝合金轮毂由于其具有质量轻、强度高及抗腐蚀能力强等优点, 被广泛应用于汽车及航空航天领域^[2-3]。铸造铝合金车轮相对于钢质车轮具有密度小、力学性能好的优势, 目前, 低压铸造铝合金车轮已占到产品总量的95%以上^[4-6], 但该工艺在生产壁厚差别大、形状复杂、尺寸较大的铝合金车轮时容易产生铸造缺陷^[7-10], 其力学性

收稿日期: 2022-08-31; 修订日期: 2022-12-02

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(232102220039)

作者简介: 杨茜(1982-), 女, 博士, 讲师

E-mail: yanglxz@qq.com

能无法满足高端市场需求^[6]。

锻造铝合金车轮不仅具有轻量化优势,而且组织更为致密、力学性能更优。锻造铝合金车轮的晶粒流向与受力方向一致,没有铸造工艺产生的气孔、疏松等缺陷,其强度、韧性明显优于铸造铝轮毂,更加耐疲劳,具有优秀的耐腐蚀性能^[5-6,11]。目前,铝合金车轮锻造方法已经可用于批量生产,但普遍存在生产工序多、生产效率低、设备吨位大、模具尺寸大和加工成本高等缺点,主要面向重载车和高档轿车^[11]。

液态模锻又称为挤压铸造,集铸造和锻造特点于一体,将熔融或半熔融状态的金属直接注入模具,然后施加高压,使其在压力下发生凝固和塑性变形,得到最终的制件^[11-12]。该工艺工序简单、效率高,制件精度高,组织结构和力学强度接近于锻件,且可以显著降低生产成本^[13-15],具有广泛的应用前景。但对于复杂结构产品,采用传统液态模锻工艺实施难度大,在一定程度上限制了其应用范围。当汽车车轮厚度差较大时,液态模锻容易在厚壁处出现热节,导致缩孔及疏松,凝固后会存在热应力、热变形及裂纹等缺陷,导致制品性能降低。与轮辋部分相比,厚壁的轮辐部分强度下降约 12%,塑性降低近 2 倍^[10],因热节缺陷造成的废品率达 5.5%。究其原因:在热节处存在孤立的液相区,凝固时压力不足,难以发生塑性流动完成补缩,容易产生缩孔、缩松,晶粒也较为粗大^[15]。

本研究针对常规液态模锻成形大壁厚差轮毂时产生的缺陷,提出一种协调施压成形方案,按收缩量大小分区域加压,增大厚壁处的补缩量,解决了液态模锻时出现的局部疏松、冷隔、气孔及热应力和变形等问题,制件组织均匀,力学性能得到提高。此外,还设计了一种低压浇注法车轮液态模锻模具,其具有结构简单、材料利用率高、制件质量高等特点,对汽车轻量化和节能减排具有重要意义。

1 车轮协调施压液态模锻成形的工艺原理分析

液态模锻是液态金属在压力条件下冷却结晶凝固定型,成为没有铸造缺陷的并伴有塑性变形的液锻件。其特征为:从与模具接触的熔体开始结晶并逐步向心部推进,直至全部结晶,在这一过程中,液体的结晶和固体的塑性变形是同时发生的,固态金属发生压缩变形,未凝固的液态金属处于等静压

状态。在结晶过程中,一旦施加的外力减小或消失,液态金属将由等静压成形转换为自由结晶,从而失去液态模锻的作用,产生铸造缺陷,影响制件性能。根据这一原理,结合车轮结构特点,对成形方案与模具结构进行优化,进行协调施压成形,使坯料各部位均能在压力下结晶凝固成形,避免自由结晶发生,以得到内部组织和力学性能良好的制件。

1.1 车轮成形工艺分析

图 1 为一种轮辋名义直径为 $\Phi 45.72$ cm、名义宽度为 20.32 cm 的铝合金汽车车轮锻件示意图,主要包括轮辐和轮辋两个部分,其中轮辐部分包括轮毂和辐条,轮毂部分具有轴孔结构,辐条间为风口结构。根据制件的结构特征,浇注系统浇口设在轴孔部位。辐条部分和轮毂部分的厚度最大,热容量大、冷却慢、液固收缩量大。轮辋部分包括轮辋体、上轮缘和下轮缘,各部分厚度基本一致,且不足轮辐的 1/3。轮辋各部分成形条件差别较大,上轮缘处离浇口远,热容量小、温度低、结晶凝固最快,液固收缩量小;轮辋体厚度小,热容量小、结晶凝固快,但该部分在高度方向的收缩量大于轮辐部分,综合考虑,将其与轮辐部分采用相同的压缩量;下轮缘处厚度较小,结晶快又便于补缩,可不考虑其收缩量。另外,轴孔部分和风口部分的模具零件在浇注之前已经闭合,加压时须采取措施避免对上模的下行产生干涉。

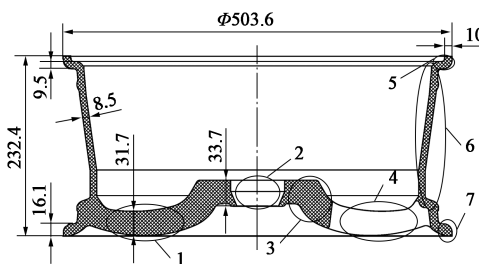


图 1 汽车车轮锻件示意图

1. 辐条 2. 轴孔 3. 轮毂 4. 风口 5. 上轮缘 6. 轮辋体
7. 下轮缘

Fig. 1 Schematic diagram of forging part for automobile wheel

1.2 车轮成形工艺设计思路

根据车轮结构特征,采用低压浇注的充模方法进行定容浇注,再通过模具直接施压进行液态模锻。将整体施压改为分区施压,对轮辐和轮辋体使用较大压缩量,对上轮缘采用较小压缩量,下轮缘部分不设置压缩量;通过协调变形,保证各部分达到所需的压缩量,实现车轮成形质量控制,达到最佳成形效果。同时,采用封堵零件与成形零件同时兼

作脱模零件的多功能零件设计构思,以简化模具结构,降低对液压机的动作要求。

2 车轮液态模锻成形模具和工艺流程设计

基于低压浇注及协调施压的设计理念,开展液态模锻成形模具的结构优化和工艺流程设计,形成适用于该铝合金车轮的先进成形技术。

2.1 液态模锻成形模具设计

采用具有上顶出缸的液压机,液压机下方放置低压铸造保温炉;成形凹模采用可侧向分型的组合凹模结构,由液压缸通过侧向合模机构带动组合凹模运动,实现其开合模动作,并在成形时提供合模力。成形模具结构如图2所示,该模具具有如下结构特征。

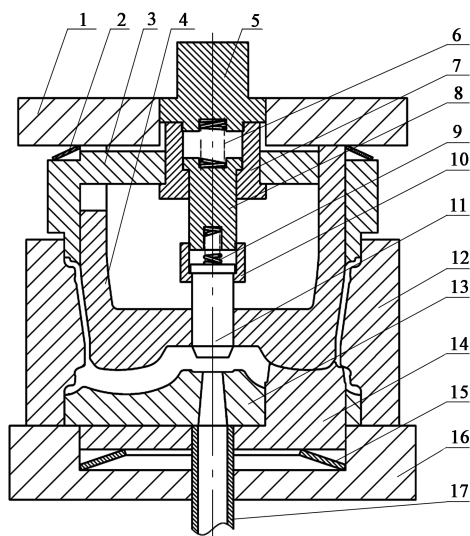


图2 模具结构示意图

1. 上固定板 2. 施压弹簧 3. 压套 4. 上凸模 5. 压杆 6. 大弹簧
7. 环套 8. 连接杆 9. 小弹簧 10. 限位套 11. 堵头 12. 凹模
13. 下凸模 14. 型芯 15. 协调弹簧 16. 下固定板 17. 升液管

Fig. 2 Schematic diagram of die structure

(1) 低压注射定容浇注:通过升液管将保温炉与模具下凸模内的锥形浇口密封连接,形成低压浇注系统;上模下行至要求位置,使闭合模腔容积等于需要注射的熔体体积,浇注完成后,通过堵头对浇口进行封堵,完成模腔的封闭,能够及时对模腔中的熔体施加压力,同时使升液管中的熔体快速回流到保温炉中。

(2) 协调施压:将整体上模改为由上凸模和压套组成的复合结构。上凸模与上固定板连接,并在

压套和上固定板间安装施压弹簧,通过施压弹簧调节压套对坯料施加压力,当压力达到设定值时,弹簧产生压缩,以减少压套的压下量,使其与上凸模的施压过程进行协调;合模时上凸模与型芯已经接触,施压时型芯向下退让,下方的协调弹簧产生压缩变形。施压弹簧和协调弹簧均采用定压蝶形弹簧,少量的变形即可产生大的变形抗力。

(3) 脱模机构:为简化模具结构和降低对设备的要求,不再设计专门的脱模机构,而是将施压机构和封堵机构进行优化设计,使压套和堵头兼具顶出功能,实现制件的可靠脱模。

(a) 压套的脱模功能:压杆与顶出缸连接,从而可实现由顶出缸控制压套的运动,使其具有脱模功能。压套为具有过梁和底环的筒状结构,上凸模的上部为立柱结构,立柱穿过过梁间的通孔与上固定板固定连接,从而使压套相对于上凸模能够产生轴向运动;环套与压杆固定连接,在外侧形成环槽,与压套底环配合形成环槽配合结构,环槽的高度大于底环的高度。一方面,使压套的施压过程不受压杆的限制,从而产生协调施压效果;另一方面,在脱模时,顶出缸可以通过压杆推动压套下行,产生脱模作用。

(b) 堵头的脱模功能:在压杆与堵头间设置双弹簧封堵协调机构,由压杆、环套、连接杆、限位套和堵头及双弹簧组成。其中连接杆套装在环套中,限位套与连接杆固定连接,堵头套装在限位套中。大弹簧安装在压杆和连接杆之间,小弹簧安装在堵头和连接杆之间,如图2所示。在对熔体施压时,堵头碰到下凸模不再下行,小弹簧受压变形,保证上凸模的施压作用;脱模时,顶出缸驱动堵头下行,对制件产生推出力。由于制件对堵头具有抱紧力,所以,推顶到一定行程推出力减小后,通过限位套限制其下行,从而与压套形成推出行程差,制件从堵头上脱出。

(c) 堵头与压套的联合动作,防止制件脱模变形:脱模初期,堵头和压套共同作用,同时对制件的轴心部位和外缘产生推力,防止其变形;当推出一段距离使脱模力减小后,堵头停止运动,压套继续下行,将制件从上凸模和堵头上脱出,实现二次脱模动作。

2.2 成形模具的工艺流程设计

基于铝合金车轮结构及液态模锻工艺特性,设计成形模具的工艺流程。

(1) 将熔炼好的铝合金注入低压铸造保温炉

中,密封保温炉并进行保温。

(2) 对模具进行预热及温度调节,使其温度保持在 $200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 启动液压机,带动上模下行至要求位置,使模腔容积等于所需熔体体积,顶出缸处于回程位置,如图 2 所示状态。

(4) 保温炉加压,通过升液管将合金熔体注入模具模腔中。

(5) 顶出缸下行,堵头压住浇口,将充液通道封堵,模腔完全封闭,然后保温炉泄压,充液通道中的熔体流回保温炉,如图 3a 所示。

(6) 液压机下行,对闭合模腔中的液态坯料进行持续施压,压力为 $50\sim 80\text{ MPa}$,使液态坯料在压力下结晶和凝固定型为液锻件。此过程具有以下成形特征:

(a) 上凸模和压套下行,对模腔中的液态坯料施压,使其始终在受力状态下结晶凝固;

(b) 上凸模下行时克服协调弹簧的弹力,迫使型芯后退;

(c) 堵头保持密封状态不动而小弹簧被压缩;

(d) 上轮缘处凝固定型,坯料变形抗力增加,施压弹簧被压缩,压套减速和停止下行,上凸模继续下行;

(e) 下轮缘处在压力下结晶凝固定型,其补缩料由轮辐部分提供;

(f) 轮辐部分和轮辋体处结晶凝固定型,保压过程结束。

在整个施压过程中,模具各成形零件的动作是相互协调完成的,结束时的模具状态如图 3b 所示。

(7) 组合凹模侧向分型,上模回程开模,如图 3c 所示(图 3c 中侧向开合模装置未画出)。

(8) 顶出缸再次推出,进行脱模,其过程为:

(a) 压杆下行,推动压套和堵头下行进行脱模,当制件从上凸模上脱出一段距离,脱模力变小后,限位套压住上凸模底部后停止下行,此后大弹簧产生弹性收缩,为压杆提供下行空间;

(b) 压杆推动压套继续下行,而堵头随制件移动一段距离后受到限位套限位停止运动,制件从上凸模和堵头上脱出。

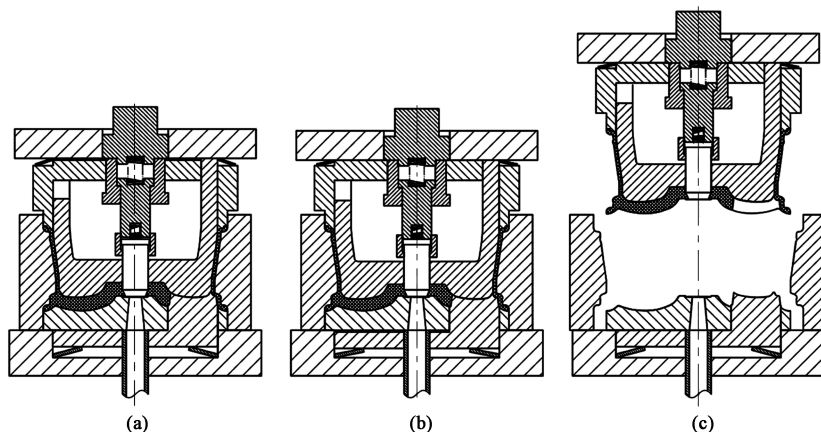


图 3 液态模锻成形模具的工艺过程示意图

(a) 浇注完成状态 (b) 施压结束状态 (c) 开模状态

Fig. 3 Schematic diagrams of technical process for forming mold of liquid die forging

(a) Pouring completion state (b) Pressing end state (c) Mold opening state

3 技术特点及应用

通过模具成形零件,直接对浇入模腔内的液态金属施加压力,使液态金属始终在压力下结晶凝固、强制补缩,从而能消除制件内部的缩孔、疏松等缺陷;同时,凝固的金属层发生塑性变形,具有热变形组织,晶粒细小均匀。制件力学性能接近模锻件而远大于低压铸造产品,与常规液态模锻相比,新

工艺具有以下优势:

(1) 借助低压浇注方法,利用封闭定容模具进行浇注,省去定量浇注装置,便于实现机械化、自动化,可大大减轻劳动强度,改善车间的生产环境;同时,在封闭条件下进行浇注,可以减轻液态金属氧化,提高制件质量;

(2) 具有分区施压、协调变形特点,能够保证制件各部分的压缩量与坯料的收缩量相符合,从而保证各处质量一致,达到最佳效果;

(3) 浇注系统封堵零件堵头和成形零件压套同时兼作脱模零件, 利用两者的行程差实现二次脱模动作, 提高脱模质量; 封堵动作与脱模动作协调进行, 模具结构明显简化, 并降低了对成形设备的功能要求;

(4) 采用封堵机构直接对浇口进行封堵, 不仅不需浇口凝料, 还能够减少轴孔余料, 使材料利用率更高。

本研究模具采用低压注射方法进行浇注, 其前期熔炼及注射工艺均可以采用目前常用的铝合金汽车车轮低压铸造技术方法, 低压铸造机换为吨位较大液压机即可。故在现有低压铸造工艺的基础上进行技术改进, 即可大幅度提高产品质量。

4 结论

(1) 提出了一种协调施压的技术方案, 采用对坯料分区域施压, 使不同厚度坯料受到的压下量与其收缩量相匹配, 以避免厚壁处的组织缺陷, 提高其组织均匀性和力学性能。

(2) 利用低压浇注系统进行定量封闭浇注, 使成形工艺简化, 工作环境优化。

(3) 通过环槽配合结构和双弹簧封堵协调机构的设计, 使施压零件和封堵零件兼具顶出功能, 可以减少零件数量, 实现制件的可靠脱模, 并可降低对成形设备输出动作的要求。

(4) 本研究模具具有结构简单紧凑、材料利用率高和制件质量高的特点, 适合车轮低压铸造工艺的升级换代, 具有较高的应用价值。

参考文献:

- [1] 陈微, 官英平, 王振华. 高钛 6061 铝合金轮毂精锻成形的微观组织模拟 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (1): 1-8.
Chen W, Guan Y P, Wang Z H. Numerical simulation of microstructure evolution for precision forging of high titanium 6061 aluminum alloy wheels [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (1): 1-8.
- [2] 杨兴旺, 陶志伟, 袁凯, 等. 基于响应面法的喷射成形 7055 铝合金飞机轮毂锻造工艺优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (10): 23-28.
Yang X W, Tao Z W, Yuan K, et al. Optimization on forging process for spray formed 7055 aluminum alloy aircraft wheel hub based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (10): 23-28.
- [3] 周杰, 李世山, 张谦, 等. 复杂深筒铝合金轮毂锻件精密成形工艺及模具技术 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (9): 270-277.
Zhou J, Li S S, Zhang Q, et al. Precision forming process and die technology on complex deep cylindrical aluminum alloy wheel hub forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (9): 270-277.
- [4] 代颖辉. 挤压铸造 A356 铝合金重载车轮的模具设计 [J]. 铸造, 2016, 65 (2): 155-157, 161.
Dai Y H. Mould design for A356 aluminum alloy heavy load wheels by squeeze casting [J]. Foundry, 2016, 65 (2): 155-157, 161.
- [5] 石家平, 余成远. 铝合金车轮制造技术及发展趋势探讨 [J]. 世界有色金属, 2019, 525 (9): 174, 176.
Shi J P, Yu C Y. Discussion on manufacturing technology and development trend of aluminum alloy wheel [J]. World Nonferrous Metals, 2019, 525 (9): 174, 176.
- [6] 周喆. 铝合金车轮制造技术及发展趋势 [J]. 世界有色金属, 2017, 481 (13): 231-232.
Zhou Z. Manufacturing technology and development trend of aluminum alloy wheels [J]. World Nonferrous Metals, 2017, 481 (13): 231-232.
- [7] 庞午骥, 曹振伟, 万金华. 铝合金车轮制造技术及发展趋势 [J]. 铝加工, 2017, 235 (2): 4-7.
Pang W J, Cao Z W, Wan J H. Manufacturing technology and development trend of aluminum wheel [J]. Aluminium Fabrication, 2017, 235 (2): 4-7.
- [8] 周振, 卢德宏, 李贞明, 等. 低压铸造铝合金轮毂的研究现状 [J]. 中国铸造装备与技术, 2022, 57 (2): 58-64.
Zhou Z, Lu D H, Li Z M, et al. Research status of low pressure casting aluminum alloy wheel hub [J]. China Foundry Machinery & Technology, 2022, 57 (2): 58-64.
- [9] 任凯, 冯立超, 孙立, 等. 低压铸造铝合金轮毂的研究现状 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (9): 10-15.
Ren K, Feng L C, Sun L, et al. Research status of low pressure casting aluminum alloy wheels [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (9): 10-15.
- [10] 邢书明, 郭莉军, 刘文鑫, 等. 压力成形轮形件的非均质现象 [J]. 北京交通大学学报, 2015, 39 (4): 1-6.
Xing S M, Guo L J, Liu W X, et al. Inhomogenous of wheel under pressure forming process [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39 (4): 1-6.
- [11] 赖华清, 范宏训. 汽车铝合金轮毂的成形工艺 [J]. 金属成形工艺, 2002, 20 (6): 38-40, 59.
Lai H Q, Fan H X. Forming technology of aluminium hub for automobile [J]. Metal Forming Technology, 2002, 20 (6): 38-40, 59.
- [12] 罗守靖, 陈炳光, 齐丕囊. 液态模锻与挤压铸造技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [13] Luo S J, Chen B G, Qi P X. Liquid Die Forging and Squeeze Casting Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [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.
Zhang L J, Fan Y B, Zhao J, et al. Structure and properties of high-strength aluminum alloy wheel hubs prepared by squeezing casting process [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2020, 43 (5): 112-116.
- [14] 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): 1063-1065.
Ma C J, Chen J X, Ge S J, et al. Microstructure and mechanical properties of squeezing casting aluminum alloy wheel [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34 (10): 1063-1065.
- [15] 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): 2313-2329.
Jiang J F, Li M X, Wang Y. Research development of squeeze casting technology of aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31 (9): 2313-2329.