

机械零件用含钒压铸铝合金的性能优化

吴 刚¹, 刘之强²

(1. 辽阳职业技术学院机电工程学院, 辽宁 辽阳 111004; 2. 大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要:采用不同压射比压和压射速度进行了机械零件用含钒压铸铝合金 Al-10Si-2.5Cu-0.3V 的压铸试验, 并进行了合金力学性能和耐磨损性能的测试与分析。结果表明: 随压射比压由 650 MPa 增大到 750 MPa、压射速度从 250 mm/s 加快到 450 mm/s 时, 合金的力学性能和耐磨损性能均先提高后下降。合金的压射比压优选 725 MPa、压射速度优选 350 mm/s。与压射比压 650 MPa 相比, 当压射比压增加到 725 MPa 时合金的抗拉强度增大 18 MPa、断后伸长率减小 0.6%、磨损体积减小 $8 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 。与压射速度 450 mm/s 相比, 当压射速度为 350 mm/s 时合金的抗拉强度增大 20 MPa、断后伸长率减小 0.7%、磨损体积减小了 $10 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 。

关键词:含钒压铸铝合金; Al-10Si-2.5Cu-0.3V; 机械零件; 压射比压; 压射速度; 力学性能; 耐磨损性能

中图分类号: TF821, TG27

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2021)03-0193-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.03.029

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
聊科研
与作者互动

Performance optimization of die casting aluminum alloy containing vanadium for mechanical parts

Wu Gang¹, Liu Zhiqiang²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Liaoyang Vocational College of Technology, Liaoyang 111004, Liaoning, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: The die-casting experiments of Al-10Si-2.5Cu-0.3V die-casting aluminum alloy containing vanadium for mechanical parts were carried out with different injection ratio and injection speed, and the mechanical properties and wear resistance of the alloy were tested and analyzed. The results show that the mechanical properties and wear resistance of the alloy increase firstly and then decrease with the increase of injection pressure from 650 MPa to 750 MPa and injection speed from 250 mm/s to 450 mm/s. The injection specific pressure and injection velocity of the alloy are 725 MPa and 350 mm/s, respectively. Compared with results from injection pressure of 650 MPa, when the injection pressure increases to 725 MPa, the tensile strength increases by 18 MPa, total elongation after fracture decreases by 0.6%, and the wear volume decreases by $8 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$. Compared with results from injection rate of 450 mm/s, when the injection rate is 350 mm/s, the tensile strength of the alloy increases by 20 MPa, and total elongation after fracture decreases by 0.7%, and the wear volume decreases by $10 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$.

Key words: vanadium containing die casting aluminum alloy, Al-10Si-2.5Cu-0.3V, mechanical parts, injection specific pressure, injection speed, mechanical properties, wear resistance

收稿日期: 2020-01-22

基金项目: 辽宁省教育厅科研项目课题, 项目编号: w2015263。

作者简介: 吴刚 (1969—), 男, 汉族, 辽宁辽阳人, 工程学士, 副教授, 主要研究方向: 数控技术、机械设备工艺技术等。

E-mail: wangmoubei2997814@163.com。

0 引言

轻量化、可持续发展理念带来了巨大的工业原材料变革,铝、镁等轻质合金逐渐代替钢、铁等金属材料。特别是铝合金,因强度高、导热性好、易加工、耐腐蚀、色泽美观,易回收等独特优势,在汽车、船舶、航空、电子、机械等领域应用广泛^[1-3]。近年来我国的机械行业发展迅猛,对于各种机械零件的种类、数量、质量的需求不断上升,将铝合金应用于机械零件的加工,可成形各种形状复杂、高尺寸精度的机械零件^[4]。但是普通铝合金存在刚性、硬度不足,膨胀系数大等缺点,容易使铝合金机械零件在加工过程中发生变形、开裂、表面粗糙、尺寸不精准等问题^[5]。目前我国的大部分铝合金产品都为压铸铝合金,与普通铝合金相比,采用压铸工艺生产铝合金机械零件优势在于塑性体流变性能好、抗氧化、线收缩率小、成形精度高、生产工艺简单、材料利用率高,综合性能优良等优点,不足之处在于容易粘膜、塑性不高,尤其是力学性能和耐磨损性能往往达不到市场要求^[6-9]。合金化作为一种合金改性的重要途径被广泛采用,金属钒是一种常用的合金化元素。在铝合金中添加钒,可以起到细化合金晶粒、提高合金综合性能的作用。含钒铝合金具有杂质低、质量性能好、生产工艺流程简单等优点,可广泛用于航空、军工、机械等行业^[10-12],但其距离大规模商业化应用还有一段距离。含钒铝合金主要分为铸造铝和变形铝两大类。王朝闻等^[13]研究了 V 对 A380 铝合金显微组织和力学性能的影响。刘海娥

和张建超^[14]分析了机械零件用铸造 Al-Si-V 铝合金的高温性能。刘路等^[15]研究和探讨了 V 元素对 2519 铝合金组织与力学性能的影响。

Al-10Si-2.5Cu 铝合金是一种常用的压铸铝合金,但目前有关 Al-10Si-2.5Cu 铝合金中添加 V 的研究还较为鲜见。因此基于前期研究,笔者尝试在该铝合金中添加适量的合金元素钒,开发出新型机械零件用含钒压铸铝合金 Al-10Si-2.5Cu-0.3V,并采用不同工艺参数进行合金压铸试验,优化了合金的压铸工艺参数,以期优化压铸铝合金的性能,进一步扩展含钒压铸铝合金的应用前景。

1 试验材料及方法

以自制 Al-10Si-2.5Cu-0.3V 新型压铸铝合金为研究对象,经 X 射线荧光光谱仪分析,合金试样的化学成分如表 1 所示。合金试样制备的主要流程:首先按合金成分正确配料;接着在 YFL-50 型中频熔炼炉中熔炼,熔炼温度 660 ℃;然后升温至 680 ℃出渣后静置 30 min,再在 DC300T 卧式冷室压铸机上进行压铸试验,其工艺参数见表 2。由于压铸过程中,压射比压和压射速度是极其重要的两个工艺参数,在本试验中,保持快压速度 8 m/s、浇注温度 635 ℃等工艺参数不变,仅改变压射比压和压射速度。压铸合金试样为圆棒状,尺寸 $\Phi 50\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 。此外,为了研究钒对 Al-10Si-2.5Cu 铝合金试样性能的影响,以不添加钒的 Al-10Si-2.5Cu 铝合金试样为对比试样。所有试样都进行了 T6 态热处理:530 ℃ $\times$ 10 h+175 ℃ $\times$ 8 h。

表 1 合金试样化学成分
Table 1 Chemical compositions of the alloy specimens

%

试样	Si	Cu	V	Mg	Fe	Mn	Ni	Zn	Al
1	10.124	2.489	0.291	<0.2	<0.6	<0.3	<0.3	<0.6	Bal.
2	10.126	2.486	0.293	<0.2	<0.6	<0.3	<0.3	<0.6	Bal.
3	10.123	2.487	0.292	<0.2	<0.6	<0.3	<0.3	<0.6	Bal.
4	10.122	2.485	0.294	<0.2	<0.6	<0.3	<0.3	<0.6	Bal.
5	10.125	2.489	0.291	<0.2	<0.6	<0.3	<0.3	<0.6	Bal.
6	10.124	2.486	0.293	<0.2	<0.6	<0.3	<0.3	<0.6	Bal.
7	10.127	2.486	0.292	<0.2	<0.6	<0.3	<0.3	<0.6	Bal.
8	10.125	2.488	0.294	<0.2	<0.6	<0.3	<0.3	<0.6	Bal.
9	10.123	2.485	0.292	<0.2	<0.6	<0.3	<0.3	<0.6	Bal.
10(对比试样)	10.124	2.487	0	<0.2	<0.6	<0.3	<0.3	<0.6	Bal.

在每个压铸合金试样上随机切取 3 个平行拉伸试样。拉伸试样为圆棒状,具体尺寸见图 1。拉伸

试验在 CMT-5105 型试验机上进行,试验温度为室温,拉伸速度为 1 mm/min。以 3 个平行拉伸试样的

算术平均值作为试样拉伸性能测试数据。拉伸断口形貌在 JSM6510 型扫描电子显微镜(SEM)下进行观察。磨损试验也在室温下进行,磨轮转速 500 r/min、磨损时间 2 min、相对滑动速度 90 mm/min,对磨材料试样本体,记录磨损体积。

表2 试样压铸工艺参数

试样编号	压射比压/ MPa	压射速度/ (mm·s ⁻¹)	快压速度/ (m·s ⁻¹)	浇注温度/ ℃
1	650	350	8	635
2	675	350	8	635
3	700	350	8	635
4	725	350	8	635
5	750	350	8	635
6	725	250	8	635
7	725	300	8	635
8	725	400	8	635
9	725	450	8	635
10(对比试样)	725	350	8	635

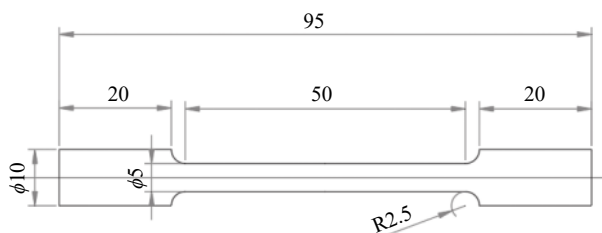


图1 拉伸试样尺寸

Fig. 1 Dimensions of tensile specimens

2 试验结果及讨论

2.1 力学性能

当压射速度 350 mm/s、快压速度 8 m/s、浇注温度 635 ℃ 均不变时,采用不同压射比压时合金试样的室温力学性能测试结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,随压射比压由 650 MPa 增大到 750 MPa 时,试样的抗拉强度呈现出先增大后减小的变化趋势,断后伸长率则在一个较小的变化范围内先减小后增大。当压射比压为 650 MPa 时,试样的抗拉强度最小(238 MPa)、断后伸长率最大(2.1%);当压射比压增加到 725 MPa 时,试样的抗拉强度达到最大值 256 MPa,较压射比压 650 MPa 时增大了 18 MPa,而断后伸长率则减小为 1.5%,较压射比压 650 MPa 时减小了 0.6 个百分点。由此可以看出,压射比压对试样力学性能产生较为明显的影响。为了获得理想的力学性能,机械零件用含钒压铸铝合金 Al-10Si-

2.5Cu-0.3V 的压射比压不宜过大也不宜过小。在压射速度 350 mm/s、快压速度 8 m/s 的情况下,压射比压优选为 725 MPa。

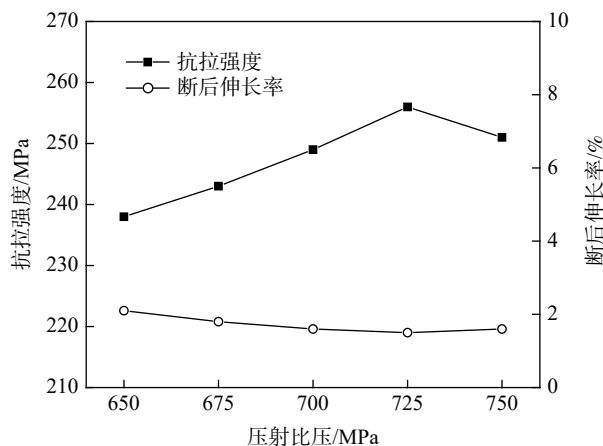
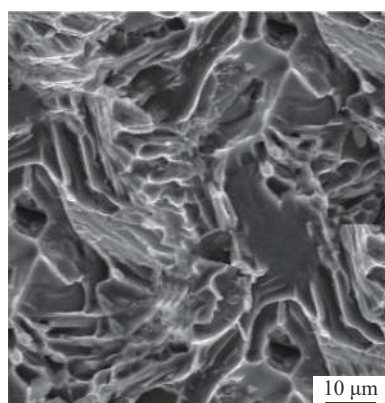


图2 不同压射比压时试样的力学性能测试结果

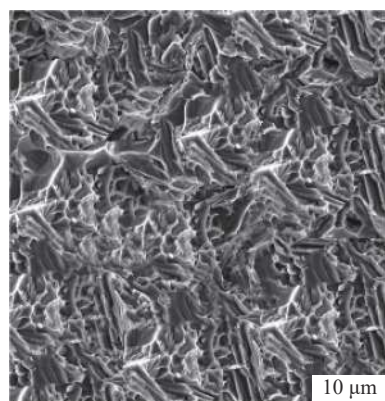
Fig. 2 Tensile test results of the specimens at different injection pressures

图 3 为压射速度 350 mm/s、快压速度 8 m/s、浇注温度 635 ℃ 时,压射比压分别为 650 MPa (试样 1)和 725 MPa (试样 4)时试样的拉伸断口形貌 SEM 照片。从图 3 可以看出,虽然压射比压 650 MPa 和 725 MPa 时试样的拉伸断口都呈现出准解理断裂特征。但是,与压射比压 650 MPa 时相比,725 MPa 时试样的韧窝明显变得更加细小、更加密集,显示出更好的拉伸性能。

当压射比压 725 MPa、快压速度 8 m/s、浇注温度 635 ℃ 均不变时,采用不同压射速度时合金试样的室温力学性能测试结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,随压射速度从 250 mm/s 加快到 450 mm/s 时,试样的抗拉强度呈现出先增大后减小的变化趋势,断后伸长率则在一个较小的变化范围内先减小后增大。当压射速为 450 mm/s 时,试样的抗拉强度最小(236 MPa)、断后伸长率最大(2.2%);当压射速度减慢到 350 mm/s 时,试样的抗拉强度达到最大值 256 MPa,较压射速度 450 mm/s 时增大了 20 MPa,而断后伸长率则减小为 1.5%,较压射速度 450 mm/s 时减小了 0.7 个百分点。由此可以看出,压射速度也对试样力学性能产生较为明显的影响。为了获得理想的力学性能,机械零件用含钒压铸铝合金 Al-10Si-2.5Cu-0.3V 的压射速度不宜过快也不宜过慢。在压射比压 725 MPa、快压速度 8 m/s 的情况下,压射速度优选为 350 mm/s。



(a) 压射比压 650 MPa



(b) 压射比压 725 MPa

图3 试样拉伸断口形貌

Fig. 3 Tensile fracture morphology of the specimens

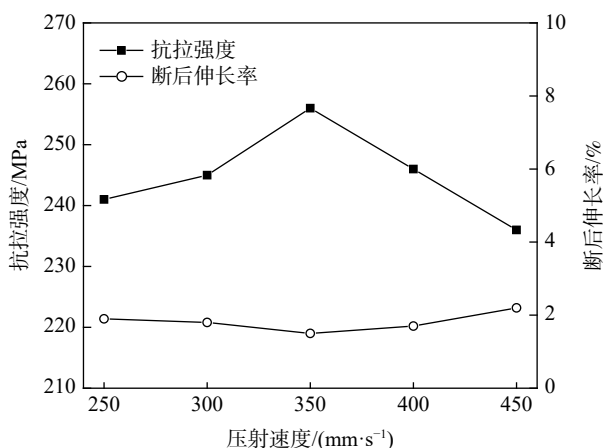


图4 不同压射速度时试样的力学性能测试结果

Fig. 4 Tensile test results of the specimens at different injection speeds

2.2 耐磨损性能

当压射速度 350 mm/s、快压速度 8 m/s 均不变时,采用不同压射比压时合金试样的室温耐磨损性能测试结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,随压射比压由 650 MPa 增大到 750 MPa,试样的磨损体积呈现出先减小后增大、耐磨损性能表现出先提高后下降的变化趋势。当压射比压为 650 MPa 时,试样

的磨损体积最大($21 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$)、耐磨损性能最差;当压射比压增加到 725 MPa 时,试样的磨损体积为最小值($13 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$),较压射比压 650 MPa 时减小了 $8 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$,耐磨损性能最佳。由此可以看出,压射比压对试样耐磨损性能产生较大影响。为了获得理想的耐磨损性能,机械零件用含钒压铸铝合金 Al-10Si-2.5Cu-0.3V 的压射比压不宜过大也不宜过小,当压射速度 350 mm/s 和快压速度 8 m/s 不变时,压射比压优选为 725 MPa。

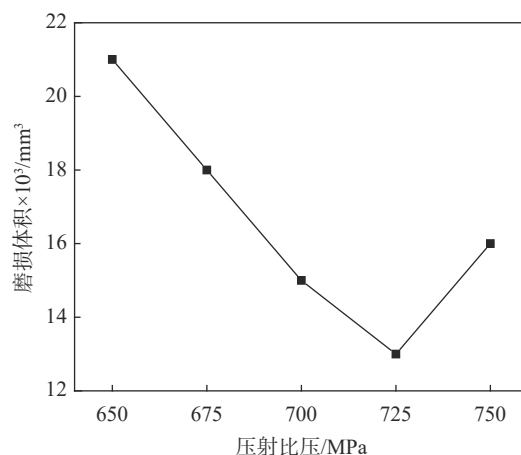


图5 不同压射比压时试样的耐磨损性能测试结果

Fig. 5 Wear test results of the specimens at different injection pressures

当压射比压 725 MPa、快压速度 8 m/s 均不变时,采用不同压射速度时合金试样的室温耐磨损性能测试结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,随压射速度从 250 mm/s 加快到 450 mm/s 时,试样的磨损体积先减小后增大、耐磨损性能先提高后下降。当压射速为 450 mm/s 时,试样的磨损体积最大($23 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$)、耐磨损性能最差;当压射速度减慢到 350 mm/s 时,试样的磨损体积为最小值($13 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$),较压射速度 450 mm/s 时减小了 $10 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$,耐磨损性能最佳。由此可以看出,压射速度也对试样力学性能产生较明显影响。为了获得更好的耐磨损性能,机械零件用含钒压铸铝合金 Al-10Si-2.5Cu-0.3V 的压射速度不宜过快也不宜过慢,当压射比压 725 MPa、快压速度 8 m/s 不变时,压射速度优选为 350 mm/s。

当压射比压 725 MPa、压射速度 350 mm/s、快压速度 8 m/s、浇注温度 635 ℃ 等压铸工艺参数均不变时,不添加合金元素钒的对比试样 10 与添加合金元素钒的试样 4 的性能测试结果对比,如表 3 所示。从表 3 可以看出,与不添加合金元素钒的 Al-

10Si-2.5Cu 铝合金相比,添加钒的 Al-10Si-2.5Cu-0.3V 新型压铸铝合金的抗拉强度和断后伸长率都得到提高,磨损体积明显减小,新型铝合金的力学性能和耐磨损性能均得到明显改善。由此可以看出,合金元素钒的添加可以明显改善 Al-10Si-2.5Cu 合金的力学性能和耐磨损性能。

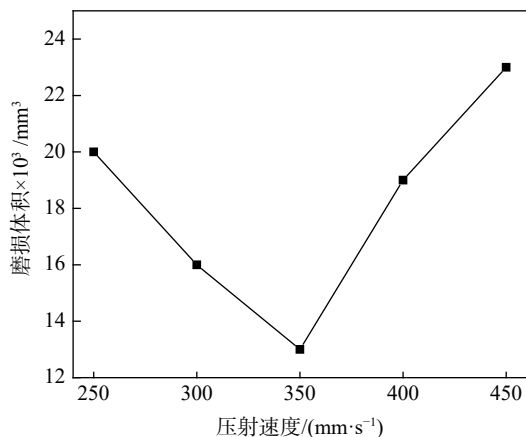


图6 不同压射速度时试样的耐磨损性能测试结果

Fig. 6 Wear test results of the specimens at different injection speeds

表3 添加钒对合金性能的影响

Table 3 The result show the effect of vanadium addition on mechanical properties of alloy

试样编号	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	磨损体积/mm ³
4	256	1.5	13×10 ⁻³
10(对比试样)	235	1	24×10 ⁻³

2.3 讨论与分析

在机械零件用含钒压铸铝合金 Al-10Si-2.5Cu-0.3V 压铸过程中,压射比压和压射速度是两个极其重要的工艺参数。在压射过程中,存在两种压力作用在合金上,一方面是对流动的液态金属产生的动压力,主要起到完成填充和成型的作用;另一方面是在充填结束后对静止金属产生的静压力,主要起到压实凝固金属的作用。在压铸过程中,适当增大压射比压,一方面可以增大作用在流动液态金属上的动压力,另一方面还可以增大作用在静止金属上的静压力,换言之,除了更好地克服充型阻力、实现更好的填充性能外,还可以对凝固过程中的合金实施压实作用,减少或消除内部气隙,细化合金内部组织的同时减少缺陷的产生,从而可以有效提高合金的力学性能和耐磨损性能。但是,压射比压并不是越大越好,过高的压射比压容易导致粘模等问题的产生,非但不能进一步提高合金的力学性能和耐磨损

性能,反而导致合金力学性能和耐磨损性能下降。压射速度是另一个重要的压铸工艺参数。压射速度过快,充型阻力过大、填充性能越差,导致压铸合金力学性能和耐磨损性能较差;选择恰当的压射速度有助于获得更好的填充性能和压实作用,从而获得优异的合金力学性能和耐磨损性能。但是,压射速度也不宜过慢。过慢的压射速度容易导致内部气隙增多、甚至出现微裂纹等缺陷,导致合金力学性能和耐磨损性能变差。所以,需要合理选择压射比压和压射速度。对压铸机械零件用含钒压铸铝合金 Al-10Si-2.5Cu-0.3V 而言,在快压速度 8 m/s 不变时,压射比压优选 725 MPa、压射速度优选 350 mm/s。

华南地区某企业在机械零部件压铸生产线上分别采用 Al-10Si-2.5Cu 铝合金和 Al-10Si-2.5Cu-0.3V 新型铝合金进行同一款方形平板产品(产品尺寸 220 mm×68 mm×3 mm)压铸,结果表明:新型铝合金零件的产品合格率与产线原用 Al-10Si-2.5Cu 铝合金相当,产品进行力学试验和磨损试验后发现,Al-10Si-2.5Cu-0.3V 新型铝合金产品的力学性能和耐磨损性能均优于 Al-10Si-2.5Cu 合金产品。Al-10Si-2.5Cu-0.3V 新型铝合金有望在更多的机械零件压铸产品上得到应用。

3 结论

1)随压射比压由 650 MPa 增大到 750 MPa,压射速度从 250 mm/s 加快到 450 mm/s 时,压铸机械零件用含钒压铸铝合金 Al-10Si-2.5Cu-0.3V 的力学性能和耐磨损性能均先提高后下降。

2)压射速度 350 mm/s、快压速度 8 m/s 均不变,当压射比压 650 MPa 时,压铸机械零件用含钒压铸铝合金 Al-10Si-2.5Cu-0.3V 的抗拉强度最小、断后伸长率最大、磨损体积最大,力学性能和耐磨损性能最差;与压射比压 650 MPa 相比,当压射比压增加到 725 MPa 时合金的抗拉强度增大 18 MPa、断后伸长率减小 0.6 个百分点、磨损体积减小 $8 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 。压射比压 725 MPa 时合金具有最佳力学性能和耐磨损性能。

3)压射比压 725 MPa、快压速度 8 m/s 均不变,当压射速度 450 mm/s 时,压铸机械零件用含钒压铸铝合金 Al-10Si-2.5Cu-0.3V 的抗拉强度最小、断后伸长率最大、磨损体积最大,力学性能和耐磨损性能最差;与压射速度 450 mm/s 相比,当压射速度为 350 mm/s 时合金的抗拉强度增大 20 MPa、断

后伸长率减小 0.7 个百分点、磨损体积减小了 $10 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 。压射速度为 350 mm/s 时合金的力学性能和耐磨损性能最佳。

机械零件用含钒压铸铝合金 Al-10Si-2.5Cu-0.3V 在快压速度 8 m/s 不变时, 压射比压优选 725 MPa, 压射速度优选 350 mm/s。

4) 基于提高力学性能和耐磨损性能考虑, 压铸

参考文献

- [1] Liang Wenbo. Analysis and research on the way to improve the machining efficiency of aluminum alloy[J]. *China Metal Bulletin*, 2019, (2): 167-168.
(梁文波. 铝合金机械加工效率的提升方式分析与研究[J]. *中国金属通报*, 2019, (2): 167-168.)
- [2] Qian Chunhua, Cui Haitao, Gao Chao, *et al.* Study on thermo-mechanical fatigue behavior of E319 cast aluminum alloy[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2019, 38(4): 634-638.
(钱春华, 崔海涛, 高超, 等. E319铸铝合金热机械疲劳行为研究[J]. *机械科学与技术*, 2019, 38(4): 634-638.)
- [3] Dong Xianming, Jian Chao. Present status and prospect of aluminum alloy die casting standards[J]. *Foundry*, 2017, 66(10): 1122-1124.
(董显明, 蹇超. 铝合金压铸标准现状及展望[J]. *铸造*, 2017, 66(10): 1122-1124.)
- [4] Zhang Zhiqiang, Zhang Xiaokai, He Dongye. Study on machining technology of aluminum alloy materials[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2018, 43(12): 16-19.
(张志强, 张晓凯, 何东野. 6016铝合金热冲压数值模拟研究[J]. *锻压技术*, 2018, 43(12): 16-19.)
- [5] Zhao Ertuan, Tian Yujing, Sun Shichen, *et al.* Optimization of permanent casting process for aluminum alloy combined shell[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2018, 38(12): 1317-1320.
(赵而团, 田玉晶, 孙世臣, 等. 铝合金组合壳体铸件的金属型铸造工艺优化[J]. *特种铸造及有色合金*, 2018, 38(12): 1317-1320.)
- [6] Zhang Junchao, Zhong Gu, Zou Chun, *et al.* Research progress of the high Vacuum die-casting aluminum alloys[J]. *Materials Review*, 2018, 32(z2): 375-378.
(张俊超, 钟鼓, 邹纯, 等. 高真空压铸铝合金的研究进展[J]. *材料导报*, 2018, 32(z2): 375-378.)
- [7] Tan Lin. The influence of low pressure casting parameters on the mechanical properties of aluminum alloy wheels was studied China venture capita[J]. *China Science and Technology Investment*, 2017, (36): 313.
(覃琳. 关于低压铸造参数对铝合金车轮机械性能的影响研究[J]. *中国科技投资*, 2017, (36): 313.)
- [8] Ni Hongjun, Chen Ke, Zhang Fubao, *et al.* Research status and prospect on die-casting aluminum alloy[J]. *Light Metals*, 2019, (3): 51-55.
(倪红军, 陈科, 张福豹, 等. 压铸铝合金研究现状及展望[J]. *轻金属*, 2019, (3): 51-55.)
- [9] Guo Lianjin, Jin Linkui, Meng Xinpei, *et al.* Failure analysis on early cracking of die-casting mold for NOS425 steel-aluminum alloy[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2019, 44(8): 129-136.
(郭联金, 金林奎, 孟鑫沛, 等. NOS425钢铝合金压铸模早期开裂失效分析[J]. *锻压技术*, 2019, 44(8): 129-136.)
- [10] Jing Han. Reaction kinetics of vanadium-aluminum alloy preparation by thermite method[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2017, 38(4): 40-43.
(景涵. 铝热法制备钒铝合金的动力学研究[J]. *钢铁钒钛*, 2017, 38(4): 40-43.)
- [11] Li Jianbing. Summary on the process of producing vanadium-aluminum alloy[J]. *Ferro-Alloys*, 2017, 48(6): 13-15.
(李建兵. 钒铝合金的生产方法综述[J]. *铁合金*, 2017, 48(6): 13-15.)
- [12] Hu Zhankui, Ke Shanshan. Influence of V content on microstructure and properties of 3102 aluminum alloy[J]. *Aluminium Fabrication*, 2017, (1): 4-9.
(胡展奎, 柯珊珊. 钒含量对3102铝合金组织及性能的影响[J]. *铝加工*, 2017, (1): 4-9.)
- [13] Wang Chaowen, Lin Chong, Wu Hebao, *et al.* Effects of V on microstructure and mechanical properties of A380 aluminum alloy[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2019, 39(5): 552-555.
(王朝闻, 林冲, 吴和保, 等. V对A380铝合金显微组织和力学性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, 39(5): 552-555.)
- [14] Liu Hai'e, Zhang Jianchao. High temperature properties of cast Al-Si-V aluminum alloy for mechanical parts[J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(1): 103-105.
(刘海娥, 张建超. 机械零件用铸造Al-Si-V铝合金的高温性能[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(1): 103-105.)
- [15] Liu Lu, Chen Jianghua, Xia Shenlin, *et al.* Effect of element V on microstructure and mechanical properties of 2519 alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2014, 35(4): 78-83.
(刘路, 陈江华, 夏申琳, 等. V元素对2519铝合金组织与力学性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2014, 35(4): 78-83.)