

真空压铸对 LA42 镁合金热导率和力学性能的影响

李子昕¹ 张玮宸¹ 李德江¹ 胡波¹ 王雪杨¹ 周丽萍¹ 曾小勤¹ 林占宏² 金晨² 赵寿²

(1.上海交通大学材料科学与工程学院,轻合金精密成型国家工程研究中心;2.青海盐湖特立镁有限公司)

摘要 以 Mg-4La-2Al-0.3Mn(LA42)合金为研究对象,利用 OM、XCT 等方法,结合复合材料的导热模型、强化模型,研究了真空压铸工艺对合金热导率和力学性能的影响。结果表明,真空压铸对 LA42 合金的热导率影响不大,归因于压铸件的孔隙率低,其相比固溶原子对热导率的影响,可以忽略不计,但屈服强度和伸长率相比常规压铸件分别提高了 5.8% 和 25.7%。屈服强度的提升主要归因于真空压铸条件下预结晶组织的减少和细小等轴晶分数的提高,伸长率的提升主要归因于真空压铸条件下孔洞缺陷和预结晶组织分数的降低。

关键词 Mg 合金;热导率;力学性能;真空压铸

中图分类号 TG146.22;TG249.2

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Vacuum-assisted Die Casting on the Thermal Conductivity and Mechanical Properties of LA42 Magnesium Alloy

Li Zixin¹, Zhang Weichen¹, Li Dejiang¹, Hu Bo¹, Wang Xueyang¹, Zhou Liping¹, Zeng Xiaoqin¹, Lin Zhanhong², Jin Chen², Zhao Shou²

(1.National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University; 2.Qinghai Salt Lake Tri-Magnesium Co., Ltd.)

Abstract: Using OM and XCT techniques, combined with thermal conductivity model and strengthening model of the composites, the effects of vacuum-assisted die-casting processes on the thermal conductivity and mechanical properties of Mg-4La-2Al-0.3Mn(LA42) alloy were investigated. The results reveal that vacuum-assisted die casting has little effect on the thermal conductivity of LA42 alloy, which is negligible compared to the effect of solid solution atoms on the thermal conductivity, due to the low porosity of die castings. However, the yield strength and elongation of vacuum-assisted die casting are improved by 5.8% and 25.7%, respectively, compared with those of ones by conventional process. The increase in yield strength is mainly attributed to the reduction of external solidified crystals and the increase of the fraction of fine equiaxial crystals under vacuum-assisted die casting process. The improvement in elongation is mainly attributed to the decrease of pores and external solidified crystals fraction under vacuum-assisted die casting process.

Key Words: Mg Alloy, Thermal Conductivity, Mechanical Properties, Vacuum-assisted Die-Casting

由于 5G 设备的高功率密度和高度集成化,有效的散热对于维持电子产品的正常运行十分重要。因此,有必要采用结构功能一体化材料,以呈现轻量级、高强度和优良的散热能力,能够为 5G 设备提供持续散热。镁合金因其低密度、高比强度、低成本和环境友好性,具有广阔的应用前景,是理想的散热材料^[1]。压铸作为一种高效、低成本的近净成形技术,是 5G 结构件的首选成

形方式^[2-4]。但是,充填过程中,往往存在气体的卷入和补缩不足,最终在铸件不同的位置形成气孔和缩松等缺陷^[5-7],导致微观组织分布不均匀,极大地影响了压铸件的服役寿命和力学性能。采用真空压铸能减少压铸件内部缺陷数量,改善充型和补缩能力^[8],是提升压铸件力学性能的有效方法。然而,热导率是衡量 5G 结构件散热能力的主要指标,真空压铸中孔洞会阻断热量在铸

收稿日期:2022-09-23;修改稿收到日期:2022-10-27
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB3701101);青海盐湖工业股份有限公司科技专项资助项目(21-ZC0609-0003);上海交通大学实验技术专项课题资助项目(JCZXSJB2022-01)
第一作者简介:李子昕,男,1993 年出生,博士研究生,上海(200240),E-mail:zxlee24@sjtu.edu.cn
通信作者:李德江,男,1979 年出生,副教授,上海(200240),E-mail:lidejiang@sjtu.edu.cn
引用格式:李子昕,张玮宸,李德江,等. 真空压铸对 LA42 镁合金热导率和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(5):590-595.
LI Z X, ZHANG W C, LI D J, et al. Effects of vacuum-assisted die casting on the thermal conductivity and mechanical properties of LA42 magnesium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5):590-595.

件中的传输,因此真空压铸应当有助于热导率的提升^[9]。同时,真空压铸对力学性能的提升主要归因于孔洞缺陷减少^[9-11]。因此,研究真空压铸对导热性能和力学性能的影响行为具有积极意义。

本研究分别采用常规压铸和真空压铸工艺制备了具有高热导率的 Mg-4La-2Al-0.3Mn 镁合金(简称 LA42),系统分析了不同压铸工艺条件下合金的微观组织差异,结合复合材料的导热模型、强化模型,分析真空压铸与常规压铸在热导率、力学性能上的差异,阐明差异的原因,为相关领域的研究提供参考。

1 试样制备与方法

采用伊之密 DM300 冷室压铸机制备了常规和真空条件下的 LA42 合金压铸件,制备过程中通有保护气体(体积分数为 99.5% 的 N₂+0.5% 的 SF₆)。合金实际成分通过 ICP-OES 测量获得,见表 1。压铸件外形及其相应的压铸工艺参数分别见图 1 和表 2。图 1 中 A 为力学性能的拉伸试棒(标距尺寸直径为 6.4 mm,长为 60 mm),B 为 190 mm×40 mm×2.5 mm 的试片,在圆圈区域切取直径为 12.7 mm 的热导率测量圆片,并在该位置沿厚度方向进行微观组织观察。

表 1 使用合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of experimental alloy %			
wt%			
La	Al	Mn	Mg
4.21	2.48	0.34	余量

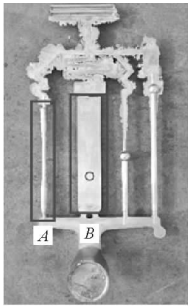


图 1 压铸试样

Fig.1 Die casting specimen

表 2 使用的压铸工艺参数

Tab.2 HPDC processing parameters					
浇注温度/ ℃	模具温度/ ℃	低速速度/ (m·s ⁻¹)	高速速度/ (m·s ⁻¹)	增压压力/ MPa	真空 度/Pa
700±10	220±10	0.25	5.0	70	4 000

采用 XCT(phoenix V|tome|xm)对每种工艺至少 3 个热导率试样进行 X 射线断层扫描,以获取常规压铸和真空压铸的孔隙率。采用 Zwick/Roell 拉伸试验机,在室温下以 0.5 mm/min 的拉伸速率对拉伸棒进行拉伸试验。利用 LFA-467 激光导热仪测量试样的热扩散系数,使用密度计(Sartorius Quintix124-1CN)对试样

的常温密度进行测试,通过 Neumann-Kopp 定律计算获得试样的比热容。试样的热导率 λ 可由下式获得^[12-13]:

$$\lambda = \alpha \rho c_p \tag{1}$$

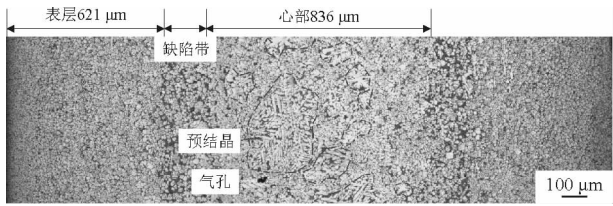
式中,α 为热扩散系数;ρ 为密度;c_p 为比热容。

对试样进行机械研磨、抛光和用镁合金专用腐蚀剂(4 mL 的硝酸+96 mL 的乙醇)腐蚀 5 s 清洗干净后,采用光学显微镜(Zeiss Axioscope 5)沿压铸件厚度方向进行微观组织分析;采用搭载 EDS 的 HitachiSU-70 扫描电镜在至少 10 个基体区域测量固溶原子浓度;采用 ImageProPlus 软件测量共晶体积分数;采用智铸超云云平台获取常规压铸和真空压铸下的冷却速率曲线,求得对应的平均冷却速率。

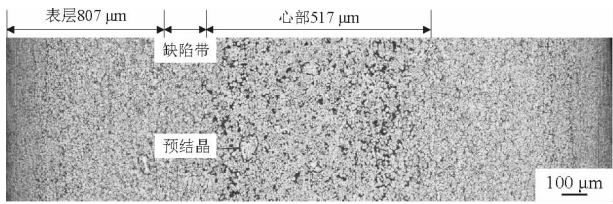
2 试验结果及分析

2.1 微观组织

图 2 为 LA42 铸件沿厚度方向的金相组织。可以看出,常规压铸和真空压铸沿厚度方向的金相组织均呈现典型的“三明治”结构。该“三明治”组织主要由 3 个区域组成,区域 1 是靠近模具内表面的表层区,区域 2 是铸件中间的心部组织区,区域 3 是表层和心部之间的缺陷带。图 3 为常规压铸沿厚度方向 3 个区域的 SEM 高倍组织。从图 3a 可见合金晶粒细小,呈典型的等轴晶状态,平均晶粒尺寸约为 14 μm。图 3b 出现发达的共晶区域,绝大部分共晶组织由 α-Mg+Al₃La 组成^[14],少部分由 α-Mg+Mg₁₂La 组成。图 3c 含有大量粗大的预结晶组织,呈现枝晶形貌,枝晶间隙伴有缩松。对比图 2a 和图 2b,可见真空压铸和常规压铸的组织存在显著差异,具体参数见表 3。常规压铸的表层组织薄,厚度约为 621 μm,心部伴有大量预结晶组织,占整个



(a) 常规压铸



(b) 真空压铸

图 2 LA42 压铸件沿厚度方向金相组织

Fig.2 OM images of LA42 casting along the thickness direction

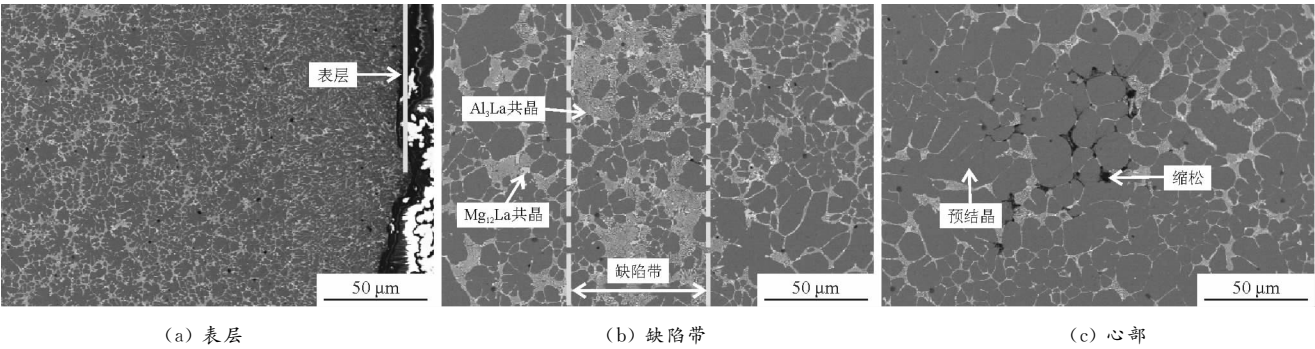


图 3 LA42 常规压铸件沿厚度方向表层、缺陷带、心部的 SEM 组织

Fig.3 OM images of LA42 conventional casting in the surface layer, defect band, and the core area along the thickness direction

表 3 常规压铸与真空压铸条件下相关参数对比

Tab.3 Comparison of relevant parameters under conventional and vacuum-assisted die casting condition

成形方式	平均冷却速率/ (K·s ⁻¹)	等轴晶晶粒尺寸/ μm	共晶分数/ %	固溶原子浓度 La、Al、Mn/%	孔隙率/%	预结晶晶分数/%	预结晶晶尺寸/μm
常规压铸	58	14	20.2	0.08、1.02、0.12	0.32	10.5	39.4
真空压铸	87	12	18.3	0.09、1.46、0.12	0.08	1.4	28.6

厚度方向组织的 10.5%，平均尺寸约为 39.4 μm；而真空压铸的表层组织厚，约为807 μm，心部的预结晶组织仅占整个厚度方向组织的 1.4%，平均尺寸约为28.6 μm。

真空压铸和常规压铸的组织差异主要原因在于空气热导率很低，仅为 0.023 W/(m·K)，而模具钢 H13 的热导率约为 31.2 W/(m·K)^[15]，空气的传热能力远低于模具表面，因此，空气类似于绝热物质，真空条件下模具界面传热系数会高于常规压铸^[15]，冷却速率更快，固溶原子浓度增加，表层组织更厚，α-Mg 形核率高，晶粒更细，从而抑制了预结晶组织的进一步长大。

2.2 真空压铸对 LA42 合金热导率的影响

常规压铸和真空压铸的密度、比热容、热扩散系数见表 4。图 4 为真空压铸和常规压铸热导率对比图。可以看出，真空压铸并没有导致热导率显著提升，甚至略微还有些降低。图 5 为典型的三维孔洞分布图，可以看出真空压铸后孔隙率显著下降，平均孔隙率由常规压铸的 0.32% 降低至 0.08%。

表 4 常规压铸与真空压铸条件下的密度、比热容、热扩散系数

Tab.4 Density, specific heat capacity and thermal diffusion coefficient under conventional and vacuum-assisted diecasting conditions

成形方式	密度/ (g·cm ⁻³)	比热容/ (J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)	热扩散系数/ (m ² ·s ⁻¹)
常规压铸	1.78	0.99	60.8
真空压铸	1.78	0.99	59.9

孔隙率对热导率的影响可以由复合材料导热模型表述^[16]：

$$k = \frac{k_{Mg} [k_{air} + 2k_{Mg} + 2f(k_{air} - k_{Mg})]}{k_{air} + 2k_{Mg} - f(k_{air} - k_{Mg})} \quad (2)$$

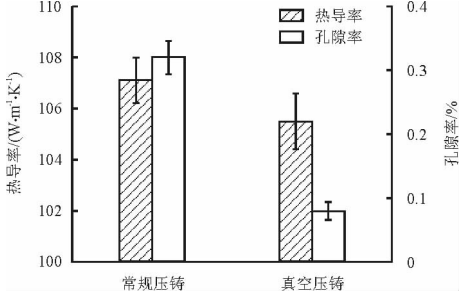


图 4 真空压铸与常规压铸的热导率和孔隙率对比

Fig.4 Comparison of thermal conductivity and porosity of alloy by conventional and vacuum-assisted die casting

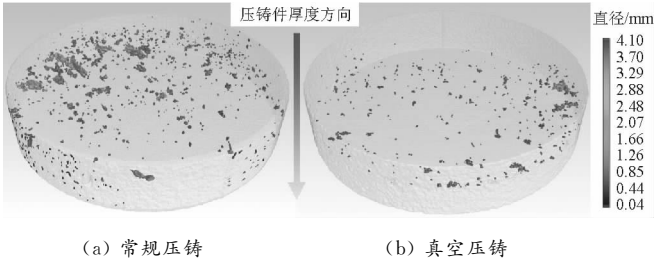


图 5 常规压铸和真空压铸 LA42 合金压铸件的三维孔洞分布
Fig.5 3D pore distribution of LA42 alloy casting by conventional and vacuum-assisted die casting

式中， k 为含孔隙纯 Mg 的热导率； k_{air} 为空气热导率； f 为孔隙率； k_{Mg} 为纯 Mg 的热导率，取 158 W/(m·K)。空气相比镁合金的热导率，相差 6 个数量级，因此，气孔对热量在合金中传输的影响几乎是阻断性的。图 6 为

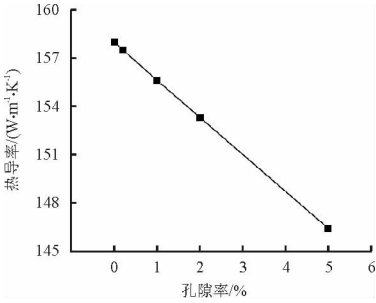


图 6 基于复合材料导热模型的纯镁热导率随孔隙率变化
Fig.6 The variation of thermal conductivity of pure magnesium with porosity based on the thermal conductivity model of the composites

依据式(2)推算出纯镁热导率随孔隙率变化规律,可见每增加 1% 的孔隙率,纯镁热导率降低 $2.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。然而,相比多孔材料,在压铸件中,孔隙率往往很低,一般不超过 3%^[7, 17-21]。真空压铸相比常规压铸,不仅仅是孔隙率降低,溶质原子浓度也提升,晶粒更细小。孔隙率相比固溶原子对热导率的影响可忽略不计^[22]。所以,真空压铸尽管可以降低合金中的孔隙率,但综合来看,并不一定会导致热导率提升。

2.3 真空压铸对 LA42 合金力学性能的影响

图 7 为常规压铸与真空压铸的拉伸曲线和力学性能。可以看出,真空压铸相比常规压铸,屈服强度由 146.2 MPa 提高至 154.7 MPa ,提升了约 5.8%,伸长率由 10.5% 提高至 13.2%,提高了 25.7%,其屈服强度差异可以归结到强化方式不同上。在铸造合金中,主要强化方式包括晶界强化、固溶强化和第二相强化。

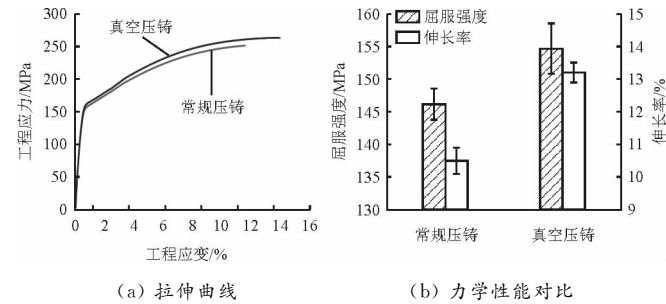


图 7 常规压铸与真空压铸条件下 LA42 合金的拉伸曲线和力学性能

Fig.7 Tensile curves and mechanical properties of LA42 alloy under conventional and vacuum-assisted die casting conditions

首先,晶界强化主要由细小的等轴晶和粗大的预结晶组织提供,因此,传统的晶界强化公式 Hall-Petch^[23]可以转变为:

$$\sigma_{gs} = \sigma_0 + f_{\text{预结晶}} k d_{\text{预结晶}}^{-1/2} + (1 - f_{\text{预结晶}} - f_{\text{共晶}} - f) k d_{\text{细晶}}^{-1/2} \quad (3)$$

式中, σ_{gs} 是晶界强化贡献; σ_0 是晶格摩擦应力^[23]; k 为 Hall-Petch 系数,为 $220 \text{ MPa} \cdot \mu\text{m}^{1/2}$ ^[23]; $f_{\text{预结晶}}$ 和 $d_{\text{预结晶}}$ 分别为预结晶组织的体积分数和尺寸; $f_{\text{共晶}}$ 和 $d_{\text{细晶}}$ 分别为共晶体积分数和等轴晶尺寸。分别计算常规压铸与真空压铸晶界强化贡献,求得其差值,为 7.3 MPa ,见图 8。

固溶强化主要由基体中的 La、Al、Mn 元素提供,其固溶强化贡献 σ_{ss} 可表述为^[24]:

$$\sigma_{ss} = M(38.9) \left[\left(\frac{\epsilon_b}{0.176} \right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{\text{SFE}}}{5.67} \right)^2 - \frac{\epsilon_b \epsilon_{\text{SFE}}}{2.98} \right]^{3/2} c_s^{1/2} \quad (4)$$

式中, M 为泰勒因子,取 4.2 ^[25]; ϵ_b 为尺寸偏差; ϵ_{SFE} 为化学偏差; c_s 为溶质原子浓度;对于 ϵ_b , La、Al、Mn 分别取 29.59 、 -11.50 和 -35.60 ^[24, 26];对于 ϵ_{SFE} , La、Al、

Mn 分别取 -3.26 、 -1.25 和 2.12 ^[24, 26]。分别计算常规压铸与真空压铸固溶强化贡献,求得其差值,为 2.6 MPa ,见图 8。

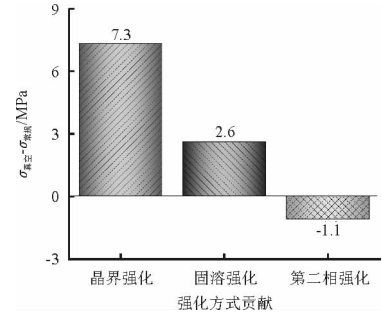


图 8 常规压铸与真空压铸在不同强化机制上的差异
Fig.8 The difference between conventional and vacuum-assisted die casting in terms of different strengthening mechanisms

第二相强化主要由共晶相提供,因此也可以称为共晶相强化,共晶相的屈服强度可以通过屈服强度与硬度的线性关系求得^[27],共晶相绝大部分由 Al_3La 组成,其显微硬度 (HV) 约为 70 ^[28],屈服强度可近似为 140 MPa 。因此,第二相强化贡献 σ_{sp} 可以表述为^[29]:

$$\sigma_{sp} = V_{sp} \sigma_{\text{eutectic}} \quad (5)$$

式中, V_{sp} 为第二相体积分; σ_{eutectic} 为共晶相屈服强度。分别计算常规压铸与真空压铸第二相强化贡献,求得其差值,为 -1.1 MPa ,见图 8。

从图 8 可以清晰地发现,真空压铸与常规压铸在强度上的差异主要由晶界强化导致。晶界强化的差异主要取决于预结晶分数和细小等轴晶分数的差异。常规压铸的预结晶分数几乎是真空压铸的 10 倍,而真空压铸的细小等轴晶分数远高于常规压铸。同时,两种压铸工艺的细小等轴晶尺寸相差不大。因此,主要是常规压铸的大量粗大预结晶组织显著削弱了晶界强化效果,从而造成了真空压铸和常规压铸的强度差异。

真空压铸与常规压铸的伸长率差异一方面归因于孔洞缺陷,孔洞缺陷对伸长率的影响已有报道^[6, 30-32]。但是真空压铸相比常规压铸,伸长率提高了 25.7%,可能还存在其他因素。有研究发现,同一批压铸 AE44 合金,相比屈服强度和抗拉强度,伸长率的波动最大^[28]。通过原位拉伸试验发现,除了孔洞缺陷处容易造成应力集中,粗大的预结晶组织也是造成应力集中的主要原因。并且,伸长率较低的试样断口表面,含有大量的预结晶组织。图 9 为常规压铸和真空压铸的断口表面。在常规压铸宏观断口表面,能发现大量的预结晶组织,伴随着裸露的粗大枝晶,见图 9a;而在真空压铸断口表面,能观察到的裸露枝晶极少,说明存在的预结晶分数较低,见图 9b。因此,常规压铸的高预结晶组织含量,

是导致其伸长率比真空压铸低的一个重要原因。

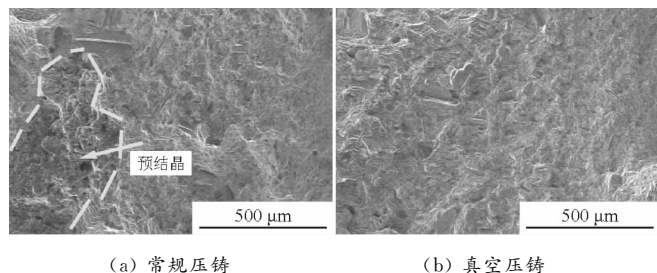


图9 常规压铸和真空压铸的断面形貌

Fig.9 SEM fractures morphology of the alloy by conventional and vacuum-assisted die casting

3 结 论

(1)孔洞缺陷对热导率有一定影响,每增加1%的孔隙率,热导率下降 $2.3\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,但真空压铸件的孔隙率往往很低,与固溶原子对热导率的影响相比,可以忽略不计。所以,真空压铸对热导率的影响很小。

(2)真空压铸冷却速率快,表层厚,抑制了预结晶长大;常规压铸的预结晶分数是真空压铸的10倍,预结晶分数降低是造成真空压铸强度显著提升的主要原因。

(3)真空压铸的低孔隙率和低预结晶分数,是伸长率显著提升的主要原因。

参 考 文 献

- [1] 郭径,叶兵,吴玉娟,等.高强初压铸镁合金的研究现状和发展趋势[J].特种铸造及有色合金,2019,39(3):254-260.
- [2] 罗哲民,李烈军,倪东惠,等.AZ91D超薄笔记本电脑外壳压铸工艺参数优化[J].特种铸造及有色合金,2016,36(10):1057-1060.
- [3] 张亚琴,席亚娟,李远发,等.稀土镁合金的散热性能研究[J].特种铸造及有色合金,2015,35(5):463-465.
- [4] 陈礼清,赵志江.从镁合金在汽车及通讯电子领域的应用看其发展趋势[J].世界有色金属,2004(7):12-20.
- [5] 刘志勇,许庆彦,柳百成.压铸工艺对镁合金组织性能影响的研究[J].铸造,2004(8):652-654.
- [6] 张钰笔,李德江,胡斌,等.真空度对压铸AZ91D镁合金组织和力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2016,36(1):52-55.
- [7] LI Z X, LI D F, ZHOU W, et al. Characterization on the formation of porosity and tensile properties prediction in die casting Mg alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10(7): 1857-1867.
- [8] 尹之华,黄毅,陈振明,等.型腔压力对通讯腔体压铸充型行为的影响[J].特种铸造及有色合金,2018,38(10):1082-1085.
- [9] HU C, ZHAO H, WANG X, et al. Microstructure and properties of AlSi12Fe alloy high pressure die-castings under different vacuum levels[J]. Vacuum, 2020, 180: 109561.
- [10] CAO H, SUN Q, PU Q, et al. Effect of vacuum degree and T6 treatment on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu alloy die castings[J]. Vacuum, 2020, 172: 109063.
- [11] DONG X, ZHU X, JI S. Effect of super vacuum assisted high pressure die casting on the repeatability of mechanical properties of Al-

- Si-Mg-Mn die-cast alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 266: 105-113.
- [12] LEITNER J, VONKA P, SEDMIDUBSKY D, et al. Application of Neumann-Kopp rule for the estimation of heat capacity of mixed oxides[J]. Thermochimica Acta, 2010, 497(1-2): 7-13.
- [13] LIU Y F, JIA X J, QIAO X G, et al. Effect of La content on microstructure, thermal conductivity and mechanical properties of Mg-4Al magnesium alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 806: 71-78.
- [14] ZHU S, WONG C, STYLES M, et al. Revisiting the intermetallic phases in high-pressure die-cast Mg-4Al-4Ce and Mg-4Al-4La alloys[J]. Materials Characterization, 2019, 156: 109839.
- [15] YANG H, YU W, CAO Y, et al. Effect of different processing parameters on interfacial heat-transfer behavior in high-pressure die-casting process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(12): 2599-2606.
- [16] MANZANO R A, ESPINOZA B F J, YANEZLIMON J M, et al. Effects of porosity on the thermal properties of A380-aluminum alloy[J]. Journal of Materials Research, 1999, 14(10): 3901-3906.
- [17] 万谦,赵海东,邹纯.铝合金铸件微观孔洞三维特征及分布的研究[J].金属学报,2013,49(3):284-290.
- [18] ZHANG Y, ZHENG J, XIA T, et al. Porosity quantification for ductility prediction in high pressure die casting AM60 alloy using 3D X-ray tomography[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A772: 138781.
- [19] JIAO X Y, ZHANG Y F, WANG J, et al. Characterization of externally solidified crystals in a high-pressure die-cast AlSi10MnMg alloy and their effect on porosities and mechanical properties[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 298: 117299.
- [20] WU M, HOU Y, HUA L, et al. On the deformation behavior of heterogeneous microstructure and its effect on the mechanical properties of die cast AZ91D magnesium alloy[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10(7): 1981-1993.
- [21] WANG J, GUO Z, JIAO X Y, et al. On the formation mechanism of the ring-like microstructure of high-pressure die-cast A390 alloy[J]. Materials Characterization, 2018, 140: 179-188.
- [22] SU C, LI D, LUO A A, et al. Effect of solute atoms and second phases on the thermal conductivity of Mg-RE alloys: A quantitative study[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 747: 431-437.
- [23] CACERES C H, MANN G E, GRIFFITHS J R. Grain size hardening in Mg and Mg-Zn solid solutions[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2011, A42(7): 1950-1959.
- [24] YASI J A, HECTOR L G, TRINKLE D R. First-principles data for solid-solution strengthening of magnesium: From geometry and chemistry to properties[J]. Acta Materialia, 2010, 58(17): 5704-5713.
- [25] SHEN J H, LI Y L, WEI Q. Statistic derivation of Taylor factors for polycrystalline metals with application to pure magnesium[J]. Materials Science and Engineering, 2013, A582: 270-275.
- [26] LIU Z R, LI D Y. The electronic origin of strengthening and ductilizing magnesium by solid solutes[J]. Acta Materialia, 2015, 89, 225-233.
- [27] 何上明.Mg-Gd-Y-Zr(-Ca)合金的微观组织演变、性能和断裂行为研究[D].上海:上海交通大学,2007.

某 H70 合金弹壳体收口成形工艺数值模拟研究

王兴雷 冯再新 姚宇康 郭小森
(中北大学材料科学与工程学院)

摘 要 某新型 H70 弹壳体的收口成形按传统理论计算工艺,弹壳毛坯待变形传力区和斜肩变形区均存在成形失稳问题,且制件口部壁厚增厚严重,超出产品尺寸要求。经模拟和试验研究,得出了毛坯变形区和传力区不发生失稳且工艺最简的变形条件。对于弹壳口部壁厚,可增大缩口系数,采用 4 次收口工艺控制口部壁厚的增加程度。修正了本壳体传统收口成形工艺,所得制件满足产品尺寸要求。

关键词 收口成形;成形失稳;数值模拟;模具结构

中图分类号 TG376.3 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation of Necking Process of a H70 Alloy Shell Body

Wang Xinglei, Feng Zaixin, Yao Yukang, Guo Xiaosen

(School of Materials Science and Engineering, North Central University)

Abstract: According to the traditional theoretical calculation of a novel H70 shell body, the forming instability problem occurs in the force transfer area and oblique shoulder deformation area, and the wall thickness of riser is seriously thickened, which exceeds the product size requirements. Through simulation and experimental investigation, the deformation conditions of blank deformation area and force transfer area without instability and the simplest process were obtained. For the shell riser wall thickness, the shrinkage coefficient can be increased, which is controlled by quartic closing process. The traditional closing forming process of the shell is modified, and the obtained parts meet the requirements of product size.

Key Words: Closing Forming, Forming Instability, Numerical Simulation, Mold Structure

对于薄壁管的成形,有研究者提出用颈缩法确定薄壁管成形极限的方法^[1],获得了薄壁管件的极限应变,首次确定了薄壁管的成形线,该研究方法在薄壁管成形工艺的设计中有重大意义。张小光等^[2]对弹壳类零件进行多种成形工艺分析,指出了弹壳零件复合冷挤压成形工艺的可靠性,但缺少通过挤压成形工艺控制壁厚尺寸精度的研究。

某新型弹壳体产品属于高性能弹体,广泛用于航、陆等军事领域,对弹壳体的成形品质要求较高。实践

中,壳体采用反挤压、变薄引伸等传统生产工艺较为顺利,但因壳体壁厚薄,收口时存在斜肩变形区和待变形传力区易失稳、制件口部尺寸精度难以控制的问题。本研究拟采用数值模拟及试验方法确定该弹壳体的收口成形工艺,解决壳体失稳和壁厚尺寸精度问题,旨在为类似问题的解决提供参考。

1 弹壳体基本情况

弹壳体毛坯尺寸及二次收口后的实物图见图 1。

收稿日期:2022-10-26;**修改稿收到日期:**2022-12-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51871075)

第一作者简介:王兴雷,男,1998 年出生,硕士研究生,太原(030051),E-mail:986253843@qq.com

通信作者:冯再新,男,1968 年出生,教授,太原(030051),E-mail:fengzaixin@nuc.edu.cn

引用格式:王兴雷,冯再新,姚宇康,等. 某 H70 合金弹壳体收口成形工艺数值模拟研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(5):595-598.

WANG X L, FENG Z X, YAO Y K, et al. Numerical simulation of necking process of a H70 alloy shell body[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5):595-598.

[28] 夏雅童.压铸 AE44 和 AM60 合金的微观组织、缺陷和力学性能[D]. 重庆:重庆大学, 2021.

[29] WANG C, LAVERNIA E J, WU G, et al. Influence of pressure and temperature on microstructure and mechanical behavior of squeeze cast Mg-10Gd-3Y-0.5Zr alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2016, A47(8): 4 104-4 115.

[30] 谭唯. Al-10Si-0.3Mg 压铸薄壁试样微观组织和缺陷表征及其对塑

性的影响[D]. 重庆:重庆大学, 2019.

[31] 胡泊,熊守美,村上正幸,等. AM50 镁合金真空压铸件孔洞分布与力学性能的关系[J]. 铸造, 2009, 58(11): 1 115-1 122.

[32] 王程程. 铝合金真空压铸气致缺陷及力学性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2020.

(编辑:张正贺)