

ZM5 镁合金隔板件挤压铸造工艺研究

陈利文¹ 赵宇宏¹ 孙晓平¹ 景舰辉¹ 赵 源¹ 樊如意¹ 侯 华^{1,2}
(1.中北大学材料科学与工程学院,高性能铝/镁合金材料开发及应用省部共建协同创新中心;
2.太原科技大学材料科学与工程学院)

摘 要 基于 ZBYT500 多功能液态/半固态成形装备,采用间接挤压铸造工艺生产了 ZM5 镁合金隔板件,分别在铸件边缘厚壁位置、中心薄壁位置、直浇道位置取样,分析不同位置微观组织形貌及力学性能。在较快的热传导和压力下凝固,中心薄壁位置虽然存在大量的枝晶,但晶粒组织发生了明显的细化,力学性能明显优于其他位置,其抗拉强度达到 185.4 MPa,伸长率为 5.6%。
关键词 挤压铸造;镁合金铸件;微观形貌;力学性能
中图分类号 TG249.2;TG146.22 文献标志码 A
DOI:10.15980/j.tzzz.2023.07.001 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Squeeze Casting Technology of ZM5 Magnesium Alloy Baffle
Chen Liwen¹, Zhao Yuhong¹, Sun Xiaoping¹, Jing Jianhui¹, Zhao Yuan¹, Fan Ruyi¹, Hou Hua^{1,2}
(1. Collaborative Innovation Center of Ministry of Education and Shanxi Province for High-performance Al/Mg Alloy Materials, School of Materials Science and Engineering, North University of China;
2.School of Materials Science and Engineering,Taiyuan University of Science and Technology)

Abstract: ZM5 magnesium alloy baffles were produced by indirect squeeze casting based on ZBYT500 multi-functional liquid/semi-solid forming equipment.Sampling from the edge, the center and the sprue to explore the microstructure morphology and mechanical properties of different positions. Due to the rapid heat transferring and solidification under pressure, there are a lot of dendrites in the central position, while the grain structure is obviously refined, and mechanical properties are obviously superior to those of the other positions, where the tensile strength is 185.4 MPa and elongation is 5.6%.
Key Words: Squeeze Casting, Magnesium Alloy Castings, Microstructure, Mechanical Properties

挤压铸造是通过对注入模具型腔中的金属液施加较高的机械压力,使已凝固的外壳发生一定量的塑性变形,金属液在等静压作用下及时补缩,从而得到晶粒细小、组织致密、孔隙度低、表面质量好、力学性能优良的铸件^[1-3]。挤压铸造件具有优良的力学性能和组织,当前铝合金挤压铸造件已经实现了批量化生产,如铝合金轮毂、副车架、控制臂、转向节、阀体、变速箱箱体等^[4-7]。随着轻量化发展要求,镁合金结构件越来越广泛地被应用到航空航天、国防军工及现代其他产业中^[8],但镁合金易氧化燃烧、易产生冷隔缺陷,导致采用挤压铸造方法制备镁合金铸件的工艺要求更高,而关于镁合金挤压铸件批量化生产的报道很少,主要是采用挤压铸造工艺来制备不同成分的镁合金材料^[9-12]。因此,开发镁合金铸件挤压铸造技术,探明工艺-微观组织-力学性能之间

相互作用规律,实现高性能镁合金结构件挤压铸造批量化生产,具有积极的意义。

本研究基于 ZBYT500 多功能液态/半固态成形装备,采用间接挤压铸造工艺生产 ZM5 镁合金隔板件,分别在铸件边缘厚壁位置、中心薄壁位置、直浇道位置取样,探究不同位置微观组织形貌及力学性能,旨在为镁合金铸件挤压铸造技术推广应用提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料及设备

试验原材料为 ZM5 镁合金,其成分见表 1。挤压铸造采用 ZBYT500 多功能液态/半固态成形装备,其最大合模力为 5 000 kN,挤压速度在 3~17 mm/s 可

收稿日期:2022-07-28;修改稿收到日期:2022-09-15
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52074246,22008224,52275390,52205429,52201146);国防基础科研资助项目(JCKY2020408B002,WDZC202212);山西省专利转化专项计划资助项目(202303002);山西省重点研发计划资助项目(202102050201011,202202050201014)
第一作者简介:陈利文,男,1986 年出生,副教授,太原(030051),E-mail:chenliwen@nuc.edu.cn
通信作者:赵宇宏,女,1974 年出生,教授,太原(030051),E-mail: zhaoyuhong@nuc.edu.cn
引用格式:陈利文,赵宇宏,孙晓平,等. ZM5 镁合金隔板件挤压铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(7):865-870.
CHEN L W,ZHAO Y H, SUN X P, et al. Squeeze casting technology of ZM5 magnesium alloy baffle[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(7):865-870.

865

调,顶出压射缸压力在 100~2 000 kN可调,顶出速度在 4~38 mm/s可调,压射速度在 50~1 500 mm/s 可调。其他试验设备有 SG2-40-13 箱式电阻炉、DK7735 电火花线切割机、BS-3030-ZD 锯床等。

表 1 ZM5 镁合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZM5 magnesium alloy %							
w_B							
Al	Zn	Mn	Fe	Ni	Cu	Si	Mg
7.5~9.0	0.2~0.7	0.15~0.5	≤ 0.004	≤ 0.008	≤ 0.008	≤ 0.05	余量

1.2 隔板件制备

经过备料、熔炼、模具预热、保护气下浇注、间接挤压铸造等工序,最终制得 ZM5 镁合金隔板铸件。首先用锯床对 ZM5 镁合金锭切块,打磨其表面以去除杂质;预热箱式电阻炉至 200 ℃,随后把 ZM5 镁合金块体放入预热的坩埚中;在熔炼过程中持续通入氩气保护,继续升温加热至 730 ℃,待 ZM5 镁合金锭熔化后,进行精炼、除气、扒渣,将熔体温度设定为 680 ℃,到温后静置 15 min。采用模温机预热模具,设定预热温度为 280 ℃。

启动多功能液态/半固态成形装备,测试滑块和顶缸运行是否正常,开模并喷涂脱模剂和冲头润滑油,并向料缸通入氩气。将坩埚从箱式电阻炉中取出,在氩气保护下将镁合金液浇入到料缸中,多功能液态/半固态成形装备合模,然后依靠冲头将镁合金液压入模具型腔中,充填过程平稳快速,达到制件外部形状,靠冲头进行加压,压力为 130 MPa,保压 30 s,开模将铸件取出,置于木板上冷却至室温。

1.3 分析测试

分别在 ZM5 镁合金隔板件 4 个部位进行取样(铸件边缘厚壁 1 号位置、中心薄壁 2 号位置、直浇道下部 3 号位置、直浇道中部 4 号位置),进行微观组织表征和力学性能测试,见图 1。试样分别使用 1000 号、1500 号、2000 号砂纸进行打磨,然后在金相抛光机抛光 15 min,随后采用 3% 的硝酸酒精进行腐蚀。采用 Leica DMI8 型金相显微镜进行金相组织观察。采用 SU-1500 型扫描电镜对微观组织形貌和拉伸断口形貌进行表征,

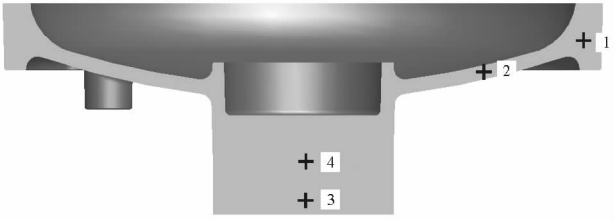


图 1 试样取样位置
Fig.1 Sampling location

并采用扫描电镜配置的能谱仪对元素分布和成分进行分析。采用 AG-X PLUS 型电子万能试验机对试样进行室温拉伸测试,加载速率为 1 mm/min。采用铸造模拟软件 EasyCast 对隔板件凝固过程温度场进行数值模拟,分析铸件各部位的凝固顺序^[13]。

2 试验结果与分析

2.1 宏观断面

图 2 为 ZM5 镁合金隔板件。可见整个铸件形状结构完整,表面平整光滑,没有观察到由于金属液流动充型造成的裂纹、冷接纹、冷隔等缺陷,也没有明显凹陷、凸起等宏观缺陷。



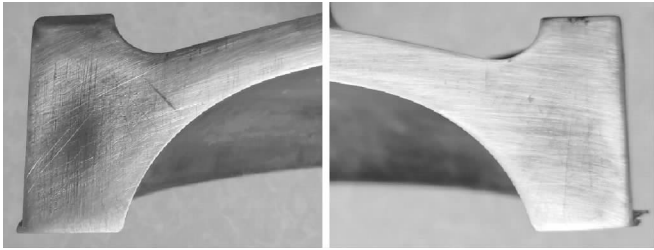
(a) 凸面 (b) 凹面
图 2 ZM5 镁合金隔板件

Fig.2 ZM5 magnesium alloy baffle

图 3 为切割断面的宏观形貌,可见隔板件断面光滑致密,无明显气孔、缩松、缩孔、氧化夹杂等缺陷。这表明在浇注过程中施加气体保护,可以有效控制金属液的氧化燃烧,在充型过程中金属液流动平稳,没有卷气现象发生,随后镁合金液在压力下进行凝固,可以显著减少收缩缺陷。



(a) 断面形貌



(b) 左侧方框放大 (c) 右侧方框放大

图 3 ZM5 镁合金隔板件断面形貌

Fig.3 The cross section morphologies of ZM5 magnesium alloy baffle

2.2 微观组织

图 4 为采用 EasyCast 软件得到的隔板件凝固过程温度场分布数值模拟结果。可以看出,铸件最薄处的 2 号位置冷却速率最快,首先发生凝固,铸件边缘壁厚处 1 号位置随后凝固,直浇道处 3 号位置和 4 号位置最后凝固。

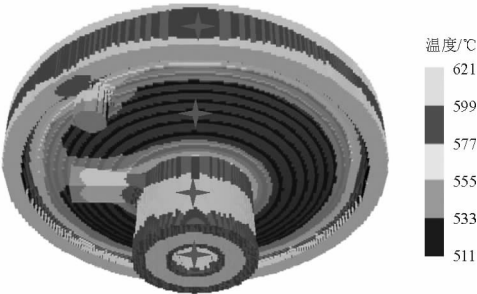


图 4 ZM5 镁合金隔板件凝固过程温度场分布(凝固 30%)
Fig.4 Temperature field distribution of ZM5 magnesium alloy baffle during solidification(30%)

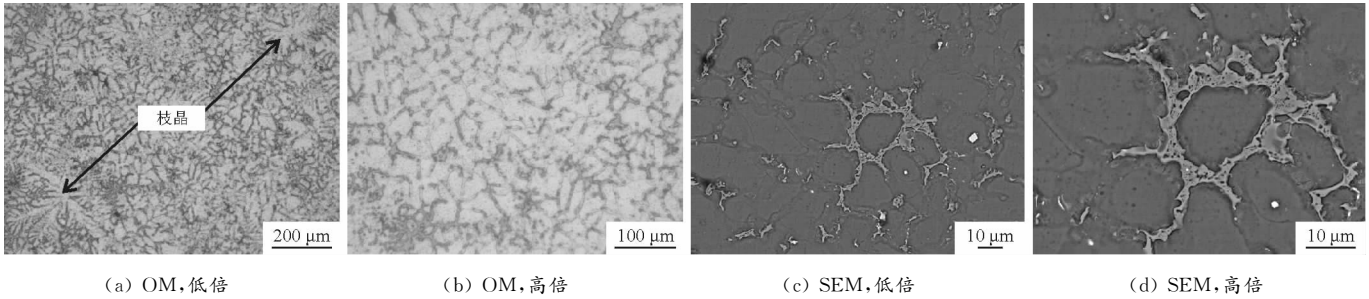


图 5 ZM5 镁合金隔板件 1 号位置微观组织
Fig.5 Microstructure of ZM5 magnesium alloy baffle at position 1

力可以持续传递到 2 号位置中未凝固的金属液中,因此该部位组织最为致密。图 6 为 ZM5 镁合金隔板件 2 号位置的微观组织形貌。可以看出,虽然存在大量的枝晶,但晶粒组织发生了明显的细化。这是由于传热系数

由于 2 号位置先发生凝固,而此时 1 号位置金属液尚未凝固,将会导致冲头施加的压力传递不到 1 号位置内的金属液中,可能会造成缩孔与缩松缺陷。图 5 为 ZM5 镁合金隔板件 1 号位置的微观组织形貌。整体来看,1 号位置处没有发现明显的收缩缺陷,说明在 2 号位置发生凝固前,冲头施加的压力可以对 1 号位置实现及时补缩,有效减少后续凝固过程中缺陷的产生。还可以看出,1 号位置的微观组织主要由灰色的 α -Mg 基体和黑色的第二相金属间化合物 β -Mg₁₇Al₁₂ 构成,存在着大量的发达枝晶,晶粒较为粗大。这是由于凝固过程中发生液态收缩、凝固收缩和固态收缩,铸件与模具之间出现微小间隙,造成模具与铸件间的传热系数降低,导致晶粒自由长大。此外,第二相 β -Mg₁₇Al₁₂ 细小,大部分在晶界处呈连续分布,也有少量以颗粒状分布在晶粒内部。

2 号位置由于与模具上、下模的接触面积较大,热传导最快,是整个铸件最先凝固的部位,冲头施加的压

提高,增加了液态金属过冷度,使初始形核数目显著增加,有效抑制晶粒长大^[14]。此外,还可以看出第二相 β -Mg₁₇Al₁₂ 在晶界处为连续的网状分布,晶界清晰,相比于 1 号位置,2 号位置晶内几乎没有第二相

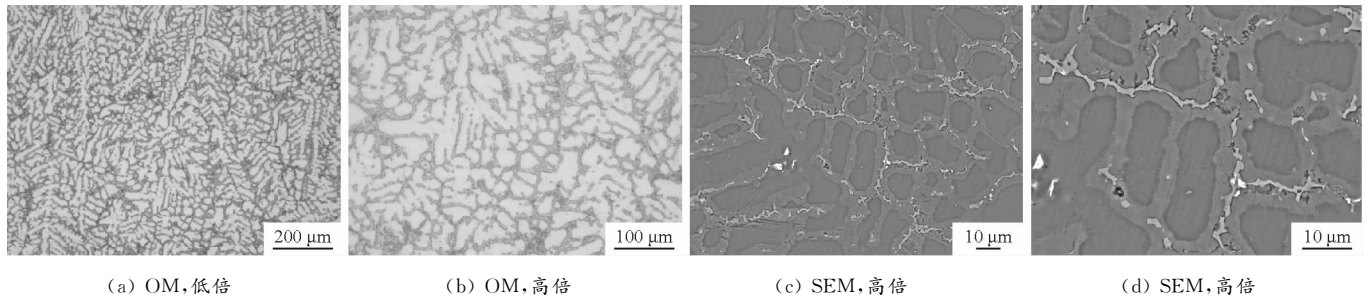


图 6 ZM5 镁合金隔板件 2 号位置微观组织
Fig.6 Microstructure of ZM5 magnesium alloy baffle at position 2

β -Mg₁₇Al₁₂。

3 号位置是整个铸件最后凝固的部位,其中直浇道下半部分与冲头直接接触,与冲头存在一定的热传导,所以凝固顺序先于上半部分(4 号位置)。在冲头压力持续作用下,该部位已经凝固的封闭腔外壳发生一定的

塑性变形,以消除由于内部金属液在冷却过程中产生的体积收缩,使液态金属在等静压下及时补缩,从而可以有效消除缩孔和缩松等缺陷。图 7 为 ZM5 镁合金隔板件 3 号位置的微观组织形貌。可以看出, α -Mg 基体相当一部分是以树枝状晶存在,但组织较为细小,无明显

的收缩缺陷。

4 号位置也是整个铸件最后凝固的部位,壁厚较厚,与周围模具热量传递相对较少,但由于冲头压力的持续施加,能够保证该部位金属液始终在压力下凝固,

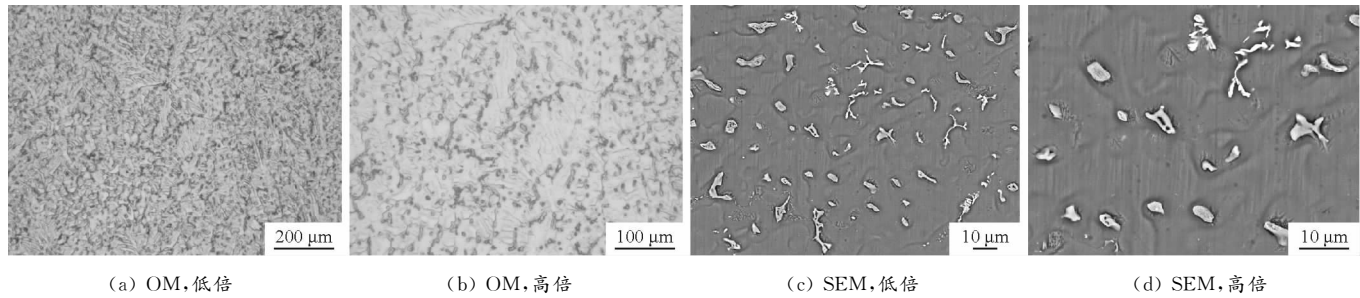


图 7 ZM5 镁合金隔板件 3 号位置微观组织
Fig.7 Microstructure of ZM5 magnesium alloy baffle at position 3

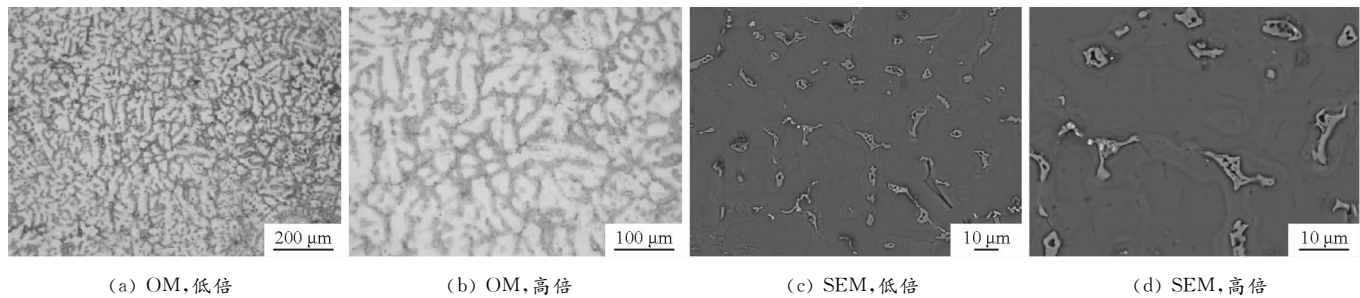


图 8 ZM5 镁合金隔板件 4 号位置微观组织
Fig.8 Microstructure of ZM5 magnesium alloy baffle at position 4

相 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 。

图 9 为 2 号位置面扫描能谱分析图。可以看出, Mg 元素均匀分布在除晶界外的基体上,晶界处存在部分第二相 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$,主要由 Mg、Al 元素组成,其中夹杂少量的 Zn 元素。从图 9f 可以看出,合金中存在极少量的斑点,其元素组成为 Al、Mn,推断为 AlMn 相,夹

杂少量 Si 元素,为杂质相,从图 9e 可以看出其含量较少。

从图 9g 可以看出, A 处 Mg 含量最高,摩尔分数达到 96.65%, Al、Mn、Zn、Si 元素含量顺序递减,摩尔分数分别为 2.93%、0.08%、0.03%、0.01%,这说明晶粒内部为 $\alpha\text{-Mg}$ 相。从图 9h 可以看出, B 处 Mg 摩尔分数

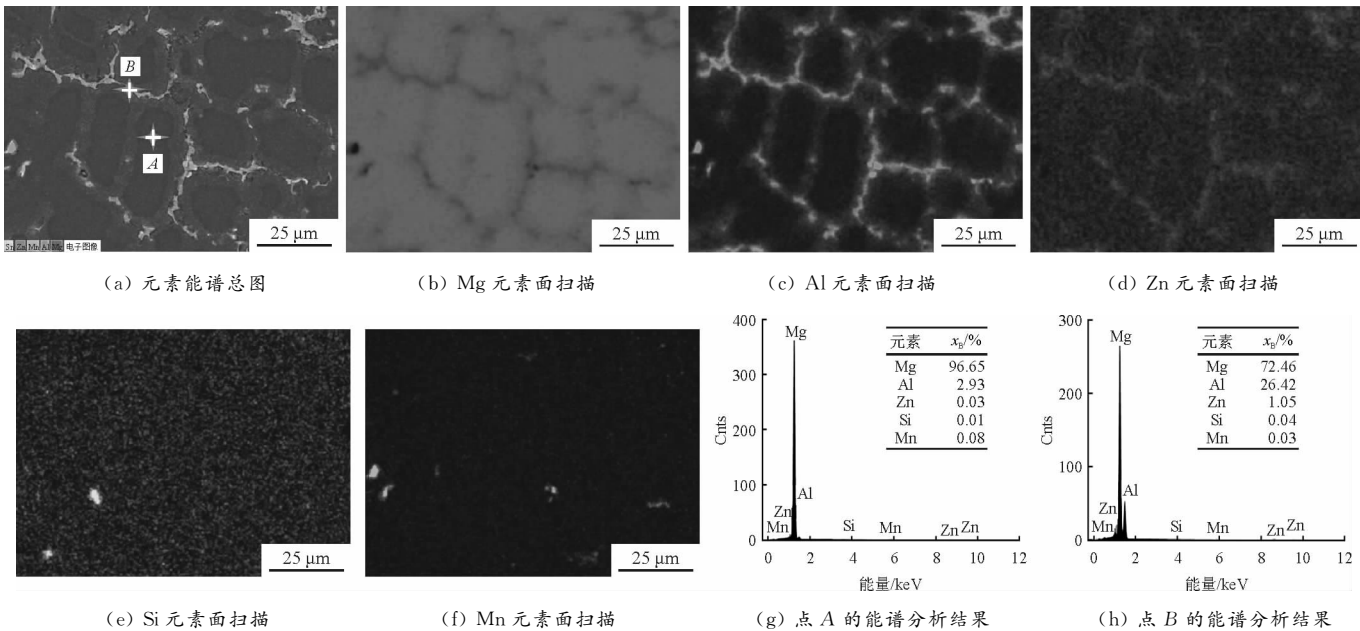


图 9 ZM5 镁合金隔板件 2 号位置面扫描能谱图及 EDS 分析
Fig.9 Face scanning results and EDS analysis of ZM5 magnesium alloy baffle at position 2

为72.46%，Al、Zn、Si、Mn 的摩尔分数分别为 26.42%、1.05%、0.04%、0.03%，Mg、Al 含量合计为98.88%，所以 B 点确定为第二相 β -Mg₁₇Al₁₂。

由于金属 Mg 的化学性质活泼，在挤压铸造过程中，容易引入许多杂质元素，与其他合金元素形成夹杂物，破坏合金基体的连续性，导致结构件力学性能下降。其次，杂质元素的引入，还会消耗基体中有效的合金元素，降低其在基体中的含量，从而降低合金元素对结构件的优化效果，如降低成形性、耐腐蚀性等。

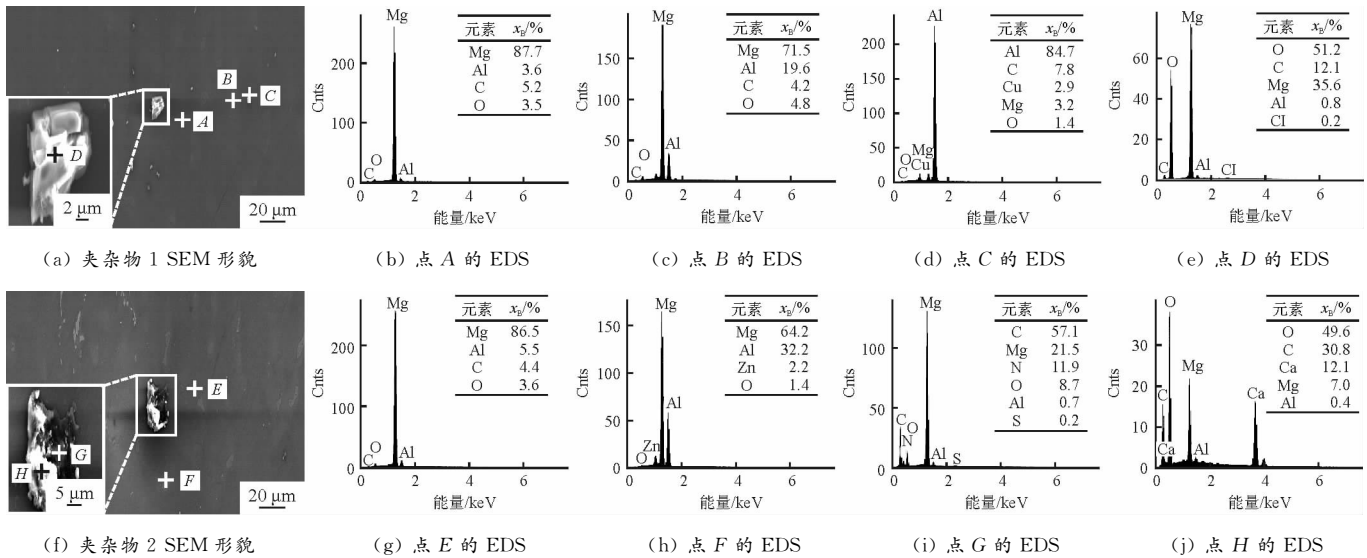


图 10 夹杂物 SEM 及 EDS 分析
Fig.10 SEM and EDS analysis of inclusions

此外，镁合金熔炼过程中覆盖性熔剂中的卤化物 (NaCl、KCl、CaCl₂、CaF₂) 拥有较低的熔点，熔化后在镁合金熔体表面均匀铺开起到保护隔离作用。一些熔剂还能润湿熔体中杂质，使其团聚成大颗粒，在静置过程中沉淀到坩埚底部，从而带出熔体，实现熔体净化的作用。通过打渣、过滤等过程，会有少部分较小的团聚颗粒随着熔体进入到铸件内部，造成夹杂。图 10f 和图 10j 可以看出，镁合金基体中团聚状的夹杂物，经过 EDS 分析，夹杂物 G 处中 C、Mg、N、O 含量分别为 57.1%、21.5%、11.9%、8.7%，夹杂物 H 处中 O、C、Ca、Mg 的含量分别为 49.6%、30.8%、12.1%、7.0%，表明该处夹杂物为熔剂夹杂和氧化物夹杂的混合物，夹杂物直径为 60 μm 左右。在本试验中，在熔炼、转运和浇注过程中，全程采用氩气进行保护，夹杂物含量控制在 0.5% 以下，尺寸控制在 80 μm 以下，可有效减少夹杂物对结构件整体力学性能的影响。

2.3 力学性能

ZM5 镁合金隔板件不同位置的力学性能见图 11。可以看出，2 号位置的力学性能明显优于其余位置，其抗拉强度达 185.4 MPa，伸长率为 5.6%。2 号位置与

在熔炼、打渣、转运和浇注过程中，镁合金熔体极易与周围环境中的含氧物质发生反应，形成氧化物夹杂，常见能与 Mg 发生反应的含氧物质有 O₂、H₂O 和 CO₂，最终可能会生产 MgO 夹杂，见图 10。从图 10a~图 10e 可以看出，镁合金基体中存在团聚状的夹杂物，经过 EDS 分析表明，A 处为 Mg 基体，B 处为 β -Mg₁₇Al₁₂，C 处为 Al 颗粒；D 处夹杂物中 O 元素、C 元素和 Mg 元素的含量分别为 51.2%、12.1% 和 35.6%，主要为 MgO 夹杂，夹杂物直径为 30 μm 左右。

直浇道相连，冲头施加给直浇道的压力可以传递到 2 号位置，使其始终保持在等静压下凝固。充分的热传导和压力下凝固，可以获得细化的晶粒组织，消除内部收缩缺陷，有利于力学性能的提升。相对于其他位置，1 号位置的力学性能相对较低，其抗拉强度为 176.3 MPa，伸长率为 3.9%。由于 2 号位置先于 1 号位置凝固，冲头所施加的压力传递不到 1 号位置内，其内部的金属液将不会在压力下凝固，可能产生收缩缺陷。同时由于凝固过程的收缩，铸件与模具之间出现微小间隙，造成模具与铸件间的传热系数降低，导致晶粒较为粗大，使力

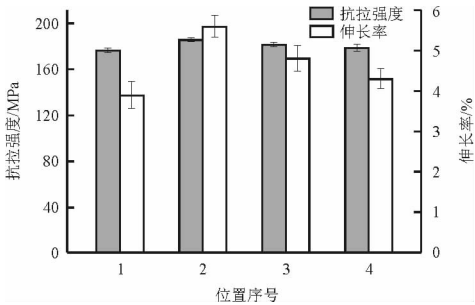
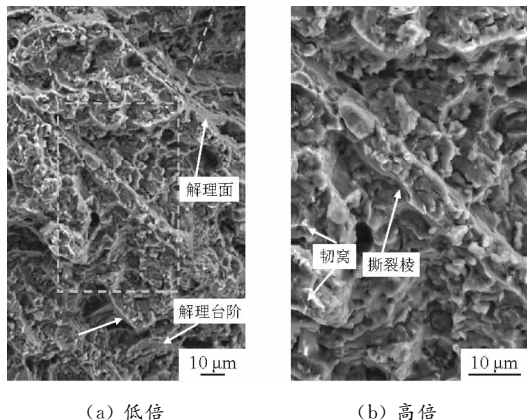


图 11 ZM5 镁合金隔板件不同位置的力学性能
Fig.11 Mechanical properties of ZM5 magnesium alloy baffle at different positions

学性能下降。

图 12 为 ZM5 镁合金隔板件 2 号位置的断口形貌。可以清楚看到解理面、解理台阶和撕裂棱,并有少量的韧窝,其断裂形式是脆性断裂。图 12b 为局部放大图,可以进一步观察到韧窝数量少且较浅,断口形貌以撕裂棱和解理台阶为主。



(a) 低倍 (b) 高倍
图 12 ZM5 镁合金隔板件断口形貌

Fig.12 Fracture morphologies of ZM5 magnesium alloy baffle

3 结 论

基于 ZBYT500 多功能液态/半固态成形装备,采用间接挤压铸造工艺生产了 ZM5 镁合金隔板件,分别在 4 个不同部位进行取样(铸件边缘厚壁 1 号位置、中心薄壁 2 号位置、直浇道下部 3 号位置、直浇道中部 4 号位置),进行微观组织表征和力学性能测试。Easy-Cast 模拟结果表明,铸件最薄处的 2 号位置,冷却速率最快,首先发生凝固,铸件边缘壁厚处 1 号位置随后凝固,直浇道处 3 号位置和 4 号位置最后凝固。由于较快的热传导和压力下凝固,2 号位置虽然存在大量的枝晶,但晶粒组织发生了明显的细化,力学性能明显优于其余位置,其抗拉强度达 185.4 MPa,伸长率为 5.6%。然而,由于凝固后期压力传递不到 1 号位置内部,其内部的金属液将不会在压力下凝固,同时模具与铸件间形成的间隙造成传热系数降低,1 号位置存在着大量的发达枝晶,晶粒较为粗大,抗拉强度为 176.3 MPa,伸长率为 3.9%。

参 考 文 献

[1] 罗守靖,陈炳光,齐丕曩. 液态模锻与挤压铸造技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
[2] 黄毅,罗继相,郭称发,等. 挤压铸造技术在汽车结构件中的应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(8): 1 040-1 043.

[3] 陈利文,侯华,靳玉春,等. 基于响应面法的铝合金间接挤压铸造工艺研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(4): 1 174-1 179.
[4] 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.
[5] CHEN L W, ZHAO Y H, WEN Z, et al. Modelling and optimization for heat treatment of Al-Si-Mg alloy prepared by indirect squeeze casting based on response surface methodology[J]. Materials Research, 2017, 20(5): 1 274-1 281.
[6] 邢书明,闫光远,鲍培培,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): 133-138.
[7] 孙晓平,赵宇宏,陈利文,等. 间接挤压铸造水雷壳体用 ZAlSi7Mg 铝合金隔板件[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(4): 446-450.
[8] 景舰辉,陈利文,孙晓平,等. 热处理对半固态注射成形石墨烯/镁基复合材料组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(1): 47-50.
[9] 贾海龙,张梦娜,杨铭,等. 挤压铸造镁合金研究进展[J]. 中国材料进展, 2021, 40(10): 772-784.
[10] 吴国华,张亮,丁文江. 镁合金液态精密成形研究进展[A]. 第十三届全国铸造年会暨 2016 中国铸造活动周论文集[C]. 合肥, 2016.
[11] YOU Z, JIANG A, DUAN Z, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of semi-solid squeeze casting AZ91D [J]. China Foundry, 2020, 17(3): 219-226.
[12] 姚杰,吴树森,方晓刚,等. 高压强对 Mg-Zn-Y-Zr 合金凝固组织及性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(8): 1 761-1 769.
[13] 李静怡,赵宇宏,陈利文,等. 镁合金隔板铸件低压铸造工艺数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(5): 588-592.
[14] CHEN L W, ZHAO Y H, LI M, et al. Reinforced AZ91D magnesium alloy with thixomolding process facilitated dispersion of graphene nanoplatelets and enhanced interfacial interactions[J]. Materials Science and Engineering, 2021, A804: 140 793.

(编辑:张正贺)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- | | | |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网 | ● 行业动态 | ● 联系我们 |
| ● 微商城 | ● 铸造前沿 | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例 | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂 | ● 产品库 |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库 |