

## AZ91D 镁合金半固态触变成形压铸工艺

阎峰云<sup>1</sup>, 强旭东<sup>2</sup>, 张玉海<sup>1</sup>, 黄晓锋<sup>2</sup>, 范松岩<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 有色金属合金及加工教育部重点实验室, 兰州 730050)

**摘要:** 采用等温热处理对 AZ91D 镁合金进行非枝晶化, 研究半固态镁合金的触变压铸工艺, 得到性能良好的触变压铸镁合金试件。通过改变压力和压射速度等工艺参数, 发现其抗拉强度和伸长率都随着压力或速度的上升而增加, 当增压压力为 35 MPa 和压射速度为 4.5 m/s 时, 其抗拉强度达到最大, 为 237.5 MPa, 伸长率为 4.8%。通过组织分析认为, 半固态触变压铸对晶粒细化效果明显, 这与固相颗粒在充型过程中的二次破碎, 液相喷射分散后凝固具有直接的关系。

**关键词:** 镁合金; 触变成形; 半固态压铸; 等温处理; 力学性能

中图分类号: TG 146.2<sup>+</sup>2

文献标识码: A

## Die-casting process of semi-solid thixo-forming of AZ91D Mg alloy

YAN Feng-yun<sup>1</sup>, QIANG Xu-dong<sup>2</sup>, ZHANG Yu-hai<sup>1</sup>, HUANG Xiao-feng<sup>2</sup>, FAN Song-yan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials,  
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys and Processing, Ministry of Education,  
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The non-dendrite or spherical grains microstructure of AZ91D magnesium was obtained using the isothermal treatment technique and the thixo-casting process were studied under semi-solid state. The specimens with good properties were obtained and analyzed. The effects of injection speed and additional pressure on tensile strength, elongation rate and microstructure of specimens were investigated. The results show that the mechanical properties of alloy can be improved with the increase of injection speed and additional pressure. While the additional pressure is 35 MPa and the injection speed is 4.5 m/s, the tensile strength and elongation rate can reach 237.5 MPa and 4.8%, respectively. Through the microstructure analysis, the semi-solid thixo-casting most obviously refines the crystal grain. The solid phase particles in the semi-solid ingot may be broken into pieces again and the liquid phase may be sprayed and solidified during filling process due to most high shearing strength.

**Key words:** magnesium alloy; thixo-forming; semi-solid die casting; isothermal heat treatment; mechanical properties

镁合金具有较高的比强度和比弹性模量, 良好的刚性、减振性、切削加工性和抗电磁屏蔽性, 较低的形成温度等优点, 逐渐成为 21 世纪汽车材料的重要组成

部分<sup>[1]</sup>, 镁合金加工被誉为 21 世纪最具发展前景的绿色产业<sup>[2]</sup>。

压铸是镁合金铸造最主要的成形工艺。世界镁铸

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2007CB613700); 甘肃省科技支撑计划资助项目(0708GKCA029)

收稿日期: 2007-07-28; 修订日期: 2007-11-29

通讯作者: 阎峰云, 教授; 电话: 0931-2976688; E-mail: yanfy@lut.cn

件总产量的93%是用压铸工艺生产的。这主要是由于镁合金具有优良的压铸工艺性能。AZ91D是一种室温使用的主要压铸镁合金,且具有较高的强度及良好的铸造性能<sup>[3]</sup>,但与铝合金相比,其热裂倾向较大,期望通过半固态成形技术,降低成形温度和凝固收缩,进而提高镁合金强度<sup>[4-7]</sup>。镁合金半固态成形技术已成功商业化应用的是美国Dow化学公司发明的触变注射机(Thixomolding Machine),但其成形时的固相率小于30%,主要生产性能要求不高的3C类产品<sup>[8]</sup>。重庆大学、华中科技大学和北京有色金属研究总院等单位分别对半固态触变压铸、流变压铸和流变挤压技术进行了研究<sup>[9-12]</sup>,为后续半固态技术发展提供了借鉴。其余关于镁合金半固态成形研究主要集中在半固态坯料的制备<sup>[13]</sup>和半固态流变行为等方面。

本研究设计用冷室压铸机和加热式压室实现镁合金半固态触变压铸的新方法。其中半固态锭料采用等温处理技术,设计了等温处理用的管式加热保温炉与加热式压室连接,着重研究了半固态压铸工艺参数对镁合金组织和力学性能的影响。

## 1 实验

实验材料为标准AZ91D镁合金,其化学成分如表1所列。合金经重熔、精炼和适当的变质处理后,浇注成 $d50\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 的坯料。使用前车去表面氧化皮,加工成 $d47.5\text{ mm}$ 圆柱形锭料。经DSC分析,该合金的熔化起始温度为 $468\text{ }^\circ\text{C}$ ,熔化结束温度为 $596\text{ }^\circ\text{C}$ ,共晶温度为 $421\text{ }^\circ\text{C}$ 。

实验装置局部图如图1所示,半固态等温处理用的加热保温炉(9)与加热式压室(3)连接,经变质处理的镁合金锭料在保护气氛中加热、等温处理,同时完成合金的半固态化和非枝晶化。半固态锭料(7)由柱塞(8)推入加热式压室,进而由冲头(5)实施镁合金半固态触变压铸。在二次重熔过程中实现半固态非枝晶化,适宜的半固态等温热处理温度为 $580\text{ }^\circ\text{C}$ ,保温时间为 $90\text{ min}$ <sup>[14]</sup>。

用德国富来公司生产的DAK 450-54卧式冷室压铸机压铸试样,试样压铸模参照GB/T13822-92设计,铸态拉伸试样总长为 $170\text{ mm}$ ,工作段直径为 $6.4\text{ mm}$ ,工作段长度为 $60\text{ mm}$ 。冲击试样尺寸为 $6\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 。用Instron810万能试验机测定试样的室温拉伸性能,东京CIEM-30D-CPC试验机测定试样的冲击韧性,S520扫描电镜观察拉伸断口,MEF-3金相显微镜观察金相组织。

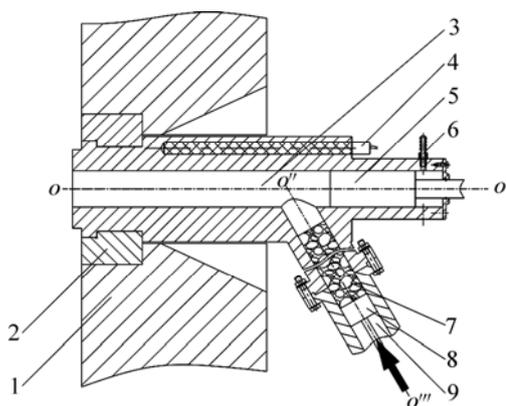


图1 等温处理炉体与加热式压室连接图

Fig.1 Schematic diagram of semi-solid ingot heating furnace connect with heated Sleeve of cold-chamber die casting machine: 1—Fixation machine; 2—Fix block; 3—Shot sleeve; 4—Electrical heater; 5—Piston (1); 6—Protective gas gate; 7—Semi-solid ingot; 8—Piston (2); 9—Furnace tube

表1 AZ91D镁合金的化学成分

Table 1 Chemical component of AZ91D magnesium alloy (mass fraction, %)

Al	Zn	Mn	Si
8.600 0	0.750 0	0.280 0	<0.006 7
Fe	Cu	Ni	Bal
<0.002 1	<0.001 1	<0.000 8	<0.001 2

压铸工艺参数是保证压铸件综合性能的关键,同时也直接影响生产效率和模具寿命。实验采用的工艺参数为:增压压力 $24\sim 38\text{ MPa}$ ,增压时间 $30\text{ ms}$ ,压射速度 $2.5\sim 5.5\text{ m/s}$ ,模具温度 $220\text{ }^\circ\text{C}$ ,压室温度 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 。当考察其中某个参数对组织性能的影响时,其他参数固定。

## 2 结果与分析

### 2.1 压铸工艺参数对触变成形AZ91D合金力学性能的影响

#### 2.1.1 压射速度对镁合金半固态压铸件力学性能的影响

设置的增压压强为 $35\text{ MPa}$ ,考察压射速度对力学性能的影响。图2所示为压射速度对触变成形AZ91D合金抗拉强度和伸长率的影响。由图2可看出,试样的抗拉强度和伸长率随着压射速度的增加都有提高。这是由于镁的结晶潜热小,释放热量相对较少,且在金

属模中凝固时, 铸件和压铸模界面接触紧密, 导热效果显著, 因此镁合金半固态压铸时的凝固速度较一般液态压铸要快, 这种快速凝固行为也将在一定程度上限制来自于浇道金属液的增压补缩。如果压射速度过低, 则金属液流动较慢, 致使远离浇口部位的收缩得不到充分补偿, 从而形成较多的缩松、浇不足等缺陷。压射速度的提高将动能转化为热能, 提高了合金熔体的再次融合, 使金属液的流动性提高, 有利于消除缩松等缺陷, 从而提高了其抗拉强度和伸长率。但过快的压射速度易于卷进太多的气体, 在合金液内部形成反向气压, 也不利于液体的补缩, 容易形成气孔、缩孔和缩松, 降低了合金抗拉强度和伸长率。

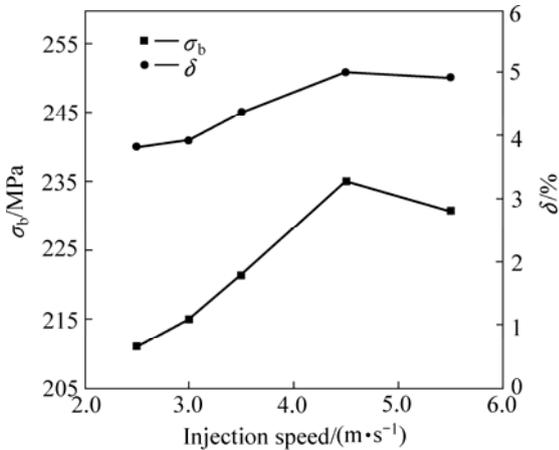


图 2 压射速度对触变成形 AZ91D 合金抗拉强度和伸长率的影响

Fig.2 Effects of injection speed on tensile strength and elongation of thixo-forming AZ91D alloy

图 3 所示为压射速度对触变成形 AZ91D 合金硬度和冲击韧性的影响。由图 3 可看出, 当速度从 2.5 m/s 上升到 3.5 m/s 时, 试样的硬度变化不大; 当速度从 3.5 m/s 上升到 5.5 m/s 时, 硬度值快速上升。经分析在高速充型时, 由于冷却速度快导致压铸件表面层组织十分细小, 在铸件表面形成致密的金属壳, 导致了硬度值的上升; 当速度从 2.5m/s 上升到 3.5m/s 时, 冲击韧性下降, 随后从 4.5 m/s 上升到 5.5m/s 时又有所回升。有研究者认为这是由于速度过快, 形成的金属壳非常薄, 冷却凝固过程中产生的收缩应力全部由极薄的金属壳层承担, 在应力超过金属壳层的极限强度后, 金属壳层发生撕裂。同时, 后续填充的高温金属液从金属壳层的表面流过时, 虽然裂纹深处被焊合, 但在表面已形成许多显微裂纹。因此在后续的冲击实验中, 首先从这些微小的裂纹处发生开裂, 导致合金冲击韧性降低<sup>[15-16]</sup>。

综上所述, 压铸成形件存在表面细晶区和内部

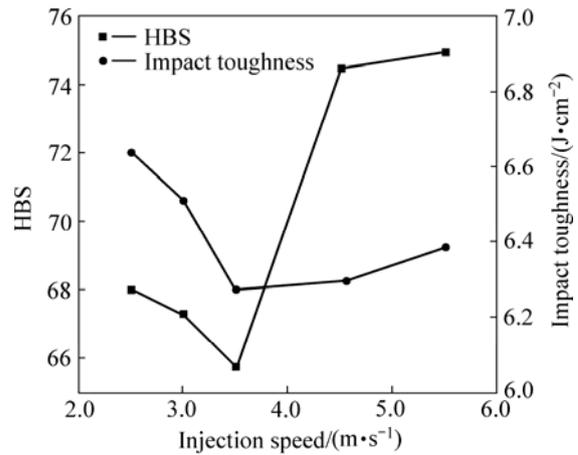


图 3 压射速度对触变成形 AZ91D 合金硬度和冲击韧性的影响

Fig.3 Effects of injection speed on rigidity and impact toughness of thixo-forming AZ91D alloy

粗晶区, 压射速度增加使金属表层晶粒细小而硬度上升, 同时也使内部晶粒变小, 而提高拉伸性能。在拉伸实验时, 整个截面承受载荷, 裂纹由内部萌生而扩展到表面, 这个过程内部粗晶粒区起主要作用; 在进行冲击实验时, 首先断裂的是表面金属壳层, 裂纹从表面扩展到内部区域, 这个过程金属表层起主要作用, 而金属表层的微小裂纹往往降低了冲击韧性。

### 2.1.2 增压压强对镁合金半固态压铸件力学性能的影响

在固定压射速度为 4.5 m/s 下, 考察了增压比压对合金性能的影响。图 4 所示为增压压强对触变成形 AZ91D 合金抗拉强度和伸长率的影响。图 5 所示为增压压强对触变成形 AZ91D 合金硬度和冲击韧性的影响。

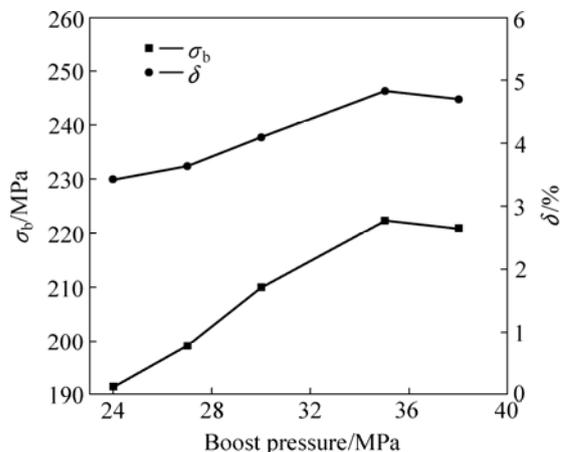


图 4 增压压强对触变成形 AZ91D 合金抗拉强度和伸长率的影响

Fig.4 Effects of boost pressure on tensile strength and elongation of thixo-forming AZ91D alloy

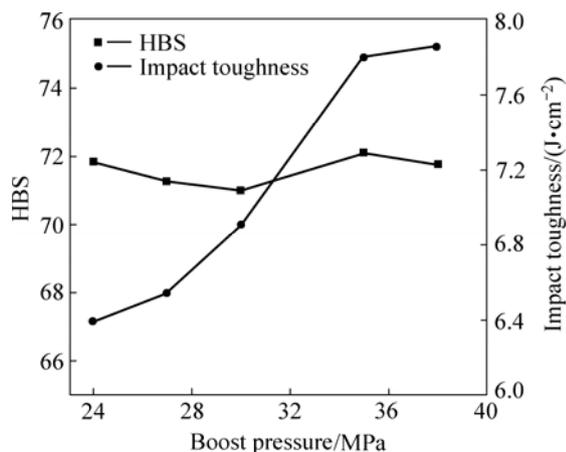


图5 增压压强对触变成形 AZ91D 合金硬度和冲击韧性的影响

Fig.5 Effects of boost pressure on rigidity and impact toughness of thixo-forming AZ91D alloy

从图 4 和 5 可以看出, 随着增压压强的增加, 成形件的抗拉强度和伸长率增加一致, 冲击韧性也随之增加。分析可知, 压强的增大改善了其填充特性, 使成形件的远端得到补缩, 气孔减少或弥散化, 使成形件的表面和内部组织更为致密, 从而提高了抗拉强度、延伸率以及冲击韧性。在压射过程中, 压射速度与压强共同对性能提高起着重要的作用。图 6 所示为等温处理前后 AZ91D 合金的微观组织。从图 6 中可看出, 压强对硬度影响并不明显。也有研究者认为铸件的表面硬度不受压强和速度的影响, 但却随着合金中铝含量的升高而增加<sup>[17]</sup>。

## 2.2 压铸对触变成形 AZ91D 合金组织的影响

### 2.2.1 铸态坯料组织和等温热处理后的组织分析

AZ91D 镁合金铸态坯料组织如图 6(a)所示。经等温热处理后, 半固态锭料组织转变为固相球状组织和液相, 且具有明显的触变特征<sup>[18]</sup>。AZ91D 镁合金坯料组织由初生相  $\alpha$ -Mg 固溶体(浅色区域)形成的发达树枝晶和在枝晶间分布的共晶体  $\alpha$ -Mg+Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 构成。在升温过程中, Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相会部分溶入  $\alpha$ -Mg 相中, 使得部分二次枝晶臂合并。且随着温度的进一步升高或等温时间的延长而使温度均匀化, 包裹于树枝晶  $\alpha$ -Mg 相中的共晶体  $\alpha$ -Mg+Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 开始熔化, 熔点较高部分  $\alpha$ -Mg 初生相则保留为固态。由于界面曲率的作用, 使凹进部分和固相尖突部分的平衡熔点下降, 即<sup>[19]</sup>

$$T_R = T_{cr} - (2E_{SL}T_{cr}V/\Delta HR) \quad (1)$$

式中  $T_R$  为半径为  $R$  的曲面处的平衡熔点;  $T_{cr}$  为固-

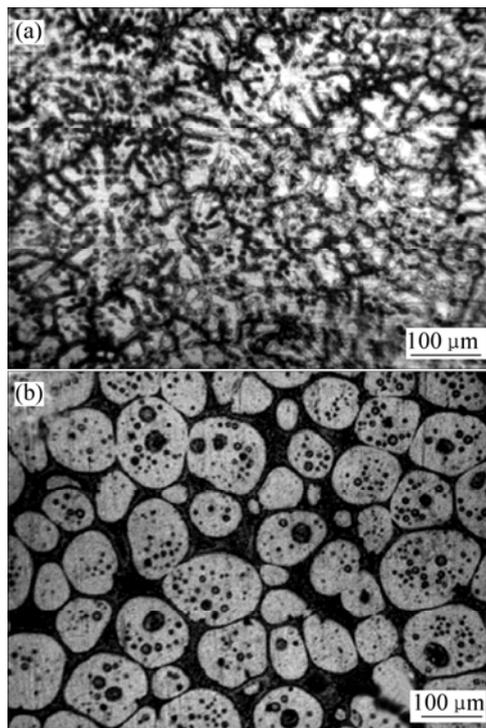


图6 等温处理前后 AZ91D 合金的微观组织

Fig.6 Microstructures of AZ91D alloy before(a) and after(b) isothermal heat-treatment

液界面为平界面时的熔点;  $E_{SL}$  为固-液界面处的表面能;  $\Delta H$  为液固转变时的摩尔焓变;  $V$  为固相摩尔体积;  $R$  为固-液面曲率半径。

从式(1)可看出, 曲率半径越小, 平衡熔点就越低, 因此促使枝晶的分解和固相颗粒的圆整化。

### 2.2.2 触变压铸后组织分析

AZ91D 半固态触变压铸后组织如图 7 所示。通过比较等温热处理后锭料和压铸试件的晶粒可以看出: 压铸成形后的组织中, 晶粒尺寸明显细化, 其晶粒平均尺寸为 15~20  $\mu\text{m}$ , 远小于等温热处理后的半固态组

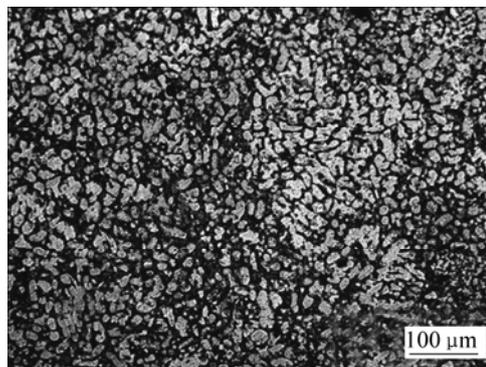


图7 AZ91D 合金半固态触变压铸的微观组织

Fig.7 Microstructure of AZ91D alloy after semi-solid thixo-forming die-casting

织, 比原始金属型浇注的坯料组织细小。这说明在压铸过程中半固态金属通过内浇口时, 由于剪切力作用使得晶粒进一步细化, 也使得固液相混合均匀。

由此可以认为, 在整个压射充型过程中半固态浆料经历了以下几个阶段的变化: 首先, 在冲头推动下液相包裹着固相颗粒一起流动, 并伴随有少量固相凝固; 其次, 锭料形变, 压室容积减小, 压强增大时固相颗粒逐渐靠拢, 并与液相发生偏析; 第三, 当锭料到达模具内浇口时, 压射速度突然增大, 固相颗粒发生剧烈滑动和摩擦, 导致原始大颗粒可能发生二次破碎, 液相高度分散; 第四, 高度混合和分散的固液两相在高速、高压下充型和快速凝固。在最后增压阶段, 挤压力进一步提高, 从而使固相颗粒发生变形即颗粒塑性变形阶段(主要发生在料柄)。

### 2.3 断口分析

采用扫描电子显微镜对拉伸试样断口进行了分析(见图8)。从图8中可看出, 其断裂方式均为沿晶断裂。分析认为半固态触变压铸组织组成为原始球形  $\alpha$ -Mg

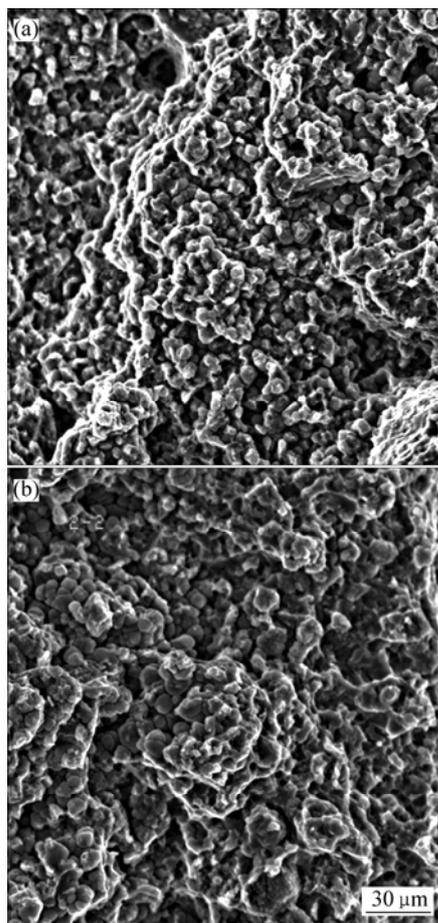


图8 AZ91D 合金拉伸断口表面形貌

Fig.8 Fracture morphologies of AZ91D alloy: (a) Near surface; (b) Centre

和后续凝固的  $\alpha$ -Mg, 以及由于快速凝固所形成的离异共晶体等。离异的  $\beta$ ( $Mg_{17}Al_{12}$ )为脆性相, 与  $\alpha$ -Mg 的晶体结构不一致(不共格), 且分布在晶界, 这将导致界面处的脆性断裂。同时在晶界上也发现了疏松和显微气孔, 形成裂纹源。断口组织观察发现, 一个晶粒表面有许多更细小的颗粒在其表面, 这些细晶尺寸为  $3\sim 6\ \mu\text{m}$ (表层区)和  $6\sim 10\ \mu\text{m}$ 。这可能是由于半固态中的液相在高度分散、高冷却速度下的爆发式形核<sup>[12]</sup>和长大的缘故, 内部存在的缩松和裂纹与成形条件关系极大, 降低了合金的有效强度, 且随着压力增大, 充型过程的补缩作用增强, 原有固相间的焊合作用增强, 组织致密性提高, 断裂敏感性降低。当模具温度和压室温度提高时, 有望减少缩松和裂纹, 提高力学性能, 特别是提高冲击韧性。

## 3 结论

1) 半固态触变压铸成形件的抗拉强度随着压射速度和压强的增加而增加, 但过高的速度会造成气体卷入, 形成缺陷而降低力学性能。

2) 当增压压强为 35 MPa、速度为 4.5 m/s 时, 其抗拉强度达到最大, 为 237.5 MPa, 伸长率为 4.8%, 冲击韧性为 6.3 J/cm<sup>2</sup>。且随着压射速度的增大, 半固态熔体在内浇口处的剪切作用增强, 有利于固相颗粒和液相的均匀混合, 但速度过大, 将使熔体卷气倾向增大; 压强增大促进液态部分合金的补缩效果, 促进固相颗粒间的焊接, 组织致密性提高, 从而使强度提高。半固态成形试棒的断裂方式主要为沿晶断裂。

3) 通过半固态触变成形, 镁合金组织得到明显细化且组织均匀, 平均晶粒尺寸为  $15\sim 20\ \mu\text{m}$ 。在高速压铸过程中, 极高的剪切速率使得半固态合金中固相的二次破碎和分解倾向加剧; 高度分散的液相在后期凝固中有大规模生核长大特征。

4) 自行设计的加热式压室改变了传统冷室压铸机用于镁合金半固态触变压铸的困难。密闭、具有气体保护的加热和输送方式实现了镁合金半固态锭料的非枝晶化和保温、输送的目的, 减缓了半固态锭料在压室中的凝固速度, 满足半固态镁合金压铸成形的要求。

## REFERENCES

- [1] 王达健, 谢刚, 戴永年. 低密度汽车镁材[J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(1): 390-393.

- WANG Da-jian, XIE Gang, DAI Yong-nian. Low density material of magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1997, 7(1): 390-393.
- [2] AGHION E, BRONFIN B. Magnesium alloy development towards the 21st century[J]. Magnesium Alloys, 2000, 350(3): 19-28.
- [3] BROWN R. Magnesium automotive meeting[J]. Light Metal Age, 1992, 50(5/6): 18-20.
- [4] FLEMINGS M C. Behavior of metals in the semi-solid state[J]. Metallurgical Transactions, 1991, 22A(5): 957-981.
- [5] 谢水生, 黄声宏. 半固态金属加工技术及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999: 1-12.
- XIE Shui-sheng, HUANG Sheng-hong. The technique and application in semi-solid processing[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999: 1-12.
- [6] 毛卫民. 半固态金属成形技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 2-6.
- MAO Wei-min. Technology of semi-solid forming of metal[M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 2-6.
- [7] 罗守靖, 田文彤, 谢水生, 毛卫民. 半固态加工技术及应用[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(6): 765-769.
- LUO Shou-jing, TIAN Wen-tong, XIE Shui-sheng, MAO Wei-min. Technology and applications of semi-solid forming[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(6): 765-769.
- [8] CZERWINSKI F, ZIELINSKA-LIPIEC A, PINET P J, OVERBEEKE J. Correlating the microstructure and tensile properties of a thixomolded AZ91D magnesium alloy[J]. Acta Materialia, 2001, 49(7): 1225-1235.
- [9] 王开, 刘昌明, 翟彦博. AZ91D 镁合金触变铸造件热处理前后组织与性能研究[J]. 特种铸造及有色合金(压铸专刊), 2007(S): 429-433.
- WANG Kai, LIU Chang-ming, ZHAI Yan-bo. Research on the microstructure and mechanical properties of AZ91D magnesium alloy part in thixo-casting processing pre/pro-heat treatment[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2007(S): 429-433
- [10] 李东南, 林涵, 吴树森, 罗吉荣. 流变压铸成形镁合金 AZ91D 的显微组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(4): 64-68
- LI Dong-nan, LIN Han, WU Shu-sen, LUO Ji-rong. Microstructure and mechanical properties of magnesium alloy AZ91D produced by rheo-die casting process[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(4): 64-68.
- [11] 李东南, 吴和保, 吴树森, 罗吉荣. 半固态 AZ91D 镁合金组织与性能研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(13): 1421-1425.
- LI Dong-nan, WU He-bao, WU Shu-sen, LUO Ji-rong. Study on microstructure and properties of semi-solid magnesium alloy AZ91D[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(13): 1421-1425.
- [12] 张少明, 杨必成, 樊中云, 徐俊, 石力开, 陈国良. 镁合金 AZ61 的流变挤压工艺和组织特征[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(6): 1423-1428.
- ZHANG Shao-ming, YANG Bi-cheng, FAN Zhong-yun, XU Jun, SHI Li-kai, CHEN Guo-liang. Rheo-extrusion of AZ61 Mg alloy and its microstructure[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(6): 1423-1428.
- [13] 李元东, 郝远, 陈体军, 闫峰云. 冷却速率对 AZ91D 镁合金半固态组织制备的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(6): 19-24.
- LI Yuan-dong, HAO Yuan, CHEN Ti-jun, YAN Feng-yun. Effect of cooling rate on fabrication of semi-solid microstructure of AZ91D magnesium alloy[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2004, 30(6): 19-24.
- [14] 李元东, 郝远, 闫峰云, 方铭. AZ91D 镁合金在半固态等温热处理中的组织演变[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(4): 571-575.
- LI Yuan-dong, HAO Yuan, YAN Feng-yun, FANG Ming. Microstructure evolution of magnesium alloy AZ91D during semi-solid isothermal heat treatment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(4): 571-575.
- [15] SEQUOIA W P, DUNLOP G L, MURRAY M T. Effect of section thickness and microstructure on the mechanical properties of high pressure die cast magnesium alloy AZ91D[C]//Proceeding of the Third International Magnesium Conference. Manchester, UK: The Institute of Materials Published, 1996: 63-73.
- [16] 吴伟, 邹智厚, 马春艳, 杨林, 陈立佳, 刘正. 工艺参数对压铸 AM50 镁合金力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2005, 25(10): 612-614.
- WU Wei, ZOU Zhi-hou, MA Chun-yan, YANG Lin, CHEN Li-jia, LIU Zheng. Effects of processing parameters on the mechanical properties of die casting AM50 Mg alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2005, 25(10): 612-614.
- [17] 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, 53(8): 652-654.
- LIU Zhi-yong, XU Qing-yan, LIU Bai-cheng. Research on the influence of die casting process on structure and performance of magnesium alloy[J]. Foundry, 2004, 53(8): 652-654.
- [18] YAN Feng-yun, SUN Li-ping, GONG Yi, HAO Yuan. Steady state rheological characteristic of semisolid magnesium alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2007, 23(5): 637-640.
- [19] KUKUSHKIN S A. Theory of the Ostwald ripening of new-phase nuclei in single-component melts[J]. Acta Metallurgical Material, 1994, 42(2): 715-722.

(编辑 李艳红)