

文章编号:1673-9981(2013)04-0217-06

大尺寸 ZK60 镁合金圆棒和型材的组织与力学性能*

王顺成¹, 周楠¹, 郑开宏¹, 戚文军¹, 胡权², 鲁炎卿²

1. 广东省工业技术研究院(广州有色金属研究院)金属加工与成型技术研究所, 广东 广州 510650;
2. 佛山市三水凤铝铝业有限公司, 广东 佛山 528133

摘要:采用半连续铸造法制备直径 300 mm 的 ZK60 镁合金圆棒, 并挤压成外截圆直径为 200 mm 的工字型材, 并对 ZK60 镁合金圆棒和型材的组织与力学性能进行了研究. 结果表明: ZK60 镁合金圆棒的成分分布均匀, 显微组织为等轴晶, 晶粒平均粒径为 40.1 μm ; ZK60 镁合金型材在挤压过程中, 产生了剧烈的塑性变形和再结晶, 晶粒进一步细化, 晶粒平均粒径为 21.5 μm ; ZK60 镁合金型材的拉伸力学性能存在各向异性, 其中间横梁的拉伸力学性能好于侧边, 纵向的拉伸力学性能好于横向; 挤压态 ZK60 镁合金型材的整体拉伸力学性能较好, 其抗拉强度、屈服强度及伸长率分别大于 293.1 MPa, 224.4 MPa 和 14.1%.

关键词: ZK60 镁合金; 半连续铸造; 挤压; 圆棒; 型材
中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A

镁合金是目前工业应用中最轻的金属结构材料, 具有密度小、比强度高、阻尼减震能力优良及电磁屏蔽性能好等优点^[1], 在汽车^[2]、轨道交通^[3]、电子信息^[4]、纺织机械^[5]、休闲运动器材^[6]、医用植入器件^[7]、航空航天^[8]及武器装备^[9]等领域中都有巨大的应用潜力. 目前, 镁合金的应用以压铸件为主^[10], 而型材的应用量相对较小, 这主要是由于镁合金存在容易氧化燃烧、熔体净化处理难度大^[11]和塑性变形能力差等问题^[12], 导致铸造镁合金棒材和挤压加工型材都较为困难, 特别是铸造大尺寸、高品质镁合金圆棒和挤压加工大截面镁合金型材^[13]. 本文采用半连续铸造法制备直径为 300 mm 的 ZK60 镁合金圆棒, 以及在 3000 吨挤压机上挤压外截圆直径为 200 mm 的工字型材, 并研究了 ZK60 镁合金圆棒和挤压型材的组织及力学性能.

1 实验材料与方法

实验材料为 ZK60 镁合金, 用 SPECTROMAX

光电直读光谱仪分析测试其化学成分, ZK60 镁合金的化学成分列于表 1.

表 1 ZK60 镁合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of ZK60 magnesium alloy

| 元素 | Zn | Zr | Mn | Al | Si | Ca | Fe | Mg |
|--------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|----|
| 含量 w/% | 5.91 | 0.43 | 0.01 | 0.002 | 0.016 | 0.007 | 0.004 | 余量 |

图 1 为制备 ZK60 镁合金圆棒的半连续铸造设备. 半连续铸造设备包括有 500 kg 的镁合金井式熔炼炉、半连续铸造机及镁合金气体保护装置. 将 ZK60 镁合金置于熔炼炉内, 在 680 $^{\circ}\text{C}$ 下加热熔化, 同时通入 $\text{SF}_6 + \text{CO}_2$ 的混合气体对熔体进行保护, 镁合金熔体经精炼、扒渣和静止后, 启动半连续铸造机将其铸成直径 300 mm 的 ZK60 镁合金圆棒, 熔体浇注温度为 680 $^{\circ}\text{C}$, 冷却水流量为 3500 L/min, 铸造速度为 80 mm/min.

图 2 为采用半连续铸造法制备的直径 300 mm 的 ZK60 镁合金圆棒. 从图 2 可见, ZK60 镁合金圆棒表面的偏析瘤和冷隔均较小. 经测试内部未见裂

收稿日期: 2013-08-12

* 基金项目: 广东省教育部科技部产学研结合项目(2010A090200078, 2012B090600051)

作者简介: 王顺成(1976-), 男, 湖南宜章人, 高级工程师, 博士.

纹、气孔和夹杂等缺陷,表明,ZK60 镁合金圆棒的冶金质量较高,有利于减少圆棒的表面机械加工量,提高圆棒的材料利用率.分别在 ZK60 镁合金圆棒的中心及表层位置进行取样,在 SPECTROMAX 光电直读光谱仪上分析测试 Zn 和 Zr 元素的含量;在 D/MAX-RC 型 X 射线衍射仪(XRD)上,对合金进行物相组成分析;试样经磨制、抛光和腐蚀后,在 LEICA-DMI3000M 型金相显微镜上进行组织观察;采用截线法,测量晶粒的平均直径.

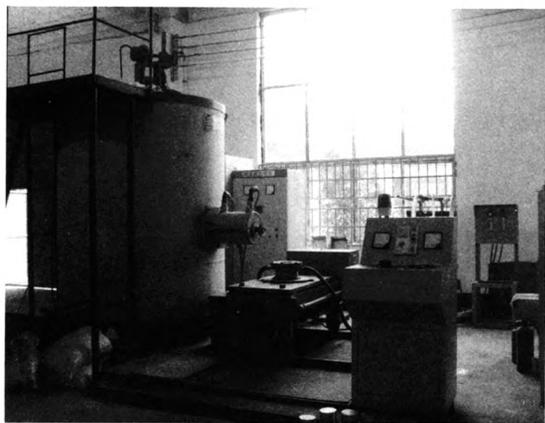


图 1 ZK60 镁合金圆棒半连续铸造设备

Fig. 1 Semi-continuous casting equipments for ZK60 magnesium alloy round bar



图 2 直径 300 mm 的 ZK60 镁合金圆棒

Fig. 2 ZK60 magnesium alloy round bars with a diameter of 300 mm

图 3 为 ZK60 镁合金型材挤压现场图,挤压设备为 3000 吨的卧式挤压机.首先将 ZK60 镁合金圆棒加工成直径 280 mm、长 600 mm 的挤压棒坯,然后在电阻炉内进行预热,预热温度为 420 °C,再将预热后的挤压棒坯转移至挤压机上,将其挤压成外截圆直径 200 mm 的工字型材,模具温度和挤压筒温度为 400 °C,挤压速度为 1.5 m/min,挤压比为 28.5.

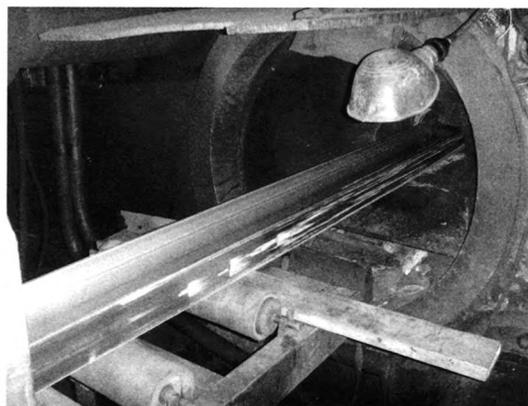


图 3 ZK60 镁合金型材挤压现场图

Fig. 3 Extruding scene of large size ZK60 magnesium alloy profiles

图 4 为外截圆直径 200 mm 的 ZK60 镁合金工字型材.从图 4 可见,ZK60 镁合金型材表面光亮,尺寸精确,表面无氧化、开裂等缺陷.图 5 为 ZK60 镁合金型材的尺寸与取样位置示意图.按图 5 所示位置分别在 ZK60 镁合金型材中间横梁和侧边的横向及纵向取样.试样经磨制、抛光和腐蚀后,在 LEICA-DMI3000M 型金相显微镜上进行组织观察;采用截线法,测量晶粒的平均直径;分别在 ZK60 镁合金挤压型材中间横梁和侧边的横向及纵向取样,并加工成标准拉伸试样,在 DNS200 型电子拉伸试验机上进行室温拉伸,拉伸速度为 2 mm/min.

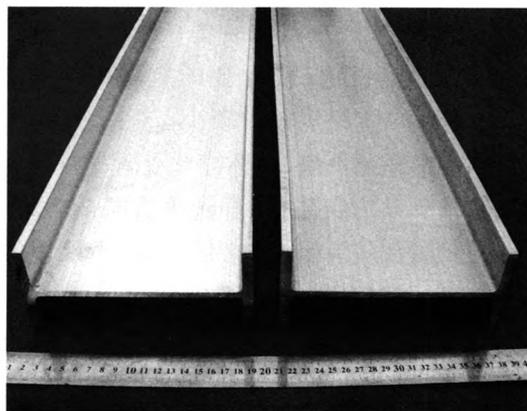


图 4 外截圆直径 200 mm 的 ZK60 镁合金工字型材

Fig. 4 ZK60 magnesium alloy profiles with an outer circle diameter of 200 mm

2 实验结果与分析

2.1 ZK60 镁合金圆棒的成分分布

表 2 为 ZK60 镁合金圆棒中心和表层的 Zn 和

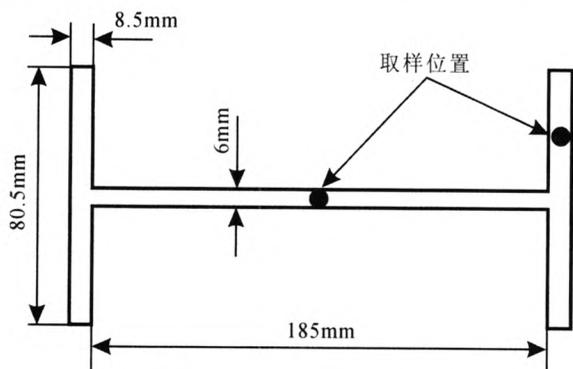


图5 ZK60 镁合金型材的尺寸与取样位置示意图

Fig. 5 Size and sampling positions of ZK60 magnesium alloy profile

Zr 元素含量分布. 从表 2 可见,ZK60 镁合金圆棒中心的 Zn 和 Zr 元素含量均高于表层,这主要是半连续铸造过程中,圆棒表层合金先凝固,中心部位合金最后凝固,而合金中 α -Mg 又是先析出凝固,因此合金元素 Zn 和 Zr 在凝固过程中受到 α -Mg 的凝固排挤而逐渐向圆棒中心富集,最终导致圆棒中心的 Zn 和 Zr 元素含量高于圆棒表层. 从表 2 还可见,虽然 ZK60 镁合金圆棒中心的 Zn 和 Zr 元素含量高于表层,但中心和表层的 Zn 元素含量相差仅为 1.02%, Zr 元素含量相差仅为 2.12%,这对于直径 300 mm

的 ZK60 镁合金圆棒而言,合金元素分布仍然是较为均匀的.

表 2 ZK60 镁合金圆棒元素含量分布

Table 2 Elements content distribution of ZK60 magnesium alloy round bar

| 元素 | 元素含量 $\omega/\%$ | | 含量相差值/ $\%$ |
|----|------------------|-------|-------------|
| | 圆棒中心 | 圆棒表层 | |
| Zn | 5.95 | 5.89 | 1.02 |
| Zr | 0.434 | 0.425 | 2.12 |

2.2 ZK60 镁合金圆棒的显微组织

图 6 为 ZK60 镁合金圆棒中心和表层的显微组织. 从图 6 可见,ZK60 镁合金圆棒的显微组织为等轴晶,晶粒平均粒径为 $40.1 \mu\text{m}$. 由于在半连续铸造过程中,ZK60 镁合金圆棒表层凝固速度比中心合金的凝固速度快,因此圆棒表层晶粒略比中心晶粒小,其中圆棒中心和表层晶粒的平均粒径分别为 $41.7 \mu\text{m}$ 和 $38.5 \mu\text{m}$,圆棒中心和表层的晶粒尺寸只相差 8.3%,表明 ZK60 镁合金圆棒的晶粒大小分布较为均匀.

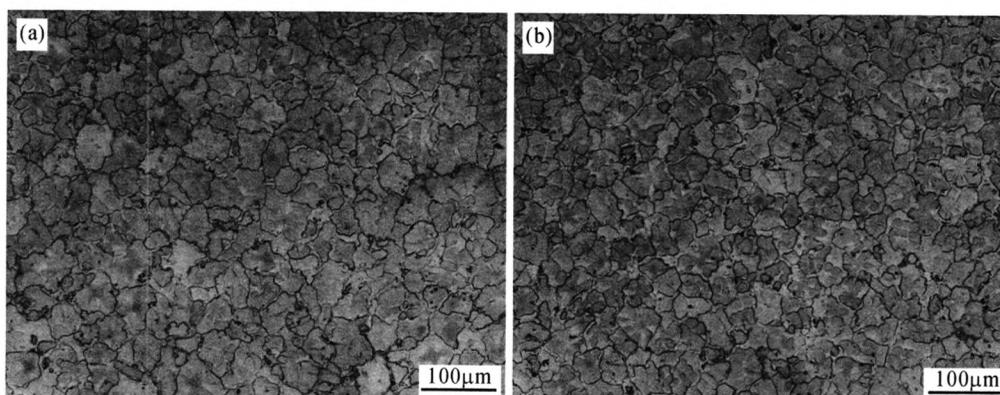


图6 ZK60 镁合金圆棒的显微组织

(a)中心;(b)表层

Fig. 6 Microstructures of ZK60 magnesium alloy round bar

(a) center;(b) border

图 7 为 ZK60 镁合金圆棒的 X 射线衍射分析谱图. 从图 7 可见,ZK60 镁合金圆棒显微组织由 α -Mg, MgZn, MgZn₂ 和 Zr 组成. Zn 是 ZK60 镁合金的主要的强化元素,铸造状态下 Zn 与 Mg 形成 MgZn 和 MgZn₂ 两种合金相,它们在热处理过程中可起到固溶强化和时效强化的双重作用,从而提高 ZK60 镁合金的抗拉强度^[14]. 单纯的 Mg-Zn 合金由于结

晶温度区间较宽,合金流动性较差,合金热裂倾向大,容易产生粗大的晶粒. 在 Mg-Zn 合金中添加 Zr 元素,可起到晶粒细化作用. Zr 在镁中的固溶度很小,在包晶温度下仅为 0.58%. Zr 与 Mg 均属于密排六方晶格,二者的晶格常数非常接近(Zr 的晶格常数 $a=0.323 \text{ nm}, c=0.514 \text{ nm}$; Mg 的晶格常数 $a=0.321 \text{ nm}, c=0.521 \text{ nm}$),因此 Zr 是 ZK60 镁合

金的非常有效的晶粒细化剂^[15]. 在 ZK60 镁合金凝固过程中, Zr 首先以 α -Zr 质点析出并形成富 Zr 的

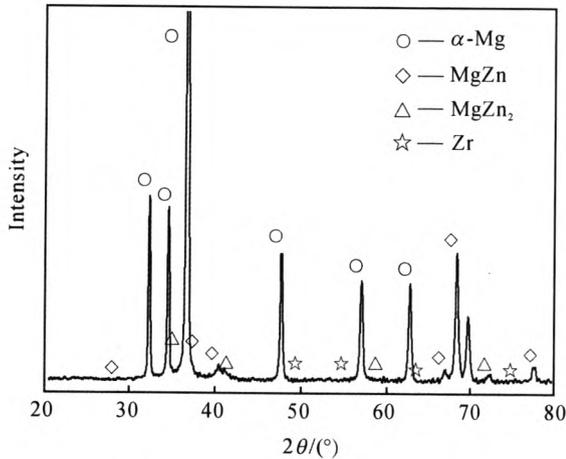


图7 ZK60 镁合金圆棒的 X 射线衍射谱图

Fig.7 XRD pattern of ZK60 magnesium alloy round bar

固相粒子, 为 α -Mg 晶粒提供有效的异质形核核心, 从而细化 α -Mg 晶粒, 提高 ZK60 镁合金的力学性能.

2.3 ZK60 镁合金型材的显微组织

图 8 和图 9 分别为 ZK60 镁合金工字型材中间横梁和侧边的显微组织. 由于 ZK60 镁合金型材挤压比较大, 在挤压过程中 ZK60 镁合金发生了剧烈的塑性变形, 剧烈的塑性变形使晶粒被挤压破碎并发生再结晶^[16]. 从图 8 和图 9 可见, 与 ZK60 镁合金圆棒的原始晶粒组织(图 6)相比, ZK60 镁合金型材的晶粒得到明显的细化, 晶粒平均粒径为 $21.5 \mu\text{m}$, 晶粒的细化有利于提高 ZK60 镁合金型材的力学性能. 另外, 由于部分晶粒再结晶不完全, 存在少量较为粗大的晶粒. 从图 8 和图 9 还可发现, 由于中间横梁比两侧边更薄, 挤压变形量更大. 因此, 中间横梁的晶粒尺寸比侧边的晶粒略细小. 比较 ZK60 镁合金工字型材横截面和纵截面的显微组织可发现: ZK60 镁合金型材横截面上晶粒基本为等轴晶晶粒(图 8(a)和图 9(a)); 而在纵截面上(图 8(b)和图 9(b)), 由于挤压流动的原因, 晶粒被挤压破碎并沿挤压方向呈带状分布.

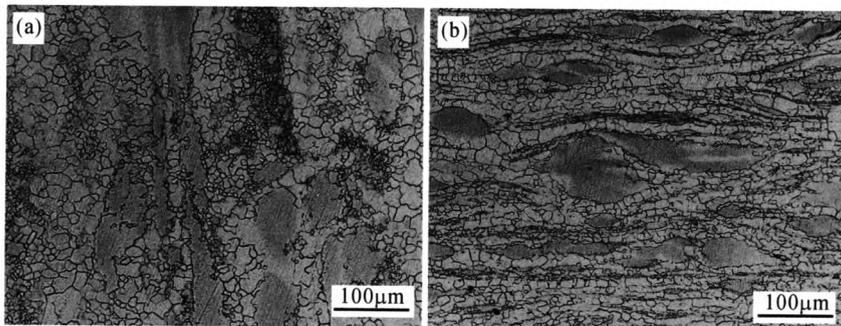


图8 ZK60 镁合金工字型材中间横梁的显微组织
(a)横截面;(b)纵截面

Fig.8 Microstructures in middle beam of ZK60 magnesium alloy profile
(a) transverse section;(b) longitudinal section

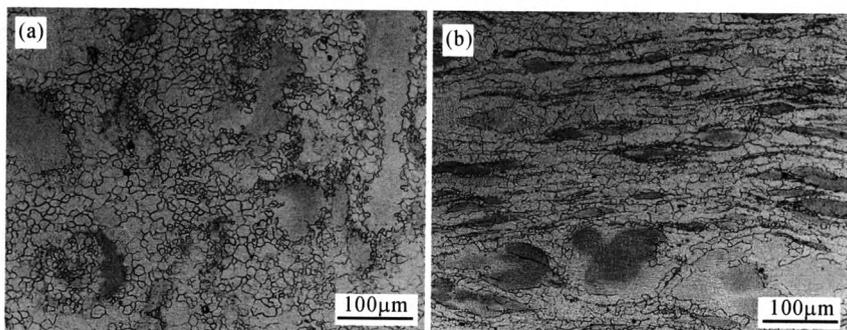


图9 ZK60 镁合金工字型材侧边的显微组织
(a)横截面;(b)纵截面

Fig.9 Microstructures in sides of ZK60 magnesium alloy profile
(a) transverse section;(b) longitudinal section

2.4 ZK60 镁合金型材的力学性能

表3为挤压态 ZK60 镁合金型材在室温下的拉伸力学性能。由表3可知,挤压态 ZK60 镁合金型材的整体拉伸力学性能较高,其抗拉强度、屈服强度及伸长率分别大于 293.1 MPa, 224.4 MPa 和 14.1%。

从表3还可知,中间横梁的拉伸力学性能整体好于侧边的拉伸力学性能,型材纵向的抗拉强度和屈服强度整体大于横向,但伸长率则是纵向略小于横向。这是由于 ZK60 镁合金工字型材的拉伸力学性能存在各向异性,一方面是由于中间横梁变形量更大,晶粒更细小些,其次是 ZK60 镁合金型材挤压过程中形成了纤维组织,导致纵向晶粒被挤压拉长。另外,由于镁合金是密排六方晶体结构,在挤压过程中,密排六方晶格的基面逐步转向与挤压方向重合^[17]。

表3 挤压态 ZK60 镁合金型材的拉伸力学性能

Table 3 Tensile mechanical properties of ZK60 magnesium alloy profile with extruded state

| 取样位置 | 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 伸长率/% | |
|------|----------|----------|-------|------|
| 横梁 | 纵向 | 325.5 | 262.8 | 15.5 |
| | 横向 | 302.9 | 243.3 | 18.2 |
| 侧边 | 纵向 | 312.4 | 247.1 | 14.1 |
| | 横向 | 293.1 | 224.4 | 16.3 |

3 结论

(1)采用半连续铸造法,制备的直径 300 mm 的 ZK60 镁合金圆棒的成分和显微组织分布较为均匀,晶粒平均粒径为 40.1 μm 。

(2)外截圆直径 200 mm 的 ZK60 镁合金工字型材,在挤压过程中产生了剧烈的塑性变形和再结晶,晶粒被明显细化,晶粒平均粒径为 21.5 μm 。

(3)挤压态 ZK60 镁合金工字型材的整体力学性能较高,其抗拉强度、屈服强度及伸长率分别大于 293.1 MPa, 224.4 MPa 和 14.1%。

(4)挤压态 ZK60 镁合金工字型材的拉伸力学性能存在各向异性,其中中间横梁的拉伸力学性能好于侧边,纵向拉伸力学性能好于横向。

参考文献:

- [1] 戚文军,王顺成,王海艳,等. 广东省镁工业技术路线图[M]. 广州:华南理工大学出版社,2010.
- [2] 陈军. 镁合金在汽车工业中的应用分析[J]. 材料研究与应用,2010,4(2):81-84.
- [3] 韩晓明. 城市轨道交通车辆采用的工程新材料[J]. 装备制造,2012(3):2-8.
- [4] 陈先华,耿玉晓,刘娟. 镁及镁合金功能材料的研究进展[J]. 材料科学与工程学报,2013,31(1):148-152.
- [5] 陈姣玲. 镁合金材料在纺机机械行业的应用前景[J]. 世界有色金属,2012(6):56.
- [6] 向冬霞,王军. 镁合金挤压管、型材的研制及在自行车上的应用[J]. 中国金属通报,2007,38:27-30.
- [7] 霍丽娜. 医用镁合金产业化进展及前景[J]. 世界有色金属,2012(12):56-57.
- [8] 丁文江,付彭怀,彭立明,等. 先进镁合金材料及其在航空航天领域中的应用[J]. 航天器环境工程,2011,28(2):103-109.
- [9] 唐全波,黄少东,伍太宾. 镁合金在武器装备中的应用分析[J]. 兵器材料科学与工程,2007,30(2):69-71.
- [10] 彭勇,王顺成,郑开宏,等. 高性能镁合金铸造技术研究进展[J]. 铸造技术,2013,34(2):203-207.
- [11] 毛红奎,孟宪宝,王凤平,等. 镁合金熔液净化的研究现状[J]. 铸造技术,2013,34(2):208-210.
- [12] 孙付涛,韩晨,陈拂晓,等. AZ31 镁合金变形行为的研究进展[J]. 材料研究与应用,2009,3(2):85-88.
- [13] 刘静安. 镁及镁合金的特性与挤压工艺特点[J]. 轻合金加工技术,2011,39(5):43-48.
- [14] LI C X, YU Y D. The effect of solution heat treatments on the microstructure and hardness of ZK60 magnesium alloys prepared under low-frequency alternating magnetic fields[J]. Materials Science and Engineering A, 2013,559:22-28.
- [15] DAVID H S, MA Q, MARK A E, et al. Grain refinement of magnesium alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005,36:1669-1679.
- [16] MUHAMMAD S, LOTHAR W. Microstructure development during extrusion in a wrought Mg-Zn-Zr alloy[J]. Scripta Materialia, 2009,60(7):536-538.
- [17] DAI Q W, ZHANG D F, CHEN X. On the anisotropic deformation of AZ31 Mg alloy under compression[J]. Materials & Design, 2011,32(10):5004-5009.

Microstructure and mechanical properties of round bars and profiles made of ZK60 magnesium alloy with a large size

WANG Shuncheng¹, ZHOU Nan¹, ZHENG Kaihong¹, QI Wenjun¹, HU Quan², LU Yanqing²

1. *Institute of Metal Forming and Processing Technology, Guangdong General Research Institute for Industrial Technology (Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals), Guangzhou 510650, China*; 2. *Foshan Sanshui Fenglu Aluminum Co. Ltd., Foshan 528133, China*

Abstract: The ZK60 magnesium alloy round bars with a diameter of 300 mm were prepared by semi-continuous casting method and extruded into profiles with an outer circle diameter of 200 mm. The microstructures and mechanical properties of round bars and profiles of ZK60 magnesium alloy were studied. Results show that the distribution of chemical compositions in ZK60 magnesium alloy round bars is homogenous with equiaxed grains and the average grain size is 40.1 μm . The grains size of ZK60 magnesium alloy profiles are refined to 21.5 μm due to the severe plastic deformation and grain recrystallization during the extruding process. The tensile mechanical properties of ZK60 magnesium alloy profiles is anisotropic, in which the tensile mechanical properties of middle beam are higher than that of both sides and the tensile mechanical properties in transverse section are higher than that in longitudinal section. The tensile strength, yield strength and elongation of ZK60 magnesium alloy profiles with extruded state are higher than 293.1 MPa, 224.4 MPa and 14.1%, respectively.

Key words: ZK60 magnesium alloy; semi-continuous casting; extrusion; round bar; profile