

# 镁基复合材料中常用颗粒增强相研究现状

李仲杰<sup>1</sup>, 姬长波<sup>1</sup>, 于化顺<sup>1</sup>, 潘峰<sup>1</sup>, 刘帅<sup>1</sup>, 余晖<sup>2</sup>

(1.山东大学 材料液固结构演变与加工教育部重点实验室, 济南 250061;  
2.河北工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300130)

**摘要:** 镁基复合材料具有低的密度、高比强度、比刚度与优异的阻尼性能, 是汽车、航空航天等领域的理想轻量化材料, 已经成为近年来新材料领域的研究热点。合理有效地选择颗粒增强相对于提升镁基复合材料的性能有着重要的作用。分别从外加法与原位合成法两个方面综述了镁基复合材料颗粒增强相的类型及其对材料力学性能的影响, 并对其相应的应用现状进行了分析。最后对颗粒增强相的发展趋势进行了展望。

**关键词:** 镁基复合材料; 增强相; 制备技术; 力学性能

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.05.014

**中图分类号:** TG178.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)05-0104-06

## The Research Status of Reinforced Particle in Magnesium Matrix Composites

LI Zhong-jie<sup>1</sup>, JI Chang-bo<sup>1</sup>, YU Hua-shun<sup>1</sup>, PAN Feng<sup>1</sup>, LIU Shuai<sup>1</sup>, YU Hui<sup>2</sup>

(1.Key Laboratory for Liquid-Solid Evolution & Processing of Materials, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China; 2.School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**ABSTRACT:** Magnesium matrix composites with low density, high specific strength, specific stiffness and excellent damping performance, is the ideal lightweight materials in automotive, aerospace and other fields, which has developed into a new research hotspot in the fields of materials. Selecting particles reasonably and effectively plays an important role in improving the properties of magnesium matrix composites. In this paper, the types of reinforced particles phase in magnesium matrix composites and their effects on mechanical properties of materials are reviewed from two aspects of external addition and in-situ synthesis methods, and their corresponding application status is analyzed. The new development of the reinforced particles phase in magnesium matrix composites is also discussed.

**KEY WORDS:** magnesium matrix composite; strengthening phase; preparation technology; mechanical properties

随着航空航天、电子通讯以及汽车工业的迅速发展, 对于材料的轻量化要求越来越高, 镁合金作为最轻的工程材料, 在轻量化应用上有着巨大的前景, 但镁及其合金作为结构材料时, 塑性较差且力学性能相对较低, 尤其在高温服役条件下性能下降迅速, 限制了其进一步发展与应用。在此背景下, 颗粒增强镁基复合材料在一定程度上克服了镁合金的力学性能限

制, 以其比强度高、阻尼减震性好、机械加工性能优越以及较低的成本优势, 引起了越来越多的重视, 并在相关领域得到了大量的应用<sup>[1-4]</sup>。

增强相选择对于镁基复合材料的性能有着重要的影响。选择增强相一般要符合高弹性模量与强度、润湿性好、熔点高、密度小以及热膨胀系数与基体差异较小等原则。目前颗粒增强镁基复合材料的制备方

收稿日期: 2017-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(51701060); 国家外专局高端外国专家项目(GDW20171300102); 河北省教育厅基金(QN2015035); 河北省自然科学基金(E2016202130); 河北工业大学优秀青年科技创新基金(2015002)

作者简介: 李仲杰(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为镁基复合材料。

通讯作者: 于化顺(1961—), 男, 教授, 主要研究方向为金属基复合材料。

法大致为通过粉末冶金、搅拌铸造、挤压铸造、熔体浸渗、溅射沉积等<sup>[5-11]</sup>, 通过外加增强相颗粒以及自蔓延高温合成、机械合金化、固液反应法等<sup>[13-16]</sup>, 通过向基体中添加金属单质或者化合物, 使增强相在镁基体中合成的原位合成方法, 因此文中通过以下两个方面分别对增强相颗粒的应用进行综述。

## 1 外加法增强相颗粒类型

外加法目前相较于原位合成法工艺更加成熟, 增强相颗粒与基体的界面反应机制较为简单, 反应也在一定程度上具有可控性, 可以准确有效地控制增强相的种类、含量, 因此外加法是制备镁基复合材料最为常用的制备方法。其中, 于化顺教授课题组在陶瓷与准晶增强相颗粒上都进行过一定的研究。陈成等<sup>[17]</sup>利用热压烧结法制备了 50wt.%SiC/Al-10Si 复合材料, 并系统地研究了 SiC 增强相颗粒对于微观组织和导热性能的影响。卢庆亮<sup>[18]</sup>采用原位合成法制备了准晶增强 Mg-Zn-Y 合金, 研究了 Mg-Zn-Y 合金的等径角挤压 (ECAP) 变形组织及力学性能, 研究表明, 准晶的存在有利于提升镁合金的性能, 而此合金也可以作为增强相添加进其他镁合金中制备复合材料。

### 1.1 陶瓷增强相颗粒

在颗粒增强镁基复合材料中, 陶瓷颗粒为最常用的增强相。这是由于陶瓷颗粒具有的高硬度、强度、弹性模量以及高温稳定性以及较低的密度, 这些优异的性能极大地满足了复合材料中对于增强相的要求, 但陶瓷颗粒也存在着延展性低、润湿性较低的缺点。目前常用的陶瓷增强相颗粒包括碳化物、硼化物以及氧化物等, 例如 SiC, TiC, AlN, MgO, TiB<sub>2</sub> 等<sup>[19-23]</sup>, 其中 SiC 由于与镁基体有着极好的润湿性, 在镁基复合材料中得到了广泛应用。

K. K. Deng 等<sup>[24]</sup>研究了不同规格的 SiC 颗粒 (0.2, 5, 10 μm) 对于镁基复合材料性能的影响。通过搅拌铸造法向处于半固态时的 AZ91 基体加入 2%, 5% 和 10% (体积分数) 的不同规格 SiC 颗粒后, 倒入不锈钢坩埚中, 在 100 MPa 压力下冷凝成形后, 进行锻造与热挤压二次加工。研究表明, 通过热加工成形后的复合材料 SiC 颗粒均匀地分布在基体中, SiC 颗粒对于材料的晶粒大小、再结晶形核过程以及织构有着较大影响, 所制备的复合材料的屈服强度与抗拉强度分别在 200~300 MPa 与 310~380 MPa 之间。Sameer Kumar D 等<sup>[25]</sup>研究了纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒对于 AZ91E 基体性能的影响。将规格为 50 nm 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒通过半固态搅拌铸造按照 1%~3% (质量分数) 添加进 AZ91E 基体中, 搅拌均匀后浇注成形。研究表明, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒在基体中分布较为均匀, 且致密度较高, 所制备的复合

材料的屈服强度与抗拉强度在 100~140 MPa 与 150~200 MPa 之间, 伸长率在 2%~3% 之间。

### 1.2 非晶增强相颗粒

非晶合金又名金属玻璃, 是不存在位错、晶界、层错等晶体缺陷的亚稳态材料, 具有长程无序、短程有序的结构特点, 近年来由于其高强度、硬度及弹性应变极限、高疲劳强度与耐蚀性、相对高的断裂韧性, 引起了人们的广泛关注<sup>[26-28]</sup>。由于非晶制备一般需要较大的冷却速度而使得其多以薄片、细丝或粉末的形式存在, 因此科研工作者针对于非晶颗粒增强镁基复合材料的制备工艺及力学性能做了一定研究。

S. Sankaranarayanan 等<sup>[29]</sup>通过行星球磨法制备了 Ni<sub>50</sub>Ti<sub>50</sub> 非晶颗粒, 将镁粉中分别添加 3%, 6%, 10% (体积分数) 的非晶粉末, 利用微波烧结与后续的热挤压工艺制备了 Ni<sub>50</sub>Ti<sub>50</sub> 非晶颗粒增强镁基复合材料。结果表明, 非晶颗粒的添加有效地提升了复合材料的强度, 其中添加了 10vol.% Ni<sub>50</sub>Ti<sub>50</sub> 非晶颗粒的复合材料, 其屈服强度与抗拉强度分别为 (148±7) MPa 与 (178±9) MPa。D. V. Dudina 等<sup>[30]</sup>通过熔体快淬技术制备成分为 Zr<sub>57</sub>Nb<sub>5</sub>Cu<sub>15.4</sub>Ni<sub>12.6</sub>Al<sub>10</sub> 非晶条带后, 采用球磨的方法将其球磨成颗粒, 将粉末按照 15% (体积分数) 的比例混入 AZ91 镁屑中进行混合球磨后, 在感应烧结炉内进行热压烧结。研究表明, 添加非晶颗粒有利于提升复合材料的强度, 但同时会减少其韧性, 该实验所制备的复合材料的屈服强度与抗压强度分别为 325 MPa 与 542 MPa, 较 AZ91 基体有大幅度提升。

### 1.3 准晶增强相颗粒

准晶是介于晶体和非晶体之间的一种形态, 独特的结构使其具有优异的物理性质和力学性能, 最早是由以色列科学家 Daniel Shechtman<sup>[31]</sup>在研究 Al-Mn 合金时首次发现。随后罗治平等<sup>[32]</sup>首先证实了 Mg-Zn-Y 合金中的 Mg<sub>3</sub>Zn<sub>6</sub>Y<sub>1</sub> 三元相为二十面体准晶相 (I-phase), I 相也以其优异力学性能及而成为了近年来准晶研究的热点之一。由于自生准晶只能在特定系列镁合金中生成, 因此科研工作者们将准晶作为外加增强相颗粒加入镁合金基体中, 制备准晶颗粒增强镁基复合材料。

李小平<sup>[33]</sup>通过雾化制粉制备了近乎 100% 的准晶相的 Al<sub>63</sub>Cu<sub>25</sub>Fe<sub>12</sub> 颗粒, 并通过粉末冶金法制备了 (Al<sub>63</sub>Cu<sub>25</sub>Fe<sub>12</sub>)p/Mg 复合材料, 通过挤压后准晶相颗粒均匀分布于基体中, 且与 Mg 基体界面结合性良好, 界面处发生了轻微的界面反应, 复合材料的抗拉强度和屈服强度均比铸态 Mg 明显提高, 其中 10% (质量分数) (Al<sub>63</sub>Cu<sub>25</sub>Fe<sub>12</sub>)p/Mg 复合材料的屈服强度和抗拉强度分别达到 193.28 MPa 和 229.23 MPa。Xudong

Wang 等<sup>[34]</sup>研究了准晶颗粒对于 AZ31 合金基体性能的影响。首先制备了成分为  $Mg_3Zn_6Gd_1$ (at.%)的准晶颗粒,再通过反复塑性变形/热挤压方法制备准晶颗粒增强 AZ31 复合材料。研究表明,所添加的准晶颗粒准晶相含量在 90%以上,准晶颗粒在基体中分布均匀,界面结合性良好,其中添加了 15%(质量分数)准晶颗粒的复合材料的屈服强度与抗拉强度分别为 334 MPa 与 372 MPa。Huijun Kang 等<sup>[35]</sup>研究了准晶颗粒对于 Mg-8Gd-3Y 合金基体性能的影响。首先制备了  $Mg_3Zn_6Y_1$  的准晶颗粒,在 650 °C 时向基体中加入质量分数为 0~15%的准晶颗粒后浇注成形。研究表明,准晶颗粒的添加有效地提升了材料的力学性能,所制备的复合材料屈服强度在 165~175 MPa,抗拉强度为 180~220 MPa。

#### 1.4 LPSO 增强相颗粒

长周期堆垛有序结构(Long Period Stacking Ordered, LPSO)作为镁合金中常见的增强相,在 Yoshihito Kawamura 等<sup>[36]</sup>通过快速凝固/粉末冶金方法(Rapid Solidification Power Metallurgy, RS P/M)制备出一种室温屈服强度和伸长率分别为 610 MPa 和 5%的含 6H-LPSO 结构的超高强稀土镁合金( $Mg_{97}Zn_1Y_2$ )后,获得了国内外学者的广泛关注。由于 LPSO 比基体具有更高的硬度(Mg: (31.3±2.2) HV, Mg+LPSO: (137±35) HV),可有效抑制位错的运动<sup>[37]</sup>,与镁基体界面共格良好且发生扭折(Kinking)后能容纳可观变形量<sup>[38]</sup>,具备高的热稳定性<sup>[39-40]</sup>,因此与准晶颗粒类似,LPSO 相颗粒也可以作为镁基复合材料中的一种外加增强相颗粒。

刘珂等<sup>[41]</sup>采用 Mg-Zn-Er 中间合金制备 LPSO 含量约为 65%的增强颗粒后,将其加入到纯镁及其合金中,通过挤压比为 16,挤压温度 250~450 °C 的热挤压制备 LPSO 相颗粒增强镁基复合材料,所制备的复合材料屈服强度为 95~275 MPa,抗拉强度为 120~325 MPa,利用 LPSO 结构的自身优势达到了提高性能的目的。目前 LPSO 相颗粒增强镁基复合材料未见相关论文报道。

#### 1.5 金属及合金增强相颗粒

传统的陶瓷颗粒虽然能够有效地提升复合材料的强度,但会在一定程度上降低其塑性,这主要是由于陶瓷增强相自身塑性较差,以及与基体界面结合性不强或发生了不良的界面反应而导致,Ni, Ti, Cu 等金属及合金的颗粒由于对比镁基体较高的熔点与较低的固溶度,且其自身具有较好的硬度与延展性,被科研人员用来作为镁基复合材料的增强相颗粒,提升复合材料的性能。

S.F. Hassan 等<sup>[42]</sup>研究了 Ti 颗粒对于镁基体性能

的影响。通过喷射沉积(Disintegrated Melt Deposition, DMD)与后续热挤压相结合的方式,制备了不同体积分数的(2.2%, 4.0%) Ti 颗粒增强镁基复合材料。研究表明,通过热挤压后复合材料无明显缺陷, Ti 颗粒与基体润湿性良好且 Ti 颗粒的加入有利于提升复合材料的尺寸稳定性,其中添加了 4.0% Ti 颗粒的复合材料屈服强度与抗拉强度分别为 (154±10) MPa 与 (239±5) MPa,伸长率为 (9.5±0.3) %。Y. L. Xi 等<sup>[43]</sup>研究了 Ti-6Al-4V 颗粒对于 MB15 合金基体性能的影响。通过传统的粉末冶金技术与后续热挤压加工相结合方式制备了 10%的 Ti-6Al-4V 颗粒(<37 μm)增强 MB15 复合材料。研究表明, Ti-6Al-4V 颗粒在基体中分布均匀,无明显团聚,颗粒与基体之间的界面无明显的界面反应,增强相颗粒的加入可以明显提升材料的性能,强化机制与 SiC 增强颗粒类似,经过时效处理后的复合材料屈服强度与抗拉强度分别为 295 MPa 与 386 MPa,伸长率为 5.6%。随着高能球磨、大塑性变形等纳米晶制备方法的广泛应用,纳米晶材料以其高强度、硬度与塑性等特点受到了广泛的关注。

目前已经有文献报道<sup>[44]</sup>可以通过高能球磨方法获得纳米晶 Ti-6Al-4V 粉末,其粉末经 SPS 烧结后性能显著提升,但目前有关于纳米晶颗粒作为复合材料增强相的研究仍鲜有相关文献报道。

#### 1.6 金属间化合物增强相颗粒

近年来,科研工作者们开始尝试采用诸如 TiAl, TiAl<sub>3</sub>, Ni<sub>3</sub>Al 等金属间化合物来作为轻金属基复合材料的增强颗粒,但目前已公开文献中对于金属间化合物颗粒增强镁基复合材料的相关报道仍然较少。金属间化合物同时拥有金属键与共价键,因此若采用其作为增强颗粒,可以有效地提升界面结合能力,进而在一定程度上提升复合材料的整体力学性能。目前 YAl<sub>2</sub>, Mg<sub>24</sub>Y<sub>5</sub>, Al<sub>2</sub>Ca 等金属间化合物已经有相关文献报道被用于镁基复合材料之中。对比其他金属间化合物, YAl<sub>2</sub> 由于其较高的熔点(1748 K)、较高的弹性模量(158 GPa)与硬度(645 HV)以及较低的热膨胀系数( $10^{-5} K^{-1}$ ),得到了较多的研究。

S. J. Wang 等<sup>[45]</sup>研究了 YAl<sub>2</sub> 颗粒对于 Mg-Li 合金组织性能的影响。通过搅拌铸造将 YAl<sub>2</sub> 颗粒加入到 LA141 合金(14.1% Li 和 1.5% Al, 体积分数)中浇注成形。研究表明, YAl<sub>2</sub> 在基体中非常稳定,界面处没有发生界面反应,且 YAl<sub>2</sub> 颗粒明显的增强了复合材料的力学性能,5% Al<sub>2</sub>Y/Mg-Li 复合材料的屈服强度与伸长率分别为 189 MPa 与 7%。N. Li 等<sup>[46]</sup>研究了 YAl<sub>2</sub> 作为增强颗粒对于 Mg-14Li-3Al 与 Mg-14Li-1Zn 基体的组织性能的影响。通过常规熔炼与行星式球磨的方法制备了单相的 YAl<sub>2</sub> 颗粒后,通过搅拌铸造法将其加入到 Mg-14Li-3Al 与 Mg-

14Li-1Zn 基体中。研究表明, 对比 SiC 颗粒,  $YAl_2$  金属间化合物颗粒有着极好的稳定性与承受载荷的能力, 所制备的复合材料整体性能明显好于基体合金, 5vol.% $YAl_2$ p/Mg-14Li-3Al 与 5vol.% $YAl_2$ p/Mg-14Li-1Zn 的屈服强度与伸长率分别为 220 MPa, 190 MPa 与 9%, 7%。

## 2 原位自生增强相颗粒类型

与传统的外加增强相颗粒相比, 原位合成的增强相颗粒在制备工艺上进行了优化, 减少了传统外加法中的增强相颗粒单独制备合成、处理及加入的流程, 提高了制备效率。另外, 原位自生的增强相颗粒由于是在基体内部形核与长大, 因此在热力学上较外加法颗粒更为稳定, 与基体润湿性好, 也不存在外加法中增强相颗粒表面污染问题, 因此界面结合性好, 且颗粒尺寸更细小, 有利于提升复合材料的性能。于化顺教授课题组对于原位反应生成增强相颗粒方面有一定研究, 其中王新迎等<sup>[47]</sup>将  $Fe_2O_3$ ,  $CuO$ ,  $CrO_3$  多元氧化物加入到 ZL109 基体中, 通过原位反应生成了  $Al_2O_3$  陶瓷颗粒, 大幅度提升了材料的性能。张静静<sup>[48]</sup>利用将 Al-Ti- $B_4C$ - $CuO$  混合粉末冷压成形后, 置于铝液中利用预制品之间的燃烧合成反应使铝液浸渗制备复合材料, 反应生成了  $Al_3Ti$ ,  $Al_3BC$  等产物, 制备的复合材料具有较高的致密度、硬度、弹性模量和断裂韧性以及较低的热膨胀系数。目前关于原位合成颗粒增强镁基复合材料的研究相对较少, 其具体反应原理仍有待于进一步探究。

### 2.1 原位合成陶瓷增强相颗粒

陶瓷增强颗粒由于其自身具有的高硬度、强度、弹性模量 and 高温稳定性, 以及较低的密度, 一直以来都是颗粒增强镁基复合材料最常见的增强相颗粒, 由于原位合成法所具有的润湿性好、界面结合性强, 不存在颗粒表面污染以及可以最大程度避免增强相颗粒的团聚等优势, 使得其在原位合成法制备镁基复合材料中同样得到了广泛的应用。目前原位合成法制备镁基复合材料中常见的陶瓷颗粒增强相包括  $Mg_2Si$ ,  $TiC$ ,  $AlN$  等。

王军<sup>[49]</sup>利用 Mg- $SiO_2$  为研究体系, 原位合成了  $Mg_2Si$  颗粒增强 AZ91 复合材料, 并研究了碱土元素 Ca 和 Sr、稀土元素 Y, 高能超声以及热处理对  $Mg_2Si$  颗粒形貌及尺寸的影响。研究表明, Ca, Sr, Y 有利于改善并细化  $Mg_2Si$  形貌, 通过固溶+时效处理,  $Mg_2Si$  形貌不变且性质稳定, 同时施加超声工艺和添加碱土、稀土元素制备的  $Mg_2Si$ /AZ91 复合材料经过热处理后的抗拉强度为 242.3 MPa, 伸长率为 2.86%。B. N. Sahoo 等<sup>[50]</sup>利用 Ti 与  $B_4C$  混合颗粒, 在 AZ91 熔体

内原位合成了 TiC 与  $TiB_2$  颗粒, 研究表明, 在  $900\text{ }^\circ\text{C}\times 2\text{ h}$  的参数下原位合成的 TiC 与  $TiB_2$  颗粒均匀分布在基体中, 经过均匀化处理后的复合材料的抗拉强度与伸长率分别为 231 MPa, 12%。

### 2.2 原位合成金属间化合物增强相颗粒

近年来, 金属间化合物以其优异的性能已经成为镁基复合材料中的新型增强相颗粒。在众多的金属间化合物中, 钛-铝系金属间化合物以其低密度、高比强度, 与基体很好的润湿与相似的热膨胀系数, 以及优异的高温力学性能与抗氧化性能, 成为了科研工作者的开发热点。其中  $TiAl_3$  因密度最低、比强度最高、高温抗氧化性能最好而得到了更多的关注。

杨冠男<sup>[51]</sup>研究了原位合成法制备的复合材料中  $TiAl_3$  颗粒对于材料性能的影响。将 Ti 粉与 Al 粉按原子比 1:3 称量后, 将混合粉末按 10%~40% 比例(体积分数)加入镁基体粉末中, 球磨混合均匀后冷压成形后续进行烧结。研究表明, 通过烧结后成功生成了  $TiAl_3$  金属间化合物,  $TiAl_3$  的生成有利于提升复合材料的抗压强度与耐磨性。其中添加了 40% Al-Ti 混合粉末的复合材料的抗压强度达到了 290 MPa。Hai Zhi Ye 等<sup>[52]</sup>通过向 AM60B 合金中加入 Ni, 原位合成了  $Al_{60}Mn_{11}Ni_4$  与  $Al_{0.42}Ni_{0.58}$  两种金属间化合物颗粒, 研究表明, 添加了 0.5% (质量分数) 的 Ni 生成的  $Al_{60}Mn_{11}Ni_4$  颗粒在基体内分布均匀, 能够明显细化晶粒, 提升材料性能, 所制备的复合材料抗拉强度与伸长率分别为 236 MPa 与 12%。

## 3 增强相颗粒的发展趋势

针对于外加法的增强颗粒选择, 目前发展的主要方向集中在两个方面: 一方面需要继续研究外加颗粒与基体之间的反应原理, 以期通过调控反应条件参数来达到控制反应发生的作用, 探索出一套可大规模工业化应用的产业体系; 另一方面则应继续研究新型增强相颗粒, 随着工业化发展进程的不断加快, 对于材料的性能要求越来越高, 新型增强相颗粒的不断尝试与研究有利于进一步拓展镁基复合材料的应用范围。

对于原位合成法的增强颗粒, 目前对其基本反应机制的探究仍不完善, 因此该技术有着极大的发展潜力。深入探究其反应机制, 对于达到增强相颗粒类型、尺寸与含量的可控性有着重要的意义。而对于制备尺寸较小、精度要求高的零件, 原位合成法较之外加法仍然具有较大的发展优势。

此外, 区别于传统的工程材料, 选择合理的增强相颗粒, 有利于提升镁基复合材料在功能材料中的应用前景。

## 参考文献:

- [1] ZHENG M Y, WU K, KAMADO S, et al. Aging Behavior of Squeeze Cast SiCw/AZ91 Magnesium Matrix Composite[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2003, 348(1/2): 67—75.
- [2] JIANG Q C, LI X L, WANG H Y. Fabrication of TiC Particulate Reinforced Magnesium Matrix Composites[J]. *Scripta Materialia*, 2003, 48(6): 713—717.
- [3] 韩飞, 陈刚, 刘洪伟, 等. 铸态 ZK60 镁合金往复挤压的组织与性能[J]. *精密成形工程*, 2017, 9(2): 40—44.  
HAN Fei, CHEN Gang, LIU Hong-wei, et al. Microstructure and Properties of Cyclic Extrusion and Compression Using As-cast[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2017, 9(2): 40—44.
- [4] ÇIÇEK B, AHLATÇI H, SUN Y. Wear Behaviours of Pb Added Mg-Al-Si Composites Reinforced with In Situ Mg<sub>2</sub>Si Particles[J]. *Materials & Design*, 2013, 50(17): 929—935.
- [5] SINGH K K, SINGH S. Reinforcement of Silicon Nitride Particles with AZ81 Magnesium Alloy Prepared by Stir Casting[J]. *Research Gate*, 2016(2): 108.
- [6] VELU S. Investigation of Mechanical Properties of Magnesium-SiC Composite Produced by Stir Casting[J]. *Research Gate*, 2015, 10(51): 755—768.
- [7] BRASZCZYŃSKA-MALIK K. Fabrication of AM50 Magnesium Matrix Composite with Titanium Particles by Stir Casting Method[J]. *Research Gate*, 2016, 1(3): 21—25.
- [8] NGUYEN Q B, QUADER I, NAI M L S, et al. Enhancing Hardness, CTE and Compressive Response of Powder Metallurgy Magnesium Reinforced with Metastable Al<sub>90</sub>Y<sub>10</sub> Powder Particles[J]. *Powder Metallurgy*, 2016, 59(3): 209—215.
- [9] YANG L, HOU H, ZHAO Y, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Squeeze Casting Quasicrystal Reinforced AZ91D Magnesium Matrix Composites[J]. *Rare Metal Materials & Engineering*, 2016, 45(8): 1978—1982.
- [10] WU Jin-ke, WANG Y M, HOU H, et al. Study on Technologies of Squeeze Casting of SiCp/AZ91D Magnesium Composites[J]. *Foundry*, 2014, 63(4): 336—340.
- [11] YAO Y, CHEN L. Processing of B<sub>4</sub>C Particulate reinforced Magnesium-matrix Composites by Metal-assisted Melt Infiltration Technique[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2014, 30(7): 661—665.
- [12] ANASORI B, CASPI E N, BARSOUM M W. Fabrication and Mechanical Properties of Pressureless Melt Infiltrated Magnesium Alloy Composites Reinforced with TiC and Ti<sub>2</sub>AlC Particles[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 618: 511—522.
- [13] SHAMEKH M, PUGH M, MEDRAJ M. Understanding The Reaction Mechanism of In-situ, Synthesized (TiC-TiB<sub>2</sub>)/AZ91 Magnesium Matrix Composites[J]. *Materials Chemistry & Physics*, 2012, 135(1): 193—205.
- [14] FARKAS G, CHOE H, MÁTHIS K, et al. In Situ Investigation of Deformation Mechanisms in Magnesium-based Metal Matrix Composites[J]. *Metals & Materials International*, 2015, 21(4): 652—658.
- [15] SHEN L, CHEN T, MA Y, et al. Modification of in-situ Mg<sub>2</sub>Si/AM60B Magnesium Matrix Composites with MgCO<sub>3</sub> and Sr[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2011, 31(7): 653—655.
- [16] WANG Z H, LI B, DU X, et al. Microstructure and Mechanical Properties of AlN Particles Reinforced Magnesium Matrix Composites with In Situ Synthesis Process[J]. *Solid State Phenomena*, 2016, 256: 181—185.
- [17] 陈成, 张国玲, 于化顺, 等. 高体积分数 SiCp/Al-Si 复合材料的微观组织与导热性能[J]. *功能材料*, 2012, 43(19): 2675—2679.  
CHEN Cheng, ZHANG Guo-ling, YU Hua-shun, et al. Microstructure and Thermal Conduction Property of SiCp/Al-Si Composite with High Volume Fraction of SiCp[J]. *Journal of Functional Materials*, 2012, 43(19): 2675—2679.
- [18] 卢庆亮. 准晶增强 Mg-Zn-Y 合金的 ECAP 变形组织及力学性能[D]. 济南: 山东大学, 2006.  
LU Qing-liang. Microstructure and Properties of Quasicrystal Strengthened Mg-Zn-Y Alloy Produced by Equal Channel Angular Pressing[D]. Jinan: Shandong University, 2006.
- [19] SHEN M J, WANG X J, LI C D, et al. Effect of Submicron Size SiC Particles on Microstructure and Mechanical Properties of AZ31B Magnesium Matrix Composites[J]. *Materials & Design*, 2014, 54(2): 436—442.
- [20] SREEKANTH D, RAMESHBABU N. Development and Characterization of MgO/hydroxyapatite Composite Coating on AZ31 Magnesium Alloy by Plasma Electrolytic Oxidation Coupled with Electrophoretic Deposition[J]. *Materials Letters*, 2012, 68(1): 439—442.
- [21] BALAKRISHNAN M, DINAHARAN I, PALANIVEL R, et al. Synthesize of AZ31/TiC Magnesium Matrix Composites Using Friction Stir Processing[J]. *Journal of Magnesium & Alloys*, 2015, 3(1): 76—78.
- [22] CHEN J, BAO C G, WANG Y, et al. Microstructure and Lattice Parameters of AlN Particle-Reinforced Magnesium Matrix Composites Fabricated by Powder Metallurgy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 28(11): 1354—1363.
- [23] GOBARA M, SHAMEKH M. Corrosion Behavior of In Situ (TiC-TiB<sub>2</sub>)p/AZ91 Magnesium Matrix Composites in Harrison Solution[J]. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2014, 61(5): 319—327.
- [24] DENG K K, WANG X J, WU Y W, et al. Effect of Particle Size on Microstructure and Mechanical Properties of SiCp/AZ91 Magnesium Matrix Composite[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2012, 543(5): 158—163.
- [25] SAMEER K D, SUMAN K N S, TARA S C, et al. Microstructure, Mechanical Response and Fractography of AZ91E/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (p) Nano Composite Fabricated by Semi Solid Stir Casting Method[J]. *Journal of Magnesium & Alloys*, 2016.
- [26] SAIDA J, MATSUSHITA M, LI C, et al. Formation of Icosahedral Quasicrystalline Phase in Zr<sub>70</sub>Ni<sub>10</sub>M<sub>20</sub>(M= Pd, Au, Pt) Ternary Metallic Glasses[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(24): 3558—3560.
- [27] YI S, KIM D H. Stability and Phase Transformations of Icosahedral Phase in A 41.5Zr41.5Ti17Ni Alloy[J]. *Journal of Materials Research*, 2000, 15(4): 892—897.
- [28] MURTY B S, PING D H, HONO K, et al. Direct Evi-

- dence for Oxygen Stabilization of Icosahedral Phase during Crystallization of  $Zr_{65}Cu_{27.5}Al_{7.5}$  Metallic Glass[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(1): 55—57.
- [29] SANKARANARAYANAN S, SHANKAR V H, JAYALAKSHMI S, et al. Development of High Performance Magnesium Composites Using Ni50Ti50 Metallic Glass Reinforcement and Microwave Sintering Approach[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014: 627.
- [30] JAYALAKSHMI S, SAHU S, SANKARANARAYANAN S, et al. Development of Novel Mg-Ni<sub>60</sub>Nb<sub>40</sub> Amorphous Particle Reinforced Composites with Enhanced Hardness and Compressive Response[J]. *Materials & Design*, 2014, 53(2): 849—855.
- [31] SHECHTMAN D, BLECH I, GRATIAS D, et al. Metallic Phase with Long-range Orientational Order and No Translational Symmetry[J]. *Physical Review Letters*, 1984, 53(20): 1951—1953.
- [32] LUO Z P, ZHANG S Q, TANG Y L, et al. Quasicrystals in as-cast Mg-Zn-RE Alloys[J]. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1993, 28: 1513—1518.
- [33] 李小平. Al-(63)Cu-(25)Fe-(12)准晶与镁、铝及其合金复合过程的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.  
LI Xiao-ping. A Study of Process in Al<sub>63</sub>Cu<sub>25</sub>Fe<sub>12</sub> Quasicrystalline Combined with Mg/Al and Their Alloys[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [34] WANG X, DU W, WANG Z, et al. Microstructures And Mechanical Properties of Quasicrystal Reinforced AZ31 Matrix Composites[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2011, 530(1): 446—451.
- [35] KANG H, WU S, LI X, et al. Improvement of Microstructure and Mechanical Properties of Mg-8Gd-3Y by Adding Mg3Zn6Y Icosahedral Phase Alloy[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2011, 528(16/17): 5585—5591.
- [36] KAWAMURA Y, HAYASHI K, INOUE A, et al. Rapidly Solidified Powder Metallurgy Mg97Zn1Y2 Alloys with Excellent Tensile Yield Strength Above 600 MPa[J]. *Mater Trans*, 2001, 2: 1172—1176.
- [37] CHINO Y, MABUCHI M, HAGIWARA S, et al. Novel Equilibrium Two Phase Mg Alloy with The Long-period Ordered Structure[J]. *Scripta Mater*, 2004, 51: 711—714.
- [38] SHAO X H, YANG Z Q, MA X L. Strengthening And Toughening Mechanisms in Mg-Zn-Y Alloy with A Long Period Stacking Ordered Structure[J]. *Acta Mater*, 2010, 58: 4760—4771.
- [39] OKUDA H, HORIUCHI T, YAMASAKI M, et al. In Situ Measurements on Stability of Long-period Stacking ordered Structures in Mg<sub>85</sub>Y<sub>9</sub>Zn<sub>6</sub> Alloys during Heating Examined by Multicolor Synchrotron Radiation Small-angle Scattering[J]. *Scripta Mater*, 2014, 75: 66—69.
- [40] GRÖBNER J, KOZLOV A, FANG X Y, et al. Phase Equilibria and Transformations in Ternary Mg-rich Mg-Y-Zn Alloys[J]. *Acta Mater*, 2012, 60: 5948—5962.
- [41] 刘珂, 杜文博, 王朝辉, 等. 一种高性能镁金属基复合材料及其制备方法[D]. 北京: 北京工业大学, 2013: 1—8.
- LIU Ke, DU Wen-bo, WANG Zhao-hui, et al. Preparation Method of A High Performance Magnesium Metal Matrix Composite Material[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013: 1—8.
- [42] HASSAN S F, GUPTA M. Development of Ductile Magnesium Composite Materials Using Titanium as Reinforcement[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2002, 345(1): 246—251.
- [43] XI Y L, CHAI D L, ZHANG W X, et al. Ti-6Al-4V Particle Reinforced Magnesium Matrix Composite by Powder Metallurgy[J]. *Materials Letters*, 2005, 59(14/15): 1831—1835.
- [44] LONG Y, WANG T, ZHANG H Y, et al. Enhanced Ductility in A Bimodal Ultrafine-grained Ti-6Al-4V Alloy Fabricated by High Energy Ball Milling and Spark Plasma Sintering[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 608: 82—89.
- [45] WANG S J, WU G Q, LI R H, et al. Microstructures and Mechanical Properties of 5wt.% Al2Yp/Mg-Li Composite[J]. *Materials Letters*, 2006, 60(15): 1863—1865.
- [46] LI N, ZHANG Q Q, NIU L Y, et al. Microstructure, Properties and Application of YA12 Intermetallic Compound As Particle Reinforcements[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 617: 139—145.
- [47] 王新迎, 于化顺, 王雷, 等. 多元氧化物和铝原位反应制备铝基复合材料的组织和性能[J]. *中国有色金属学报*, 2014(2): 387—394.  
WANG Xin-ying, YU Hua-shun, WANG Lei, et al. Microstructure and Properties of Aluminum Matrix Composites Fabricated by In-situ Reaction Between Multi-oxide and Aluminum[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014(2): 387—394.
- [48] 张静静. 快速自发浸渗法制备铝基复合材料及其反应和浸渗机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.  
ZHANG Jing-jing. Study on Fabrication of Al Composites with Al-Ti-B4C-CuO Powder Mixtures by Quick Spontaneous Infiltration Process and Concerned Reaction and Infiltration Mechanism[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [49] 王军. 原位 Mg<sub>2</sub>Si 颗粒增强 AZ91 复合材料的制备及其性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.  
WANG Jun. Study on Fabrication and Properties of AZ91 Matrix Composites Reinforced by In Situ Mg<sub>2</sub>Si Particles[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010.
- [50] SAHOO B N, PANIGRAHI S K. Synthesis, Characterization and Mechanical Properties of In-situ (TiC-TiB<sub>2</sub>) Reinforced Magnesium Matrix Composite[J]. *Materials & Design*, 2016, 109: 300—313.
- [51] 杨冠男. Al3Ti/Mg 复合材料的制备与性能研究[D]. 广州: 暨南大学, 2010.  
YANG Guan-nan. Research on The Preparation and Properties of Al3Ti/Mg Composite Materials[D]. Guangzhou: Jinan University, 2010.
- [52] YE H Z, LIU X Y. In Situ Formation of Aluminide Intermetallic Particles in A Magnesium Alloy[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2006, 427(1/2): 27—34.