

搅拌摩擦焊接参数对 ZK60 镁合金接头微观组织和力学性能的影响 *

谢广明^{1,2)} 马宗义²⁾ 耿林¹⁾

1) 哈尔滨工业大学材料学院, 哈尔滨 150001

2) 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016

摘要 采用搅拌摩擦焊接方法对 6 mm 厚的挤压态 ZK60 镁合金板材进行焊接。在广泛的焊接参数 (600—1200 r/min 的旋转速率和 50—200 mm/min 的焊接速度) 下, 均得到了高质量的焊接接头。在焊接工具的搅拌和摩擦热的联合作用下, 在焊核区形成了细小、均匀的再结晶晶粒, 同时 MgZn₂ 粒子被破碎并大部分固溶入镁基体。对于 ZK60 镁合金, MgZn₂ 粒子的弥散强化作用高于晶粒细化的作用, 因而焊核区的硬度低于母材, 拉伸时接头在焊核区发生断裂。在低热输入焊接参数 (≤ 800 r/min) 下, 随焊接参数的变化, 焊核区晶粒尺寸、焊接接头的抗拉和屈服强度及延伸率变化较小。在高热输入焊接参数 (1200 r/min) 下, 焊核区晶粒明显变大, 接头的抗拉和屈服强度略有下降。对焊接接头进行人工时效后, 不同热输入条件下得到的焊接接头的强度和延伸率都有明显提高。

关键词 搅拌摩擦焊接, 镁合金, 微观组织, 力学性能

中图法分类号 TG453

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2008)06-0665-06

EFEECTS OF FRICTION STIR WELDING PARAMETERS ON MICROSTRUCTURES AND MECHANICAL PROPERTIES OF ZK60 MAGNESIUM ALLOY JOINTS

XIE Guangming^{1,2)}, MA Zongyi²⁾, GENG Lin¹⁾

1) School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001

2) Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

Correspondent: MA Zongyi, professor, Tel: (024)83978908, E-mail: zyma@imr.ac.cn

Supported by National Outstanding Young Scientist Foundation (No.50525103) and Hundred Talents

Program of Chinese Academy of Sciences

Manuscript received 2007-11-23, in revised form 2008-01-28

ABSTRACT Six millimeters thick ZK60 alloy plates were successfully friction stir welded (FSW). The sound welded joints were achieved under a wide range of welding parameters (rotation rate of 600—1200 r/min and traverse speed of 50—200 mm/min). After FSW, the coarse grains in ZK60 alloy were changed to fine equiaxed recrystallized grains at the nugget zone. Furthermore, the coarse MgZn₂ particles were broken up and mostly dissolved into the matrix. For the ZK60 magnesium alloy, the precipitation strengthening effect was more dominant than fine-grain strengthening effect. Therefore, hardness value of the nugget zone was lower than those of the parent material and the fracture occurred at the nugget zone. At low heat input parameters (≤ 800 r/min), the grain sizes in the nugget zone, and the tensile strengths and elongations of welded joints at different parameters were similar, but at high heat input parameter (1200 r/min), the grains in the nugget zone became large and the tensile strength of welded joint slightly decreased. After aging treatment, the strengths and elongations of welded joints under different parameters increased and their mechanical properties were similar.

KEY WORDS friction stir welding, magnesium alloy, microstructure, mechanical property

* 国家杰出青年科学基金项目 50525103 和中国科学院百人计划支持项目资助

收到初稿日期: 2007-11-23, 收到修改稿日期: 2008-01-28

作者简介: 谢广明, 男, 1980 年生, 博士生

镁合金作为最轻的商用工程结构材料, 具有比强度高、铸造成型性好、吸震降噪性能优越、易于回收等众多优点, 广泛应用于汽车、电子和航空航天领域^[1]。其中, 应用最广泛的是以 Al 为主要合金元素的 AZ 系列镁合金,

特别是用于变形用的 AZ31 合金和用于铸造成型的 AZ91 合金。然而 AZ31 变形镁合金的强度还不是很高，因而高强度的 ZK60 镁合金即 Mg-Zn-Zr 合金便具有了极大的应用潜力^[1]。Mg-Zn 系二元合金容易产生晶粒长大，添加的 Zr 元素具有显著的细化晶粒作用，Zr 是 Mg-Zn 系列合金中最有效的晶粒细化元素。

搅拌摩擦焊是 1991 年由英国焊接研究所发明的一种新型固相连接技术，与传统的熔化焊相比，搅拌摩擦焊具有自动化程度高、焊接质量稳定和热变形小等显著特点，并且节能、环保，因而近十几年来有了长足的发展^[2,3]。目前关于搅拌摩擦焊的研究大部分都集中在铝合金上，关于镁合金的焊接研究相对较少，这主要是由于和铝合金基体的面心立方结构相比，镁合金基体的密排六方结构在塑性变形过程中可开动的滑移系较少，因而塑性变形能力较铝合金要差^[4-12]。目前关于镁合金的搅拌摩擦焊主要针对 Mg-Al 系列合金，对 Mg-Zn-Zr 系列合金的研究很少^[11]。表 1 列举了不同牌号的 AZ 系列镁合金搅拌摩擦焊接头的性能。从表中可以看出，焊接板材的厚度大多不超过 4 mm，而且若想要得到高强度系数的焊接接头 (>0.8)，需要采用高热输入量的焊接参数（旋转速率 $>1000 \text{ r/min}$ ）进行焊接，增加了能源的消耗。

最近，本文作者在 800 r/min-100 mm/min 的焊接参数下进行了 ZK60 镁合金的搅拌摩擦焊接，并分析了人工时效对焊接接头性能的影响。研究表明^[11]，在该参数下可以获得高质量的焊接接头，焊后人工时效可进一步改善接头的力学性能。在本文的研究中，扩展了焊接参数，即改变焊接速度和旋转速度，在宽的焊接参数范围内对 6 mm 厚的挤压态 ZK60 镁合金板材进行了搅拌摩擦焊接，详细分析了焊接参数对接头微观组织和力学性能的影响，以期为镁合金搅拌摩擦焊的工业应用提供参照。

1 实验方法

从宽为 100 mm，厚为 8 mm 的挤压态 ZK60 合金板材中机械加工出 6 mm 厚的板材作为实验样品，主要化学成分（质量分数，%）为：Zn 6.0，Zr 0.6，其余为 Mg。焊接工具的轴肩直径为 20 mm，锥状搅拌针的直径为 6 mm，长为 5.7 mm，侧面开有螺纹。采用北京 FSW Technology 公司研制的 FSW-5LM-020 型搅拌摩擦焊

机进行焊接。焊接前用钢丝刷将工件对接面和表面的氧化膜清理掉，然后用丙酮予以清洗。将工件固定后，采用 600—1200 r/min 的工具旋转速率和 50—200 mm/min 的焊接速度进行焊接，搅拌头倾角为 2.5°，下压量均控制在 0.25 mm。部分焊接样品在 150 °C 进行 24 h 的人工时效。

垂直于焊缝用线切割切取长为 50 mm，宽为 10 mm 的金相样品，用苦味酸、醋酸、乙醇和水的混合溶液对机械抛光后的试样进行化学侵蚀，在光学显微镜（OM）和扫描电子显微镜（SEM）下对微观组织进行观察，晶粒尺寸采用割线法测量。在焊核区和母材处取出 10 mm × 10 mm × 10 mm 的样品，在 Philips 型 X 射线衍射仪上进行物相分析。采用 LECO-LM247AT 型硬度计对焊接接头进行显微硬度测量，载荷 4.9 N，加载时间 13 s。利用线切割垂直于焊接方向切取拉伸试样，试样的直线段长为 40 mm，宽为 10 mm。在 Zwick-Roell 型拉伸试验机上进行拉伸实验，应变速率 $4.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

2 实验结果与讨论

图 1 为不同焊接参数下 ZK60 镁合金焊接接头的宏观形貌，焊缝质量良好，致密无缺陷。搅拌摩擦焊接头分为 4 个区域：母材区（PM）、热影响区（HAZ）、热机械影响区（TMAZ）和焊核区（nugget zone）。从图 1 中可以看出整个焊核区呈盆状，前进边的热机械影响区边界要比回撤边的更清晰，这样的焊核形貌与搅拌摩擦焊接 AZ31 的形貌类似^[12]。在不同参数下得到的焊核形貌基本一致，然而在 800 r/min-200 mm/min 的焊接参数下焊核区的宽度最窄，这可能是由于在 200 mm/min 的高焊接速度下，热输入量降低，由焊接工具所导致的 MgZn₂ 相的溶解区域变窄而造成的，MgZn₂ 相的溶解将随后讨论。

图 2 为母材和不同参数下焊核区的显微组织。母材区表现为典型的挤压态组织，在挤压横截面上，晶粒沿平行于板面的方向被拉长并且存在大量挤压后的流线（图 2a）。焊核区在焊接工具的强烈搅拌和热作用下发生了动态再结晶，产生比母材更细小的等轴再结晶晶粒。当旋转速率不超过 800 r/min 时，各参数下焊核区的晶粒尺寸十分接近，平均晶粒尺寸 $\sim 5 \mu\text{m}$ （图 2b-e）。当旋转速率上升到 1200 r/min 时，由于热输入量的增加使得焊核区的晶

表 1 AZ 系列镁合金搅拌摩擦焊接总结
Table 1 A summary of FSW of AZ system magnesium alloys

Material	Thickness	Rotation rate	Traverse speed	Strength coefficient	Fractural location	Ref.
	mm	r/min	mm/min			
Thixomolded AZ91D	2	1240—1750	50	1.0	PM	[4]
Cast AZ91D	4	1098—1251	41—187	1.0	PM	[5]
AZ31B-H24	4	2500	61—267	0.85	Nugget zone	[6]
Forged AZ61	6.3	1220	90	—	Nugget zone	[7]
AZ31B-H24	4	2000	100	0.8	HAZ	[8]

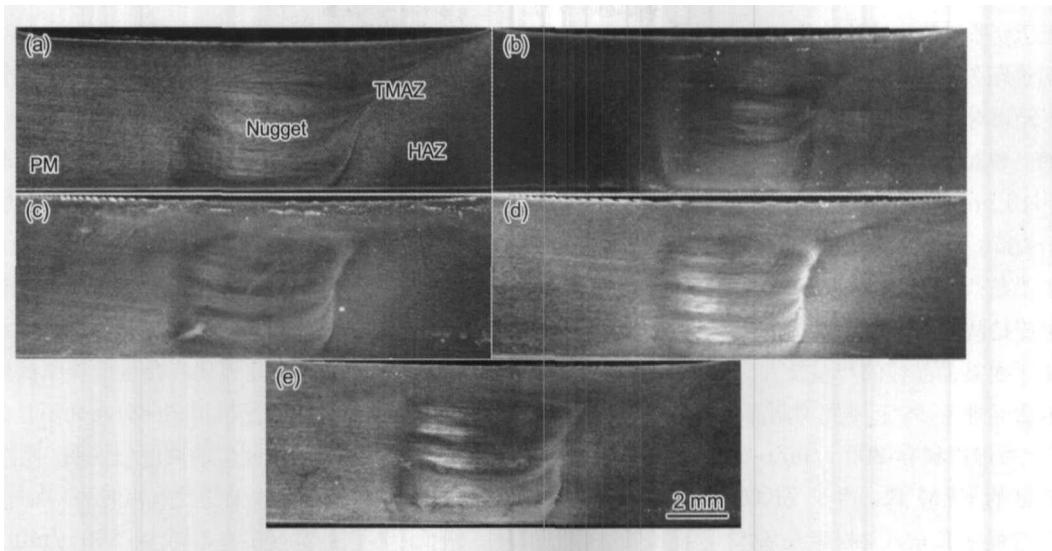


图1 不同焊接参数下的ZK60搅拌摩擦焊接头宏观形貌

Fig.1 Cross-sectional macrographs of FSW ZK60 samples at 600 r/min-50 mm/min (a), 800 r/min-100 mm/min (b), 800 r/min-150 mm/min (c), 800 r/min-200 mm/min (d) and 1200 r/min-100 mm/min (e), the advancing side is on the right

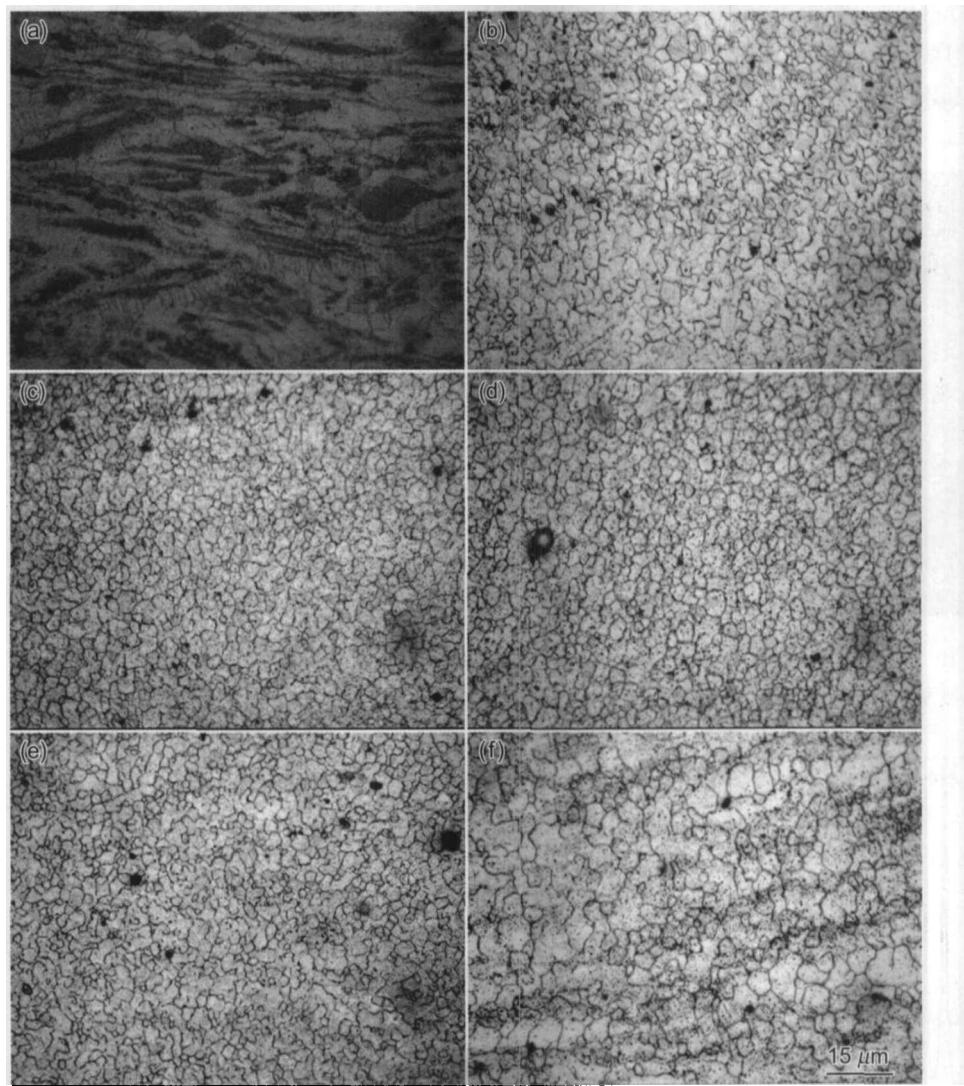


图2 母材和不同参数下ZK60搅拌摩擦焊接头焊核区的晶粒结构

Fig.2 Microstructures of the PM (a) and nugget zones of FSW ZK60 samples at different FSW parameters of 600 r/min-50 mm/min (b), 800 r/min-100 mm/min (c), 800 r/min-150 mm/min (d), 800 r/min-200 mm/min (e) and 1200 r/min-100 mm/min (f), under strongly stirring and hot effect the dynamic recrystallization occurred and fine equiaxial grains formed

粒略有长大, 平均晶粒尺寸达到 $\sim 8.5 \mu\text{m}$ 。总的来说, 晶粒尺寸对热输入的变化并不敏感, 这主要是由于 ZK60 合金中 Zr 元素对晶粒长大有很强的抑制作用。搅拌摩擦焊焊核区的晶粒尺寸通常要小于母材, 如 AZ61 焊核区的晶粒尺寸 $\sim 10 \mu\text{m}$, 明显小于母材^[7]。然而, Lee 等^[6]报道在 2500 r/min–87 mm/min 参数下, 搅拌摩擦焊接 AZ31 焊核区的晶粒尺寸约为 $90 \mu\text{m}$, 几乎是母材晶粒尺寸的 2 倍。这主要是两方面原因造成: 一是焊接过程中的热输入量大造成了再结晶晶粒的严重长大; 二是 AZ31 镁合金中第二相的含量非常少, 起不到抑制晶粒长大的作用。

图 3 为母材和在 800 r/min–100 mm/min 焊接参数下焊核区的 SEM 像。由于 ZK60 母材为挤压态材料, 在热挤压过程中部分第二相溶入基体, 因而只有一定量的粗大第二相粒子残存(图 3a)。在搅拌摩擦焊接的强烈搅拌和热作用下, 粗大的第二相被粉碎并且大部分溶入基体中, 因此焊核区中的第二相尺寸和数量明显小于母材(图 3b)。图 4 为母材和在 800 r/min–100 mm/min 参数下焊核区的 X 射线衍射分析, 可以看出母材和焊核区主要的第二相是 MgZn₂ 相。

图 5 为不同参数下沿焊缝横截面中线的显微硬度分布。从图中可以看出各个硬度曲线的趋势基本上是一致的, 均表现出焊核区硬度低于母材硬度, 而且不同参数下焊核区的硬度比较接近。焊核区的硬度主要受两个因素控制, 一方面晶粒细化导致硬度增加, 另一方面 MgZn₂ 相的溶解造成焊核区硬度降低。对 ZK60 镁合金, MgZn₂ 相溶解降低硬度的因素占主导地位, 因而焊核区的硬度低于母材。这与铝合金的研究结果是一致的。Sato 等^[13]的研究表明, 对于沉淀强化铝合金搅拌摩擦焊接头, 决定接头硬度的主导因素是析出相的分布而不是晶粒尺寸。不同焊接参数下焊核区相似的硬度值说明, 搅拌摩擦焊造成的 MgZn₂ 相的溶解效果是大致相同的。从图 5 可以注意到, 最低硬度区的宽度略有不同, 在 800 r/min–200 mm/min 参数下, 最低硬度区的宽度最窄, 这与该参数下焊核区宽度最窄是一致的。

本研究所得到的 ZK60 镁合金搅拌摩擦焊接头的硬度分布与 AZ 系列镁合金是完全不同的。AZ 系列合金中的 β -Mg₁₇Al₁₂ 相尺寸一般都比较大, 因此对合金硬度的提高贡献不大^[7]。随着 Al 含量的增加, AZ 系列镁合

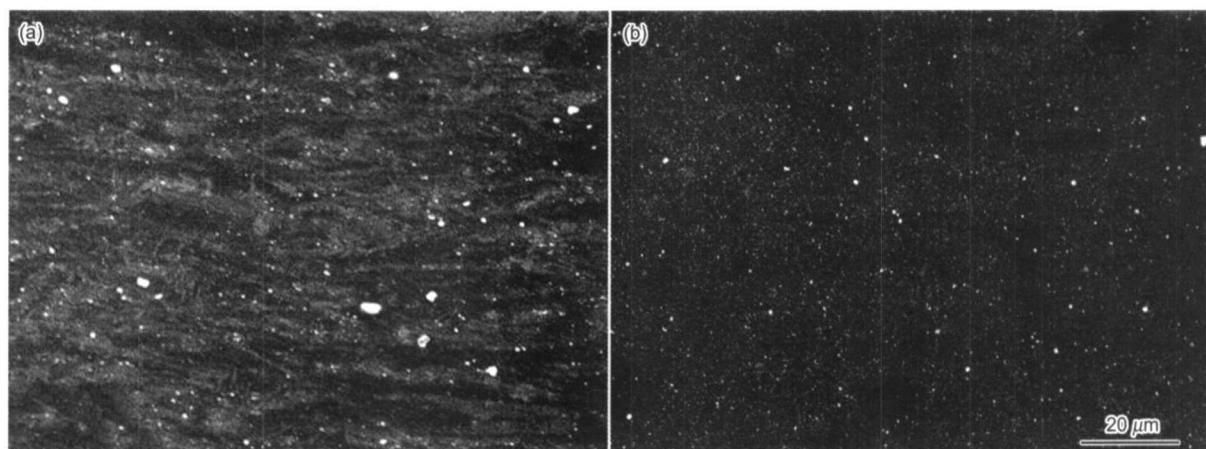


图 3 扫描电镜下母材与焊核区中第二相颗粒的分布

Fig.3 SEM images of PM (a) and nugget zone (b) (800 r/min–100 mm/min), the white particles are the second phases

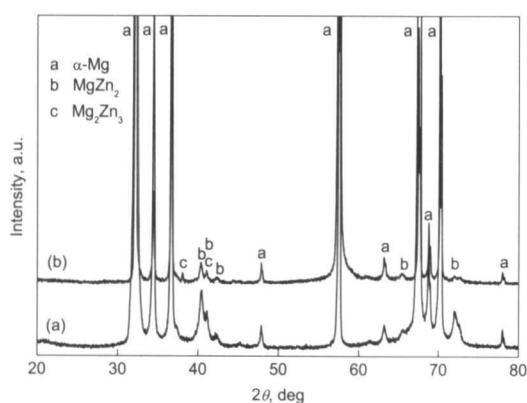


图 4 ZK60 合金母材与焊接区的 X 射线衍射谱

Fig.4 XRD patterns of PM (a) and nugget zone (b) of ZK60 alloy (800 r/min–100 mm/min)

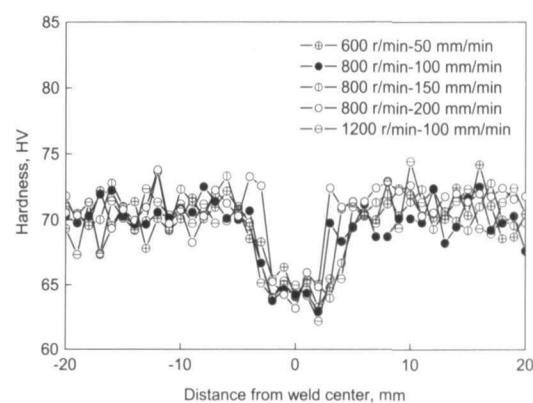


图 5 不同参数下焊接接头横截面的硬度分布

Fig.5 Hardness profiles in FSW ZK60 joints at various parameters

金搅拌摩擦焊接头硬度分布表现为两种不同的形式。一方面, Chang 等^[8] 和 Park 等^[7] 对 AZ31 和 AZ61 的搅拌摩擦焊研究表明, 焊核区和母材区的硬度基本上是一致的。这是由于搅拌摩擦焊使得这两类合金中含量相对较少的 Mg₁₇Al₁₂ 相大部分固溶进基体, 因此起不到弥散强化的作用。另一方面, Chang 等^[8] 报道, AZ91 搅拌摩擦焊接头焊核区的硬度则要明显高于母材。这是因为 AZ91 中含有大量 Mg₁₇Al₁₂ 相, 搅拌摩擦焊接除使部分 Mg₁₇Al₁₂ 相溶入镁基体外, 剩余的 Mg₁₇Al₁₂ 相被粉碎并弥散分布在基体中, 起到了弥散强化作用, 因而提高了焊核区的强度。

对于镁合金, 影响其力学性能的因素较多, 一般有粒子弥散强化、组织和晶粒尺寸等影响, 这些影响中以粒子弥散强化影响最为主要。因此, 对于 ZK60 镁合金, 搅拌摩擦焊接头的焊核区由于大量 MgZn₂ 粒子的溶解, 并且原始挤压态母材中的强组织遭到破坏, 使该区域成为最薄弱的区域, 拉伸时断裂发生在焊核区^[11]。但是对于 AZ 系列镁合金, 情况是完全不同的。热影响区内晶粒在热作用下长大, 使之成为搅拌摩擦焊接头最薄弱的区域。Chang 等^[8] 报道了在 2000 r/min-100 mm/min 参数下 AZ31B-H24 合金搅拌摩擦焊接头在热影响区断裂。图 6 为母材和不同参数下接头的力学性能, 可以看出焊接接头的各项力学性能均低于母材。在低热输入量焊接参数 (≤ 800 r/min) 下, 抗拉强度最高能达到母材的 91%, 延伸率达到母材的 70% 左右。不同参数下焊接接头强度和延伸率都比较接近, 这与各个焊核区类似的硬度分布是一致的。在高热输入量焊接参数 (1200 r/min) 下, 焊接接头的屈服强度略有下降, 延伸率有所提高, 达到了母材的 90%, 这是由焊核区的晶粒尺寸变大所致。Lee 等^[6] 报道在 1800 和 2500 r/min 下得到良好的 AZ31B-H24 镁合金搅拌摩擦焊接头, 接头的强度达到母材的 85%。然而, Chang 等^[8] 报道, 在 2000 r/min 下, AZ31B-H24 搅拌摩擦焊接头的抗拉强度仅达到了母材的 79%。显然, ZK60 搅拌摩擦焊接头的强度系数高于在 AZ 系列镁合金中取得的效果。

最近的研究表明, 对 800 r/min-100 mm/min 参数下的焊接接头进行人工时效后, 接头的抗拉和屈服强度及延伸率均有所提高, 分别达到了母材的 94%, 92% 和 77%^[11]。在本研究中对低热输入参数 (800 r/min-200 mm/min) 和高热输入参数 (1200 r/min-100 mm/min) 下的焊接接头进行人工时效, 同样也提高了抗拉和屈服强度以及延伸率, 而且与在 800 r/min-100 mm/min 下得到的力学性能很接近 (图 7)。这表明焊态下不同热输入条件下, 焊核区中 MgZn₂ 的固溶程度是接近的, 因而产生了类似的时效强化效果。这也进一步说明, MgZn₂ 相的形态和分布是决定 ZK60 镁合金接头性能的决定性因素。

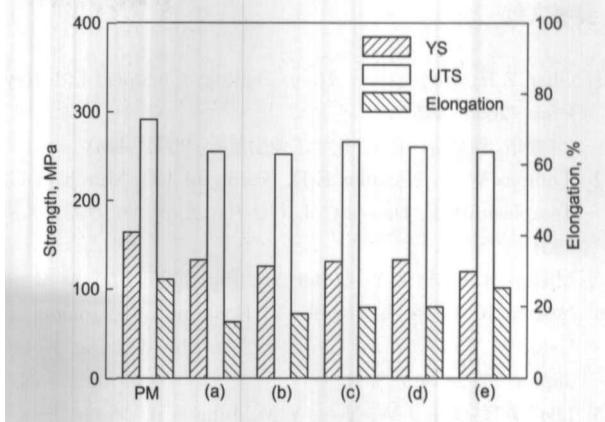


图 6 母材与焊缝的横向拉伸性能

Fig.6 Transverse tensile properties of the PM and FSW joints at parameters of 600 r/min-50 mm/min (a), 800 r/min-100 mm/min (b), 800 r/min-150 mm/min (c), 800 r/min-200 mm/min (d) and 1200 r/min-100 mm/min (e)

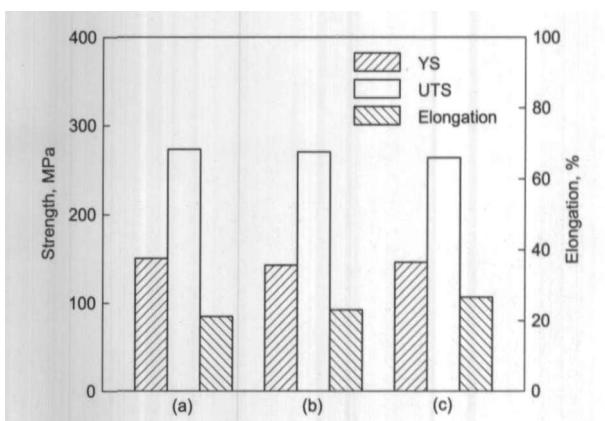


图 7 人工时效后焊缝的横向拉伸性能

Fig.7 Transverse tensile properties of welded joints at 800 r/min-100 mm/min (a), 800 r/min-200 mm/min (b) and 1200 r/min-100 mm/min (c), after aging at 150 °C for 24 h

3 结论

- (1) 在 600—1200 r/min 的旋转速率以及 50—200 mm/min 的焊接速度下, 均获得了无缺陷的 ZK60 镁合金搅拌摩擦焊接头。
- (2) 焊核区的晶粒被明显细化, 粗大的 MgZn₂ 相被粉碎并大部分溶入镁基体中。
- (3) MgZn₂ 相的溶解造成焊核区的硬度低于母材, 焊接参数对焊核区的硬度没有明显的影响。
- (4) 在低于 800 r/min 的低热输入焊接参数下, 焊接参数对接头拉伸性能影响不大, 抗拉强度可达母材的 ~90%; 在 1200 r/min 的高热输入条件下, 接头的强度降低, 塑性提高。
- (5) 对不同热输入焊接参数下的焊接接头进行人工时效, 接头的力学性能明显提高, 并且它们的强度和延伸率都十分接近。

参考文献

- [1] Chen Z H. *Magnesium Alloy*. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 446
(陈振华. 镁合金. 北京: 化学工业出版社, 2004: 446)
- [2] Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C, Murch M G, Templesmith P, Dawes C J. *GB Pat Appl No.9125978.8*, 1991
- [3] Mishra R S, Ma Z Y. *Mater Sci Eng*, 2005; R50: 1
- [4] Nakata K, Inoki S, Nagano Y, Hashimoto T, Johgan S, Ushio M. *Proc 3rd Int Conf Friction Stir Welding*, Kobe, Japan, 27–28 Sep., 2001
- [5] Lee W B, Kim J W, Yeon Y M, Jung S B. *Mater Trans*, 2003; 44: 917
- [6] Lee W B, Yeon Y M, Jung S B. *Mater Sci Technol*, 2003; 19: 785
- [7] Park S H C, Sato Y S, Kokawa H. *Scr Mater*, 2003; 49: 161
- [8] Chang W S, Kim H J, Noh J S, Bang H S. *Key Eng Mater*, 2006; 321–323: 1723
- [9] Zhang D, Suzuki M, Maruyama K. *Scr Mater*, 2005; 52: 899
- [10] Xie G M, Ma Z Y, Geng L, Chen R S. *Mater Sci Eng*, 2007; A471: 63
- [11] Xie G M, Ma Z Y, Geng L. *Mater Sci Eng A*, Available Online at www.sciencedirect.com, 26 Aug., 2007, in Press
- [12] Gharacheh M A, Kokabi A H, Daneshi G H, Shalchi B, Sarrafi R. *Int J Mach Tool Manuf*, 2006; 46: 1983
- [13] Sato Y S, Kokawa H, Enomoto M, Jogan S. *Metall Mater Trans*, 1999; 30A: 2429