

文章编号:1637-9981(2012)04-0240-06

挤压 ZK60-Gd 合金搅拌摩擦焊接头的组织与性能*

周楠, 戚文军, 刘畅, 宋东福

广东省工业技术研究院金属加工与成型技术研究所, 广东 广州 510650

摘要:采用金相显微镜、扫描电镜、显微硬度计、拉伸试验仪等手段研究了镁合金 ZK60-Gd 搅拌摩擦焊接头的组织与性能。结果表明:ZK60-Gd 镁合金的焊接参数为:焊接速度 120~240 mm/min, 搅拌头转速 900~1300 r/min。热输入量过大或不足均可导致缺陷;焊接头各区域的组织均有明显特征, 焊核区形成细小均匀的再结晶组织;通过焊接工艺优化, 焊缝的抗拉强度可达 285 MPa, 为母材强度的 87.08%, 试样断裂均发生在热影响区。

关键词:挤压 ZK60-Gd 合金;搅拌摩擦焊;微观组织;力学性能

中图分类号: TG453 **文献标识码:** A

Mg-Zn-Zr 系合金具有强度高、塑性好及耐蚀等优点, 是目前应用最广泛的变形镁合金之一^[1-2]。许多研究者针对 Mg-Zn-Zr 系合金进行了微合金化、晶粒细化、超塑性、耐蚀性等方面的研究^[3-8]。在 Mg-Zn-Zr 系合金中, 以 ZK60 合金的综合性能最好, 是目前研究的热点;为改善 ZK60 合金的力学性能, 扩展其应用领域, 许多研究者针对 ZK60 进行了搅拌摩擦焊工艺和性能的研究^[9-10]。

研究表明, 在镁合金中添加稀土元素可显著提高其综合力学性能, 目前主要添加的稀土元素有 Nd, Y, Ce, La 及 Gd 等^[11]。本文以挤压态 ZK60-Gd 镁合金为实验材料, 通过改变搅拌头的转动速度和焊接速度, 研究了搅拌摩擦焊参数对接头的微观组织及力学性能的影响, 以期进一步扩大镁合金 ZK60-Gd 在工程上的应用范围。

1 实验

实验用 ZK60-Gd 合金锭是将纯 Mg、纯 Zn 和 Mg-30%Zr、Mg-20%Gd 中间合金在镁合金熔炼炉中进行熔炼, 熔体经精炼除渣后浇入预热温度 523 K 的金属型模具中, 浇注温度为 988 K, 得到直径为 100 mm, 长度为 200 mm 的 ZK60-Gd 镁合金铸棒。

将制备的 ZK60-Gd 合金锭经均匀化处理, 挤压成 6 mm 厚、75 mm 宽的板材, 再通过机械加工制得规格为 100 mm×75 mm×6 mm 的板材供焊接使用。合金的主要成分列于表 1。

表 1 ZK60-Gd 镁合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of ZK60-Gd magnesium alloy

元素	Al	Zn	Mn	Zr	Gd	Mg
含量 w/%	0.05	6.0	0.10	0.87	0.95	bal.

搅拌摩擦焊实验在 FSW-3LM-4012 研究型搅拌摩擦焊机上进行。焊接前用砂纸打磨试件表面以除去铣痕、氧化皮及油污等, 并用丙酮对其进行清洗。将试件固定后, 按照实验方案预先设定好旋转速度、焊接速度、轴肩下压量等工艺参数, 然后运行程序进行焊接。

完成焊接过程后, 沿垂直于焊缝方向截取 35 mm×10 mm 的小块, 制成金相试样。将试样用砂纸逐级磨光, 然后用金刚石研磨膏进行抛光。抛光至无划痕后, 采用苦味酸(1.5 g)+乙醇(25 mL)+乙酸(5 mL)+水(10 mL)溶液对试样进行腐蚀。用光学显微镜及扫描电子显微镜观察微观组织。采用 D/

收稿日期:2012-08-30

* 基金项目:广东省产学研结合项目(2010A090200078)

作者简介:周楠(1982-), 男, 山东济南人, 助理工程师, 硕士。

MAX-RC 型 X 射线衍射仪分析试样的相组成,采用 MH-5D 型维氏硬度计测试样品硬度,在 GP-TS2000 型材料性能试验机上测试材料的拉伸力学性能。

2 实验结果

2.1 接头的宏观形貌

通过大量实验发现,ZK60-Gd 镁合金在焊接速度为 120~240 mm/min,搅拌头转速为 900~1350 r/min 时,均可得到表面比较平整光滑、无明显飞

边、沟槽、未焊合等缺陷的焊接接头,并且焊缝背面也焊合良好,没有出现凹陷、“吻接”等现象。当焊速为 120 mm/min 时,若搅拌头的转速低于 750 r/min,焊缝表面出现了沟槽;若转速高于 1400 r/min,焊缝局部产生熔化现象。焊缝出现沟槽主要是由于热输入量不够,焊缝区金属不能完全塑化,使得焊接过程类似于加工切削过程,焊缝局部产生熔化主要是由于热输入量过大而导致焊缝金属熔化。几种焊接参数下镁合金 ZK60-Gd 焊接接头的宏观形貌如图 1 所示。

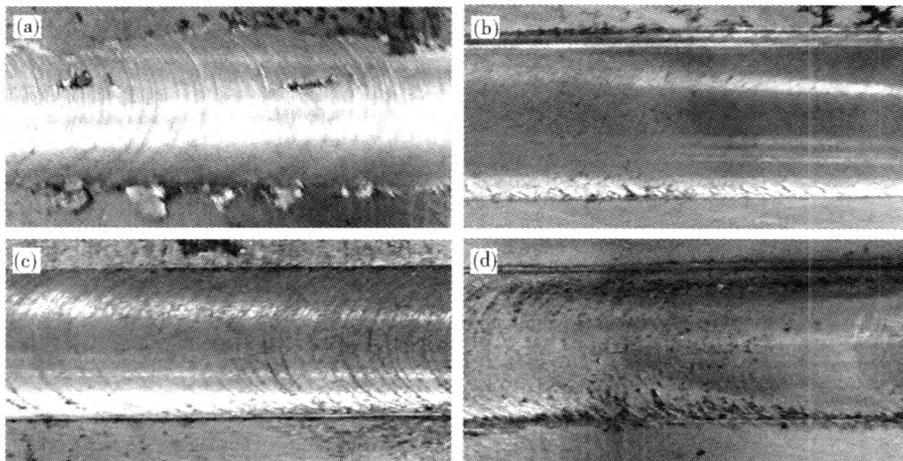


图 1 不同焊接参数下 ZK60-Gd 镁合金搅拌摩擦焊接接头的宏观形貌

(a)750 r/min,120 mm/min;(b)900 r/min,120 mm/min;(c)1350 r/min,120 mm/min;(d)1500 r/min,120mm/min

Fig. 1 Macrographs of FSW ZK60-Gd welds using different welding parameters

2.2 接头的微观形貌

图 2 所示为在旋转速度 1200 r/min、焊接速度 240 mm/min 的焊接参数下试件各个区域的微观组织。图 2(a)为母材区组织,具有典型的挤压组织特征。图 2(b)为热影响区组织,由于热影响区只受到热循环的影响,而无机械力的作用,故晶粒未发生塑性变形,只是随温度的升高而略有增大,并且各部分形成的晶粒大小不一致,但基本保持了原始晶粒的挤压组织特征。图 2(c)为热机械影响区的显微组织,在该区域内,新的再结晶晶粒在被拉长的原始晶粒的晶界处形核,并逐渐取代原始晶粒,过渡为焊核区的组织。图 2(d)为焊核区的微观组织,由于搅拌

头的搅拌作用,与热影响区和热机械影响区相比,在焊核区组织中已看不到大颗粒的第二相粒子。第二相粒子呈弥散分布,晶粒极为细小均匀。

2.3 接头的硬度分布

图 3 为以不同参数搅拌摩擦焊接 ZK60-Gd 镁合金,沿焊接接头横截面中线的显微硬度分布图。由图 3 可见,各个焊接参数下接头的硬度值的变化趋势基本一致,在焊接接头中,焊核区的硬度最高,热影响区的硬度最低。从图 3 中还可以看出,以不同参数焊接时,焊核区的硬度比较接近,最高硬度区即焊核区的宽度略有不同,在旋转速度 1200 r/min 和焊接速度 300 mm/min 时,焊核区的宽度最窄,这是由于在该焊接参数下,热输入量较少的缘故。

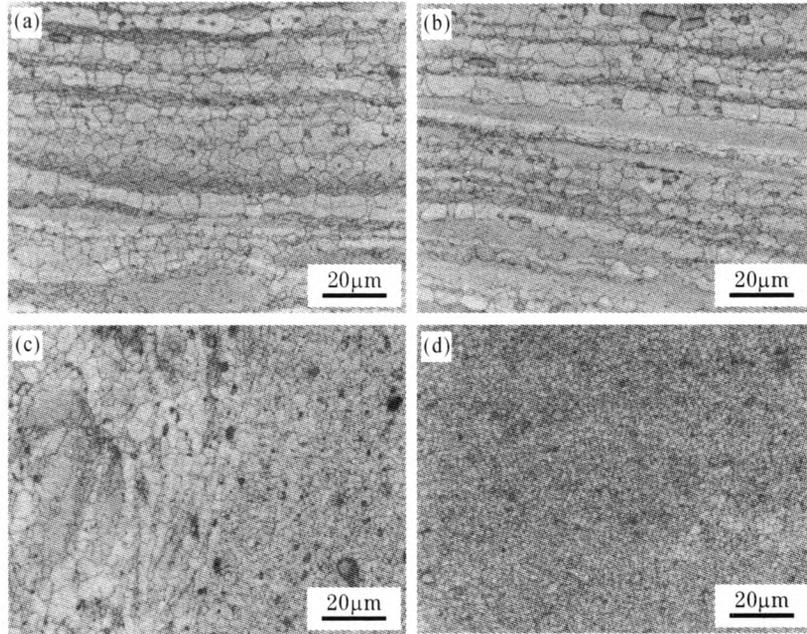


图2 焊接头各区域的微观组织

(a)母材区;(b)热影响区;(c)热机影响区;(d)焊核区

Fig.2 Microstructure in different area of weld joint

(a) parent material;(b) HAZ;(c) HMAZ;(d) weld nugget zone

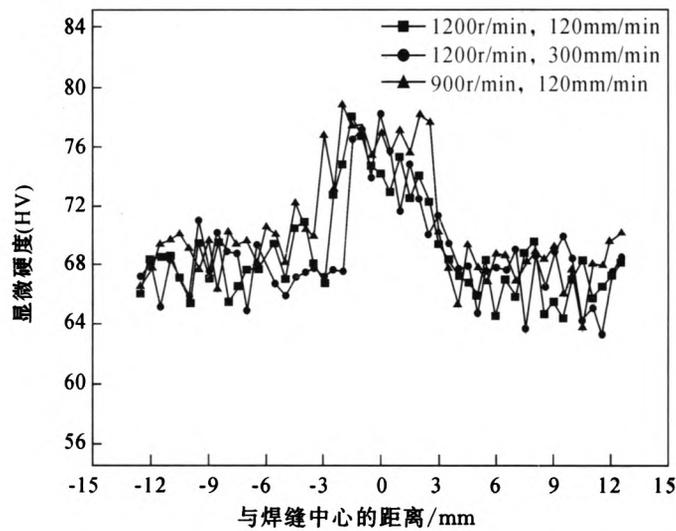


图3 不同参数下焊缝的显微硬度分布

Fig.3 Hardness distribution of different parameters

2.4 接头的力学性能

图4是在搅拌头旋转速度为1200 r/min时,焊接速度对接头抗拉强度影响的实验结果.在搅拌摩擦焊接过程中,由于接头的抗拉强度随着焊接速度的增大而减小.因此,焊接速度为240 mm/min的接头抗拉强度高于其它焊接速度的接头抗拉强度.当

焊接速度达到300 mm/min后,接头由于存在孔型缺陷,导致在拉伸实验过程中出现应力集中,成为裂纹源,并使接头有效承载面积减小,因此其抗拉强度最低.

当焊接速度一定时,接头处的热输入量会随搅拌头旋转速度的增大而增加,焊接接头的抗拉强度

是随搅拌头旋转速度的增大而增大的.但搅拌头的旋转速度过高,所产生的热量会使焊接区内的温度在一定值保持较长的时间,使焊核区的晶粒有足够

时间长,形成粗大组织,这些粗大组织会导致接头的抗拉强度严重下降.

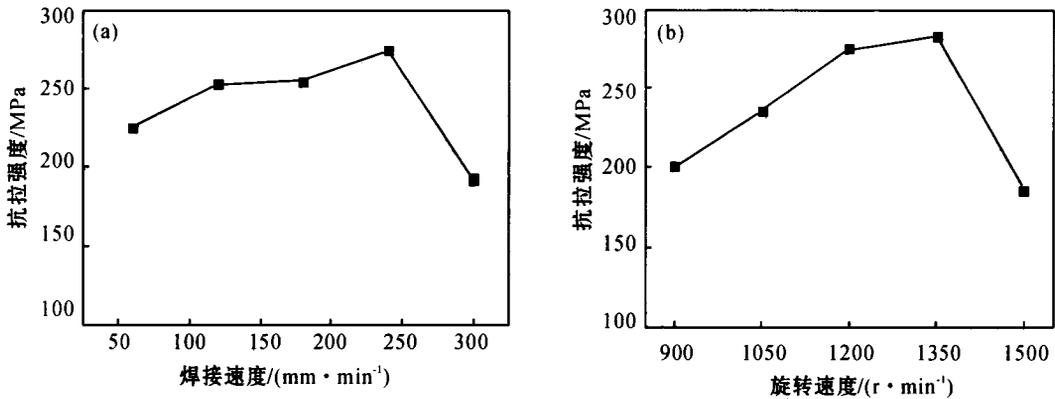


图 4 焊接参数对接头抗拉强度的影响

Fig. 4 Effect of welding parameters on the tensile strength of joints

经过工艺优化,确定在旋转速度为 1350 r/min,焊接速度为 240 mm/min 时,焊接头的抗拉强度达到了最高,为 283 MPa,而挤压态 ZK60-Gd 合金的抗拉强度为 325 MPa,由此可见,焊接头的抗拉强度可达母材的 87.08%.

3 分析与讨论

图 5 为以旋转速度 1200 r/min、焊接速度 60 mm/min 焊接时,母材和接头焊核区的 X 射线衍射

图谱.由于母材为挤压组织,其相组成为 α -Mg 固溶体相、Mg-Zn-Gd 相以及 $MgZn_2$ 相,如图 5(a)所示;经过搅拌摩擦焊后,焊核区仍然存在 Mg-Zn-Gd 相的衍射峰,但 $MgZn_2$ 相的衍射峰完全消失,如图 5(b)所示.这说明在热输入量较大的情况下,接头中的 $MgZn_2$ 可完全固溶进 α -Mg 固溶体而对 Mg-Zn-Gd 相没有影响,并且在焊接过程中也没有形成新的相,接头的相组成主要为 α -Mg 相固溶体和 Mg-Zn-Gd 相.

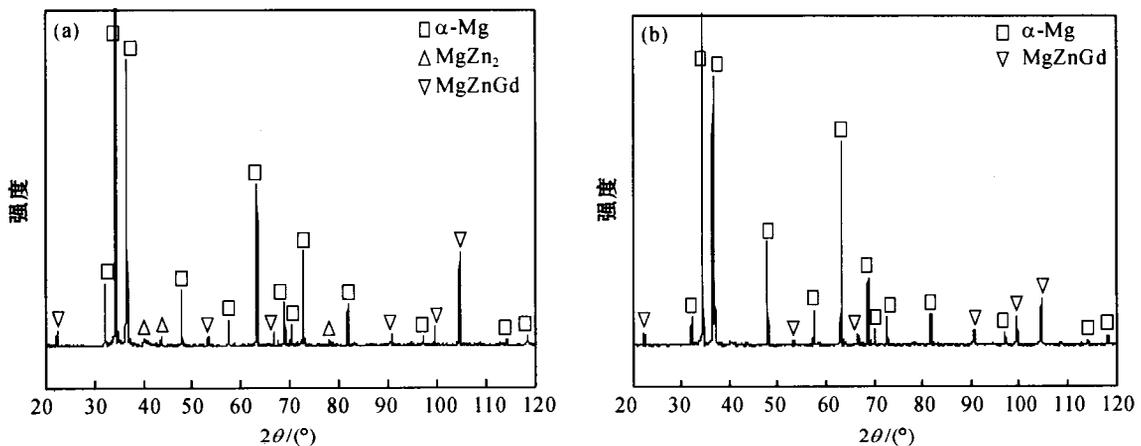


图 5 X 射线衍射图

(a)母材;(b)焊核区

Fig. 5 XRD patterns

(a) PM;(b) weld nugget zone

ZK60 镁合金在添加了 Gd 后,形成了一种由 Gd, Mg 和 Zn 组成的三元相(Mg-Zn-Gd),受挤压时,由于 Mg-Zn-Gd 相的熔点较高,为 510.85 °C^[12],因此,在热挤压过程中只会诱导母材发生动态再结晶形成细小晶粒并弥散地分布在基体中而不会溶解;但 MgZn₂ 相的熔点较低,在热挤压过程中

会部分溶入基体,只剩下少量比较粗大的 MgZn₂ 相(如图 6(a)所示).当对 ZK60-Gd 镁合金进行搅拌摩擦焊接时,同样由于 Mg-Zn-Gd 相属于高温相,强烈的搅拌和热作用也只会使得 Mg-Zn-Gd 相被破碎,并弥散分布;而少量的、粗大的、熔点较低的 MgZn₂ 相已几乎完全消失,溶入固溶体中(如图 6(b)所示).

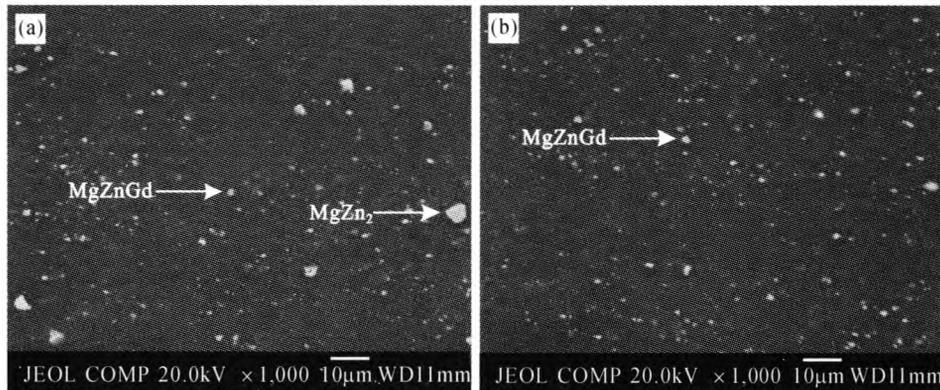


图 6 ZK60-Gd 镁合金微观组织

(a)母材;(b)焊核区

Fig. 6 Microstructure of ZK60-Gd magnesium alloy

(a)PM;(b)welded nugget

焊核区的硬度主要受两个因素控制,一方面是颗粒弥散强化导致的硬度增加,另一方面是再结晶导致的软化作用.对于 ZK60-Gd 镁合金而言,颗粒弥散强化导致硬度增加的因素占主导地位.在搅拌摩擦焊接过程中,一方面发生动态再结晶;另一方面高温 Mg-Zn-Gd 相在焊接时并不会溶解而是更加弥散地分布在基体中,使其硬度增加,因而焊核区的硬度高于母材.

对 ZK60-Gd 镁合金而言,细小的 Mg-Zn-Gd 相产生的弥散强化作用以及晶粒尺寸大小是影响其力学性能的主导因素.在搅拌摩擦焊接过程中,焊核区 Mg-Zn-Gd 相的变化不明显,但是晶粒得到了明显细化;热影响区由于受到循环热的作用,晶粒较母材粗大,根据 Hall-Petch 关系,热影响区为焊接头力学性能的最薄弱环节.实验结果表明,与母材相比,接头的强度和延伸率均有所降低;接头断裂的位置均出现在热影响区,并且最大剪切力是在与拉伸方向呈 45°角分布的基面处发生.接头的热影响区由于在循环热的作用下导致晶粒长大,因此,抗拉强度及延伸率均较母材有所降低.当焊接速度增大时,热输入量降低,则热影响区受到循环热的影响也逐渐降低,晶粒长大的效应也降低,所以抗拉强度会有所提

高,但当焊接速度过大时,焊缝会出现空洞型缺陷,接头的力学性能明显下降.搅拌头转速增大时,虽热输入量增大,但搅拌头对第二相粒子的破坏效应明显增加,第二相粒子分布更加弥散,因此抗拉强度提高,但当搅拌头转速过大时,由于热输入量过大,焊缝组织出现过烧现象,导致抗拉强度明显降低.

4 结 论

(1)当以旋转速度 900~1300 r/min、焊接速度 120~240 mm/min 对镁合金 ZK60-Gd 进行搅拌摩擦焊时,均获得了外观成形良好、内部致密的焊接头.

(2)接头焊核区晶粒得到明显细化, Mg-Zn-Gd 高温相在搅拌头的作用下弥散分布,粗大的 MgZn₂ 相被破碎,并且部分或全部溶入镁基体中.

(3)镁合金 ZK60-Gd 搅拌摩擦焊接头焊核区的硬度高于母材.对焊接头进行拉伸测试的结果表明,断裂均出现在热影响区.

(4)当旋转速度为 1350 r/min,焊接速度为 240 mm/min 时,搅拌摩擦焊接镁合金 ZK60-Gd 接头的抗拉强度最高,为 283 MPa,达母材抗拉强度的 87.08%.

参考文献:

- [1] 陈振华, 严红革, 陈吉华, 等. 镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [2] 戚文军. 广东省镁工业技术路线图[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2010.
- [3] LI Qiang, WANG Qudong, WANG Yingxin, et al. Effect of Nd and Y addition on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-Zn-Zr alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, 427(1): 115-123.
- [4] MUHAMMAD S, LOTHAR W. Microstructure development during extrusion in a wrought Mg-Zn-Zr alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2009, 60(7): 536-538.
- [5] SPIGARELLI S, MEHTEDI M El, REGEV M, et al. High temperature creep and superplasticity in a Mg-Zn-Zr alloy [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2012, 28(5): 407-413.
- [6] 王玉春, 陈民芳, 由臣, 等. Mg-Zn-Zr 表面磷酸钙涂层的制备及其耐蚀性能研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 40(S2): 592-595.
- [7] ZHANG Jing, MA Qi, PAN Fusheng. Effects of trace Er addition on the microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Zr alloy[J]. *Materials & Design*, 2010, 34(9): 4043-4049.
- [8] KIM W J, MOON I K, HAN S H. Ultrafine-grained Mg-Zn-Zr alloy with high strength and high-strain-rate superplasticity [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 538(3): 374-385.
- [9] 谢广明, 马宗义, 耿林. 搅拌摩擦焊接参数对 ZK60 接头微观组织和力学性能的影响[J]. *金属学报*, 2008, 44(6): 665-670.
- [10] 侯军才, 张秋美, 房中学. 锻造 ZK60 镁合金的搅拌摩擦焊工艺[J]. *机械工程材料*, 2009, 33(8): 36-39.
- [11] LEE W B, YEON Y M, JUNG S B. Joint properties of friction stir welded AZ31B-H24 magnesium alloy[J]. *Materials Science and Technology*, 2003, 19(5): 785-790.
- [12] 李杰华, 介万奇, 杨光昱. 稀土元素 Gd 对 Mg-Zn-Zr 镁合金组织和性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(9): 1587-1591.

Microstructure and properties of FSW joints of extruded ZK60-Gd alloy

ZHOU Nan, QI Wenjun, LIU Chang, SONG Dongfu

Institute of Metals Processing and Forming Technology, Guangdong General Research Institute of Industrial Technology, Guangzhou 510650, China

Abstract: The microstructure and properties of the friction stir welding(FSW) joint of ZK60-Gd alloy were investigated by optical microscope(OM), scanning electron microscopy(SEM), microhardness and tensile test. The results show that the appropriate welding parameters are welding speed and rotation speed of stir head, which are $n=120-240$ mm/min and $r=900-1300$ r/min, respectively. Too high or too low heat input may cause defects. Each region of welding joint has obvious features in microstructure, and the nugget region has recrystallization microstructure which is small and uniform. Through the optimization of welding technology, the tensile strength of welding joint can be up to 285 MPa, which is 87.08% of the parent metal. The fracture occurred in the heat affected zone(HAZ).

Key words: extruded ZK60-Gd alloys; friction stir welding (FSW); microstructure; mechanical property