AZ31 与 AZ61 异种镁合金的 TIG 焊研究

Gas Tungsten Arc Welding of Dissimilar Magnesium Alloys as AZ31 with AZ61

彭 建[1,2],周 绸[1],陶健全[1],潘复生[1,2]
(1 重庆大学 材料科学与工程学院,重庆 400044;
2 重庆市科学技术研究院,重庆 401123)
PENG Jian[1,2],ZHOU Chou[1],TAO Jian-quan[1],PAN Fu-sheng[1,2]
(1 College of Materials Science and Engineering,Chongqing University,
Chongqing 400044,China;2 Chongqing Academy of Science
and Technology,Chongqing 401123,China)

摘要:采用 TIG 焊对 AZ31 与 AZ61 镁合金薄板进行连接,分别采用了 AZ31 和 AZ61 焊丝,比较焊接效果的影响。通过显微镜、扫描电镜、X-ray 物相检测等实验方法,分析了两种焊丝焊接接头的外观形貌、显微组织、焊缝析出相及力学性能等差异。研究结果表明:采用 AZ31 和 AZ61 两种焊丝都能完成 AZ31 与 AZ61 镁合金薄板的对焊,获得无缺陷的焊接接头;焊缝区均存在 α-Mg 和 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 两种相,两侧母材存在热影响区,靠近焊缝处晶粒粗化,但 AZ31 侧晶粒粗化比 AZ61 侧明显。采用 AZ31 焊丝与采用 AZ61 焊丝相比,AZ31 母材侧的粗晶区宽度更窄,断裂处更靠近中心线,强度为 161MPa,达到 AZ31 挤压板母材的 64%左右;AZ61 焊丝的焊接接头平均强度为 210MPa,可达到 AZ31 母材的 84%。

关键词:AZ31 镁合金;AZ61 镁合金;TIG 焊;微观组织;力学性能
中图分类号:TG457.14 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-4381(2011)02-0046-06

Abstract: The AZ31 and AZ61 plates in 3 mm thick plates are welded with AZ31 and AZ61 welding wires by TIG method. The influence of welding wires on the strength of welded joints of AZ31 and AZ61 magnesium alloy plates was investigated. The appearance shape, microstructure and patterns of welded joints were analyzed as well as the mechanical properties test by means of OM, SEM, X-ray diffraction and *etc*. The result showed that the appearance shape was good with weather AZ31 or AZ61 welding wire. The welded zone was identified to be composed of α-Mg and β-$Mg_{17}Al_{12}$ phases. The heat affected zones exist both in AZ31 and AZ61 joints, with grains coarser than base metal. Relative to AZ61 welding wire, using the AZ31 welding wire tends to get a coarse grain region of little width, and a fracture point closer to the center line of welding seam, with tensile fracture strength of 161MPa leading to a 64% strength of the AZ31 base metal. With the AZ61welding wire, a coarse grain region of more width and a fracture point a little far from the center line are happened, the strength of the joints reaches to 210MPa, 84% of that of its AZ31 base metal.

Key words: AZ31 alloy; AZ61 alloy; TIG welding; microstructure; mechanical property

镁合金作为最轻的金属结构材料,具有比强度和比刚度高、减震性好和导热性优良等优点,在航空、航天、汽车、通讯等工业领域有广阔的应用前景[1,2]。镁合金制品在工业应用中除了以单个零件工作外,通常还需连接成子系统结构来加强设备的整体性,因而离不开高品质连接技术的支持。镁合金的熔点低、线膨胀系数和热导率高,在焊接过程中与氧、氮的亲和力强,易形成氧化夹杂和脆性相,产生焊接变形和热裂纹等问题,严重影响焊接质量。因而镁合金结构件,尤其不同合金牌号的镁合金结构件之间的连接,成为扩大镁合金材料工程化应用的瓶颈,是亟待解决的关键技术问题[3,4]。

目前镁合金的焊接问题已引起国内外学者极大的关注,但大多是对同种镁合金之间的焊接展开研究,对异种镁合金材料的焊接研究较少。与其他的焊接方法,如搅拌摩擦焊[5]、激光焊[6]、激光-电弧复合焊[7]等相比,钨极氩弧焊(TIG)具有更大的灵活性和适应性,是目前镁合金焊接最适用的焊接方法之一,但异种镁合金之间的 TIG 焊,具有相当的难度,目前国内外尚未就此取得突破性进展。本工作采用钨极氩弧焊

(TIG 焊),研究 AZ31 与 AZ61 异种变形镁合金挤压板材对焊接头的组织特征,并对比不同 Al 含量的焊丝对板材焊缝成形、接头组织及力学性能的影响,为 AZ31 与 AZ61 镁合金板材对焊的实际生产提供必要的实验数据和理论依据。

1 实验

1.1 实验材料

实验材料选用 3mm 厚 100mm 宽的 AZ31,AZ61 镁合金板材,采用 500T 挤压机,在 400℃挤压获得,挤压比为 19。TIG 焊填充材料采用 ϕ2.5mm 的挤压 AZ31 和 AZ61 焊丝。所用 AZ31 和 AZ61 合金的主要化学成分如表 1 所示。

表 1 合金的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of alloy (mass fraction/%)

Alloy	Al	Zn	Mn	Fe	Cu	Si	Mg
AZ31	3.06	0.84	0.35	0.0024	0.0018	0.012	Bal
AZ61	6.29	0.98	0.37	0.0031	0.0089	0.045	Bal

1.2 实验方法

采用 YC-300WX 钨极氩弧焊机进行 AZ31 与 AZ61 镁合金板材的 TIG 对焊实验,采用单面焊双面成型工艺,垫板设 V 型槽通气体保护,选用纯度为 99.99%的氩气为保护气体。焊前对镁合金焊丝以及待焊板料距离焊接处 20～30mm 范围内的表面进行机械清理,使之露出金属光泽;为了防止焊件变形,采用夹具压紧。焊后采用线切割截取拉伸试样,试样按照 GB/T 2651—2008 标准加工。采用光学显微镜、TESCAN VEGA 扫描电子显微镜、D/MAX-2500 型 X 射线衍射分析仪等设备,分析焊接接头的微观组织、析出相、力学性能及断口形貌分析。

2 结果与讨论

2.1 焊接工艺参数及焊缝外观

焊接工艺参数对焊缝的宏观形貌及接头性能的影响较大,通过对焊接参数的调试,采用 AZ31 和 AZ61 焊丝作为填充材料均获得了成形良好的焊缝。图 1 为采用 AZ61 焊丝的接头正面和背面的焊缝形貌,焊缝正面呈明显的鱼鳞波纹,均匀饱满,无明显的气孔、裂纹、焊瘤、未熔合等表面缺陷;背面已熔透,凸起部分连续均匀,表面无氧化发黑现象,焊后的板料保持平整。保证焊缝成形良好的工艺参数,如表 2 所示。

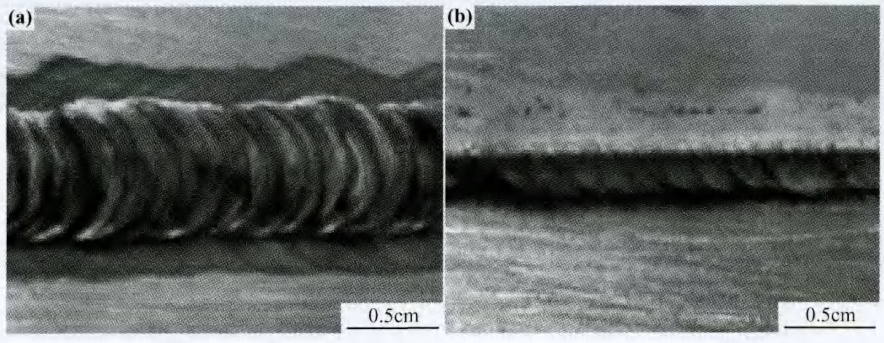

图 1 采用 AZ61 焊丝焊接的焊缝外观形貌 (a)正面形貌;(b)背面形貌

Fig. 1 Appearances of joint with AZ61 welding wire (a)the right side;(b)the back side

表 2 TIG 焊接条件参数

Table 2 Parameters of TIG welding

Parameter	Value
Electrode diameter/mm	2.4
The diameter of welding wire/mm	2.5
Current/A	60
Welding speed/(mm·s^{-1})	2-3
Ar flow rate/(L·min^{-1})	13

2.2 焊接接头的显微组织

对 AZ31,AZ61 镁合金板材截面进行组织分析,其挤压合金端面的组织分别如图 2(a)和图 2(b)所示,图的左右方向为挤压板材的宽度方向,图的上下方向为厚度方向。AZ31 和 AZ61 挤压板材的微观组织比较相似,其晶粒按大小均可分为 20～30μm 的大晶粒和 5～10μm 的小晶粒,晶粒形状均为等轴状,小晶粒的晶界轮廓更接近圆形,大晶粒的部分晶界呈平直状。该组织特征表明热变形后的静态再结晶进行不充分,原因在于热挤压后的板材因为厚度小,冷却快,新的再结晶晶粒来不及充分长大;该挤压板材所采用的挤压比为 19,仅能保证横截面各部位均产生变形[8],但尚不能产生足够大的形核率,以保证挤压合金各微观局部出现更多细小再结晶晶粒,促使变形组织更均匀更细小。

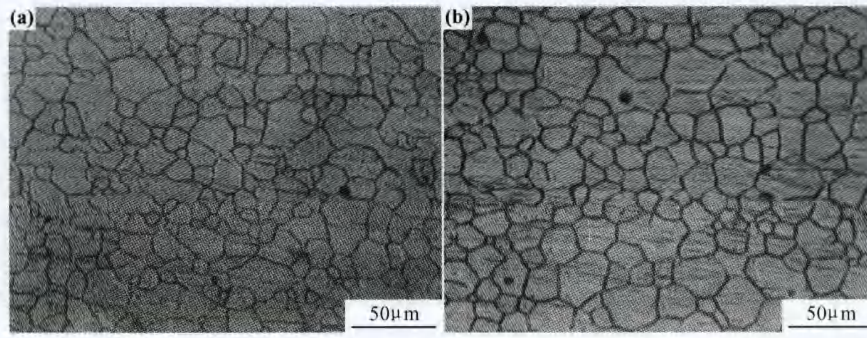

图 2 AZ31 和 AZ61 挤压板材 (a)AZ31 母材;(b)AZ61 母材

Fig. 2 Microstructure of AZ31 and AZ61 extruded sheet (a)AZ31 base metal;(b)AZ61 base metal

图 3 为 AZ31 与 AZ61 挤压板材采用 AZ61 焊丝的焊接接头组织,其中图 3(a)为 AZ31 侧热影响区,图 3(b)为焊缝熔合区,图 3(c)为 AZ61 热影响区。AZ31 侧的热影响区的晶粒相对于 AZ31 原挤压态合金晶粒变大,尤其是原有的小晶粒尺寸由 5～10μm 变为 20～30μm 左右,而原有的 20～30μm 大晶粒则变大为45～55μm 左右。热影响区内小晶粒尺寸长大优先大晶粒的结果,使得晶粒尺寸的均匀性有所改善,尤其是靠近熔合区的位置,几乎全是 40μm 以上的大晶粒。AZ61 侧热影响区与原挤压态合金的组织变化不大,与原 AZ61 挤压态合金相比,稍远离熔合区的位置仍由 20～30μm 的大晶粒和 5～10μm 的小晶粒构成,晶粒尺寸变化不大;靠近熔合区的位置,受焊接热源的影响,晶粒尺寸略微变大,形成粗晶区,但粗化程度远不

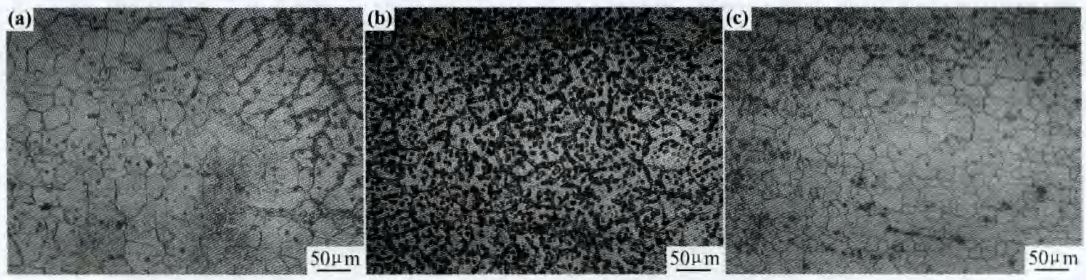

图 3 采用 AZ61 焊丝的焊接接头组织

(a)AZ31 侧热影响区;(b)焊缝熔合区;(c)AZ61 侧热影响区

Fig. 3 Microstructures of joint with AZ61 welding wire

(a)the heat affected zone of AZ31 side;(b)the weld zone;(c)the heat affected zone of AZ61 side

及 AZ31 侧热影响区内的晶粒。

图 4 为 AZ31 和 AZ61 挤压板材采用 AZ31 焊丝的对焊接头。受焊接热循环的影响,AZ31 侧靠近熔合区的晶粒相对于 AZ31 原挤压态合金晶粒明显变大,形成了一层由 3～4 个 50μm 以上的大晶粒组成的粗晶区,远离熔合区的组织基本保持与原AZ31挤压

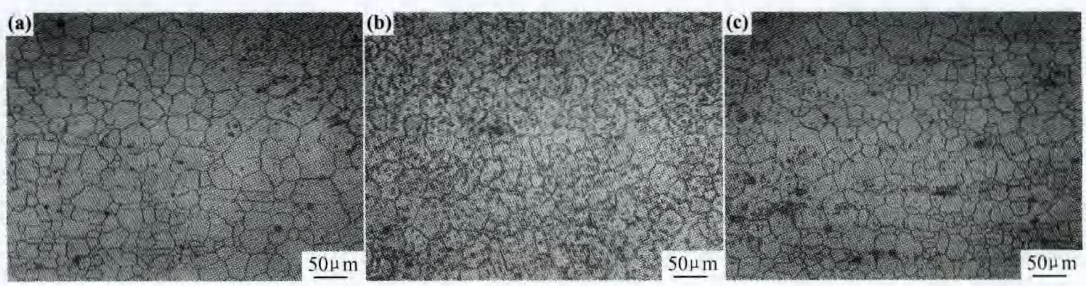

图 4 采用 AZ31 焊丝的焊接接头组织

(a)AZ31 侧热影响区;(b)焊缝熔合区;(c)AZ61 侧热影响区

Fig. 4 Microstructures of joint with AZ61 welding wire

(a)the heat affected zone of AZ31 side;(b)the weld zone;(c)the heat affected zone of AZ61 side

态合金相同的组织。与图 3 中采用 AZ61 焊丝的焊接接头的 AZ31 侧相比，粗晶区的宽度小，由粗晶区向母材细晶区的过渡位置明显。AZ61 侧的热影响区与原挤压态合金的组织相近，靠近熔合区的位置，晶粒存在轻微的粗化，形成不十分明显的粗晶区。

比较采用 AZ61 焊丝和 AZ31 焊丝的焊缝熔合区，分别如图 3(b)和图 4(b)所示，采用 AZ61 焊丝的熔化区铸态组织的枝晶形貌特征更明显，枝晶间的黑色化合物更多。从网状枝晶间化合物分布的形状分析，两者的枝晶臂大小及枝晶间间距相近，根据两者焊接工艺参数及工装条件相同，可以推断其凝固速度相当，凝固组织的晶粒尺寸应该相近。根据从图 3(b)中隐约勾勒出来的部分晶界，可粗略估计铸态合金的晶粒大小在 50μm 以上。

2.3 焊缝区的析出相

两种焊接接头的焊缝区的 X 射线衍射结果表明，二者都存在 α-Mg 和金属间化合物 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 两种相，如图 5 所示，采用 AZ61 焊丝接头的 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 衍射峰强度明显高于 AZ31 焊丝接头。由镁铝二元相图[9]可知，在平衡凝固过程中，AZ31 中的 Al 几乎全固溶于镁中形成 α 固溶体。在焊接过程中，熔化金属向两边快速传热，冷却速度快，在非平衡凝固过程中生成少量的 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 化合物相。AZ61 焊丝铝含量较高，在凝固过程中有更多 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 相析出。

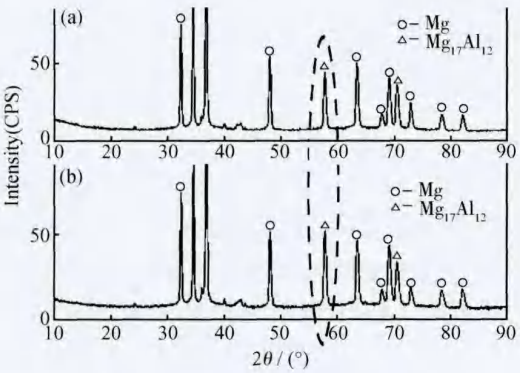

图 5 焊缝区的 X 射线衍射分析图

(a)采用 AZ31 焊丝；(b)采用 AZ61 焊丝

Fig. 5 X-ray diffraction pattern of weld zone

(a)using the AZ31 wire; (b)using the AZ61 wire

2.4 焊接接头的力学性能分析

2.4.1 焊接接头拉伸性能分析

分别对 AZ31 挤压态合金、AZ61 挤压态合金，以及分别采用 AZ31 和 AZ61 合金焊丝作为填充料的 AZ31 与 AZ61 挤压板材对焊接头进行室温拉伸实验，结果如表 3 所示。AZ31 焊丝的焊接接头平均强度为 161MPa，最高只达到 AZ31 母材的 64%左右，断裂处为 AZ31 一侧，且距离焊缝中心线为 4.5mm 左右，距离焊缝熔合线约为 1mm。加 AZ61 焊丝的焊接接头平均强度为 210MPa，最高可达到 AZ31 母材的 84%，断裂处仍为 AZ31 一侧，距离焊缝中心线 5mm 左右，距离焊缝熔合线约为 1.5mm。

表 3 合金及接头的抗拉强度(MPa)

Table 3 Tensile strength of welded joints(MPa)

Sample	1	2	3	The mean value
AZ31 as-extruded	248	250	255	251
AZ61 as-extruded	285	286	290	287
Using AZ31wire	143	165	176	161
Using AZ61wire	191	220	220	210

2.4.2 焊接接头的显微硬度分布

图 6 为焊接接头的焊缝附近组织维氏硬度分布图。当填充材料为 AZ31 焊丝时，AZ31 一侧的硬度值较低，AZ61 一侧的硬度值较高，焊缝区的硬度值居中。AZ31 焊丝熔化时，部分 AZ61 基体合金融入，提高了焊缝区的 Al 含量，使得该区域合金的固溶强化和第二相强化相对于 AZ31 合金有所提高，同时由于快速凝固使得铸态组织保持一定程度的细化，因此焊缝区的硬度和强度居于两侧的 AZ31 与 AZ61 挤压态合金之间。在 AZ31 一侧靠近焊缝区，距中心线 4.5mm 处，硬度值最低，结合显微组织和拉伸断裂结果可知，该处为 AZ31 侧热影响区的粗晶区，是拉伸时产生断裂的地方。从图 6(a)的显微硬度分布看，添加 AZ31 焊丝时，AZ31 侧的粗晶区范围比较窄，与图 4(a)相吻合。在 AZ61 侧距离中线 5mm 左右，也存在一个硬度值的波谷，对应于 AZ61 侧显微组织分析中的粗晶区，但该粗晶区的硬度高于 AZ31 一侧，而拉伸断裂发生在 AZ31 一侧，AZ61 侧的粗晶区对焊接接头的拉伸性能不产生影响。

当填充材料为 AZ61 焊丝时，AZ31 一侧的硬度值较低，AZ61 一侧的硬度值较高，而在焊缝区的硬度值出现最大值。这与 AZ61 焊丝熔入焊缝时，焊缝区的 Al 含量显著增多，使得更多的 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 相析出，加之快速凝固使得铸态组织保持一定程度细化，使得焊缝区的硬度大于其他区域。在 AZ31 一侧的距离中心线 5mm 到 7mm 范围内，出现较宽的硬度值低谷，这与图 3(a)显微组织分析中粗晶区范围较大相吻合。断裂发生在距中心线 5.5mm 左右，处于粗化区域之中。在 AZ61 一侧距离中线 4mm 左右，也存在硬度值波谷，与图 3(c)显微组织显示的位置相吻合。

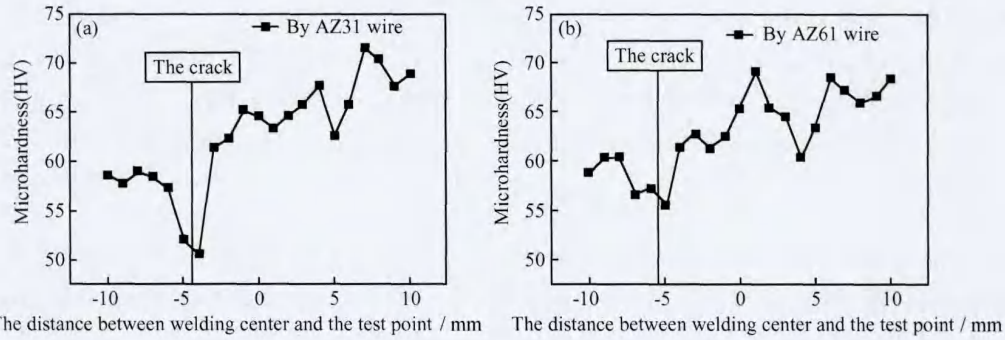

图 6 AZ31(a)与 AZ61(b)焊接头的显微硬度分布

Fig. 6 Microhardness profile of the AZ31(a) and AZ61(b) joint

2.4.3 焊接接头的断口分析

两种焊接接头断裂前无明显的缩颈，断口 SEM 扫描结果如图 7 所示，断口表面均呈灰暗色，采用 AZ31 和 AZ61 焊丝的焊接接头 AZ31 一侧断裂处的断口形貌相似，存在解理和塑坑的混合，呈现部分脆性断裂的形貌特征。对比图 7(a)与图 7(b)可以发现，采用 AZ61 焊丝的断口上，韧窝数量较多而且较深，其焊接接头的拉伸强度也稍高于采用 AZ31 焊丝的强度。

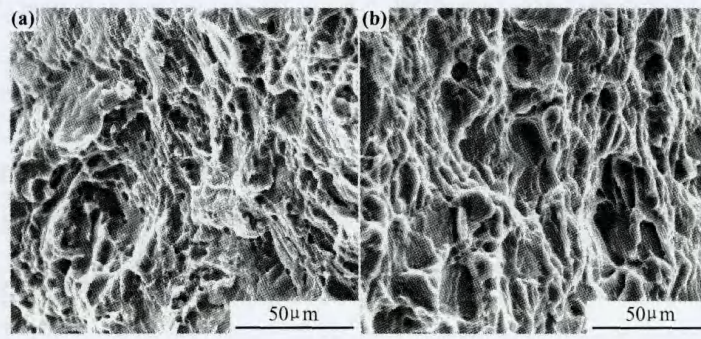

图 7 拉伸断口的微观形貌 (a)采用 AZ31 焊丝；(b)采用 AZ61 焊丝

Fig. 7 Tensile fracture morphology (a)using the AZ31 wire; (b)using the AZ61 wire

综上所述，AZ31 和 AZ61 镁合金板材对焊时，焊缝附近的组织受焊接热循环过程的影响，焊缝中心和热影响区的晶粒均比挤压态母材合金的晶粒粗大，AZ31 一侧热影响区的晶粒粗化比 AZ61 一侧更为明显。根据 Petch 理论可知[10]，焊接接头的 AZ31 一侧的热影响区的静载抗拉强度必然存在较大的损失，成为焊接接头结构承受高载荷时易发生断裂的薄弱区域。通过换用 AZ61 焊丝，以及调整其他焊接工艺参数，使得 AZ31 一侧热影响区的强度改善，是提高 AZ31 和 AZ61 板材对焊接头强度的可行途径。

3 结论

(1) AZ31 和 AZ61 镁合金挤压板材，分别采用 AZ31 和 AZ61 合金焊丝作填充料，均能获得成形美观，无明显缺陷的焊缝，可取 TIG 焊工艺参数为：钨极直径 2.4mm，焊丝直径 2.5mm，焊接电流 60A，焊接速度 2～3mm/s，氩气流量 13L/min。

(2)采用 AZ31 或 AZ61 焊丝时，焊接接头的焊缝区铸态组织均由 α-Mg 和 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 两相组成。AZ31 一侧粗晶区晶粒的粗化程度比 AZ61 一侧明显；采用 AZ31 焊丝时，AZ31 侧的粗晶区宽度比较窄，采用 AZ61 焊丝时，AZ31 侧的粗晶区较宽。

(3)采用 AZ31 焊丝的焊接接头平均强度为 161MPa，达到 AZ31 挤压板母材的 64%左右，AZ31 一侧断裂处距焊缝中心线为 4.5mm 左右，对应硬度值分布最低处。采用 AZ61 焊丝的焊接接头平均强度为 210MPa，可达到 AZ31 母材的 84%，断裂处仍为 AZ31 一侧，距离焊缝中心线 5mm 左右，处于硬度值最低的区域。

参考文献

[1] 潘复生，韩恩厚. 高性能变形镁合金及其加工技术[M]. 北京：科学出版社，2007.

[2] MORDIKE B L, EBERT T. Magnesium properties applications potential [J] Material Science and Engineering A, 2001, 302(1): 37-45.
[3] 刘正,王越. 镁基轻质材料的研究与应用[J]. 材料研究学报, 2000,14(5):450-456.
[4] 冯吉才,王亚荣,张忠典. 镁合金焊接技术的研究现状及应用[J]. 中国有色金属学报,2005,15(2):165-178.
[5] 张华,林三宝,吴林,等. 搅拌摩擦焊研究进展及前景展望[J]. 焊接学报,2003,24(3):91-96.
[6] 郭永强,孙荣禄. 镁合金激光焊接技术的研究现状与发展[J]. 激光杂志,2008,29(5):11-12.
[7] 陈俐,董春林,吕高尚,等. YAG/MAG 激光电弧复合焊工艺研究[J]. 焊接技术,2004,33(4):21-23.
[8] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
[9] NAYEB-HASHEMI A A, CLARK J B. Phase diagrams of binary magnesium alloys [M]. Ohio: ASM International, Metal Park, 1988.
[10] HESIOP J, PETCH N J. The ductile-brittle transition in the fracture of α-iron, II [J]. Philosophical Magazine, 1958, 34 (3):1128-1136.

基金项目:科技部国际科技合作项目(2010DFR50010);重庆市科委科技计划攻关重点项目(CSTC,2009AB4006)
收稿日期:2010-07-19;**修订日期:**2010-11-15
作者简介:彭建(1969—),男,博士,副教授,主要从事轻合金新材料和新工艺研究,联系地址:重庆沙坪坝区沙正街 174 号,重庆大学材料学院(400030),E-mail:jpeng@cqu.edu.cn

* *

(上接第 34 页)
程中,无论是顺式还是反式 1,4 丁二烯结构,氢化后最终都将形成如下的结构单元。

$$-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-\underset{\underset{\displaystyle C\equiv N}{|}}{CH}-$$

这种结构单元的重复使得 HNBR 在拉伸的情况下产生结晶,提高了硫化橡胶的拉伸强度[8-10]。丙烯腈含量越高,这种交替结构单元越多,结晶部分的比例越大,因而 HNBR 的拉伸强度越大,玻璃化转变温度也越高。

3 结论

(1)HNBR 与 NBR 在红外光谱上存在明显差别,HNBR 橡胶在 720~730cm^{-1} 处具有明显的$(CH_2)_n$ ($n>4$)吸收峰,据此可以初步鉴别 HNBR 与 NBR 橡胶。丙烯腈含量越高,由 $-C\equiv N$ 基团引起的 2240cm^{-1} 吸收峰的强度更强。

(2)HNBR 的热分解温度普遍高于 NBR,证明 HNBR 在高温下更加稳定。随丙烯腈含量及氢化度的增大,HNBR 的初始热分解温度升高。分子结构中双键含量增多,低温性能变好。丙烯腈含量增大,HNBR 玻璃化转变温度增高,拉伸强度增大,这与分子结构中交替结构单元增多引起的分子结晶有关。

参考文献

[1] WRANA C, REINARTKZ L, HANS R. Winkelbach, Therban® — The high performance elastomer for the new millennium [J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2001, 286(11): 657-662.
[2] CHAUDHRY R A, HUSSEIN I A, AMIN M B, et al. Influence of molecular parameters and processing conditions on degradation of hydrogenated nitrile butadiene rubber [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 97(4):1432-1441.
[3] THAVAMANI P, KHASTGIR. Compatible blends of ethylene-vinyl acetate copolymer and hydrogenated nitrile rubber [J]. Advances in Polymer Technology, 2004, 23(1):5-17.
[4] 于世林,李寅蔚. 波谱分析法[M]. 2 版. 重庆:重庆大学出版社, 1994.
[5] BIELIŃSKI D M, ŚLUSARSKI L , WŁOCHOWICZ A, et al. Structure and mechanical properties of nitrile rubbers modified with iodine[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1998, 67 (3):501-512.
[6] GB/T 7764-2001,橡胶鉴定红外光谱法[S].
[7] PATRI M, REDDY C V, ARASIMHANC N, et al. Sequential interpenetrating polymer network based on styrene butadiene rubber and polyalkyl methacrylates [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 103(2):1120-1126.
[8] 王珍,栗付平,王景鹤,等. 氢化丁腈橡胶的结构与低温性能[J]. 北京科技大学学报,2006, 28(Suppl1):370-372
[9] DAS P K, GANGULY A, BANERJI M. Electron-beam curing of hydrogenated acrylonitrile-butadiene rubber [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 97(2):648-651.
[10] SEVERE G, WHITE J L. Physical properties and blend miscibility of hydrogenated acrylonitrile-butadiene rubber [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2000, 78(8):1521-1529.

收稿日期:2010-07-15;**修订日期:**2010-11-10
作者简介:章菊华(1966—),女,硕士,高级工程师,从事高分子材料研制及应用研究,联系地址:北京市 81 信箱 70 分箱(100095),E-mail:juhua.zhang@biam.ac.cn