

第十一次全国焊接会议 论文集

(第 1 册)



中国机械工程学会焊接学会

第十一次全国焊接会议论文集

(第 1 册)

中国机械工程学会焊接学会

《第十一次全国焊接会议论文集》包括大会报告 5 篇、中国机械工程学会焊接学会各专业委员会推荐的论文 307 篇，分 2 册出版，各册内容如下：

第 1 册：大会报告、钎焊及特种连接专业委员会（I）、切割专业委员会（II）、堆焊及表面工程专业委员会（III）、金属焊接性及焊接材料专业委员会（IV）、压力焊专业委员会（V）、高能束及特种焊接专业委员会（VI）。

第 2 册：焊接生产制造与质量保证专业委员会（VII）、焊接力学及结构设计与制造专业委员会（VIII）、熔焊工艺及设备专业委员会（IX）、计算机应用技术专业委员会（X）、机器人与自动化专业委员会（XI）。

第十一次全国焊接会议论文集

Di Shi Yi Ci QuanGuo HanJie HuiYi LunWen Ji

责任印制：荆体贤 封面设计：杨桂凤

黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂印刷

开本 880×1230 毫米 1/16•印张 77.5

字数：1 300 千字 印数：1 000

2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月第 1 次印刷

镁合金结构及焊接

清华大学 潘际銮

摘要: 从战略高度阐明了研发镁合金结构材料的重要意义和它的应用领域, 讨论了镁合金的可焊性, 介绍了镁合金焊接的新成果。

关键词: 镁合金 结构材料 可焊性 焊接方法

1 新结构材料的研发是提高工业技术水平的主要支柱

工业装备的主要部分是由结构材料制成的, 结构材料的性能决定了工业装备的水平, 以煤电工程为例, 温度越高, 其热效率越高。如果蒸汽参数由亚临界 540/540℃, 17.5MPa 提高到超临界 600/600℃, 25-30MPa, 热效率可提高 6%, 发电煤耗从 290g/kwh 降为 272g/kwh。以一台 60 万千瓦机组计算, 每年可节约 60 万吨标煤。我国目前火力发电设备年产超过 3000 万千瓦, 照此计算, 新生产的火力发电设备每年可节约 300 万吨标煤, CO₂ 的排放量也可大大降低。如果能将蒸汽温度提高到 700℃, 则其热效率将更高。但是由于高温材料研发的困难, 目前实际上是不可能实现的^[1]。

2 结构材料的研发, 重要要求是可焊性

据统计, 钢产量的 45% 要用焊接才能制成工业装备, 因此可焊性就是研发结构材料的关键。以大型铁路桥梁为例, 我国已建成采用焊接结构的有九江大桥, 芜湖大桥, 前者所使用的钢材为 15MnVNq, 其力学性能为 $\sigma_b=560\text{MPa}$, $\sigma_s=420\text{MPa}$, 后者为 14MnNbq, 其力学性能为 $\sigma_b=490\text{MPa}$, $\sigma_s=340\text{MPa}$ 。可见强度都不是很高, 主要原因有二: 一是铁道桥梁要求非常好的抗疲劳和抗断裂性能, 二是要求很好的可焊性。很难找到满足这两项要求的合格钢材。目前我国正在建设天兴洲桥, 如果能将钢材的强度 σ_s 提高到 450MPa, 则可由 3 片 (3 索面) 减为 2 片 (2 索面), 其制造工作量可减少 1/3, 节约钢材约 1/3。但是研发这种钢材目前仍是困难的, 因为为保证桥梁的抗疲劳和断裂性能, 保证厚钢板 (50mm) 的可焊性, 其屈强比必须 ≤ 0.75 , 焊接线能量 ≥ 45 千焦, -40°C 时冲击韧性 $\geq 120\text{J}$ 。而研发这种钢材, 还需要花很多力气。如果再提高钢材强度, 困难就更大^[2]。

3 21 世纪的绿色结构材料——镁合金^[3]

3.1 镁合金的特点

镁合金最重要的特点是在金属中它的比重最小,钢铁为 7.8、铝为 2.7、而镁为 1.8,因此它的强度和比刚度都高,此外,它尚具有导热、导电性能好,阻尼减震性、电磁屏蔽性好等特点,镁合金易于加工成型,更重要的是它很容易回收,很容易降解,因此它是非常珍贵的绿色结构材料。

3.2 镁合金在地球上的储量

地球上常用金属矿产资源趋于枯竭,铝和铁可开采 100-300 年,铜、铝、锌可开采几十年,而镁则是取之不尽,用之不竭,它在地壳中约占 2.3%,海水中镁的储量为 2.1×10^{15} 吨,盐湖中镁的储量巨大,三大结构材料可开采年限见图 1。

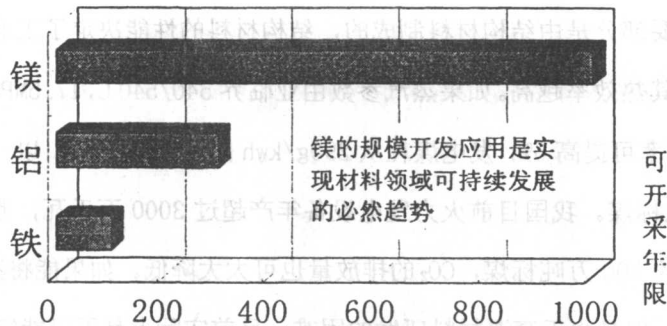


图 1 三大工程材料的可开采年限

3.3 我国镁及镁合金工业发展现状

我国是镁金属生产大国,镁的蕴藏丰富,镁资源占全球总储量的 22.5%。我国的菱镁矿资源总量 31.45 亿吨,符合炼镁要求的一、二级矿占 78%。同时,储量巨大的白云矿和青海的盐湖,也含有十分丰富的镁资源。白云矿资源已探明储量在 40 亿吨以上,青海盐湖氯化镁 32 亿吨,硫酸镁 16 亿吨。较低的投资成本,丰富的煤炭资源,低成本的原料供应,以及充裕的劳动力优势,都使镁在中国的生产具有良好的经济性和竞争性。目前,我国的原镁产量占全球产量的 40%,是世界上第一大镁生产国和出口国。2001 年,全国原镁产量约 20 万吨,其中年生产能力在 10000 吨以上的有 3 家,3000 吨以上的有 22 家,1000~3000 吨的有 50 余家。

我国已将“镁合金应用与开发”列为国家计委和科技部联合下发的“十五”国家科技发展规划中材料领域的重点任务,同时“镁合金应用开发与产业化”作为十五计划的第一批项目已在 2001 年 8 月正式启动。最终目标是充分发挥我国的镁资源优势,通过建立镁合金技术创新体系,加强镁合

金应用开发, 建立具有国际竞争力的镁合金高新技术产业群, 将镁资源优势转化为经济优势。

3.4 新世纪对材料提出的新要求

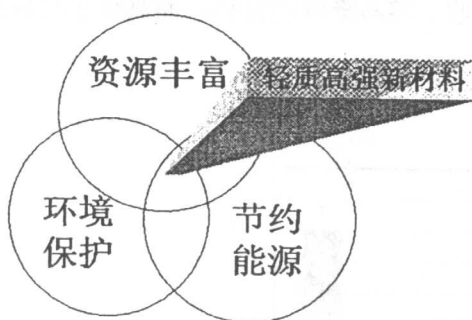


图2 新世纪对材料提出新的要求

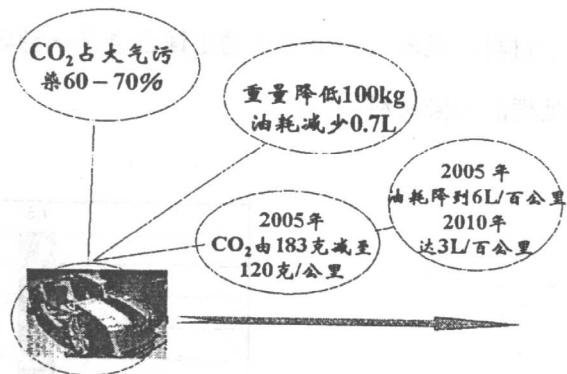


图3 欧洲环保新标准

新世纪对材料的要求有三方面, 见图2。材料的发展, 必须用三方面的指标作为衡量的法则, 一是资源丰富, 二是节约能源, 三是环境保护。例如在环保方面, 欧洲的新标准如见图3所示。在大气中汽车的 CO_2 排放量占 60-70%, 如果汽车重量能降低 100kg, 则其耗油量可减少 0.7L/百公里。按欧洲标准, 耗油量 2005 年要降到 6L/百公里, 2010 年降到 3L/百公里, 这样 2005 年 CO_2 由 183/公里克减到 120 克/公里。为达到以上要求, 研发镁合金结构是一个极为重要的方向。世界各国非常重视, 都制定了发展 Mg 合金的规划, 见图4。



图4 各国政府高度重视

3.5 镁合金与高分子材料的比较

当前高分子材料在工业中作为结构材料非常普遍, 高分子材料的比重也非常低, 只有 1.23, 低于镁合金材料, 然而镁合金具有极大的优越性, 它的扭转弹性、拉伸强度、散热性能等都大大高于高分子材料, 见图 5。更主要的是镁合金是一种容易回收、容易降解的材料, 而高分子材料是一种难以处理的污染材料。

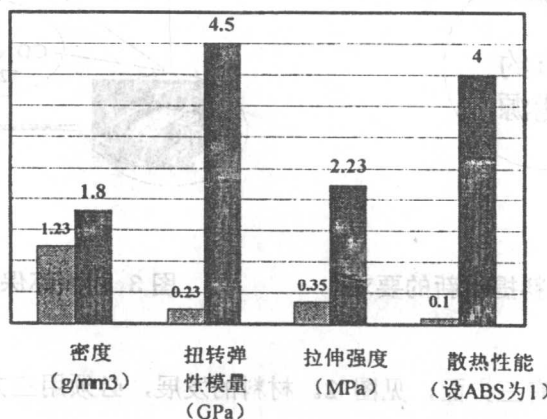


图 5 镁合金与 ABS 塑料的性能比较

4 镁合金的应用前景

镁合金的应用前景甚为广阔, 但需进行大力开发。

4.1 镁合金在汽车上的应用

世界各国汽车工业非常重视镁合金的应用, 其原因就是它可以大大降低车重, 减少油耗, 降低 CO₂ 排放量, 在汽车上有很多部件可以采用镁合金代替钢材和高分子材料, 见图 6, 很多汽车工业已用铝代替部分钢材, 现在正努力以 Mg 代替 Al 材料, 如我国长安公司计划到 2004 年实现单车使用镁合金 10 公斤, 装车 4 万辆; 隆鑫集团计划实现单车使用镁合金 4 公斤, 装车 20 万辆。目前, 集原料生产、铸造加工、应用开发、装备为一体的镁合金产业格局在重庆已基本形成。美国在 2000 年开始了一项扩大镁合金应用的 4 年计划。这个庞大的项目将由美国汽车协会执行, 预计将研制出先进的抗蠕变镁合金以生产汽缸体、发动机盖、机油盘和变速箱等在高温下工作的汽车零件。据预测, Mg 在汽车上的应用, 到 2010 年将达到 300000 吨, 见图 7。

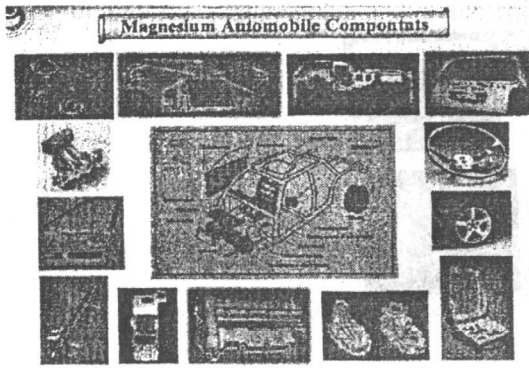


图 6 镁合金在汽车上的应用

Applications of Mg alloy for automobile

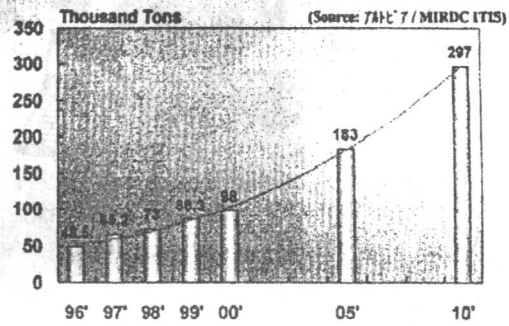


图 7 镁在汽车上的应用预测（至 2010 年）

4.2 镁合金在国防军工领域的应用

据统计，结构重量降低 1kg 可节约美元：汽车 6.6 美元；民用航空 660 美元；军用飞机 6600 美元；人造卫星每减轻 1kg，运载火箭可减轻 500kg，约节省 1000 万美元；喷气发动机每减轻 1kg，飞机可减轻 4kg，升限可提高 10 米。因此在军用飞机、宇航运载工具、宇航机器人等领域已广泛利用镁合金，见图 8、9。

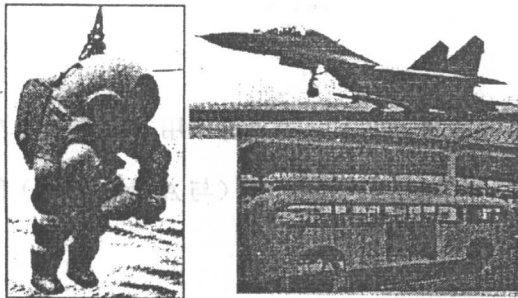


图 8 镁合金的早期和现代应用

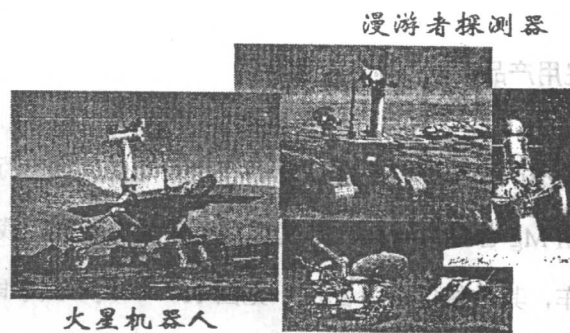


图 9 镁材料应用于宇航结构件

4.3 镁合金在电子产品领域应用

电子产品中，目前大量使用高分子材料，如电视机、计算机、显示器、投影机等外壳都是塑料制成，这些产品淘汰很快，造成大量废弃污染材料，它不能降解，又不好燃烧，所以势必以 Mg 合金代替，实际上现在已经有部分产品改用 Mg 合金，但是还只是处于开始阶段，见图 10。

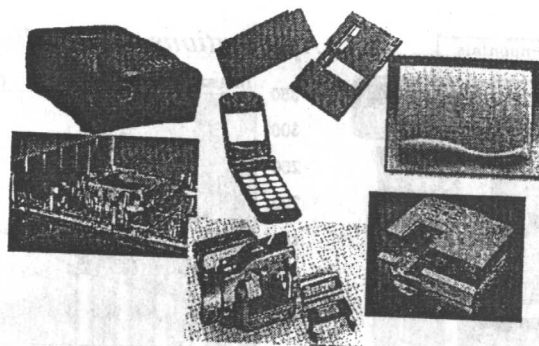


图 10 镁合金在电子产品领域应用

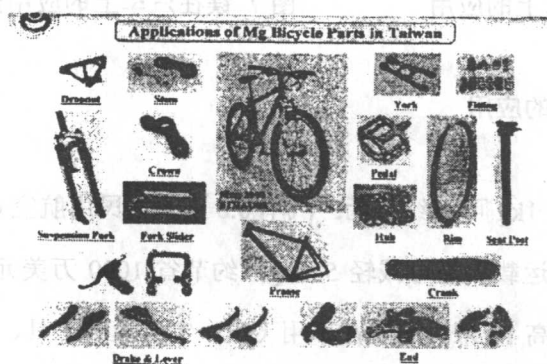


图 11 镁合金自行车

4.4 民用产品

民用产品用也有十分广泛的应用前途，例如自行车，原以钢为结构，有部分改用 Al 为结构，如若改用 Mg 合金为结构，则其重量可以大大降低。我国已有厂家生产 Mg 合金（与 Al 混合结构）的自行车，其重量仅有 7 公斤，见图 11，一人一只手即可提起行走。

5 研发 Mg 合金的主要矛盾和问题

5.1 为研发 Mg 合金需要解决的问题

- A. 成份设计和性能的改善
- B. 高温蠕变强度
- C. 先进的成型技术及装置
- D. 表面处理技术

E. 链接技术

5.2 镁合金的可焊性

- A. 镁合金的结晶温度区大, 易于产生热裂纹。图 12 所示为 Mg-Al 合金的相图^[5], 图 13 为 Al-Cu 合金的相图^[4]。可见其共晶点温度相差 100 C 左右。
- B. 镁的沸点温度低, 约为 1100 °C。温度进一步升高后, 其蒸气压比在相同温度下的 AL 合金要高 4-5 倍。见表 1^[5]。因而焊接时温度一旦过高, 镁就会气化, 产生爆炸形成飞溅。
- C. Mg 对氧的亲合力大, 其氧化物比重较大, 而容易形成夹杂。
- D. Mg 在接近熔化温度时, 能与空气中的氮强烈化合生成脆性的镁的氮化物, 使接头力学性能显著下降。

因此, Mg 合金焊接是比较困难的, 在焊接时容易产生裂纹、气孔、飞溅。图 14 所示为采用电子束焊接时, 焊缝中的气孔情况。图 15 所示为镁在 MIG 焊接时熔滴飞溅的情况。

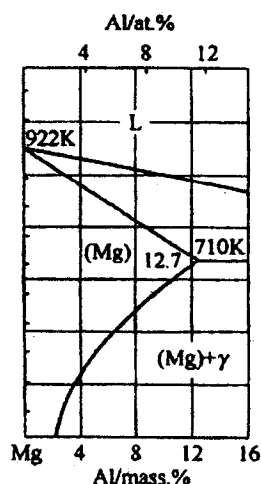


图 12 Mg-Al 二元合金相图

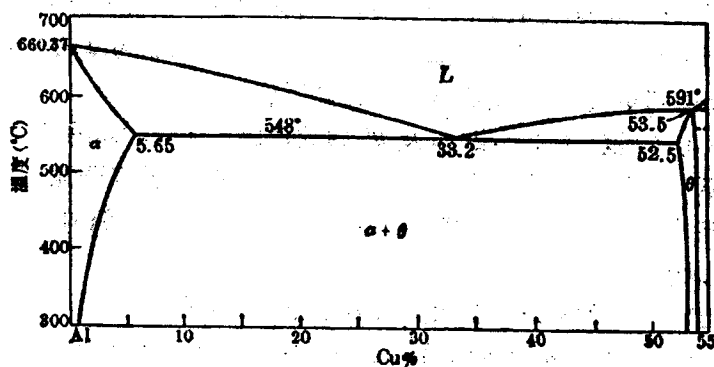


图 13 Al-Cu 合金相图

6 Mg 合金的焊接

由以上分析可知 Mg 合金的焊接有很大困难, 满意的焊接质量不易获得, 但是由于工业的迫切需要, 许多科学工作者作出了很大的努力, 取得一些重要成果。

表 1 镁的部分蒸气压值

温度/K	蒸气压/atm	温度/K	蒸气压/atm	温度/K	蒸气压/atm
给定温度下的蒸气压		1000	1.36×10^{-2}	594	10^{-7}
298.15	1.5×10^{-20}	1100	5.76×10^{-2}	644	10^{-6}
400	5.2×10^{-14}	1200	1.90×10^{-1}	703	10^{-5}
500	3.9×10^{-10}	1300	5.14×10^{-1}	776	10^{-4}
600	1.38×10^{-7}	1376	1.00	865	10^{-3}
700	8.92×10^{-6}	1400	1.19	982	10^{-2}
800	1.99×10^{-4}	Geiding 蒸气压时的温度		1143	10^{-1}
900	2.21×10^{-3}	482	10^{-10}	1376	10
923 (固体)	3.55×10^{-3}	514	10^{-9}		
923 (液体)	3.55×10^{-3}	551	10^{-8}		

注: 1atm=101325Pa

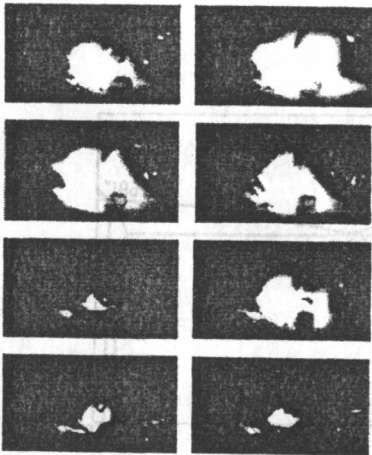
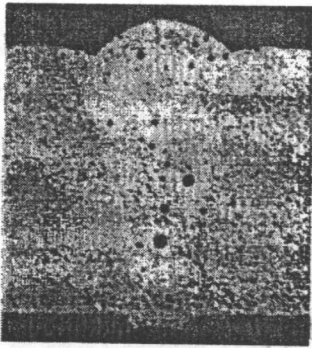
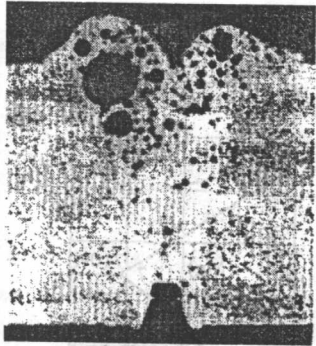


图 14 MIG 焊时熔滴飞溅情况



(a)



(b)

图 15 相同工艺参数条件下获得的不同质量的焊缝
压铸 AZ91, 焊速 $v_s=5.4\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, 焦距 $f=+30\text{mm}$

表 2 所示为常用镁合金的化学成份和力学性能。表 3 所示为 Mg 合金能采用的焊接方法。其中特别值得注意的是最新研究成功的焊接方法(表中注明为“好、新”), 以下对这几种方法予以介绍。

表 2 镁合金化学成分及力学性能

型 号		化学成分 (质量分数) (%)					力学性能			
美国	中国	Al	Zn	Mn	Ce	Zr	$\frac{\sigma_b}{\sigma_{0.2}}$ MPa	HB	δ (%)	状态
M1A	MB1			1.3~2.5			290	55	7.0	热挤棒 (R)
AZ31B	MB2	3.0~4.0	0.2~0.8	0.15~0.5			300	55	10.0	淬火处理 (T4), 棒材
	MB3	4.0~5.0	0.8~1.5	0.4~0.8			240	130	12.0	0.8~3.0 退火板(M)
							250	150	12.0	0.8~3.0 退火板(M)
AZ61A	MB5	5.5~7.0	0.5~1.5	0.15~0.5			200	110	5.0	模锻件 (R)
AZ63A	MB6	5.0~7.0	2.0~3.0	0.2~0.5			260	50	8.0	模锻件, 退火 (M)
AZ80A	MB7	7.8~9.2	0.2~0.8	0.15~0.5			300	55	8.0	淬火处理 (T4), 棒材
	MB8	-	-	1.5~2.5	0.15~0.35		225	120	12.0	冷轧退火板材 (M)
ZK60A	MB15	-	5.0~6.0	-			245	155	8.0	半冷作硬化板材 (Y2)
	MB25	~0.05	5.5~6.4	~0.1	Y 0.7~1.7	0.3~0.90	315	245	6.0	棒材 d8-100 (纵向)
AZ92		8.3~9.7	1.7~2.3	0.15		0.45	345	275	7.0	棒材(纵向)(R)

表 3 镁合金可焊性情况

材料类型		焊接方法									
		MIG	TIG	PLW	VPPA	EBW	LW	FSW	复合焊接方法		
									LW+TIG	LW+MIG	LW+EMW
镁锰系	AZ31B	MB1									
		MB8	可焊					好 (新)			
镁铝锌系	AZ61A	MB2	好 (新)			好 (新)	好 (新)				
		MB3									
		MB5									
	ZK60A	MB6									
		MB7									
	AZ31		好 (新)	可焊		可焊			可焊		好
镁锌铝系											
		ZM5						好 (新)			
		MB15									
		ZM1									
		ZM2									
		ZM3									
		AZ									

MIG: 熔化极惰性气体保护焊 TIG: 钨极惰性气体保护焊 PLW: 等离子弧焊
VPPA: 变极性等离子弧焊 EBW: 电子束焊 LW: 激光焊 FSW: 搅拌摩擦焊

6.1 MIG 焊接法

新的 MIG 焊接法是德国 M. Rethmeier 等^[7, 8]所研发的成果, 在 Mg 的 MIG 焊接中, 由于 Mg 合金的沸点很低, 加之蒸汽压上升很快, 所以在熔滴稍有过热时, 就会产生爆炸, 因而造成大量的飞溅, 使 MIG 焊过程无法进行。Rethmeier 等创造了一种受控的熔滴形式, 利用可控的电流波形使熔滴既能过渡, 又不过热, 波形图如图 16 所示。波形的第一部分, 使熔滴形成时, 以短路方式过渡, 当此熔滴过渡后, 继续产生一个小的脉冲电源, 使第二个熔滴柔和地进入熔池。电源波形的各部分均可进行调节。采用高速摄影协助进行观察、调节, 从而获得非常理想的熔滴过渡和焊缝成型。图 17 为实际电流波形图。图 18 所示为采用此电流波形后熔滴过渡情况, 可见过渡非常平稳。采用此种方法, 作者成功地焊接了 AZ61、AZ31 镁合金的生产试件, 见图 20, 并成功地研制出工业机器人操作的 MIG 焊机 (见图 21), 焊接接头疲劳强度可达母材的 75%, 接头断面见图 19。

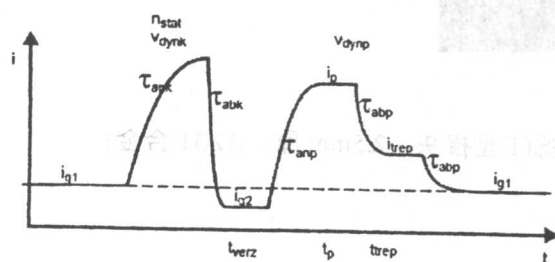


图 16 Mg 合金 MIG 焊电流波形

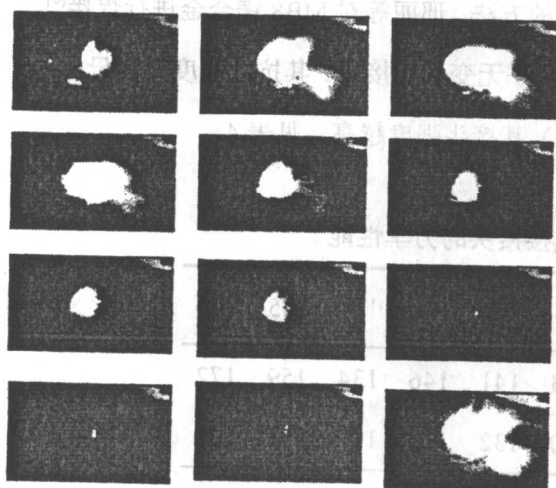


图 18 Mg 合金 MIG 焊时熔滴过渡情况

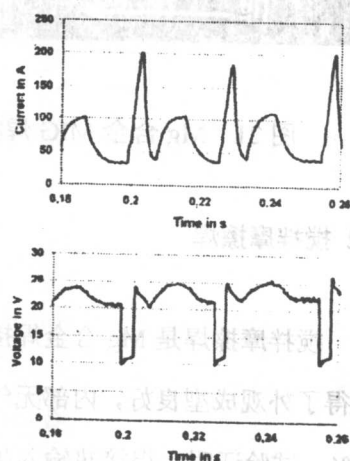


图 17 Mg 合金 MIG 焊实际电流、电压波形

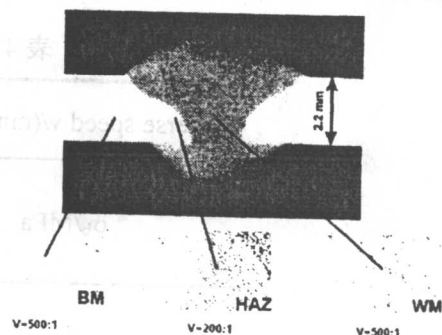


图 19 Mg 合金 MIG 焊之焊缝横断面

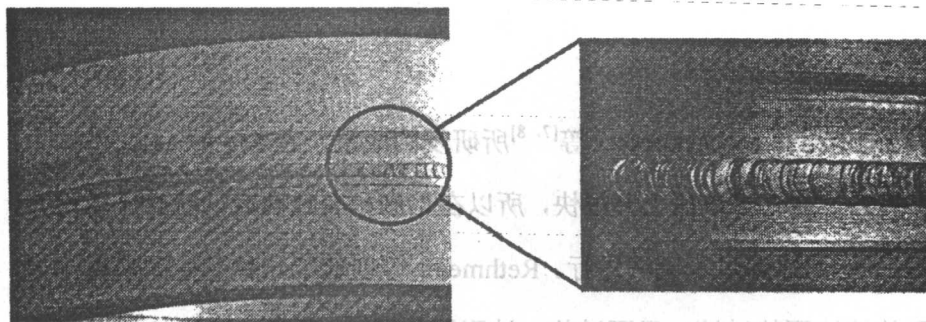


图 20 Mg 合金 MIG 焊之试验件

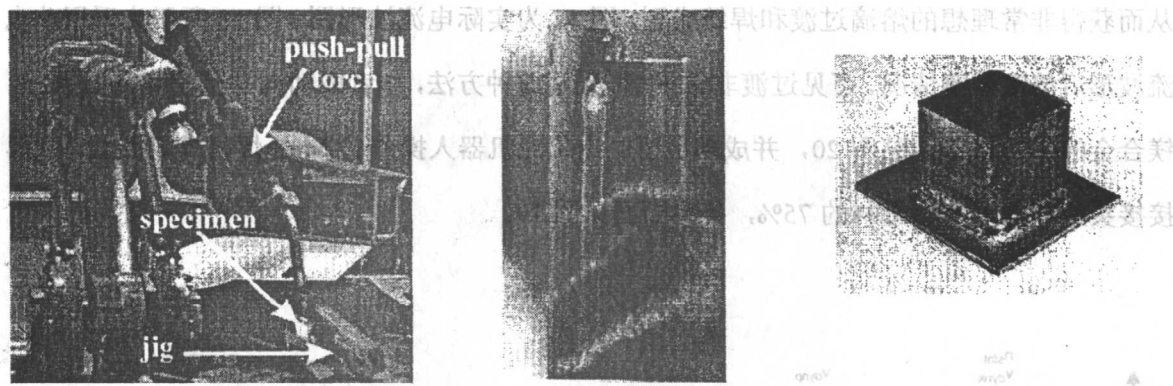


图 21 Mg 合金 MIG 焊机器人及焊接情况(T 型接头, 2.5mm 厚, AZ31 合金)

6.2 搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊是 Mg 合金焊接的一个比较理想的方法, 邢丽等对 MB8 镁合金进行焊接^[6], 获得了外观成型良好, 内部无气孔、裂纹, 焊后几乎无变形的接头, 其抗拉强度可达母材的 76%。试验证明, 焊接热输入越低 (即焊速越高) 其接头强度越高。见表 4。

表 4 镁合金塑化连接接头的力学性能

Traverse speed $v/(mm \cdot min^{-1})$	30	60	95	118	235	300
σ_b/MPa	143	141	146	134	159	172
	130	132	138	135	151	167
$\sigma_b/\sigma_{b0}(\%)$	64	63	65	60	71	76
	58	57	61	60	67	74

图 22 为 AZ81A 镁合金焊缝外观成型, 图 23 为接头宏观形貌。图 24 为其金相组织情况, 由此可见其质量是理想的。

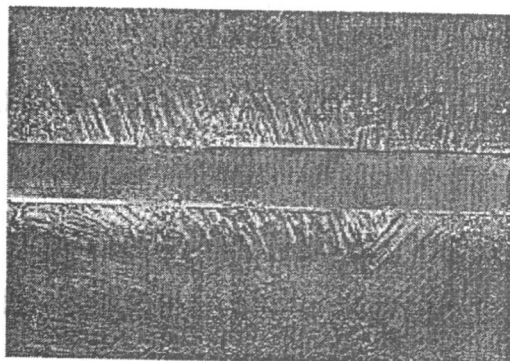


图 22 AZ81A 镁合金搅拌摩擦焊焊缝的外观成型

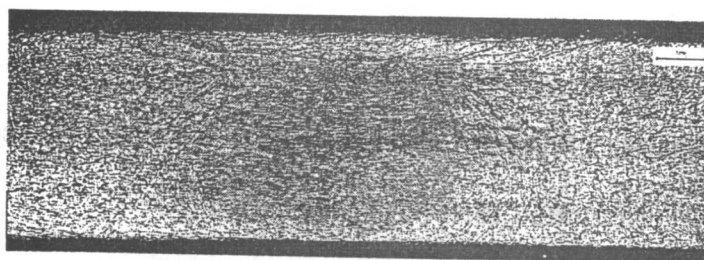
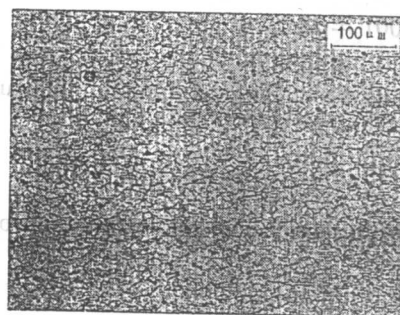
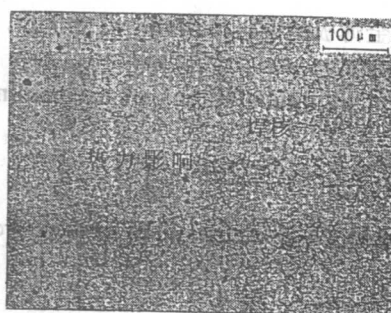


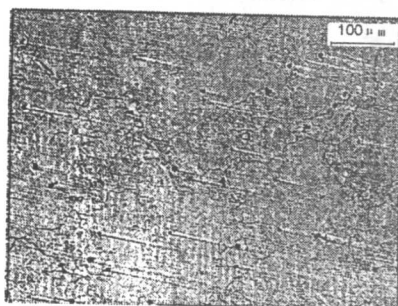
图 23 搅拌摩擦焊接头宏观形貌



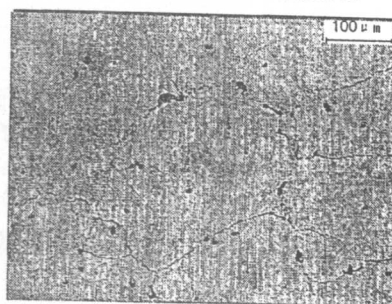
a. 搅拌摩擦焊焊核组织



b. 搅拌摩擦焊热影响区与焊核交界处



c. 搅拌摩擦焊热影响区组织



d. 母材组织

图 24 搅拌摩擦焊接头的组织形态

7 结论

- A. 镁合金是 21 世纪新型绿色结构材料, 资源丰富, 在汽车、交通、宇航、电子产品、民用产品等领域均有极为重要的价值
- B. 镁合金作为结构材料, 焊接是一个关键技术, 因此焊接成为目前国内外的研发热点
- C. 若干年来, 焊接工作者已成功地完成 Mg 合金的 MIG、EBW、LBW 及 FSW 的方法和工艺, 但离工业实际大规模应用仍有相当距离。

参考文献

1. 陆燕荪, 能源工程领域的材料, 学术报告, 2004,
2. 张玉玲 潘际炎, 芜湖长江大桥钢梁细节疲劳强度的研究, 中国铁道科学, 2001, No.5
3. 潘际奎, 镁合金—21 世纪的绿色工程材料, 学术报告, 2004
4. 史美堂, 金属材料及热处理, 上海科技出版社, 1981
5. 陈振华, 镁合金, 化学出版社, 2004
6. 邢丽等, 镁合金薄板的搅拌摩擦焊, 焊接学报, 2001 年 12 月
7. M. Rethmeier et al., MIG-Welding of magnesium alloys-metallurgical aspects, Institute for Joining and Welding, Braunschweig, Germany, 2004
8. B. Kleinpeter et al., Fatigue strength of welded wrought magnesium alloys, Institute for Joining and Welding, Braunschweig, Germany, 2004