

# AZ31B 镁合金 TIG 焊焊接接头的疲劳性能\*

王文先<sup>1</sup> 马丽莉<sup>1</sup> 慕 伟<sup>1</sup> 李晋永<sup>1</sup> 王东坡<sup>2</sup> 霍立兴<sup>2</sup> 邓彩艳<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学材料科学与工程学院 太原 030024;

2. 天津大学材料科学与工程学院 天津 300072)

**摘要:** 对 8 mm 厚 AZ31B 镁合金板及其三种 TIG 焊焊接接头的静载拉伸性能和疲劳性能进行试验研究。试验结果表明 AZ31B 镁合金母材的静载抗拉强度为 245.50 MPa, TIG 焊对接接头、纵向角接接头和非承载十字接头的静载抗拉强度分别为 193.55 MPa、229.89 MPa、227.39 MPa。脉动循环( $r=0$ )疲劳试验表明, 在  $2 \times 10^6$  循环次数下, AZ31B 镁合金母材的疲劳强度为 57.81 MPa, 为其静载抗拉强度的 23.5%。相同循环次数下, AZ31B 镁合金 TIG 焊对接接头、纵向角接接头和非承载十字接头的疲劳强度为 24.60 MPa、20.14 MPa、17.25 MPa, 分别为母材疲劳强度的 42.6%、34.8%和 29.8%。按照国际焊接学会的规范, 发现镁合金焊接接头的疲劳级别 FAT 仅为相应铝合金接头疲劳级别 FAT 的一半。由此看来, 疲劳性能是影响镁合金在承受动态载荷结构中应用的主要因素之一。

**关键词:** AZ31B 镁合金 TIG 焊 焊接接头 疲劳性能

**中图分类号:** TG401

## 0 前言

基于镁的一系列优点和丰富资源, 镁及镁合金的开发和应用对于实现人类可持续发展具有重要而深远的意义, 为此镁合金及其加工技术也成为各个国家研究的热点问题<sup>[1]</sup>。镁合金轻质高强、减少振动、节能降耗、有利环保, 其最具发展前途的应用领域是“陆海空天”交通运输装备, 这些结构离开焊接技术的支持是无法完成的。但由于镁合金材料性质活泼、熔点低、导热快和热膨胀系数大等特点, 使得其焊接性能较差, 尤其镁合金对缺口、尺寸和表面状态敏感性强等特点, 使镁合金焊接结构安全使用成为制约镁合金广泛应用的技术关键。

目前, 有关镁合金焊接接头的组织和性能已得到广泛研究<sup>[2-4]</sup>, 但其疲劳性能的研究还处于起步阶段, 这也成为制约镁合金作为焊接结构件使用的主要原因之一<sup>[5]</sup>, 因此, 在镁合金焊接结构疲劳性能方面有待开展大量深入的研究工作。

本文对挤压成形的 AZ31B 镁合金板材及其 TIG 焊对接接头、纵向角接接头、非承载十字接头等三种接头的静载强度和疲劳性能进行了试验研究, 并进行了对比分析。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

材料采用挤压成形的 AZ31B 镁合金板, 厚度为 8 mm, 其化学成分见表 1。TIG 焊填充焊丝为与母材同质的直径 3.0 mm 的 AZ31B 镁合金焊丝。

表 1 AZ31B 镁合金化学成分质量分数 w/%

| Al  | Mn   | Zn   | Si   | Fe      | Cu      | Ni      | Mg |
|-----|------|------|------|---------|---------|---------|----|
| 3.1 | 0.48 | 0.88 | 0.01 | 0.002 7 | 0.001 5 | 0.000 5 | 余量 |

### 1.2 试件形式与尺寸

静载拉伸与疲劳试验试件的形式和尺寸相同, 如图 1 所示, 其主体尺寸为 190 mm×65 mm×8 mm。母材经机械加工直接成形, 对接接头试件和非承载十字接头试件为先焊接而后进行机械加工, 纵向角接接头则先机械加工后进行焊接。

### 1.3 焊接工艺

焊接接头采用 TIG 焊方法连接, 焊接工艺参数见表 2。镁合金材料表面的氧化物采用机械清理, 焊接时要注意试件不能有大变形, 纵向角接接头和非承载十字接头焊接时按照图 1 中所示焊接顺序进行。所有焊件焊后无须热处理, 只需进行焊后表面清理。

表 2 焊接工艺参数

| 试件形式    | 焊接电流<br>I/A | 电弧电压<br>U/V | 焊接速度<br>v/(mm·min <sup>-1</sup> ) |
|---------|-------------|-------------|-----------------------------------|
| 对接接头    | 130~150     | 22~24       | 64~82                             |
| 纵向角接接头  | 130~150     | 22~24       | 96~156                            |
| 非承载十字接头 | 150~160     | 22~24       | 75~125                            |

\* 国家自然科学基金资助项目(50675148)。20061129 收到初稿, 20070426 收到修改稿

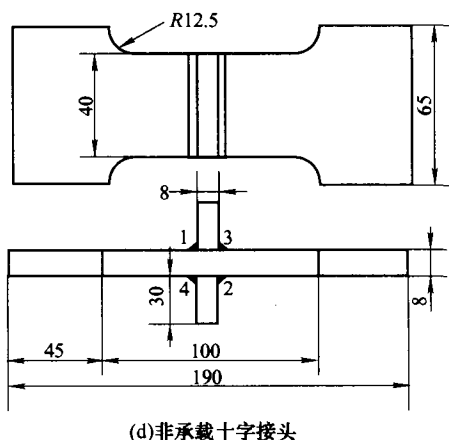
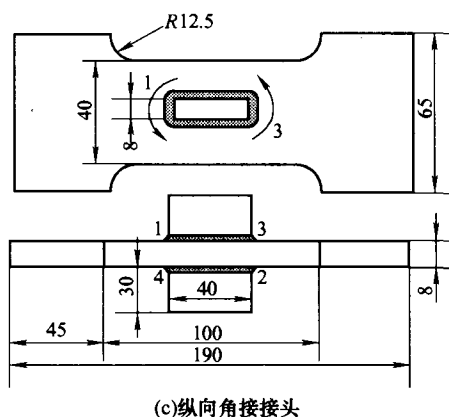
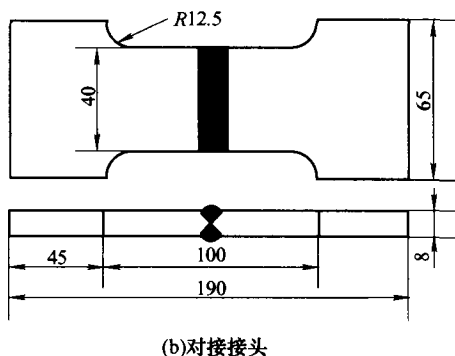
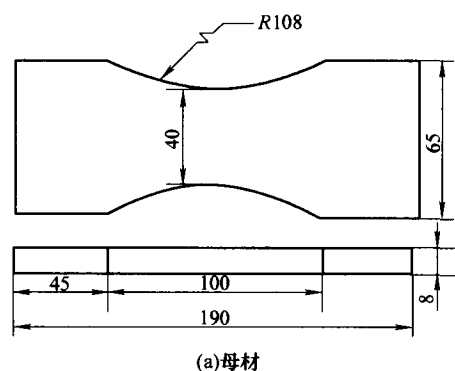


图 1 试件形式和尺寸

#### 1.4 试验方法及设备

静载拉伸试验是在 CMT5105 型微机控制电子万能试验机上进行的,最大工作载荷 100 kN,试件

在常温下进行拉伸,拉伸速度为 1 mm/min。拉伸试验分为母材、对接接头、纵向角接头和非承载十字接头四组,每组三个试件,结果取其平均值。

疲劳试验是在电磁激振式高频疲劳试验机上进行的,疲劳试验机最大工作载荷为 100 kN,静载精度为满量程的 $\pm 0.2\%$ ,动载振幅波动度为满量程的 $\pm 2\%$ 。疲劳试验分为母材、对接接头、纵向角接头和非承载十字接头四组,每组试件数量为 9 个(有效试件数量不小于 7 个);所施加的载荷类型均为脉动拉伸载荷,应力循环比 $r=0$ ,振动频率在 97~99 Hz 范围内。

## 2 静载拉伸试验结果及分析

试件的静载拉伸曲线如图 2 所示,表 3 为静载拉伸试验结果。

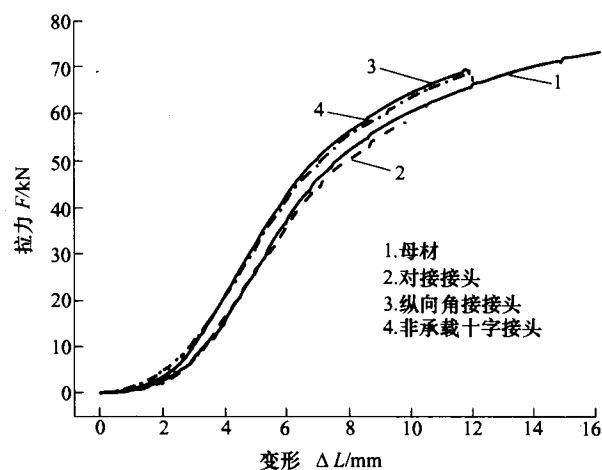


图 2 静载拉伸曲线图

表 3 静载拉伸试验结果

| 试件形式    | 抗拉强度<br>$\sigma_b$ /MPa | 断裂位置      |
|---------|-------------------------|-----------|
| 母材      | 245.50                  | 中心部位      |
| 对接接头    | 193.55                  | 热影响区与熔合线区 |
| 纵向角接头   | 229.89                  | 焊趾部位      |
| 非承载十字接头 | 227.39                  | 焊趾部位      |

由图 2 可以看出, AZ31B 镁合金无论是否经过焊接热循环,拉伸曲线的走势基本相同。断裂时,母材伸长量最大,纵向角接头和非承载十字接头伸长量次之,对接接头伸长量最小。

由表 3 可知,母材静载抗拉强度为 245.50 MPa,对接接头、纵向角接头和非承载十字接头的静载抗拉强度为 193.55 MPa、229.89 MPa、227.39 MPa,分别为母材抗拉强度的 78.8%、93.6%、92.6%。这是因为纵向角接头和非承载十字接头焊缝未贯穿

主板厚度, 而对接接头焊缝贯穿主板厚度, 焊缝热影响区组织变化引起试件抗拉强度的降低。

AZ31B 镁合金的焊接热影响区是典型的过热组织, 晶粒粗大; 焊缝区的晶粒则明显比母材和焊接热影响区的细小, 是典型的铸造急冷组织, 由细小的等轴晶组成。三种接头中, 对接接头的强度最低, 这是由于此试件接头部分为主要受力部位, 对接接头拉伸断裂发生在热影响区, 表明热影响区的晶粒粗大是导致该接头力学性能下降的主要原因之一<sup>[4]</sup>。而纵向角接接头和非承载十字接头试件的接头部位虽然也经过焊接热循环的影响, 但受力的母材主板是连续的, 因此强度较母材降幅不大, 两种接头拉伸曲线以及强度也大致相近。而两种接头试件均断裂于焊趾处, 则主要是由于焊趾处的应力集中引起的。

### 3 疲劳试验结果及分析

#### 3.1 疲劳试验结果

母材与三种焊接接头试件的疲劳试验结果见表 4。

表 4 疲劳试验结果

| 试件形式    | 试件编号 | 应力范围<br>$\Delta\sigma/\text{MPa}$ | 循环次数<br>$N/10^6$ 次 | 断裂位置 |
|---------|------|-----------------------------------|--------------------|------|
| 母材      | 1    | 95                                | 0.160              | 标段内  |
|         | 2    | 90                                | 0.452              | 标段内  |
|         | 3    | 80                                | 0.727              | 标段内  |
|         | 4    | 72.5                              | 0.667              | 标段内  |
|         | 5    | 65                                | 1.142              | 标段内  |
|         | 6    | 55                                | 1.304              | 标段内  |
|         | 7    | 47.5                              | 5.010              | 未断   |
| 对接接头    | 1    | 42                                | 0.270              | 焊趾   |
|         | 2    | 40                                | 0.826              | 焊趾   |
|         | 3    | 40                                | 0.190              | 过渡区  |
|         | 4    | 35                                | 0.527              | 焊趾   |
|         | 5    | 30                                | 1.038              | 焊趾   |
|         | 6    | 30                                | 0.745              | 焊趾   |
|         | 7    | 25                                | 2.340              | 夹持端  |
|         | 8    | 25                                | 1.967              | 焊趾   |
|         | 9    | 20                                | 6.016              | 未断   |
| 纵向角接接头  | 1    | 45                                | 0.131              | 焊趾   |
|         | 2    | 40                                | 0.310              | 焊趾   |
|         | 3    | 35                                | 0.644              | 焊缝   |
|         | 4    | 30                                | 0.540              | 焊趾   |
|         | 5    | 25                                | 0.938              | 焊趾   |
|         | 6    | 20                                | 1.255              | 焊趾   |
|         | 7    | 15                                | 5.000              | 未断   |
| 非承载十字接头 | 1    | 40                                | 0.110              | 焊趾   |
|         | 2    | 35                                | 0.524              | 焊趾   |
|         | 3    | 30                                | 0.516              | 焊趾   |
|         | 4    | 25                                | 0.888              | 焊趾   |
|         | 5    | 20                                | 1.771              | 焊趾   |
|         | 6    | 17.5                              | 1.621              | 焊趾   |
|         | 7    | 17.5                              | 1.051              | 焊趾   |
|         | 8    | 15                                | 1.313              | 焊趾   |
|         | 9    | 12.5                              | 6.000              | 未断   |

疲劳强度与循环次数之间的关系, 即疲劳  $S-N$  曲线以指数形式表达为

$$S^m N = C \quad (1)$$

式中  $S$  ——疲劳强度, 用应力范围  $\Delta\sigma$  表示

$N$  ——循环次数

$m, C$  ——拟合常数

对表 4 疲劳数据拟合得出上述表达式的具体形式, 各组疲劳试验  $S-N$  曲线参数如表 5 所示。

表 5  $S-N$  曲线参数

| 试件形式    | 拟合常数 |                       |
|---------|------|-----------------------|
|         | $m$  | $C$                   |
| 母材      | 4.45 | $1.40 \times 10^{14}$ |
| 对接接头    | 4.43 | $2.88 \times 10^{12}$ |
| 纵向角接接头  | 3.12 | $2.35 \times 10^{10}$ |
| 非承载十字接头 | 3.05 | $1.18 \times 10^{10}$ |

绘制各组试件的拟合  $S-N$  曲线, 用国际焊接学会(IIW)推荐的以应力范围  $\Delta\sigma$  和循环次数  $N$  以 10 为底的双对数坐标表示。  $S-N$  曲线如图 3~5 所示, 图 3~5 中带箭头的数据表示未断或者断于夹持端。各试件疲劳强度及对比如表 6 所示。

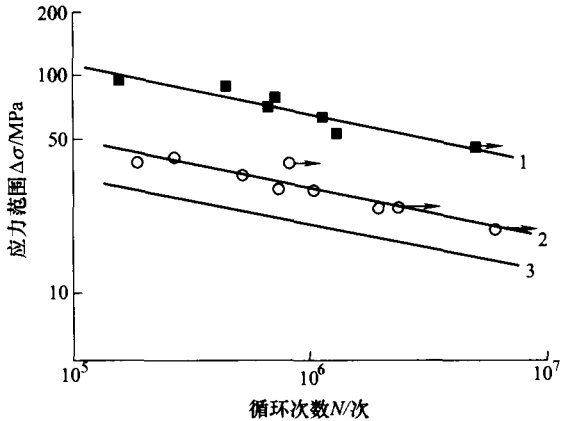


图 3 对接接头  $S-N$  曲线  
1. 母材试验中值  $S-N$  曲线  
2. 对接接头试验中值  $S-N$  曲线  
3. 对接接头试验特征  $S-N$  曲线

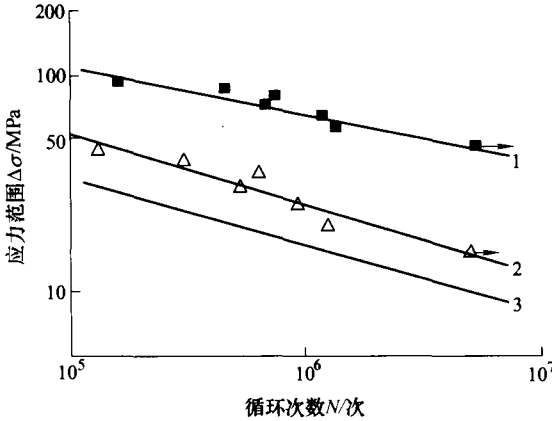


图 4 纵向角接接头  $S-N$  曲线  
1. 母材试验中值  $S-N$  曲线  
2. 纵向角接接头试验中值  $S-N$  曲线  
3. 纵向角接接头试验特征  $S-N$  曲线

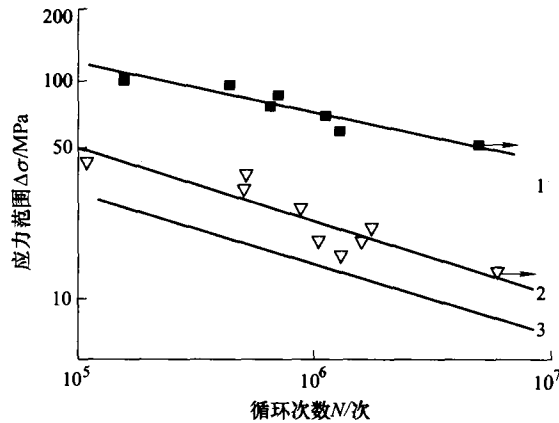


图 5 非承载十字接头 S-N 曲线  
1. 母材试验中值 S-N 曲线  
2. 非承载十字接头试验中值 S-N 曲线  
3. 非承载十字接头试验特征 S-N 曲线

表 6 各试件疲劳强度及对比

| 试件形式    | 循环次数                              |                       |                                   |                       |
|---------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|
|         | $N=2 \times 10^6$                 |                       | $N=5 \times 10^6$                 |                       |
|         | 疲劳强度<br>$\Delta\sigma/\text{MPa}$ | 与母材<br>对比 $\gamma/\%$ | 疲劳强度<br>$\Delta\sigma/\text{MPa}$ | 与母材<br>对比 $\gamma/\%$ |
| 母材      | 57.81                             | 100                   | 46.99                             | 100                   |
| 对接接头    | 24.60                             | 42.6                  | 19.95                             | 42.5                  |
| 纵向角接头   | 20.14                             | 34.8                  | 15.03                             | 32.0                  |
| 非承载十字接头 | 17.25                             | 29.8                  | 12.74                             | 27.1                  |

### 3.2 疲劳试验数据的统计方法

根据国际焊接学会(IIW)的有关文件<sup>[6]</sup>, 采用如下统计方法对各种试件的相应疲劳试验数据进行处理。

标称值可通过下述步骤计算。

(1) 计算所有疲劳试验数据点的应力范围 $\Delta\sigma$ 和循环次数 $N$ 以 10 为底的对数值。

(2) 采用幂函数模型回归计算 $m$ 和 $\lg C$ 值, 对公式(1)取对数

$$m \lg S + \lg N = \lg C \quad (2)$$

(3) 设 $C_i$ 是试验数据的对数值, 利用所获得的 $m$ 值, 计算 $\lg C$ 的平均值 $C_m$ 和标准偏差 $V_{st}$

$$C_m = \frac{\sum C_i}{n} \quad (3)$$

$$V_{st} = \sqrt{\frac{\sum (C_m - C_i)^2}{n-1}} \quad (4)$$

(4) 计算特征值 $C_k$

$$C_k = C_m - kV_{st} \quad (5)$$

按上述统计方法处理试件的相应疲劳试验数据, 统计结果如表 7 所示。

由表 7 可以得出各试件的试验特征 S-N 曲线的表达式。图 3~5 中给出了三种接头相应的试验特征 S-N 曲线。

表 7 S-N 曲线试验数据统计结果表

| 试件形式    | 拟合常数 $m$ | 特征值 $C_k$             | 标准偏差 $V_{st}$ |
|---------|----------|-----------------------|---------------|
| 母材      | 4.45     | $4.47 \times 10^{13}$ | 0.141         |
| 对接接头    | 4.43     | $9.13 \times 10^{11}$ | 0.185         |
| 纵向角接头   | 3.12     | $7.00 \times 10^9$    | 0.150         |
| 非承载十字接头 | 3.05     | $2.84 \times 10^9$    | 0.229         |

### 3.3 与铝合金疲劳级别 FAT 的对比

国际焊接学会疲劳委员会不断跟踪焊接结构断裂行为与评定的最新研究成果, 已把钢铁和铝合金焊接结构的抗疲劳设计形成规范<sup>[7]</sup>。规范将在 $2 \times 10^6$ 循环次数下的特定的疲劳强度定为疲劳级别 FAT, 对于铝合金, 则有 15 条 $m=3.0$ 的 S-N 曲线, 其中与焊接接头设计有关的 S-N 曲线 12 条。该标准所推荐的各部分 S-N 曲线的置信度为 75%, 存活率为 95%。

本文用国际焊接学会推荐的统计方法对镁合金接头试件的试验数据进行处理, 得出了拟合常数 $m=3.0$ 的各种接头的试验特征 S-N 曲线, 并计算出相应的疲劳级别 FAT 值, 与规范给出的相应形式的铝合金接头进行对比, 具体数据见表 8。

表 8 铝、镁合金接头疲劳级别 FAT 对比表

| 接头形式    | 材料  | 拟合常数 $m$ | 疲劳级别 FAT<br>$\Delta\sigma/\text{MPa}$ |
|---------|-----|----------|---------------------------------------|
| 对接接头    | 镁合金 | 4.43     | 24.60                                 |
|         | 镁合金 | 3.00     | 15.70                                 |
|         | 铝合金 | 3.00     | 32.00                                 |
| 纵向角接头   | 镁合金 | 3.12     | 20.14                                 |
|         | 镁合金 | 3.00     | 13.46                                 |
|         | 铝合金 | 3.00     | 28.00                                 |
| 非承载十字接头 | 镁合金 | 3.05     | 17.25                                 |
|         | 镁合金 | 3.00     | 10.91                                 |
|         | 铝合金 | 3.00     | 25.00                                 |

可以看出, 经过疲劳评定方法处理的镁合金接头的疲劳强度仅约为国际焊接学会规范给出的相应形式铝合金接头疲劳级别 FAT 值的二分之一。

## 4 分析讨论

由以上试验结果可以看出, 镁合金的静载抗拉强度和疲劳强度均较低。

在静载拉伸试验中, 对接接头的强度是三种接头中最低的, 而其他两种接头的强度均能达到母材的 90% 以上。对接接头断裂发生在焊接热影响区, 说明热影响区晶粒粗大是导致接头静载强度低下的主要原因。因此要研究焊接工艺对镁合金焊接热影响区金属性能的影响规律, 提高镁合金焊接接头的静载抗拉强度。

疲劳试验中, 对接接头的疲劳强度最高, 但也仅为母材疲劳强度的 40%, 其他两种接头的疲劳强

度只有母材疲劳强度的 30%左右。将各接头的试验数据用国际焊接学会推荐的疲劳评定方法进行处理,并与铝合金作比较,三种镁合金焊接接头的疲劳强度都不足相应形式铝合金接头疲劳强度的一半。纵向角接接头和非承载十字接头的断裂位置大多在焊趾部位,说明接头形式引起的应力集中是影响镁合金焊接接头疲劳性能的主要因素之一。因此要创新和改良镁合金接头形式的设计,弱化应力集中的对镁合金焊接接头疲劳性能的影响。

由此看来,疲劳性能是制约镁合金焊接结构广泛应用的主要因素,需要深入探究影响镁合金焊接接头疲劳性能的各种因素和提高疲劳强度的措施,要进一步进行镁合金焊接结构疲劳性能的评定。

## 5 结论

(1) AZ31B 镁合金母材静载抗拉强度为 245.50 MPa, TIG 焊对接接头、纵向角接接头和非承载十字接头的静载抗拉强度分别为 193.55 MPa、229.89 MPa、227.39 MPa, 分别为母材静载抗拉强度的 78.8%、93.6%、92.6%。

(2) 在  $2 \times 10^6$  的循环次数下, AZ31B 镁合金母材的疲劳强度为 57.81 MPa; TIG 焊对接接头、纵向角接接头和非承载十字接头的疲劳强度为 24.60 MPa、20.14 MPa、17.25 MPa, 分别为母材疲劳强度的 42.6%、34.8%和 29.8%。

(3) 用国际焊接学会推荐的方法对镁合金接头试件的疲劳试验数据进行处理, 镁合金对接接头、纵向角接接头和非承载十字接头的疲劳级别 FAT 值分别为 15.70 MPa、13.46 MPa、10.91 MPa, 为国际焊接学会规范给出的相应形式铝合金接头疲劳级别的 49.06%、48.07%和 43.64%, 均不足铝合金疲劳级别 FAT 值的二分之一。

## 参 考 文 献

- [1] 国家发展和改革委员会技术产业司, 中国材料研究学会. 中国新材料产业发展报告—镁及镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [2] MUNITZ A, COTLER C, STEN A, et al. Mechanical properties and microstructure of gas tungsten arc welded magnesium AZ91D plates[J]. Materials Science and Engineer, 2001, A302: 68-73.
- [3] LIU Liming, MIAO Yugang, SONG Gang, et al. Effect of heat input on microstructure and properties of welded joint in magnesium alloy AZ31B[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2004, 14(1): 87-92.
- [4] 孙四全, 王立君. 镁合金焊接接头的力学性能[J]. 焊接技术, 2004, 33(5): 1-2.
- [5] TSUJIKAWA M, SOMEKAWA H, HIGASHI K, et al. Fatigue of welded magnesium alloy joints[J]. Mater. Trans., 2004, 45(2): 419-422.
- [6] 霍立兴. 焊接结构强度与断裂[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [7] HOBBS A. Recommendations for fatigue design of welded joints and components[C] // IIW Document, XIII-1539-96/XV-845-96, 2002.

## FATIGUE BEHAVIOR OF AZ31B MAGNESIUM ALLOY JOINT WITH TIG-WELDING

WANG Wenxian<sup>1</sup> MA Lili<sup>1</sup> MU Wei<sup>1</sup> LI Jinyong<sup>1</sup>  
WANG Dongpo<sup>2</sup> HUO Lixing<sup>2</sup> DENG Caiyan<sup>2</sup>  
(1. College of Material Science and Technology,  
Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024;  
2. College of Material Science and Technology,  
Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract:** The fatigue properties and the mechanical performance of AZ31B magnesium alloy with 8 mm thickness and its welded joint by TIG welding are studied. The results showed that the tensile strength of the base metal is 245.50 MPa and that of the butt joint, longitudinal fillet joint and transverse crossed joint are 193.55 MPa, 229.89 MPa and 227.39 MPa, respectively. The fatigue properties of AZ31B Magnesium alloy are evaluated, when the coefficient of stress cycle is zero. Under the condition of  $2 \times 10^6$  cycles, the fatigue strength of the base metal is 57.81 MPa and that of the three types of joints are 24.60 MPa, 20.14 MPa and 17.25 MPa in turn. It is about 42.6%, 34.8% and 29.8% of that of the base metal, respectively. According to the standard of IIW, the FAT of the welded joint of magnesium alloy is about half of that of the aluminum alloy. So the fatigue properties are one of the key factors that obstructs the application of magnesium alloy for the structure suffered from the dynamic load.

**Key words:** AZ31B Mg alloy TIG welding Welded joint Fatigue property

作者简介: 王文先, 男, 1963 年出生, 博士, 教授。主要从事材料连接及其界面性能, 焊接结构断裂与强度的研究。发表论文 50 余篇, 获得国家发明专利 6 项, 省部级自然科学奖 1 项。

E-mail: wwxx @ public.ty.sx.cn