

Al-2.5Li-1.8Cu-1.4Mg-0.1Zr 合金的热塑性研究^①

龚润生 尹志民 刘 武

(中南工业大学材料科学与工程系, 长沙 410083)

摘 要 采用焊接热模拟技术, 模拟焊接热循环温度效应, 研究了 Al-Li 合金的热塑性特性。改变模拟特性参数、应变速率对合金的热塑性行为有较大的影响。

关键词 Al-Li 合金 热塑性 热裂纹

热塑性是描述金属材料在加热和冷却两个阶段的热循环过程中, 塑性与强度随温度的变化规律, 并把这些规律与材料的焊接性能联系起来, 从而得出热效应区的热裂纹敏感性指标, 以判断材料的可焊性能。Al-Li 合金要得到广泛的应用, 首先要解决与其它材料联接的有效方法, 弄清焊接的物理冶金。尽管目前对 Al-Li 合金基体金属的显微组织和性能的研究有了较大的进展, 但对其可焊性研究的成果甚少。Al-Li 合金同其它 Al 合金一样, 焊接的焦点是结晶裂纹与液化裂纹敏感性问题。Al 合金容易引起焊接热裂纹的原因, 主要是由于凝固温度范围较宽, 有较大的热膨胀系数和容易形成低熔共晶体物质^[1]。合金在焊接过程中, 热循环使焊缝两侧发生组织、性能变化的热效应区(HAZ), 是产生热裂纹、引起脆性破坏的最危险区。焊接热模拟技术是利用焊接热模拟试验机, 在试件上模拟焊接热效应区的热循环和热应力、应变的分布, 使试件在较大尺寸范围内, 获得焊接热效应区某一特定温度范围的均匀温度及显微组织, 使焊接热效应区各狭小的特定温度区域得以放大, 以便对其组织及性能的变化进行细致研究。大量研究证明, 模拟试件与焊接热效应区的组织与性能有着良好的

吻合, 因此焊接热模拟技术以它的可靠性及良好的重现性而受到广泛重视^[2]。本文利用 Gleeble-1500 焊接热模拟装置, 研究了一种 Al-Li 合金的热塑性特性及其对焊接热裂纹敏感性的影响。

1 实验方法与材料

为了便于比较, 同时用 LG2 铝和 Al-Li 合金进行对比模拟实验。试验材料为挤压棒材, 其成分如附表所示。Al-Li 合金的热处理工艺为: 氩气保护下, 525℃, 40 min, 水淬; 170℃, 4 h+190℃, 16 h 时效。试样尺寸为 $d 10 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 表面清洗除去氧化膜。热模拟时, 抽真空后通入一定量氩气保护。

附表 试验材料成分(%)

合金名称	Li	Cu	Mg	Zr	Fe	Si	Al
LG2 铝	—	0.01	—	—	0.06	0.06	余量
Al-Li 合金*	2.50	1.85	1.40	0.12	—	—	余量

* 本文所指 Al-Li 合金, 仅限于本成分范围的合金

焊接热循环是指焊接件某一点在焊接热源作用下的受热过程, 即该点的温度随时间的变化过程。用焊接热模拟技术研究焊接热效应区

① 收稿日期: 1995-04-12; 修回日期: 1995-05-16

各特定部位的性能,事先要制定出各部位的焊接热循环曲线,再模拟出各特定部位的温度-时间 $[T-f(t)]$ 曲线。图1是表示焊接热循环的热模拟曲线示意图,从中可以看出,各曲线的特性参数是不同的,这些特性参数包括:加热速度 v_h ;峰值温度 T_h 及其停留时间 t_h ;冷却速度 v_c 等。本文主要根据文献[3],确定与计算模拟曲线的各主要参数。模拟时以不同的加热速度从低温到高温逐步加热升温,到峰值温度后又以不同冷却速度逐步冷却到每特定温度,保温 t_h ,以固定的变形速率(本文为0.06—0.10, %/s)拉伸至断裂,分别计算出每一温度下的断面收缩率 $\varphi\%$,绘制出热塑性曲线。热塑性试验结果是评定材料抗热裂纹敏感性的指标,模拟时测出加热过程和冷却过程中试件断面收缩率的变化曲线,并确定零塑性温度和峰值温度。如果材料的热塑性曲线通过零塑性以后,随温度的降低能立即回复到加热过程中的塑性水平,那么该材料的抗热裂纹性能良好。反之塑性回复很慢,即塑性回升的温度范围较宽,不管加热过程中塑性降低速度的快慢,都说明该材料抗焊接热裂纹的性能较差。

2 实验结果与分析

2.1 零塑性温度

零塑性温度与零强度温度相差无几,故一

般以测零强度温度代替零塑性温度。Gleeble-1500热模拟机采用空气弹簧来调整力的大小,以保证试件在热循环模拟试验时受力总只有几N(几乎为零),这样试件断裂的温度就是零强度温度。测得LG2铝的零强度温度为600℃,即零塑性温度为600℃,确定模拟峰值温度为630℃。同样测得Al-Li合金的零强度温度为560℃,即零塑性温度为560℃,确定模拟试验峰值温度为580℃。

2.2 热塑性曲线

按焊接热循环的热模拟特性参数程序,实验结果得出的热塑性曲线如图2所示,从图中可以清楚看出两种材料的焊接热循环过程中的热塑性行为。LG2的加热脆化温度区间约50℃,冷却过程中脆化温度区间约为100℃,而Al-Li合金的加热和冷却过程中的脆化温度区间分别约为50℃和70℃。LG2铝和Al-Li合金加热过程中脆化温度范围都比较窄,均为50℃左右。而冷却过程中Al-Li合金塑性回升比较快,比LG2铝窄化30℃左右,所以Al-Li合金的抗焊接热裂纹敏感性的性能是良好的,特别是抗液化裂纹敏感性的能力不亚于LG2材料。

2.3 变形速率对热塑性的影响

在一定变形速率下,温度升高,材料塑性升高,接着转入降低,在脆性温度区间内,材料的热塑性很低,但并非是不变的。不同的材

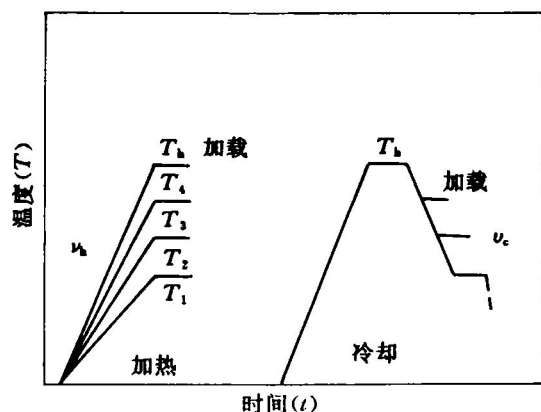


图1 焊接热循环的热模拟曲线示意图

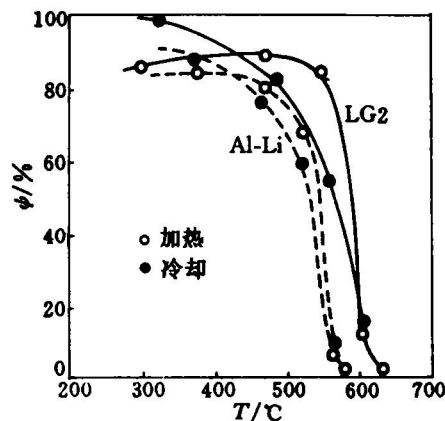


图2 热塑性曲线

料,在脆化温度范围内,热塑性随应变速率的变化规律是不同的,如图3所示。从图中可以看出:LG2铝的热塑性在脆化温度范围内,尽管塑性很小但并非是不变的数值,在一定温度下,变形速率愈大,材料的热塑性将愈小。而Al-Li合金在脆性温度范围内,热塑性随变形速率的变化却不大,但它们似乎都有一个对应热塑性最大的变形速率。在脆化温度范围内,变形速率对塑性的影响与材料的晶间状态有关。一般,温度升高,晶间层粘度减小,流动性增加,晶间形变能充分进行,使塑性增加,温度降低晶间层粘度和变形抗力增加,使塑性降低。变形速率对塑性的影响,可认为与温度对塑性的作用相似。如果晶间层粘度和流动性对变形速率敏感,材料的变形速率对塑性的影响就大,反之变形速率对材料的塑性影响就小。很明显,Al-Li合金在脆化温度范围内,晶间层粘度与流动性对变形速率的敏感性较差,不如LG2。说明Al-Li合金焊接热应力、应变的变化对热裂纹敏感性的影响,与LG2比较,

有所降低。

2.4 模拟参数对热塑性特性的影响

为了研究焊接工艺不稳和过热效应对焊接热裂纹敏感性的影响,我们有意将焊接热模拟特性参数加以改变,如使 ω_h 和 ν_c 分别降低30%~50%、峰值温度停留时间 t_h 延长2~3s,以增长焊接热效应作用的时间,进而测得其热塑性曲线如图4所示。用图4和图2曲线比较,可以看出:降低加热速度和冷却速度,延长热效应作用时间,对LG2铝的热塑性的影响不大,脆性温度区间仅增加10℃左右;而对Al-Li合金的影响确很明显,延长热效应作用时间,扩大了脆性温度范围的宽度,加热的脆化温度区间宽度约80℃,冷却过程的脆性温度区间宽度约130℃,比图2相应曲线增宽30℃和60℃,特别是冷却过程中,塑性回升的速度减慢,将大大降低抗焊接热裂纹敏感性的能力。提高冷却速度,减少热效应作用时间,有利于降低Al-Li合金焊接热裂纹敏感性。所以,Al-Li合金焊接时,要求更严格控制焊接工艺,减少热效应作用时间。

3 讨论

在铝合金中,焊接热裂纹敏感性取决于如下几个因素:合金元素含量,凝固温度范围,凝固最后阶段晶界低熔共晶体物质的数量和特

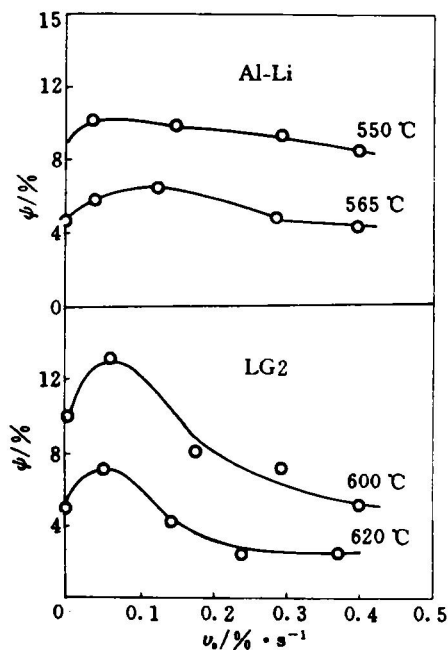


图3 在脆化温度范围内, 变形速率对热塑性的影响

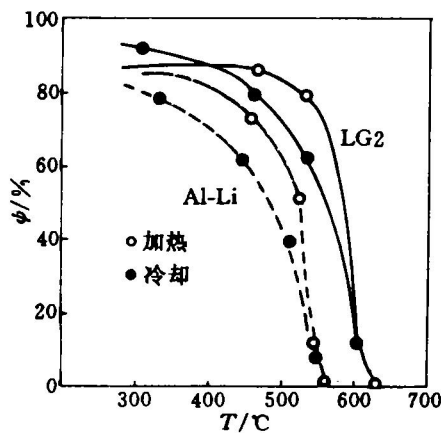


图4 降低 ω_h , ν 后的热塑性曲线

性^[1]。Al-Li 合金的合金元素含量较高,凝固时某些合金元素与有害元素一起在晶界偏聚,在凝固后期,晶间的低熔共晶体物质的化学成分含量增高,形成一种连续网状薄膜,分布在晶界,能较好的适应热循环所引起的热应力、应变的差异,所以在正常焊接热循环的热效应作用下,Al-Li 合金具有比 LG2 铝更良好的抗热裂纹的能力。同时,合金分级时效, δ (AlLi) 相仍沿晶界析出并伴随有无沉淀析出带存在,对合金力学行为有很大影响^[4]。这些晶界结构特性,无疑是 Al-Li 合金,在热脆化温度区间内,晶界粘度与流动性对变形速率不敏感的主要原因。但是这种晶界组织结构,在过热或热效应作用时间增长时,则有利于晶界粒子溶解和元素的快速扩散,所以在冷却过程中,促进了液化裂纹的形核与扩展,抑制了材料的塑性快速回升。而 LG2 晶界比较干净,合金元素含量很低,且不连续分布,这种晶界结构使晶界层粘度与流动性对变形速率较敏感,而对热效应的作用时间和过热现象,相对 Al-Li 合金就不那么敏感。综合上面所述,Al-Li 合金似乎存在有一个临界工艺参数范围,在这个工艺参数范围以上,即较快的冷却速度,较短的热效应停留时间,合金的抗焊接热裂纹性能良好;在这个工艺参数范围以下,即降低冷却速度,较长的热效应作用时间,将大大降低合金的抗焊接热裂纹的能力。

4 结论

(1) 在焊接热循环温度效应范围内,Al-Li 合金在冷却过程中,热塑性能在很窄的温度区间内回升到原有水平,说明 Al-Li 合金具有不亚于 LG2 铝的抗焊接热裂纹的能力和可焊接性能。

(2) 在热脆性温度范围内,Al-Li 合金的热塑性对变形速率敏感性较低,表明 Al-Li 合金在焊接热效应温度区间内,具有较大的承受热应力、应变的能力。

(3) Al-Li 合金的热塑性随热效应作用时间的延长影响较大,似乎存在一个临界工艺参数范围。当焊接工艺不稳或增加热效应作用时间,将影响 Al-Li 合金的焊接质量。

参考文献

- 1 Lippold J C. In: Conf Proc Aluminum-Lithium V, Williamsburgh, Va, 1989: 1365—1376.
- 2 Zacharia T, David S A *et al.* In: Conf Proc Aluminum-Lithium V, Williamsburgh, Va, 1989: 1387—1396.
- 3 陈 楚,张月娥. 焊接热模拟技术. 北京:机械工业出版社,1985: 8—20.
- 4 尹志民,张新民等. 中国有色金属学报,1992, 2(1): 67—73.