

LY12CZ 铝合金焊件在热循环作用下的尺寸不稳定性

刘雪松, 徐文立, 方洪渊, 田锡唐

(哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)



刘雪松

摘 要: 采用三坐标测量机作为测量方法试验研究了 LY12CZ 铝合金焊接件在经受热循环作用下的尺寸不稳定变形规律, 并对产生这种变形的机理进行力学和微观组织分析。结果表明, LY12CZ 铝合金焊接件经受 9 次热循环后, 尺寸趋于稳定。焊件发生尺寸不稳定变形的原因与温度条件、微观组织的变化, 焊接残余应力的松弛密切相关。

关键词: LY12CZ 铝合金; 热循环; 尺寸不稳定性

中图分类号: TG441 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2004)03-82-03

0 序 言

目前, 焊接结构在精密仪器和机器制造业、宇航工业中得到了日益广泛的应用^[1]。在这些行业中不仅制造时要求焊接构件具有较高的尺寸精度, 在使用或存放过程中还要求焊接构件的尺寸不发生变化或发生的变化应在允许范围之内, 即要求焊接构件具有一定的尺寸稳定性。在精密仪器及机器制造业中, 这个问题尤为突出, 材料的尺寸的不稳定性在宇航工业中的危害同样很严重^[2-3]。例如尺寸不稳定变形会导致陀螺仪转子质心偏心, 对长时间工作的航天惯导系统而言, 将造成陀螺漂移, 这是其主要误差源^[4]。俄罗斯和美国学者曾对钢的焊接件以及金属材料本身(非焊接件)的尺寸不稳定性问题做了大量研究^[5]; 发现绝大部分常用金属材料在常温下或周期性冷热温度循环作用下均发生了不可逆变形。在航天领域中广泛应用铝合金及其焊接结构, 例如, 载人飞船的外壳大部分为铝合金, 航天器在天空运行时, 不断作绕地球公转及自转, 其受太阳照射的一侧外壳表面温度可达 100℃以上, 而背向太阳的一侧温度很低, 接近-200℃, 这样在公转及自转过程中, 航天器外壳这一焊接结构就会不断经受热循环作用, 这时焊接结构很可能发生尺寸不稳定变形, 进而影响航天器的正常工作, 这个问题很容易被忽略。文中以 LY12CZ 高强铝合金焊接件作为对象, 考察了其经受热循环时的尺寸变化规律, 探讨了变形机理。

1 测量方法

尺寸不稳定变形所涉及的长度变化量很小, 通常只有微米数量级, 因此要求测量方法精度高、数据可靠, 对于在热循环条件下的焊件尺寸测量, 采用三坐标测量机进行测量, 这种方法的优点是测量精度较高, 测量系统可以自动进行温度补偿, 尤其可以较准确地保证测量位置的一致性, 对于需要经常变动位置的待测量件, 这是采用其它方法无法做到的。采用的三坐标测量机(简称 CMM, 即 Three-Coordinate Measuring Machines)测试设备为德国 OPTON 公司生产的 UMM500 型三坐标测量机^[6]。CMM 的测量基准采用光栅系统, 以此作为标尺, 栅距 $d = 0.016 \text{ mm}$, 测量误差小于 $1 \mu\text{m}$ 。

2 试验规程

在考察焊接件经受热循环作用下的尺寸的变化时, 热循环温度范围的选取是模拟航天器在太空运行期间所经受的冷热作用情况而确定的, 为-196~100℃。上限温度 100℃用沸水加热实现, 下限温度-196℃使用液氮冷冻试件实现。将经过精加工的焊接件(已经经过室温稳定化之后)用三坐标测量机测定原始长度, 然后用拉线缚住一端(注意不能接触测试端面), 使试件长度方向垂直液面, 将试件浸入液氮, 待液氮平静时, 可认定试件温度已达到-196℃, 冷却 1 h 后取出, 在空气中放置 1 h, 再垂直浸入沸水中, 在 100℃的沸水中保温 2 h, 取出试件, 完全干燥后进行第二次长度测试, 以上过程重复进行, 直至焊件长度趋于稳定时停止测量。为考察不同热循环温度范围对焊接件长度变化的影响, 同时进行另一组试验, 即采用相同材料和尺寸、

相同焊接规范焊接的另一焊接件进行-196~25℃温度范围的热循环条件下长度测量试验,以便进行对比。

3 焊接材料及焊接规范

采用管状试件沿母线焊一条纵缝,测量试验采用的试件尺寸如图1所示。焊接材料见表1。焊接规范见表2。

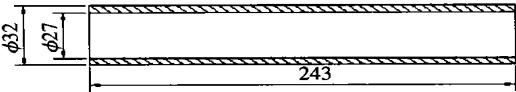


图1 LY12CZ 铝合金试件尺寸(mm)
Fig. 1 Specimen size

表1 LY12CZ 铝合金的主要化学成分(质量分数,%)

元素	Cu	Mg	Mn	杂质	Al
含量	3.8~4.9	1.2~1.8	0.3~0.9	≤1.2	余量

表2 试件的焊接规范参数

焊接方法	电流 I/A	焊接速度 v/(mm·s ⁻¹)	焊丝
AC TIG	160	3.4	LY12

4 变形规律

冷热循环后 LY12CZ 铝合金焊件的长度相对变化与循环次数的关系曲线如图2所示,从中可以看出,在冷热冲击过程中,焊件发生了伸长变形。最初变形速度快,随后逐渐变慢,经过9次冲击之后,试件尺寸趋于稳定,总的相对伸长量为 1.62×10^{-3} 。

相对应同种材料的第二组焊接件(-196~25℃)尺寸的变化量很小,其数值在3μm之内略有变化,考虑CMM系统的测量误差为1~2μm,可以认为试件随着冷热循环次数的增加尺寸基本不发生变化。

5 变形机理

从微观组织角度考虑,LY12铝合金属于Al—Cu—Mg合金,该合金是硬铝,图3为Al—Cu—Mg三元合金相图(富Al角),可见LY12合金室温时平衡相组成为α+S(CuMgAl₂)+θ(CuAl₂),S相和θ

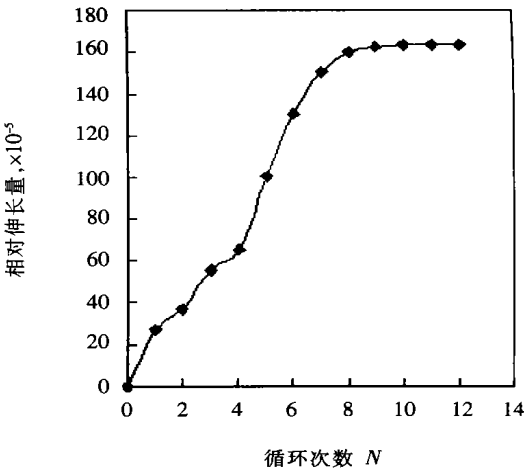


图2 LY12CZ 铝合金焊件长度相对变化与循环次数的关系
Fig. 2 Relationship between relative length changes of LY12CZ specimen and number of thermal shock cycles

相金属化合物,这些化合物在Al中均有显著的溶解度变化。焊缝及近缝区在焊后成为过饱和固溶体,在自然时效过程中易析出S相及θ相,Cu及Mg在高温溶入Al中可形成置换固溶体,α固溶体是面心立方结构,在自然时效过程中析出的S相是面心斜方晶格,θ相是体心正方晶格。S相和θ相的晶格常数均大于基体α相,如图4所示。但S相的晶格致密度与α相相近,S相的析出对过饱和固溶体的尺寸改变无明显影响,θ相的体心正方晶格的致密度(68%)与α相的面心立力晶格致密度(74%)相差较大,因而对图4的α、θ、S相晶体结构进行相分析比较,θ相的析出使晶体体积增大,产生微观压应力,所以可以认为强化相的析出使焊件在焊后发生尺寸增加的不稳定变形,最高热循环温度还未达到相变温度(三元共晶温度为507℃)的母材部分,在受热过程中,θ相及S相溶解甚微,时效中新析出相很少,由此引起的焊件尺寸变化也就很小;从力学因素角度看,LY12CZ属硬铝,其焊接残余应力值较大,焊缝及部位的拉应力峰值也较高,这里易发生应力松弛,而压应力区发生应力松弛就较困难,所以残余应力的松弛会使焊件的尺寸增大。

考虑热循环温度的变化,在上限温度100℃,S相及θ相的析出较常温时容易,所以可促进行体积的膨胀,使试件尺寸增加。从力学因素分析,在较高温度,特别是上限温度100℃时,在较高应力的焊缝及近缝区,应力的蠕变松弛也比室温下容易进行,松弛的速度也就快些,所以这也可促进焊件尺寸的增加,低应力区的松弛则困难得多,金属的蠕变变形主要是通过位错滑移,晶界滑动及空位扩散等方式进

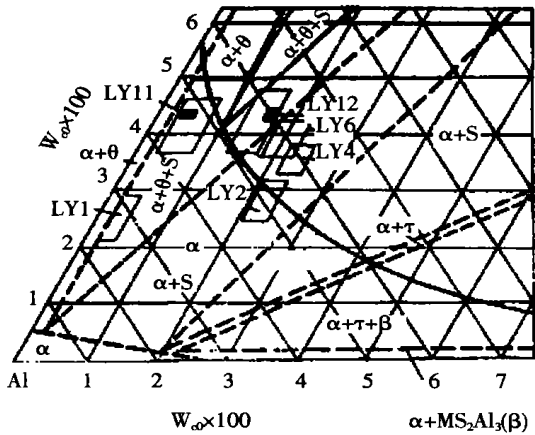


图 3 Al-Cu-Mg 三元合金相图富 Al 角部分
Fig. 3 Phase diagram of Al-Cu-Mg alloy near by Al phase

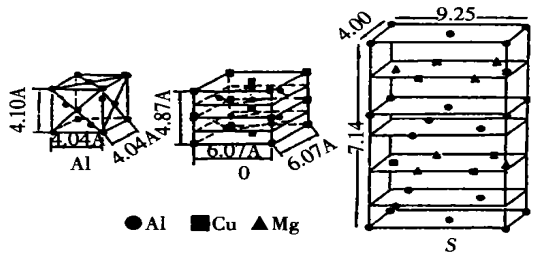


图 4 α 、S、 θ 相的晶体结构
Fig. 4 Crystal constructions of α 、S and θ phase

行的, 其中滑移是蠕变过程的重要方式。在一般情况下, 若滑移面上的位错运动受阻产生塞积, 滑移便不能进行, 常温下应力松弛到一定阶段便趋于稳定。但在较高温度时, 位错可借助于热激活和空位扩散过程来克服某些短程障碍, 从而使变形不断产生。在常温下晶界滑动变形是极不明显的, 可以忽略不计, 但在高温下, 由于晶界上原子容易扩散, 受力后易产生滑动, 故促进蠕变进行。空位扩散也在很高温度时才易进行, 在不受外力情况下, 空位的移动没有方向性。但当有较高拉应力作用(焊缝部位)时, 如图 5 所示^[7], 出现较多空位, 从而在晶体内部形成一定空位浓度, 空位沿实线箭头方向两侧流动, 原子则朝虚线箭头方向流动, 从而使晶体产生伸长蠕变。但扩散蠕变是在接近熔点温度, 应力较低时产生的。因而扩散蠕变的作用很小, 可以忽略。所以, 100 °C 的循环上限温度增加了焊接应力的松弛的趋势。在温度为 -196 ~ 25 °C 时, 虽然合金的焊缝及近缝区固溶体的过饱和程度有所增加。但原子的活动性已大大下降, 位错的滑移比常温时更困难, 所以低温下焊件不容易发生尺寸改变。

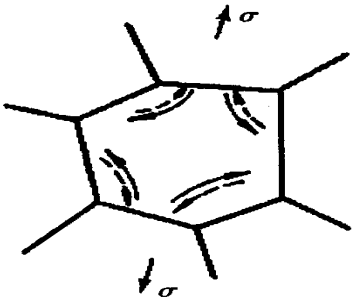


图 5 晶粒内部扩散蠕变示意图
Fig. 5 Diagrammatic sketch of diffusion creep in crystalline grain

6 结 论

- (1) LY12CZ 铝合金焊接件在经受热循环冷热冲击作用下发生尺寸不稳定变形, 其变形的测量适合在三坐标机(CMM)上进行, 在 -196 ~ 100 °C 的温度区间内, LY12CZ 铝合金焊接件经受 9 次冷热冲击循环后尺寸趋于稳定, 总的相对伸长量为 1.62×10^{-3} 。
- (2) LY12CZ 铝合金焊接件在热循环作用下发生的尺寸不稳定变形主要与焊接应力的松弛和微观组织的变化即 θ 相的析出有关。
- (3) LY12CZ 铝合金焊接件在热循环作用下发生焊接应力的松弛作用在温度循环的上限(100 °C)更明显。

参考文献:

[1] ПРЮХОВ Н. Н. Физические процессы в металлах при сварке [М]. Т 2М: Металлургия. 1976.

[2] 柯新和. 焊接结构的尺寸稳定性 [J]. 航天工艺, 1996, (5): 10 ~ 16.

[3] Zhu Hongguan, Li Yueping, Tian Xitang. A study of dimensional instability of LY12CZ aluminum alloy weldment — a method for stabilization [C]. New Advance in Welding and Allied Processes Proceedings of the International Conference 1991. 8 ~ 10.

[4] 滕云鹤. 减小静电陀螺的漂移率与调整方法 [J]. 宇航学报, 1994, 14(1): 13.

[5] Саплевин В. И. Стабильность сварных соединений и конст рукций [М]. Москва, 1986.

[6] 李 洁. 三坐标测量机测头及其误差修正的研究 [D]. 哈尔滨 哈尔滨工业大学. 1988. 24 ~ 26.

[7] 束德林. 金属力学性能 [M]. 北京: 机械工业出版社. 1987.

作者简介: 刘雪松, 男, 1968 年出生, 工学博士。主要从事焊接结构力学方面的研究工作, 发表论文 20 余篇。

Email: liuxuesong@hit.edu.cn