文章编号: 1004-0609(2013)12-3282-07

7050-T7451 铝合金预拉伸板材热膨胀系数变化规律及机理

黄晓明1,孙杰1,李剑峰1,罗育果2

(1. 山东大学 机械工程学院 高效洁净机械制造教育部重点实验室,济南 250061;2. 中航工业集团成都飞机制造有限责任公司,成都 610092)

摘 要:针对平均热膨胀系数(CTE)对航空整体结构件热变形准确预测带来较大误差这一问题,利用热机械分析 仪在 25~500 ℃范围内对 7050-T7451 铝合金热膨胀系数进行准确测量,采用数值拟合方法获得铝合金 7050-T7451 热膨胀系数随温度升高的非线性变化规律。从铝合金 7050-T7451 材料的合金成分和金相结构变化角度,揭示铝 合金 7050-T7451 热膨胀系数变化的材料学内在本质;分别采用平均热膨胀系数和准确热膨胀系数模型对工件变 形进行预测分析。结果表明,与平均热膨胀系数模型相比,采用准确热膨胀系数模型时热变形最大相对计算误差 由 17.4%降为 9.5%。

关键词: 7050-T7451 铝合金; 热膨胀系数; 微观结构; 热处理; 模型误差 中图分类号: TG146.2 文献标志码: A

Varying rules and mechanism of thermal expansion coefficient for pre-stretched 7050-T7451 aluminum alloy plate

HUANG Xiao-ming¹, SUN Jie¹, LI Jian-feng¹, LUO Yu-guo²

 Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;
 CAC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

Abstract: Data for the coefficient of thermal expansion (CTE) of pre-stretched 7050-T7451 aluminum alloy are usually given in average values. This may bring a comparatively large error for predicting distortion of aeronautic monolithic components. To solve this problem, accurate measurements of the CTE of 7050-T7451 aluminum alloy were conducted. The measurement was carried out with the help of thermo mechanical analysis (TMA) with temperature varying from 25 to 500 °C. Numerical fitting method was adopted to obtain the nonlinear variation rules of CTE of the alloy with temperatures. The inherent nature of CTE variation was revealed based on 7050-T7451 composition and metallography. At the end, the deformation prediction analysis of the workpiece was carried out using the average CTE and accurate CTE models, respectively. The results show that the maximum relative error obtained by the accurate CTE drops from 17.4% to 9.5% compared with that of the average CTE.

Key words: 7050-T7451 aluminum alloy; thermal expansion coefficient; microstructure; heat treatment; model error

现代航空工业中,铝合金是与钛合金和复合材料 并重的三大主要结构件材料之一。铝合金广泛应用于 现代飞机整体框、梁、壁板和长缘条等整体结构件^[1-2]。 7050-T7451 铝合金属于 Al-Zn-Mg-Cu 系列合金,具有 强度高、断裂韧度大和抗应力腐蚀性能好等优点,是 航空航天工业应用最广泛的铝合金材料之一。铝合金 具有较大的热膨胀系数,在航空整体结构件制造过程 中,由于加工现场与测量、装配现场存在一定的温度

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275277)

收稿日期: 2013-02-02; 修订日期: 2013-08-20

通信作者: 孙 杰, 教授, 博士; 电话: 0531-88394593; E-mail: sunjie@sdu.edu.cn

差,加工现场的合格零件在装配、测量现场出现超差 问题,给生产带来困扰^[3]。另外,铝合金工件在使用 过程中存在很大的季节性和地域性环境温度差异,当 温度变化时产生较大的热变形和热应力, 使零件的制 造及装配精度降低,甚至造成零件报废^[4]。铝合金热 膨胀系数的准确测量和建模是航空结构件温度变化引 起变形精确计算的基础和前提。国内外学者对航空材 料的热膨胀特性进行了广泛的研究。ENYA 等^[5]研究 了 C/SiC 航空复合材料在低温时的热膨胀系数,认为 通过增加碳纤维可以有效减小该材料的热膨胀变形的 各向异性。为了减小不同材料热膨胀系数差异引起的 航空光学仪表测量差异,OLIVA 等^[6]研究了 Al-6061 和 Al-6082 的低温热膨胀特性, 二者在 77 K 下的热膨 胀系数误差仅为 0.28%。BENAL 等^[7]分析了热处理时 间对玻璃纤维增强 6061 铝合金复合材料的热膨胀系 数的影响规律。孙建强等^[8]通过假定合金膨胀系数与 化学成分存在线性关系,计算了11种共晶铝合金的热 膨胀系数。武玉英等^[9]研究了硅相形态及含量对 Al-Si 合金热膨胀系数的影响,指出 Al-Si 合金中硅含量越 高,其热膨胀系数越小。王新宇等^[10]研究了镀 TiC 金 刚石/铝复合材料的热膨胀性能,认为 TiC 镀层能有效 地降低复合材料的热膨胀系数,在体积分数相同的情 况下,热膨胀系数随金刚石颗粒尺寸的减小而减小。 上述研究主要集中在不同材料一定温度范围内的热膨 胀系数平均值的比较,忽略了热膨胀系数随温度的动 态变化,也缺乏金相组织结构对热膨胀系数影响的内 在机制研究。

本文作者采用热机械分析仪对 7050-T7451 合金 不同方向的热膨胀变形量进行准确测量,分析铝合金 预拉伸板材不同方向热膨胀系数变化规律,采用多项 式拟合获得热膨胀系数随温度变化的函数关系,借助 于材料金相组织结构分析,揭示热膨胀系数变化的材 料学内在机制。比较平均热膨胀系数和温度函数表达 精确热膨胀系数对工件变形预测精度的影响,为因温 度变化引起航空整体结构件变形的预测提供支持。

1 热膨胀系数计算模型

热膨胀特性是物体的基本属性,是原子在热作用 下振动产生的效应。在双原子模型中,原子作用势能 *u*(*r*)是原子间距离*r*的函数,当发生热振动时,两原子 间距由 *r*₀变为 *r*₀+*x*,则相互作用势能变为^[11]

$$u(r) = u(r_0 + x) \tag{1}$$

将式(1)在ro处泰勒级数展开:

$$u(r) = u(r_0) + \left(\frac{du}{dr}\right)_{r_0} x + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2 u}{dr^2}\right)_{r_0} x^2 + \frac{1}{3!} \left(\frac{d^3 u}{dr^3}\right)_{r_0} x^3 + \frac{1}{4!} \left(\frac{d^4 u}{dr^4}\right)_{r_0} x^4 + \frac{1}{5!} \left(\frac{d^5 u}{dr^5}\right)_{r_0} x^5 + \cdots$$
(2)

根据波尔兹曼热力学统计原理,偏离 r₀的平均位 移 x 为

$$\overline{x} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x \exp(-\frac{u}{KT}) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-\frac{u}{KT}) dx}$$
(3)

式中: *u、K*和*T*分别为两原子间的相互作用能、玻尔 兹曼常数和热力学温度。由热膨胀系数定义,得到任 意时刻的热膨胀系数(*α*_{CTE T}):

$$\alpha_{\text{CTE},T} = \frac{1}{r_0} \frac{d\overline{x}}{dT} = \frac{1}{r_0} \left[\frac{\beta K}{\alpha^2} + \left(\frac{2\delta K^2}{\alpha^3} - \frac{16\gamma\beta^2}{\alpha^4} \right) T - \left(\frac{18\gamma^2\beta}{\alpha^6} + \frac{21\beta^2\delta}{\alpha^6} + \frac{558\gamma\delta}{4\alpha^5} \right) K^3 T^2 + \cdots \right]$$
(4)

其中:
$$\alpha = (\frac{d^2 u}{dr^2})_{r_0}; \quad \beta = -\frac{1}{2}(\frac{d^3 u}{dr^3})_{r_0}; \quad \gamma = \frac{1}{6}(\frac{d^4 u}{dr^4})_{r_0};$$

 $\delta = -\frac{1}{24}(\frac{d^5 u}{dr^5})_{r_0}, \dots$

从式(4)看出,材料的热膨胀系数随着温度的不同 而发生变化,由于铝合金的热膨胀系数受合金成分、 相变、晶体缺陷、晶体各向异性和工艺等因素影响, 难以利用理论计算热膨胀系数^[12-13]。在实际工程中, 通常采用在一定温度范围内的平均热膨胀系数,

$$\alpha_{\text{CTE, m}} = (\Delta L / L_0) / \Delta t \tag{5}$$

温度升高 T 后物体长度变为

$$L_{\rm m} = L_0 (1 + \alpha_{\rm CTE, \ m} T) \tag{6}$$

铝合金预拉伸板材金相组织结构在不同方向上存 在差异^[14],导致其热膨胀系数随着温度和材料方向的 不同而发生变化,而不是一个恒定值。因此,采用平 均热膨胀系数会造成一定的计算误差。当Δt趋于零时, 式(5)变为

$$\alpha_{\text{CTE},T} = (dL/dT)/L_T \quad (T_1 \le T \le T_2) \tag{7}$$

α_{CTE,T} 为瞬时热膨胀系数。根据式(7),温度从
 *T*₀变为 *T* 后材料长度变为

$$L_T = L_0 \exp(\int_{T_0}^T \alpha_{\text{CTE},T} dT)$$
(8)

两种计算模型产生的差异为

中国有色金属学报

9)

$$\Delta L_{T-m} = L_0 (1 + \alpha_{\text{CTE, m}} T) - L_0 \exp(\int_{T_0}^T \alpha_{\text{CTE, T}} dT)$$

2 实验

为研究 7050-T7451 铝合金的热膨胀特性,采用热 机械分析仪对铝合金试样温度变化引起特定尺寸方向 伸长量进行测试,绘制关系曲线,进而对不同温度时 材料金相组织结构进行分析。

2.1 实验材料

选取美国 Kaiser Aluminum & Chemical Corp 公司 生产的 7050-T7451 预拉伸毛坯件试样,化学成分如表 1 所列。试样尺寸 9.065 2 mm×7.995 1 mm×6.581 5 mm(长(*x*)×宽(*y*)×高(*z*))的方向分别对应板材预拉伸、 宽度和厚度方向。

表1 7050-T7451 铝合金的化学成分

Table 1Chemical composition of 7050-T7451 Al alloy (massfraction, %)

Zn	Mg	Cu	Zr	Si
5.93	2.23	2.16	0.11	0.019
Fe	Ti	Cr	Mn	Al
0.068	0.020	< 0.01	< 0.01	Bal.

2.2 实验过程

试样通过线切割从 200 mm×100 mm×58 mm 毛 坯件中心部取出,采用研磨纸对表面进行打磨处理, 分别对试样的3个方向各测量热膨胀系数3次。

热膨胀测量在热机械分析仪(TMA)上进行,温度 变化率为2℃/min,测量范围为25~500℃。实测之前, 试样在25℃预热5min。测量试样随温度升高的热膨 胀量,借助TMA数据分析软件对测得数据进行分析, 计算温度每升高1℃后的热膨胀系数。

利用 Rigaku D/max-rc 型 X 射线衍射仪进行材料 物相分析,电压为 40 kV,电流为 100 mA,扫描速度 为 4 (°)/ min。

表 3 7050-T7451 铝合金 6 阶热膨胀系数多项式拟合系数

为了观察不同温度下材料组织结构的变化,取 4 块试样进行固溶和时效处理,工艺如表 2 所示。将所 有试样进行抛光和金相腐蚀,腐蚀液为 0.5%HF+ 1.5%HCl+2.5%HNO₃+95.5%H₂O(质量分数),最后利用 Olympus 光学金相显微镜观察原始试样和处理后试样 的组织结构变化。

表2 7050-T7451 铝合金固溶时效处理工艺

Table	2	Solid	solution	and	aging	treatment	process	of
7050-1	745	1 Al all	ov					

Sample No.	Solid solution treatment and aging process
1	(475 °C, 3 h)+water quenching
2	(475 °C, 3 h)+water quenching+(120 °C, 8 h)
3	(475 °C, 3 h)+water quenching+(200 °C, 8 h)
4	(475 °C, 3 h)+water quenching+(380 °C, 8 h)

2.3 数据处理

图 1 所示为通过 TMA 测量获得的不同温度下的 热膨胀系数。从图 1 中可以看出,随着温度的升高, 7050-T7451 合金的热膨胀系数发生了非线性变化。考 虑到工程应用的准确性和实用性,根据最小方差原则 将测量的热膨胀系数离散数值进行 6 阶多项式拟合:

$$\alpha_{\text{CTE},T} = \sum_{j=0}^{6} a_j T^j \tag{10}$$

式中: *i*、*a*_j和 *T*分别为试样测量方向、拟合系数和对应的变化温度, 拟合曲线如图 1 中实线所示。*x、y*和 *z*方向 6 阶多项式拟合系数如表 3 所列。

根据变化规律,在温度升高过程中将图 1 中的热膨胀系数拟合曲线通过关键点 *A*、*B*和 *C*分为 4 个区域。

在第 I 区域,随着温度的升高,预拉伸方向的热膨胀系数从 1.746×10⁻⁵ ℃⁻¹逐渐增加到 2.231×10⁻⁵ ℃⁻¹(142 ℃),宽度方向的热膨胀系数从 1.699×10⁻⁵ ℃⁻¹增加到 2.025×10⁻⁵ ℃⁻¹(138 ℃)、厚度方向热膨胀系数从 1.921×10⁻⁵ ℃⁻¹增加到 2.218×10⁻⁵ ℃⁻¹(166 ℃)。*x*和*y*方向近似呈线性增加,而厚度*z*方向变化率小,波动性增大。

Table 3	Coefficients of six-order	polynomials of CTE for	7050-T7451 Al alloy

Direction	Coefficient						
Direction	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
х	18.65	-7.62×10^{-2}	2.73×10^{-3}	-2.57×10^{-5}	1.02×10^{-7}	-1.79×10^{-10}	1.13×10^{-13}
у	17.80	-5.24×10^{-2}	2.06×10^{-3}	-1.97×10^{-5}	7.91×10^{-7}	-1.39×10^{-10}	8.91×10^{-13}
Z	13.93	3.401 8×10 ⁻²	-7.23×10^{-3}	7.75×10^{-5}	-4.38×10^{-7}	1.32×10^{-10}	-1.98×10^{-13}



图 1 7050-T7451 铝合金热膨胀系数随温度的变化曲线

Fig. 1 CTE—temperature curves of 7050-T7451 Al alloy along different directions: (a) Pre-stretch direction; (b) Width direction; (c) Thickness direction

在第Ⅱ区域热膨胀系数的变化不明显, x、y和z方向的Ⅱ和Ⅲ区域分界点为 249、240 和 253 °C,在分 界点x、y和z方向的热膨胀系数分别为 2.005×10⁻⁵、 1.924×10⁻⁵和 2.051×10⁻⁵ °C⁻¹。热膨胀系数随温度的 升高出现略微下降的变化。

在第Ⅲ区域热膨胀系数快速增加并达到最大值。

预拉伸方向的热膨胀系数峰值为 3.293×10^{-5} ℃⁻¹ (435 ℃), 宽度方向热膨胀系数峰值次之,为 3.117×10^{-5} ℃⁻¹(441 ℃),厚度方向热膨胀系数峰值最小,为 3.125×10^{-5} ℃⁻¹(427 ℃),该方向热膨胀系数峰值温度分别低于 x 和 y 方向峰值温度 8 ℃和 14 ℃。

在第Ⅳ区域随着温度升高而呈现热膨胀系数减小的趋势。预拉伸方向、宽度方向和厚度方向的热膨胀系数分别减小至 2.693×10⁻⁵、2.717×10⁻⁵ 和 2.335×10⁻⁵ ℃⁻¹。

3 7050-T7451 铝合金热膨胀系数的 变化机理

图 2 所示为室温下 7050-T7451 铝合金的 X 射线 衍射谱。主相为 α(Al)基体,含有 MgZn₂和 Al₄Cu₉等 多相混合物。在升温过程中,热膨胀系数的变化主要 受两方面的影响:一方面是温度升高引起的原子热振 动增加,另一方面是温度变化引起的合金元素的溶解、 析出以及物相转变等相关。



图 2 7050-T7451 铝合金的 XRD 谱 Fig. 2 XRD pattern of 7050-T7451 Al alloy

为研究材料热膨胀系数变化的原因,对不同热处 理状态下试样的微观组织结构进行观察,结果如图 3 所示。从图 3(a)可以看出,原始状态下晶粒大小为 150 µm 左右,经腐蚀后呈白色,结晶区约占 40%。结晶 区域含有大量亚晶组织,经试剂腐蚀后在光学显微镜 下呈灰色。未固溶的富铁相等粗大金属化合物散落在 晶粒中间,难溶相粒子呈较短互且不相连的条状^[15-16]。

从图 3(b)可以看出,在温度升高的初始阶段,晶 界上的相发生溶解,晶界不明显。晶粒内部析出 GP 区,根据文献[17-18],作为析出相的 GP 区不断长大, 直径从 2 nm 增大至 4.7 nm,晶界相的溶解和新的 GP



(a) Raw state; (b) (475 °C, 3 h)+ (120 °C, 8 h);
(c) (475 °C, 3 h)+(200 °C, 8 h); (d) (475 °C, 3 h)+(380 °C, 8 h); (e) 475 °C, 3 h

区不断析出长大,导致第一区域热膨胀系数近乎线性 增加。

在温度升高的第 II 区域,合金中的 η 相不断增多, 这是因为合金为过饱和固溶体,合金中的 Zn 和 Mg 等原子不断从饱和固溶体中析出,形成 η 相,如图 3(c) 所示。在该过程中,首先生成 η'相,该相是一种非平 衡相,存在的温度区间较窄。η'和 η 相都为六方结构, η'相的点阵常数为 a=0.496 nm, c=1.403 nm, η 相点阵 常数为 a=0.521 nm, c=0.860 nm^[18-19],大量 η 相析出 造成基体点阵常数的负增长,减缓了热膨胀系数的增 大,热膨胀系数曲线中的第Ⅱ区域变化主要是上述相 变产生的结果。

随着温度的继续升高,溶质原子的固溶作用(见图 3(d))对热膨胀系数的影响又开始占主导作用,合金原 子的溶入使得铝合金体积增大,对应第Ⅲ区域的热膨 胀系数快速增长,当温度达到450℃时,固溶已趋饱 和^[15],固溶的影响逐渐消除。

研究表明^[20-21],当温度低于 450 ℃时,合金在固 溶时基体发生再结晶的过程十分缓慢,但温度从 450 ℃逐渐升高后,再结晶启动速度加快,从图 3(e)可以 看出,在475℃下形成大量再结晶颗粒,晶粒大小为 50 μm 左右。再结晶颗粒的形成减小了材料的体积, 从而使得第Ⅳ区域的热膨胀系数曲线呈下降趋势。

4 不同热膨胀系数模型精确度验证

根据热膨胀测量结果,利用式(7)计算 7075-T7451 铝合金试样在不同方向 25~500 ℃之间的平均热膨胀 系数,结果列于表 4。从表 4 可以看出,试样沿预拉 伸 x 方向、厚度 z 方向和宽度 y 方向的平均热膨胀系 数依次减小。由式(5)~(9)分析可知,不同的计算模型 会导致计算误差,为了验证瞬时热膨胀系数的精确性, 利用式(6)和(8)计算升温过程中试样x方向热膨胀后的 长度 L_m 和 L_T ,并与实验结果 L 相比较,求出计算误 差 Δ_{L_m-L} 和 Δ_{L_T-L} 。不同温度下两种模型的计算结果如 图 5 所示。

表 4 7050-T7451 铝合金在不同方向的平均热膨胀系数 Table 4 Average $\alpha_{CTE, m}$ of 7050-T7451 Al alloy on different orientations

Direction	x	У	Ζ
$\alpha_{\rm CTE,m}/(10^{-6}~{}^\circ\!{ m C}^{-1})$	24.34	23.14	23.68



图 4 平均和瞬时热膨胀系数计算误差对比

Fig. 4 Computation of comparison of average and precision CTE models

从图 4 可以看出,平均热膨胀系数计算所得热变 形伸长量大于实验测量值,误差为正值,这是由于在 升温初始阶段,平均热膨胀系数 2.434×10⁻⁵ ℃⁻¹大于 实际瞬时热膨胀系数,随温度升高,误差值逐渐增大, 然后又开始减小。当温度由 25 ℃升高到 292 ℃时实验 测得的伸长量为 51.9 µm,平均热膨胀系数模型计算 的伸长量为 60.9 µm,最大误差为 17.4%。利用精确热 膨胀系数模型计算结果与实验值之间的误差在温度变 化前期非常一致,温度升高到 435 ℃时产生最大误 差,实验伸长量为 78.7 µm,精确热膨胀系数模型计 算量为 86.3 µm,最大误差为 9.5%。随后误差又逐渐 减小并变为负值,这说明利用精确热膨胀系数函数有 一定的误差纠正能力,利用瞬时精确热膨胀系数,能 够得到更好的热膨胀变形预测。

5 结论

 采用热分析仪对 7050-T7451 铝合金热膨胀量 随温度变化进行精确测量,获得材料在 25~500 ℃之 间的热膨胀系数变化规律,将热膨胀系数随温度变化 特性划分为4个区域:增大-持平-增大-减小。

2) 根据最小方差原理,建立了 7050-T7451 铝合 金预拉伸板不同方向热膨胀系数非线性变化精确表达 式。

3) 根据不同温度下铝合金金相的特征,从材料组 织结构角度揭示了热膨胀系数变化规律的本质, 7050-T7451 铝合金中晶界相的溶解, GP 区、η 相形成 析出和固溶以及再结晶的发生是非线性变化的主要原 因。

4) 采用研究中所建立的精确热膨胀系数模型可 以显著提高变形预测精度。25~500 ℃间的平均热膨胀 系数模型计算变形量大于实测结果,最大计算误差率 达到 17.4%,而精确热膨胀系数函数模型最大计算误 差则为 9.5%。

REFERENCES

 [1] 刘 兵,彭超群,王日初,王小峰,李婷婷.大飞机用铝合金的研究现状及展望[J].中国有色金属学报,2010,20(9): 1705-1715.

LIU Bing, PENG Chao-qun, WANG Ri-chu, WANG Xiao-feng, LI Ting-ting. Recent development and prospects for giant plane aluminum alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(9): 1705–1715.

[2] 林 纲, 林慧国, 赵玉涛. 铝合金应用手册[M]. 北京: 机械 工业出版社, 2006: 280-290.

LIN Gang, LIN Hui-guo, ZHAO Yu-tao. Manual for application of aluminium alloys[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 280–290.

[3] YANG Y P, DONG P. Buckling distortions and mitigation techniques for thin-section structures[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21(2): 153–160.

- [4] 郭加林, 尹志民, 沈 凯, 彭小芒, 王 华. 使役条件下热暴 露对 2124-T851 铝合金显微组织与性能的影响[J]. 中南大学 学报:自然科学版, 2009, 40(4): 921-925.
 GUO Jia-lin, YIN Zhi-min, SHEN Kai, PENG Xiao-mang, WANG Hua. Effect of thermal exposure during application on microstructure and mechanical properties of 2124-T851 aluminum alloy[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(4): 921-925.
- [5] ENYA K, YAMADA N, IMAIL T. High-precision CTE measurement of hybrid C/SiC composite for cryogenic space telescopes[J]. Cryogenics, 2012, 52(4): 86–89.
- [6] OLIVA E, GONZALEZ M. High-precision CTE measurement of aluminum-alloy for cryogenic astronomical instrumentation[J]. Exp Astron, 2009, 27(1): 1–7.
- [7] BENAL M M, SHIVANAND H K. Influence of heat treatment on the coefficient of thermal expansion of Al (6061) based hybrid composites[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 435(5): 745–749.
- [8] 孙建强,张仁远,卢国辉,沈学忠.共晶铝合金热膨胀系数的 测定与回归分析[J]. 广东工业大学学报,2006,23(2):12-17. SUN Jian-qiang, ZHANG Ren-yuan, LU Guo-hui, SHEN Xue-zhong. Regression analysis and measurement for the coefficient of thermal expansion of eutectic Al-based alloy at solidus[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2006,23(2): 12-17.
- [9] 武玉英,刘相法,戴 勇,姜炳刚,边秀房. 硅相形态及含量 对 Al-Si 合金热膨胀系数的影响[J]. 中国有色金属学报,2007, 17(5): 688-692.

WU Yu-ying, LIU Xiang-fa, DAI Yong, JIANG Bing-gang, BIAN Xiu-fang. Influence of morphology and content of silicon phase on CTE of Al-Si alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(5): 688–692.

- [10] 王新宇, 于家康, 朱晓敏. 镀 TiC 金刚石/铝复合材料的界面 及热膨胀性能[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(6): 1718-1724. WANG Xin-yu, YU Jia-kang, ZHU Xiao-min. Interface and thermal expansion properties of TiC-coated diamond/Al composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(6): 1718-1724.
- [11] 丁鸿章. 工程金属材料热膨胀系数的计算[J]. 浙江工业大学 学报, 2000, 28(4): 358-366.
 DING Hong-zhang. Calculation of linear expansion coefficient of metallic materials[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2008, 28(4): 358-366.
- [12] KIMA B G, DONG S L, PARKA S D. Effects of thermal processing on thermal expansion coefficient of a 50vol.% SiC_p/Al composite[J]. Materials Chemistry and Physics, 2001, 72(1): 42–47.
- [13] 黄继武, 尹志民, 聂 波, 陈继强, 何振波. 7A52 铝合金原位 加热过程中的物相转变与热膨胀系数测量[J]. 兵器材料科学 与工程, 2007, 30(4): 9-12.
 HUANG Ji-wu, YIN Zhi-min, NIE Bo, CHEN Ji-qiang, HE

Zhen-bo. Investigation of phases and thermal expansivity of 7A52 alloy in in-situ heating[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007, 30(4): 9–12.

[14] 张新明,韩念梅,刘胜胆,宋丰轩,曾瑞林,黄乐瑜. 7050 铝 合金厚板织构、拉伸性能及断裂韧性的不均匀性[J]. 中国有 色金属学报,2010,20(2):202-208. ZHANG Xin-ming, HAN Nian-mei, LIU Sheng-dan, SONG

Feng-xuan, ZENG Rui-lin, HUANG Le-yu. Inhomogeneity of texture, tensile property and fracture toughness of 7050 aluminum alloy thick plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(2): 202–208.

- [15] LI X M, STARINK M J. DSC study on phase transitions and their correlation with properties of overaged Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21(6): 977–984.
- [16] 李学朝. 铝合金材料组织与金相图谱[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.

LI Xue-chao. Material organization and metallographic map of aluminium alloy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.

[17] 李培跃,熊柏青,张永安,李志辉,朱宝宏,王 锋,刘红伟.
 7050 铝合金淬火特性与微观组织[J].中国有色金属学报,
 2011,21(3):514-521.
 LI Pei-yue, XIONG Bai-qing, ZHANG Yong-an, LI Zhi-hui,

ZHU Bao-hong, WANG Feng, LIU Hong-wei. Hardenability characteristic and microstructure of 7050 Al alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(3): 514–521.

- [18] YANG Ji-gang, OU Bin-lung. Influence of microstructure on the mechanical properties and stress corrosion susceptibility of 7050 Al-alloy[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2001, 30(3): 158–167.
- [19] 万彩云,陈江华,杨修波,刘吉梓,伍翠兰,赵新奇.7XXX系
 AlZnMgCu 铝合金早中期时效强化析出相的研究[J]. 电子显微学报,2010,29(5):455-460.
 WAN Cai-yun, CHEN Jiang-hua, YANG Xiu-bo, LIU Ji-zi, WU

Cui-lan, ZHAO Xin-qin. Study of the early & mid-stage hardening precipitates in a 7XXX AlZnMgCu aluminium alloy[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2010, 29(5): 455–460.

[20] 熊创贤, 邓运来, 万 里, 张新明. 7050 铝合金板在固溶过 程中微结构与织构的演变[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(3): 427-434.

XIONG Chuang-xian, DENG Yun-lai, WAN Li, ZHANG Xin-ming. Evolutions of microstructures and textures of 7050 Al alloy plate during solution heat treatment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(3): 427–434.

[21] LI Pei-yue, XIONG Bai-qing, ZHANG Yong-an, LI Zhi-hui. Temperature variation and solution treatment of high strength AA7050[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(3): 546–554.

(编辑 陈卫萍)