LY12BCZYu薄板热处理工艺改进

赵连清，王文平，许东

摘要：以LY12BCZYu材料加工的薄板为例，研究了不同热处理参数对薄板残余应力以及变形的影响。测试结果表明原始的预拉伸板残余应力分布不均匀且较大；经过高低温循环、190℃保温2h随炉冷、240℃保温2h随炉冷后，残余应力明显降低且均匀性得到改善。为了保证力学性能没有较大变化的情况下，确定合理的热处理工艺，机械加工后底板的残余应力分布也较为均匀且较小。薄板经过力学和环境试验后，用100刀口形直尺测量其平面度达到0.1/100，符合要求。

关键词：LY12BCZYu；变形；残余应力；薄板

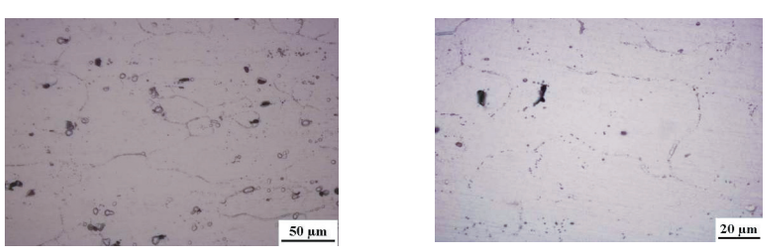
机箱结构属于功能线路体系物理层，其功能是从物理上实现各功能组件的拓扑布局，实现整机线路合理划分功能板块，维持设备外部构型，为内部线路系统提供外部机械接口和内部安装空间，确保在各种受载条件下，元器件、组件的安全，满足导热散热、辐照防护、EMC等要求。然而机箱薄底板的平面度好坏直接关系到机箱的导热散热水平，影响到产品的接口尺寸。

影响薄板变形的主要因素为薄板残余应力大小。如果残余应力分布不均匀以及大小较大，在加工过后，零件通常会出现弯曲、扭曲、弯扭组合等加工变形，使零件难以达到设计要求，甚至成为废品。因此，研究了原始板、不同热处理状态以及不同加工工艺机箱薄底板的残余应力演变规律，对后续薄板变形控制和加工生产具有重要的意义。

1. 试验材料及试验机箱

（1）试验材料力学性能　机箱材料选用的铝合金板为LY12BCZYu，由西南铝业有限责任公司生产，预拉伸板的规格为12mm×1000mm×2000mm，西南铝业公司提供的产品质量证明书材料力学性能测试数据为抗拉强度为440~465MPa，断后伸长率为12.5%~17.5%，满足GJB1741—1993技术标准。材料化学成分如表1所示。

（2）试验材料金相显微组织　由于金相组织与采用X射线衍射法测试残余应力关系密切，为保证残余应力测量的准确性，测试前对LY12BCZYu表面金相组织进行检验，该组织具有时效析出特征：晶粒状态为典型的等轴晶粒，无织构，尺寸为20~100μm，但是有一定不均匀度，原始板LY12BCZYu金相显微组织如图1所示。此后的热处理工艺不会改变原有的晶粒大



（a）宏观金相显微组织　　（b）局部放大金相显微组织

图1　原始板LY12BCZYu金相显微组织

表1　LY12BCZYu化学成分（质量分数）　　（%）

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Al
标准值	≤0.50	≤0.50	3.8~4.9	0.3~0.9	1.2~1.8	≤0.10	≤0.30	≤0.15	Re
实测值	0.14	0.30	4.83	0.59	1.70	0.10	0.15	0.01	Re

小，晶粒大小对于X射线衍射法测残余应力大小较合适。

（3）试验机箱　试验机箱选定分立面板拼合型机箱，投产数量大，代表性强，且其底板材料牌号状态为2A12T4，设计的最大外形尺寸为：长×宽×高=290mm×250mm×6mm，设计有减重槽和加强筋，减重槽内最薄的地方为2.5mm，为大尺度、全底面接触式结构，试验机箱共加工4个，如图2所示。

课题研究前发现加工的20个机箱的平面度大致为0.45mm左右，验收时平面度为0.65～0.70mm，力学试验后确认平面度超差原因是因为底面局部凹心，部分支耳下垂将底面抬起所致，平面度超差原因示意如图3所示。

2. 试验方案

试验方案分为五个阶段：

第一阶段：采用X射线衍射法进行分析 LY12BCZYu原始板、190℃保温2h炉冷、240℃保温2h炉冷、高低温循环后的表面残余应力。

第二阶段：把第一阶段热处理残余应力松弛最大后的预拉伸板和原始板，进行剥层，定性分析内部残余应力状态。

第三阶段：通过选择较为合理的热处理参数，分析热处理后预拉伸板对硬度和力学性能的影响。

第四阶段：按照制定的加工工艺进行加工生产，对加工后到尺寸成形底板进行残余应力测试和力学、环境试验后平面度的检测。

第五阶段：对残余应力测试和平面度检测后的结果，进行总结分析。试验方案流程图如图4所示。

3. 测试试样与试验结果

（1）测残余应力试样　测定LY12BCZYu试件原始板及不同热处理状态的残余应力，选择厚度δ=12mm，采用同批次同板料，轧制方向一致，加工尺寸为230mm×220mm（见图5a），对称铣四周到200mm×190mm，沿轧制方向铣出宽50mm×200mm×10mm的台阶。

机箱结构特点为：总厚度为6mm；设计有减重槽，减重槽内最薄的地方为2.5mm；同时设计的加强筋长度方向有5条，宽度为2.5mm，宽度方向为2条，宽度为2.5mm；安装凸耳设计有6个，每个安装孔的孔径为φ5.5mm，与M5规格螺钉配合。薄底板外形三维图如图5b所示。

（2）原始预拉伸板及不同热处理状态残余应力的测试　由于预拉伸铝合金厚板的残余应力分布具有各向异性，轧向和横向应力分布曲线相似，测定这一点的轧向和横向的残余应力大小，横向应力值约为长度方向的2/3。因此，测定轧向更有代表意义。

同一预拉伸板测量3个值，为了减小测量随机误差，将

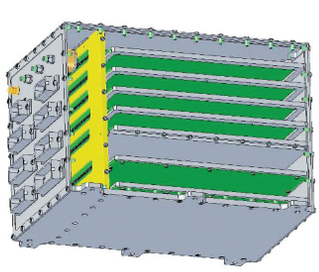


图2　试验机箱

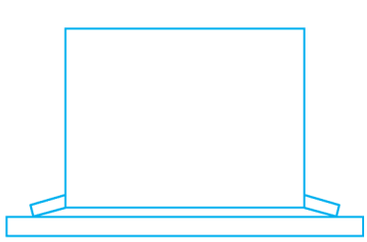


图3　平面度超差原因示意

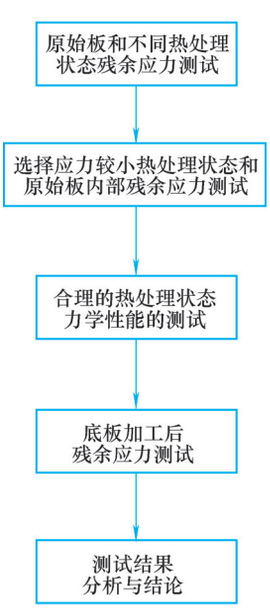
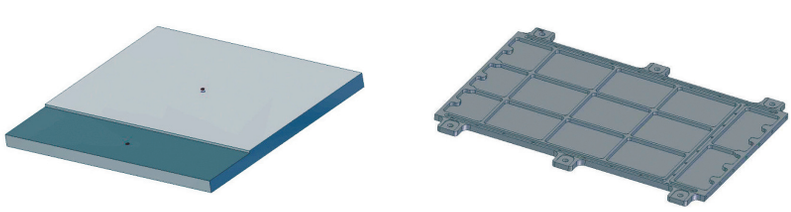


图4　试验方案流程图



（a）原始板及不同热处理试样　　（b）底板外形三维图

图5　不同加工状态的残余应力测试试样

测量值进行算术平均，并加上误差棒，试验表明，原始板的残余应力分布不均匀，经过不同热处理后残余应力分布均匀性有较大幅度改善。原始态、240℃保温2h随炉冷、190℃保温2h随炉冷、高低温循环的最大残余应力分别为105.9MPa、33.2MPa、28.3MPa、40.0MPa，平均残余应力分别为88.57MPa、15.3MPa、21.2MPa、34.1MPa。与原始状态相比，分别降低82.72%、76.06%、61.50%，可见经过热处理后的残余应力大小相差较小。不同热处理状态的残余应力大小变化如图6所示，不同热处理状态的残余应力分布如图7所示。

（3）原始预拉伸板及240℃保温2h随炉冷后内部残余应力的测试　根据参考文献[2]，最大拉应力不在板的中心，而在距板中心面约1/8板厚处，最大压应力发生在板的浅表层而不在板的表面。因此，本次试验采用数控铣削方式进行剥层，剥层厚度约为2mm，然后测定残余应力作为内部残余应力参考。由于原始板经过240℃保温2h后残余应力有较大松弛，并且更加均匀，因此，选择此状态进行剥层。

原始板内部残余应力分布不均匀，最大值为–154.3MPa，与原始板相比，240℃保温2h内部残余应力分布更为均匀，平均残余应力下降63.9%。原始预拉伸板及240℃保温2h剥层后的内部残余应力如表2所示。

（4）240℃保温2h炉冷对预拉伸板硬度和力学性能的影响　由于LY12BCZYu预拉伸板材料本身硬度值偏高（实测约为80HRB），易造成零件加工变形较大，因此依据《GJB1694—1993　变形铝合金热处理规范》要求硬度值≥68HRB，首先考虑在满足零件要求的硬度值条件下。对称铣去包铝层，厚度到（10.5±0.2）mm，然后进行不同热处理参数去应力处理前后的硬度测试，每个热处理温度下打8个硬度值然后取平均数。

试件去应力后的抗拉强度σ_b和规定非比例伸长应力$\sigma_{p0.2}$均满足较好，但断后伸长率δ低于标准值，由于机箱对塑性指标要求不高，240℃保温2h炉冷去应力参数处理后试件仍满足要求。选用3种去应力参数进行降低硬度消应力处理。240℃保温2h炉冷后的硬度值和力学性能如表3所示。

（5）加工工艺底板对残余应力和平面度的影响　机箱底板加工过程中共有三道热处理，第一道热处理为在240℃保温2h随炉冷，第二道热处理为190℃保温2h随炉冷，最后一道为高低温循环处理。底板加工工艺如图8所示，测量其残余应力共三个点，最大残余应力为19.7MPa，平均残余应力值为17.2MPa，平均残余应力数值较小。机加工、力学和环境试验后，用100刀口形直尺测量平面度较好，均满足0.1/100。热平衡试验后用100刀口形直尺复测机箱薄板平面度如图9所示。

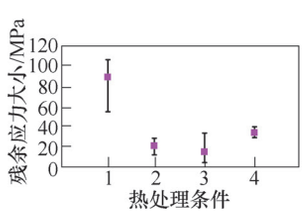


图6　不同热处理状态的残余应力大小变化图

1. 原始态　2. 190℃保温2h随炉冷
3. 240℃保温2h随炉冷　4. 高低温循环

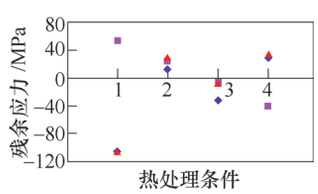


图7　不同热处理状态的残余应力分布图

1. 原始态　2. 190℃保温2h随炉冷
3. 240℃保温2h随炉冷　4. 高低温循环

表2　原始预拉伸板及240℃保温2h剥层后的内部残余应力

残余应力测试状态	1	2	3	平均值
240℃保温2h剥层后/MPa	-32	-30.6	-19.7	-27.4
原始板剥层后/MPa	-39.9	-154.3	-33.1	-75.8

表3　240℃保温2h炉冷后的硬度值和力学性能

去应力参数	去应力后硬度平均HRB	标准	GJB1741—1993		
		力学性能	抗拉强度σ_b/MPa	规定非比例伸长应力$\sigma_{p0.2}$/MPa	断后伸长率δ（%）
		标准值	≥440	≥290	≥12
室温入炉240℃，2h炉冷	75.85	实测值	445	385	9.0
			440	385	9.6
			445	375	9.5

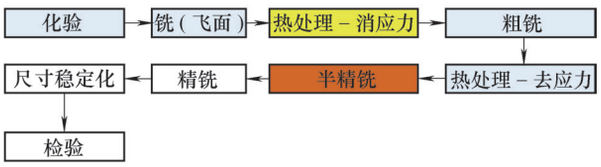


图8 底板加工工艺

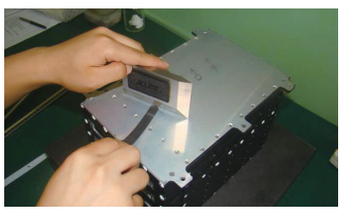


图9 热平衡试验后用100刀口形直尺复测机箱薄板平面度

4. 结语

（1）通过X射线衍射法测试原始预拉伸板的残余应力，结果表明原始板的残余应力分布不均匀，最大值达到–105.9MPa，平均残余应力为88.6MPa。

（2）原始板、240℃保温2h随炉冷、190℃保温2h随炉冷、高低温循环后的最大残余应力平均残余应力分别为88.57MPa、15.3MPa、21.2MPa、34.1MPa。与原始状态相比，平均残余应力分别降低82.72%、76.06%、61.50%，可见经过热处理后残余应力明显降低，均匀性得到改善。

（3）原始板和240℃保温2h随炉冷板经过剥层后，平均残余应力分别为75.8MPa、27.4MPa。与原始板相比，240℃保温2h随炉冷残余应力下降63.9%，且分布更加均匀，表明其热处理后内部残余应力也有较大幅度降低。

（4）机箱加工工艺中经过3道热处理后，最大残余应力值为19.7MPa，平均残余应力值17.2MPa，底板残余应力较小。用100刀口形直尺测量每道加工工序后、力学和环境试验后的平面度均满足0.1/100。

参考文献

[1] 王炎.飞机整体结构件数控加工技术应用中的问题与对策[J]. 航空制造工程，1998（4）：28-30.

[2] 郑鹏，郑玉珍，魏晖，等.2324铝合金厚板内部残余应力分布特征及其影响[J].航空学报，1996，17（3）：330-336.

作者简介：赵连清、王文平、许东，北京控制工程研究所。

MW 20170612

《金属加工(热加工)》 2017年第13期广告目次

单位名称	编号	位置	单位名称	编号	位置
西安机电研究所	1300	封面A	金属加工APP	001	前彩2
金属加工杂志社	8000	封二A	因德特伦精密机械（太仓）有限公司	1904	前彩3
陕西博创电器有限公司	5325	封面B	中国国际工业博览会	6014	前彩4
应达工业（上海）有限公司（熔炼）	1262	封二B	2017全国失效分析研讨会	8000	分隔页
天津天高感应加热有限公司	1943	封三	金属加工杂志社	8000	I
江苏丰东热技术股份有限公司	5098	封底	保定晶辉电气设备有限公司	5313	III
厦门宇电自动化科技有限公司	5104	前彩1	CLARIANT	0052	P59