

Mechanical
properties and forming technology
of fiber metal laminates

纤维金属层板的 力学性能及成形技术

陶杰 李华冠 胡玉冰 著



科学出版社

纤维金属层板的力学性能 及成形技术

陶 杰 李华冠 胡玉冰 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

纤维金属层板作为一种超混杂复合材料,综合了传统纤维复合材料和金属材料的特点,具有高的比强度和比刚度,优良的疲劳、冲击性能以及高损伤容限,是航空航天、轨道交通及汽车等领域备受青睐的轻质材料。本书共十章,针对国际上在该领域研究的热点问题,系统、详细地介绍了作者团队多年来在纤维金属层板的体系设计、损伤理论、力学性能、仿真技术及成形方法等方面的最新研究成果,内容丰富、新颖,具有系统性和前瞻性。

本书可供从事超混杂复合材料、纤维复合材料研究与应用的科技人员阅读,也可从事高性能材料研发、结构减重及轻量化设计的研究人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

纤维金属层板的力学性能及成形技术/陶杰,李华冠,胡玉冰著. —北京:科学出版社,2017.3

ISBN 978-7-03-052028-9

I. ①纤… II. ①陶… ②李… ③胡… III. ①纤维-金属板-力学性能 ②纤维-金属板-成形 IV. ①TG14

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第041469号

责任编辑:胡 凯 李涪汁 王 希/责任校对:何艳萍

责任印制:张伟/封面设计:许 瑞

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017年3月第一次印刷 印张:19 1/4

字数:400 000

定价:89.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

纤维金属层板 (fiber metal laminates, FMLs) 是一种由金属薄板和纤维复合材料交替铺层后, 在一定的温度和压力下固化而成的层间混杂复合材料, 也称为超混杂层板 (super hybrid laminates)。FMLs 综合了传统纤维复合材料和金属材料的特点, 具有高的比强度和比刚度, 优良的疲劳性能以及高损伤容限, 是航空航天工业中备受青睐的先进复合材料。时至今日, 四代纤维金属层板研发成功: 第一代芳纶纤维-铝合金层板 (aramid reinforced aluminum laminates, ARALL), 第二代玻璃纤维-铝合金层板 (glass reinforced aluminum laminates, GLARE), 第三代碳纤维-铝合金层板 (carbon reinforced aluminum laminates, CARE), 第四代石墨纤维-钛合金层板 (titanium/graphite hybrid laminates, TiGr)。以 GLARE 层板为例, 是由 0.3~0.5mm 的铝合金薄板与玻璃纤维增强环氧预浸料 (0.2~0.3mm) 交替层压而成, 具有突出的抗疲劳性能及较高的缺口断裂性能, 可使飞机结构减重 25%~30%, 抗疲劳寿命提高 10~15 倍。GLARE 在空客 A380 上机身蒙皮、垂直和水平尾翼前缘、整流板、整流罩、上机身壁板及上壁板长桁中的应用使飞机减重约 800kg。FMLs 也已成为大型飞机机身、机翼蒙皮结构的重要选材之一, 尤其是机翼前缘等对冲击及疲劳性能都有高要求的关键结构, FMLs 的性能优势是包括碳纤维复合材料在内的其他金属或先进复合材料所无法具备的。此外, 随着汽车及轨道交通等工业对材料损伤容限能力及轻量化程度的要求越来越高, 对 FMLs 类材料的需求也日益迫切。然而, FMLs 失效机制复杂, 成形难度高, 在界面作用、损伤理论及力学特性等方面存在诸多待揭示的科学问题。目前, 国内还没有一部全面介绍 FMLs 相关基础理论及应用技术的专著。鉴于此, 作者决定基于其团队在 FMLs 领域的多年研究成果, 著《纤维金属层板的力学性能及成形技术》一书。

近年来, 国内外针对 FMLs 的研究主要集中于以下三个方面: 第一, 发展多种材料体系的新型 FMLs, 以达到进一步改善材料性能、提高耐温性、利于成形及回收等目的。其中, 基于 GLARE 层板的改进、新一代 TiGr 层板的研制以及热塑性树脂的应用成为研究的热点。第二, 揭示 FMLs 的失效及损伤理论, 开展其力学性能的方法研究及预测。FMLs 综合了金属层与纤维增强树脂基复合材料层 (简称“纤维层”) 的力学性能特点, 包含多个金属层/纤维层界面和大量纤维/树脂界面, 其力学行为及损伤机理复杂, 失效模式包括纤维脱黏及断裂、界面分层、金属断裂及基体开裂等。如何建立该类超混杂复合材料科学的性能评

价方法并合理预测其力学性能,是目前重要的研究课题。第三,FMLs的成形技术难题。FMLs的成形方法与金属材料相近,但由于纤维的破坏应变小,致使该类材料的成形极限远小于相应的金属材料,并易产生层间破坏,成形难度大。然而,拓展FMLs在航空航天、轨道交通及汽车工业等领域应用的过程中,首先要解决其成形技术难题。伴随着塑性加工技术的发展,液压成形、喷丸成形等高效成形方法也可考虑用于FMLs的成形。

作者及研究团队近年来持续开展FMLs的相关基础理论与应用技术研究,相继研制开发了玻璃纤维-铝锂合金层板等改进型GLARE层板,以聚酰亚胺为基体的新型耐高温TiGr层板以及以聚醚醚酮、聚丙烯等为基体的热塑性FMLs。在FMLs的失效理论及力学性能方面,一直致力于FMLs损伤机制的研究,揭示其失效特征,并在此基础上,开展了该类材料的测试评价技术及其标准化研究,以建立FMLs综合性能科学合理的评价体系;此外,长期开展FMLs力学性能的计算机仿真技术研究,探讨超混杂复合材料的性能预测方法。在FMLs备受关注的成形技术方面,除了其传统的自成形技术、滚弯成形技术外,我们还在探究FMLs成形性能的基础上,研究和开发其喷丸成形技术与液压成形技术,取得了较好的进展。同时,致力于该类材料的加工、连接、修补及低成本制造技术等方面的研究工作,以期推动FMLs的研究及其在我国航空航天、轨道交通、汽车工业等领域的应用。

本书主要由陶杰、李华冠、胡玉冰撰写,陶杰、李华冠负责全书的统稿和定稿,李华冠、胡玉冰负责全书的校对。刘成(第3章)、徐翌伟(第4章)、杜丹丹(第5章)、陶刚和田精明(第8章)等参与了相关章节的实验研究和撰写及插图编辑工作。除此之外,研究生陈凯、符学龙和徐颖梅在FMLs力学性能等方面开展了深入研究;杨栋栋、段理想、徐飞、郑增敏等在钛合金表面处理及TiGr层板的制备技术上开展了大量的实验研究;徐凤娟、曹佳梦等参与了FMLs计算机仿真技术的研究;戴琦炜、CAN KUL在FMLs液压成形方面进行了有效的实验探索;汪涛教授、潘蕾副教授、郭训忠副教授、陶海军副教授、苏新清副教授和骆心怡副教授在FMLs的制备、性能分析和数值模拟等方面提供了有益的建议和帮助。本书的研究工作还获得了国家自然科学基金、国家高技术研究发展计划合作项目以及围绕“大飞机”工程的多项预研课题、开放基金的支持,在此一并表示衷心的感谢!此外,衷心感谢江苏先进无机功能复合材料协同创新中心对本书出版的大力支持!

还要感谢黑龙江省科学院石油化学研究院、西安飞机工业(集团)有限责任公司、中国电子科技集团公司第十四研究所、上海飞机制造有限公司以及江苏呈飞精密合金股份有限公司在研究过程中所给予的帮助!

由于作者水平有限,书中内容难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2016年9月16日

目 录

前言

第 1 章 玻璃纤维-铝锂合金层板的力学性能	1
1.1 概述	1
1.2 玻璃纤维-铝锂合金层板的制造技术	2
1.3 玻璃纤维-铝锂合金层板的综合性能	20
1.4 本章小结	38
参考文献	38
第 2 章 TiGr 层板的制备与力学性能	42
2.1 概述	42
2.2 Ti/CF/PMR 聚酰亚胺超混杂层板	42
2.3 Ti/CF/PEEK 超混杂层板	58
2.4 本章小结	61
参考文献	62
第 3 章 GLARE 层板层间剪切失效与性能评价	64
3.1 概述	64
3.2 GLARE 短梁受载层间剪切失效	68
3.3 GLARE 双梁受载层间剪切失效	74
3.4 本章小结	81
参考文献	82
第 4 章 GLARE 层板弯曲失效与性能评价	83
4.1 概述	83
4.2 GLARE 在弯曲载荷下的失效	84
4.3 GLARE 弯曲失效机制与性能评价	92
4.4 本章小结	103
参考文献	104
第 5 章 纤维金属层板静载力学性能的数值模拟与实验研究	106
5.1 概述	106
5.2 各组分材料模型的建立	106

5.3	界面模型的参数获取	114
5.4	静载力学性能的有限元模拟及损伤分析	120
5.5	本章小结	151
	参考文献	152
第 6 章	FMLs 疲劳性能的实验研究及预测	154
6.1	概述	154
6.2	FMLs 的疲劳裂纹扩展速率	154
6.3	FMLs 的疲劳寿命	180
6.4	本章小结	193
	参考文献	193
第 7 章	GLARE 层板的成形性能及自成形技术	196
7.1	概述	196
7.2	成形性能	198
7.3	自成形技术	207
7.4	本章小结	213
	参考文献	214
第 8 章	GLARE 层板的滚弯成形技术	215
8.1	概述	215
8.2	滚弯成形原理与模型建立	216
8.3	滚弯成形后层板的回弹规律研究	220
8.4	滚弯成形后层板的残余应力分布	229
8.5	滚弯成形后层板界面失效规律研究	231
8.6	本章小结	238
	参考文献	239
第 9 章	FMLs 喷丸成形技术	241
9.1	概述	241
9.2	喷丸工艺的选择及优化	243
9.3	喷丸变形特性研究	252
9.4	喷丸对层板性能的影响	260
9.5	TiGr 层板的喷丸成形	265
9.6	本章小结	271
	参考文献	272
第 10 章	GLARE 复合管液压成形技术	274
10.1	概述	274
10.2	GLARE 复合管液压胀接工艺的理论计算	276

10.3 GLARE 复合管液压胀接的有限元仿真	283
10.4 GLARE 复合管液压胀接工艺研究	288
10.5 其他 FMLs 复合管	297
10.6 本章小结	299
参考文献	300

玻璃纤维-铝锂合金层板的力学性能

1.1 概 述

作为第二代 FMLs, GLARE 层板是由 0.3~0.5mm 的铝合金薄板与玻璃纤维增强环氧树脂预浸料(0.2~0.3mm)交替层压而成, 密度低且具有突出的抗拉-压疲劳性能及较高的缺口断裂性能, 可使飞机结构减重 25%~30%, 抗疲劳寿命提高 10~15 倍^[1]。GLARE 层板也因其优异的性能在航空航天上广泛应用, 并成为大型客机机身、机翼蒙皮等轻质结构材料的重要选材^[2]。

然而, 较传统铝合金, GLARE 层板的模量较低, 限制了其应用范围; 同时, 随着碳纤维复合材料等高性能复合材料的发展, 大型飞机对选材提出了更高的要求, 如何在传统 GLARE 层板的基础上, 进一步实现材料减重并提高损伤容限能力, 是 FMLs 发展中亟待解决的问题。用碳纤维替代 GLARE 层板中的玻璃纤维发展而来的 CARE 层板可显著改善材料的刚度; 但铝合金和碳纤维间存在显著的电偶腐蚀, 使该类材料迄今未得到商业化应用^[3]。在此基础上, 采用碳纤维增强钛合金的 TiGr 层板不存在腐蚀的问题, 但 TiGr 层板的研究成熟度低, 制造成本高且断裂韧性差, 无法完全替代现有的 GLARE 层板^[4]。

除了改变增强纤维, 改变 GLARE 层板中的金属层也是可行的办法。较传统 GLARE 层板所使用的 2024-T3 铝合金, 新型铝锂合金具有低密度、高比强度和高比刚度、低疲劳裂纹扩展速率、较好的高低温性能和可焊性等性能特点, 在航空航天领域显示出广阔的应用前景^[5, 6]。用铝锂合金取代传统铝合金材料具有显著的减重效果, 可使现有飞机减重 10%, 新型飞机减重 15%~20%^[7, 8]; 且铝锂合金的材料制造及零件加工工艺与普通铝合金无太大差别, 可沿用普通铝合金的技术和设备; 此外, 较碳纤维复合材料, 铝锂合金易于成形和维修。随着铝锂合金研究及应用的不断推进, 其技术成熟度不断提高且成本不断降低; 采用损伤容限能力优异的铝锂合金替代传统的 2024-T3 铝合金作为金属基板, 研制新型 GLARE 层板将有效提高材料的综合性能。

然而, FMLs 金属基板的厚度一般为 0.2~0.5mm, 且有热处理状态的要求, 传统 GLARE 层板即选用 0.3mm 厚、T3 态 2024 铝合金基板^[9]。而对铝锂

合金而言,目前还未有该厚度范围的商用薄板;同时对热处理工艺的控制不当极易导致铝锂合金断裂韧性的恶化。作为率先开展 FMLs 研究的 TU Delft 大学及 Fokker 公司,早在 21 世纪初即提出了采用铝锂合金作为金属基板制造 FMLs 的构想,但至今未有公开报道的研究进展。Huang 等^[10]采用 2mm 铝锂合金制造了纤维-金属混杂结构并探索其疲劳裂纹扩展机理,发现铝锂合金较传统铝合金更利于材料结构性能的改善。然而,较传统 GLARE 层板采用的 0.3mm 厚铝合金基板,其采用的 2mm 铝锂合金所制造的混杂结构不属于真正意义上的 FMLs,其尺度效应导致该结构与 FMLs 在界面作用、纤维桥接效力等方面有较大差异。目前,俄罗斯全俄航空材料研究院(VIAM)^[11]是唯一被报道开展铝锂合金增强 FMLs 探索研究的单位。其将 1441 铝锂合金成功轧制至 0.3~0.5mm 厚,以 S2 高强玻璃纤维作为增强体,制造了新型玻璃纤维-铝锂合金超混杂层板,并与传统 GLARE 层板对比了拉伸、疲劳等性能。研究结果表明,所制造的新型 FMLs 仅获得了与传统 GLARE 层板较为接近的力学性能,并未获得显著的增强效果。其推测的原因包括铝锂合金制造过程的工艺控制难度高、技术成熟度差等^[12],这也是目前铝锂合金强韧化研究中的普遍难题。

但总的来说,随着铝锂合金相关技术研究的不断深入和推进,作者认为铝锂合金在 FMLs 上的应用具有广阔的前景,其可行性原因包括以下几点。

(1) 铝锂合金具有显著的性能优势。尽管在 GLARE 层板中,纤维作为增强体并起到主要承载作用,但金属层在 GLARE 层板中的体积分数最大,对其整体性能具有重要的影响,尤其是对其刚度的影响。

(2) 随着铝锂合金研究的深入及应用的拓展,其强韧化机制及相关规律将被进一步认识和揭示,相关技术的成熟度会不断提高,材料成本也将不断降低。

(3) 铝锂合金及新型 FMLs 的应用大多集中于飞机机身、机翼结构,二者在成形加工、连接、修补等方面具有较高的技术融合度,也利于飞机整体结构强度的改善。

本章重点探讨新型玻璃纤维-铝锂合金层板(NFMLs)的制造及性能。

1.2 玻璃纤维-铝锂合金层板的制造技术

1.2.1 铝锂合金基板的制造技术

FMLs 的金属层一般被称为金属基板。若采用铝锂合金代替传统 2024 铝合金制造新型铝锂合金-玻璃纤维层板(NFMLs),必须首先获得性能优异且符合 FMLs 制造要求的金属基板。FMLs 金属基板的厚度一般为 0.2~0.5mm,且有热处理状态的要求,传统 GLARE 层板即选用的 0.3mm 厚、T3 态 2024 铝合金基板。而对铝锂合金而言,目前还未有该厚度范围的商用薄板。针对所选用的大

型商用飞机用新型铝锂合金，前期研究也表明^[13, 14]，其对固溶、时效工艺较传统铝合金更为敏感，存在复杂且独特的相析出行为。故本节首先探讨新型铝锂合金基板的制造问题。

1. 铝锂合金选材

本书选用的实验材料为面向我国大型商用飞机而最新研制的新型铝锂合金，由美国 ALCOA 公司研制。该合金属于广泛应用于航空航天器的 Al-Cu-Li 系合金，但在合金设计中显著提高了 Cu/Li 的元素比例至 5.28，使其具有异于同类合金的性能特点和相析出行为^[15]。

新型铝锂合金的元素成分见表 1.1，初始状态为 T8 态、2mm 厚轧制薄板。

表 1.1 铝锂合金元素成分表(%)

Li	Cu	Mg	Ag	Zr	Mn	Zn	Al
0.70	3.71	0.70	0.34	0.11	0.29	0.32	Bal.

针对现有的 2mm 厚 T8 态新型铝锂合金轧制薄板，可采用如图 1.1 所示的工艺流程对其进行轧制及后续热处理强化，以获得满足 NFMLs 制造要求的 0.3mm 厚 T3 态铝锂合金基板。该研究也将在下文中详述。

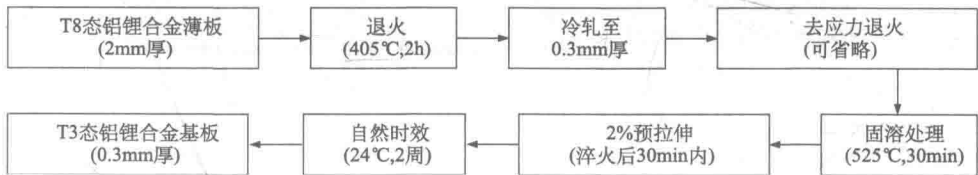


图 1.1 铝锂合金基板的制造工艺流程

2. 退火处理

T8 态铝锂合金是经过预变形加人工时效后获得的，在所有热处理状态中具有最高的强度和优异的损伤容限，是铝锂合金作为航空器结构材料时的主要服役状态。该合金在 T8 态的主要析出相为 T_1 相，如图 1.2 所示。该析出相是在 $\{111\}$ 基体晶面上形成的六角形板条相，具有很好的强化效果，不易被位错切过，能大幅提高合金强度。这种相析出形貌及组织特点也使其具有了优异的力学性能。在 T8 态下，合金的拉伸强度可达 551.12MPa，屈服强度可达 509.10MPa，显著优于普通铝合金，见表 1.2。在具有高强度的同时，铝锂合金还保持 11.20% 的断裂伸长率，获得了较为理想的强度和塑性匹配。此外，合金的拉伸

弹性模量超过 80GPa, 较其他高强铝合金在刚度方面有明显改善。

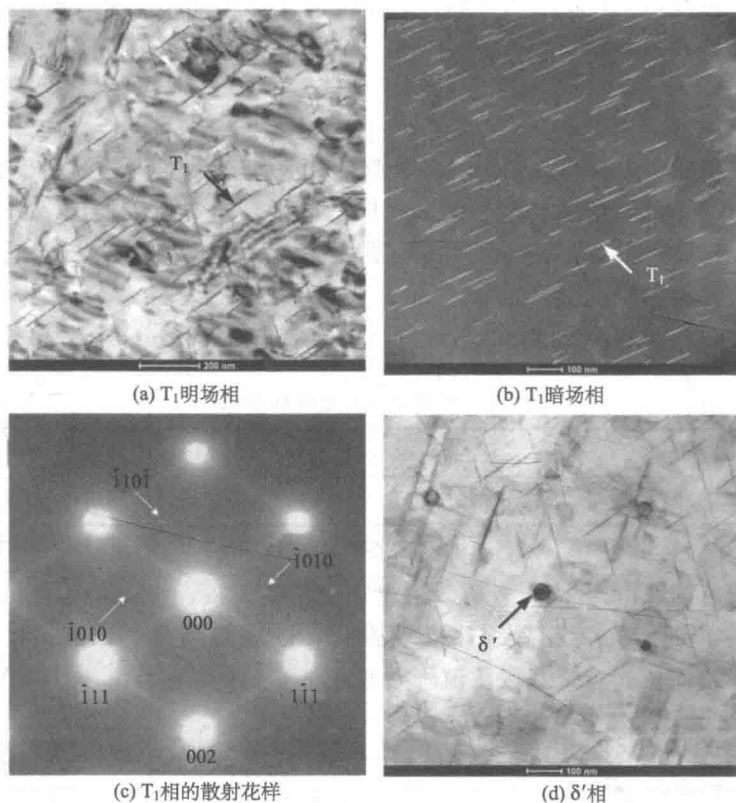


图 1.2 T8 态铝锂合金的相析出形貌图

表 1.2 T8 态铝锂合金的拉伸性能

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	拉伸弹性模量/GPa	断裂伸长率/%
551.12	509.10	81.58	11.20

在铝锂合金的热处理制度中, T8 态具有最高的强度, 很难进行塑性变形。基于已有的 2mm 铝锂合金板材, 必须通过轧制工艺降低材料厚度至 0.3mm, 以满足 NFMLs 的制造要求。而在轧制前, 需对合金进行退火处理, 降低强度并提高塑性和韧性, 改善材料的塑性变形能力。而铝锂合金的退火及下文所述的固溶处理, 对温度精度要求高, 一般需在具有空气循环系统的热处理设备中进行。

根据图 1.3 的退火工艺对合金退火后, 铝锂合金的强度明显下降, 塑性获得改善(表 1.3)。其中, 屈服强度仅为 110.43MPa, 而断裂伸长率可达 19.52%,

具有很好的塑性变形能力。

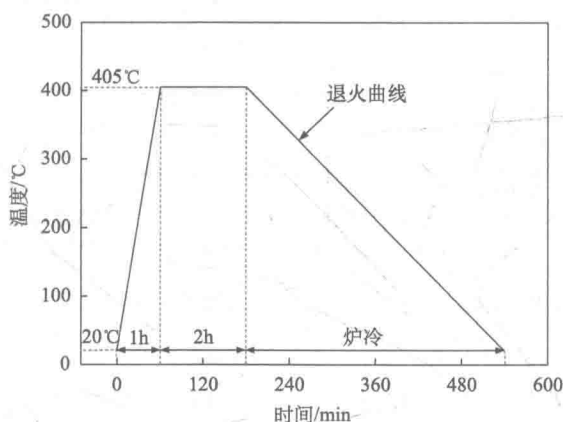


图 1.3 铝锂合金退火工艺

表 1.3 O 态铝锂合金的拉伸性能

拉伸强度/MPa	屈服强度/MPa	拉伸弹性模量/GPa	断裂伸长率/%
253.22	110.43	79.51	19.52

3. 铝锂合金的轧制工艺

对 2mm 厚铝锂合金 O 态薄板进行轧制,按照 2.0mm→1.4mm→1.05mm→0.65mm→0.3mm 的压下工艺经四道次冷轧至 0.3mm,总压下量为 85%。

经过不同道次的轧制后,铝锂合金薄板的厚度均匀性较好,当薄板轧制至目标尺寸 0.3mm 时(图 1.4),其厚度偏差可控制在 $\pm 0.02\text{mm}$ 的范围内,可有效保障后续层板的性能稳定性。

轧制后获得的 0.3mm 厚铝锂合金薄板如图 1.5 所示,其平整度及表面光洁度均较好。

4. 铝锂合金的固溶处理

对铝锂合金进行 525℃, 30min 固溶、水淬处理,以获得过饱和固溶体,并提供合理的相变驱动力,为后续时效过程的第二相强化做准备。根据前期的研究^[14],此类铝锂合金对固溶温度较为敏感,温度每升高 10℃ 都会对其性能有较大影响,因此必须精确控制固溶工艺参数,控温精度和温度均匀性均应保持在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内。热处理过程中,温度的精确控制是实现铝锂合金强韧化的关键。

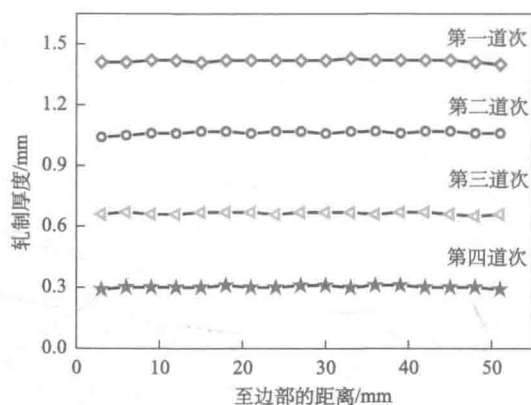


图 1.4 铝锂合金薄板在不同轧制道次下的厚度分布

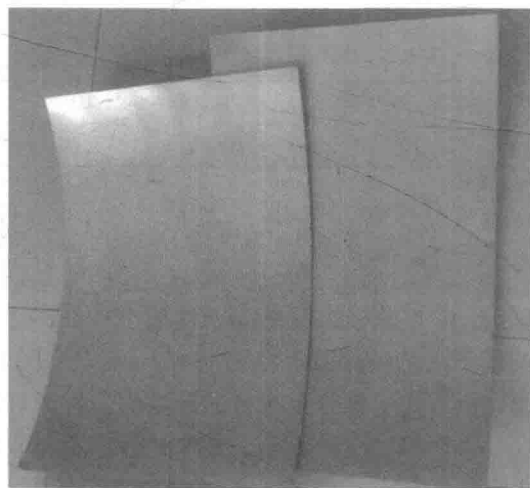


图 1.5 通过轧制获得的 0.3mm 铝锂合金薄板

5. 铝锂合金的自然时效

铝锂合金一般采用时效处理进行材料强化以满足使用要求。目前，铝锂合金最广泛的服役状态为 T8 态，可在具有最高的抗拉强度及屈服强度的同时，保持一定的塑性和韧性，损伤容限性能优异。除 T8 态外，铝锂合金也经常在 T3 状态下使用，即预变形加自然时效处理后获得的热处理状态。较 T8 态而言，铝锂合金在 T3 态下强度有所降低，但塑性及断裂韧性提高显著，在具备承载能力的同时还可以进行一定的塑性成形。对于纤维金属层板的金属基板而言，T3 态则

更为合适。在 FMLs 中, 纤维层主要起到承载作用, 铝合金的强度贡献比例小, 其是否达到最大强度对层板整体性能的影响较小。但在服役过程中, 疲劳裂纹均产生在金属层, 尽管纤维的“桥接”作用^[16]可有效抑制裂纹在金属层中的扩展, 但它对材料寿命仍具有不可忽视的影响。T3 态铝锂合金具有更好的塑性和韧性, 可有效避免裂纹的产生和扩展, 对于纤维金属层板的疲劳性能具有积极的作用。与此同时, 纤维的破坏应变小, 选择塑性和韧性更优的金属基板有利于改善材料整体塑性及变形能力。在 GLARE 层板的研制及发展过程中, 也曾在其商品名为 GLARE1 的层板中使用了 7075-T6 铝合金以提高材料的冲击性能^[17], 但随后的发展及应用中, 均选择了 2024-T3 作为金属基板^[18]。故本章也将铝锂合金基板处理至 T3 态并制造 NFMLs。

T3 态铝锂合金的时效处理包括预变形及自然时效两个过程。

1) 预变形

对铝锂合金进行 2% 预变形处理, 如图 1.6 所示, 即在预拉伸后使标距内发生 2% 的塑性变形。

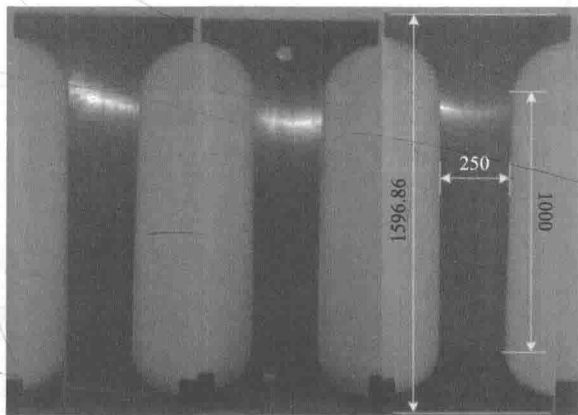


图 1.6 铝锂合金基板的预拉伸(单位: mm)

2) 自然时效

铝锂合金的自然时效通常在常温(24℃)下进行。铝锂合金在 W 态的自然时效响应快, 在常温下放置 30min 即可导致硬度的显著提高, 如图 1.7 所示。低温存储一般被认为是抑制时效行为发生的有效办法, 我们将 W 态铝锂合金在 -20℃ 环境下储存超过 168h, 无论是否已经过预变形, 其性能都不发生变化。故本节将待时效或加工的淬火态铝锂合金放置于 -20℃ 冷冻环境下储存, 以降低其自然时效带来的影响。同时, 本实验还发现, 经过 2% 预变形后的试样, 较未预变形时, 材料的初始硬度与自然时效后的硬度都略有增加。不仅如此, 其达到

稳定状态的时间由 11h 缩短为 9h，自然时效响应加快。

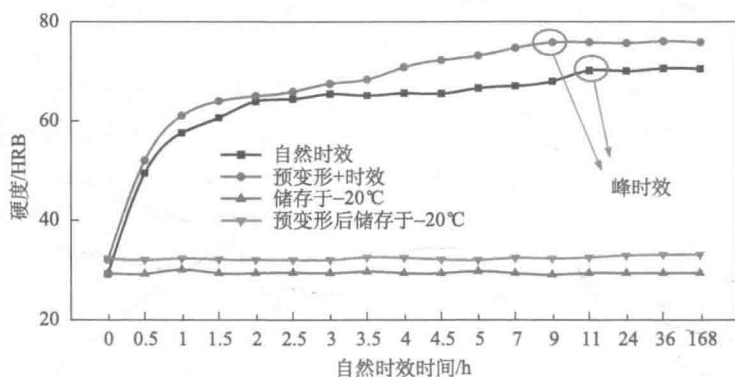


图 1.7 自然时效对铝锂合金硬度的影响

6. 铝锂合金基板的热处理变形控制

根据以上处理工艺获得的 0.3mm 铝锂合金基板往往会出现严重的热处理变形，如图 1.8 所示。变形主要来源于以下两个因素：一方面，铝锂合金板材在轧制过程中产生的残余应力，在无张紧装置约束下进行退火时，应力以变形的形式释放；另一方面，轧制后的铝锂合金仅 0.3mm 厚，淬火不均匀也会加剧其变形。

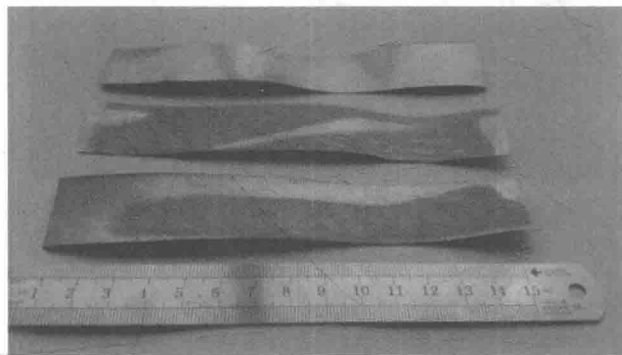


图 1.8 铝锂合金热处理过程的变形

可采用如图 1.9 所示的热处理工艺，以解决铝锂合金基板的变形问题。为了使合金在退火过程释放残余应力的同时，保持板形平整，本实验利用模压设备在该合金基板进行模压的同时完成退火，使其残余应力充分释放的同时还能够保持板形平整。同时，在控制淬火过程的变形方面，提高水淬温度至 45℃，减缓

淬火冷却速度；同时，基于时效成形^[19]的原理，在淬火完成后，将基板再次放置于模压设备中，在模压的同时进行自然时效，伴随着第二相的析出，实现铝锂合金基板的板形和性能的协调控制。

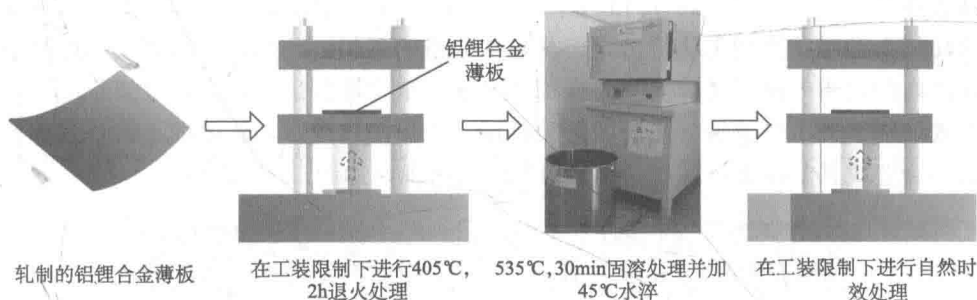


图 1.9 铝锂合金基板热处理变形的优化控制工艺

通过该改进工艺，获得的 T3 态铝锂合金基板具有较好的表面平整度，如图 1.10 所示，可满足 FMLs 后续制造及性能的要求。事实上，在工业化生产中，薄板轧制后可在具有张紧装置的生产线中在线退火及热处理强化，此类工业技术已成熟应用于各类铝合金薄板的生产，也将能够很好地解决铝锂合金基板的热处理变形问题，提高生产效率。

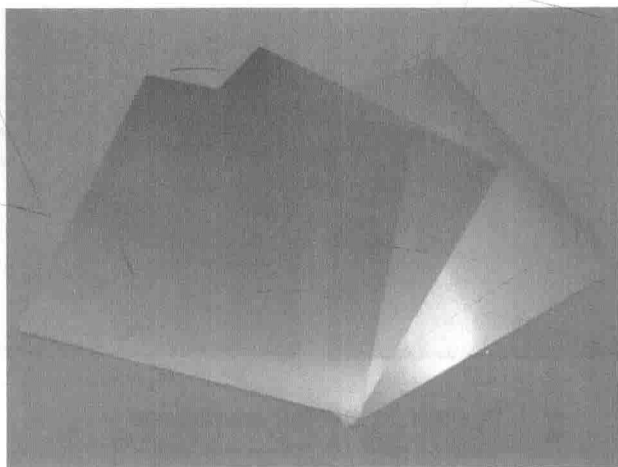


图 1.10 经过改进工艺获得的铝锂合金基板实物图

7. T3 态铝锂合金基板的组织与性能

铝锂合金经过轧制及再次固溶、时效等热处理强化后，获得的晶粒未发现明