

7050-T7451 铝合金板材疲劳性能的厚度效应

聂凯¹, 王凡¹, 王强¹, 舒阳², 骆金威²

(1. 中航工业成都飞机设计研究所, 成都 610091;

2. 中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610091)

摘要: **目的** 研究不同厚度的 7050-T7451 铝合金板材疲劳性能表现出的厚度效应。**方法** 试验件从 3 种厚度规格(75、150、203 mm)板材的不同厚度位置取样, 采用成组试验法进行 3 级应力-疲劳试验。分析试验数据, 发现并总结材料疲劳性能随板材厚度及取样厚度位置变化的演化规律。**结果** 所有厚度规格板材的表面层材料的疲劳性能均为最优, 且不同厚度规格板材表面层材料的疲劳性能差异较小。当板材的厚度较薄(75 mm)时, 随着取样厚度位置变化, 材料的疲劳性能差异较小; 当板材的厚度较厚(150、203 mm)时, 从表面层到中心层的材料疲劳性能呈非线性变化趋势, 先变弱、后增强, 疲劳寿命 10^5 循环对应的最大应力降低幅度最大为 21% 左右。随着板材厚度的增加, 疲劳性能最差的厚度层材料, 疲劳寿命 10^5 循环对应的最大应力降低了 20% 左右。**结论** 随着板材的厚度增加, 7050-T7451 铝合金板材疲劳性能的厚度效应变得越来越强, 即疲劳性能在厚度方向的不均匀性越来越明显。工程师应在工程设计中考虑 7050-T7451 铝合金疲劳性能厚度效应对结构疲劳强度的影响。

关键词: 7050-T7451; 铝合金; 板材; 疲劳性能; 厚度效应; 不均匀性

中图分类号: V252.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)05-0033-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.05.006

Thickness Effect on Fatigue Property of 7050-T7451 Aluminum Alloy Plate

NIE Kai¹, WANG Fan¹, WANG Qiang¹, SHU Yang², LUO Jin-wei²

(1. AVIC Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Chengdu 610091, China;

2. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610091, China)

ABSTRACT: The work aims to study the thickness effect on fatigue property of 7050-T7451 aluminum alloy plates with different thickness. The samples were taken from different locations along the thickness direction of three plates with different thickness (75 mm, 150 mm, and 203 mm). The grouping tests were performed for the three levels of stress-fatigue tests. By analyzing the fatigue test data, the variation law of fatigue property along the plate thickness and sampling thickness location was discovered and summarized. Among the three plates with different thickness, the fatigue strength of the surface layer was the best and varied slightly. For the plate with thickness of 75 mm, the fatigue property changed a little with the varying sampling thickness location. For the plates with thickness of 150 mm and 203 mm, the fatigue property showed nonlinear variation

收稿日期: 2022-12-19; 修订日期: 2023-02-23

Received: 2022-12-19; Revised: 2023-02-23

基金项目: 航空工业成都飞机设计研究所预研项目

Fund: Pre-Research Project of AVIC Chengdu Aircraft Design and Research Institute

作者简介: 聂凯(1992—), 男, 博士。

Biography: NIE Kai (1992-), Male, Doctor.

引文格式: 聂凯, 王凡, 王强, 等. 7050-T7451 铝合金板材疲劳性能的厚度效应[J]. 装备环境工程, 2023, 20(5): 033-041.

NIE Kai, WANG Fan, WANG Qiang, et al. Thickness Effect on Fatigue Property of 7050-T7451 Aluminum Alloy Plate[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(5): 033-041.

tendency from surface to the center and decreased firstly, and then increased and the maximum stress reduction corresponding to fatigue life of 10^5 cycles was about 21%. As the plate became thicker, the maximum stress (fatigue life was 10^5 cycles) of the surface layer with the worst fatigue decreased by about 20%. As the plate thickness increased, the fatigue property of 7050-T7451 aluminum alloy plate shows much more significant thickness effect, that is to say, the inhomogeneity of fatigue property along the thickness direction becomes more and more obvious. The engineers should consider the impact of thickness effect of 7050-T7451 aluminum alloy plate on the fatigue strength of structure in the design process.

KEY WORDS: 7050-T7451; aluminum alloy; plate; fatigue property; thickness effect; inhomogeneity

7050-T7451 铝合金是航空航天工业常用的金属材料^[1-3]。7050-T7451 铝合金根据板材的厚度可以分为薄板和厚板。一般厚度超过 6.3 mm 的板材被称为厚板^[4]。7050-T7451 铝合金的厚度达到一定程度时,材料的显微组织会表现出明显的不均匀性^[5-7]。厚板材料在实际生产过程中,中心层与表面层在均匀化过程加热不均,轧制变形过程中,变形不均以及材料不同厚度层表现出不同的淬火敏感性。因此,材料微观组织在厚度方向分布不均匀,材料的性能也表现出明显的厚度效应^[8-14]。

张新明等^[6]研究发现,120 mm 厚的 7050-T7451 轧制板的显微组织和织构在厚度方向表现出明显的不均匀性。随着厚度位置的加深,材料再结晶晶粒的比例和数量逐渐增加。板材表面层以剪切织构和立方织构为主;中心层以 β 取向轧制织构为主;1/4 层为过渡层,织构为混合织构,同时存在剪切织构、再结晶织构和变形织构。厚度方向微观结构的不同,导致板材的拉伸性能及断裂韧性在厚度方向呈现较为明显的不均匀性特征,板材中心层的强度比表层小。不仅是 7050 铝合金,其他系列的铝合金也存在轧制过程和热处理导致的微观组织及性能的不均匀性^[15-18]。板材强度沿厚度方向的不均匀性与铸锭组织不均匀、轧制工艺及淬火敏感性有关^[19-25]。李承波^[26]研究了淬火速率和自然时效对 7055 铝合金厚板组织性能不均匀性的影响,结果表明,7055 厚板对淬火过程十分敏感,人工时效前进行长时间的自 然时效可以降低厚

板的不均匀性。曹平^[27]研究了时效处理对 2519A 铝合金厚板组织与性能不均匀性的影响,结果表明,厚板中心层的强度低于表面层强度,经过 T916 处理后,沿着厚度方向的组织不均匀性降低。

已有的研究表明,铝合金的微观组织及力学性能在厚度方向呈不均匀性,通过改进工艺参数可以降低不均匀的程度,但无法完全消除厚度方向材料组织及材料性能的不均匀性。目前,关于 7050-T7451 铝合金板材疲劳性能厚度效应深入的研究仍较少。因此,定量地研究 7050-T7451 铝合金疲劳性能的厚度效应,具有一定的工程应用价值。本文通过试验方法研究了 7050-T7451 板材疲劳性能不均匀表现出的厚度效应,以及不同厚度 7050-T7451 板材疲劳性能厚度效应的差异。本文研究的厚度效应分为 2 个方面:同一厚度规格的 7050-T7451 板材,材料疲劳性能随厚度方向位置的不同而发生变化;不同厚度规格的 7050-T7451 板材,材料疲劳性能的差异。

1 试验方案

1.1 试验件及试验矩阵

试验件采用标准试样^[28],材料为 7050-T7451,如图 1 所示。板材的厚度规格为工程常用的 3 种厚度规格,分别为 75、150、203 mm。为了研究板材疲劳性能的厚度效应,试验件从板材的不同厚度位置取

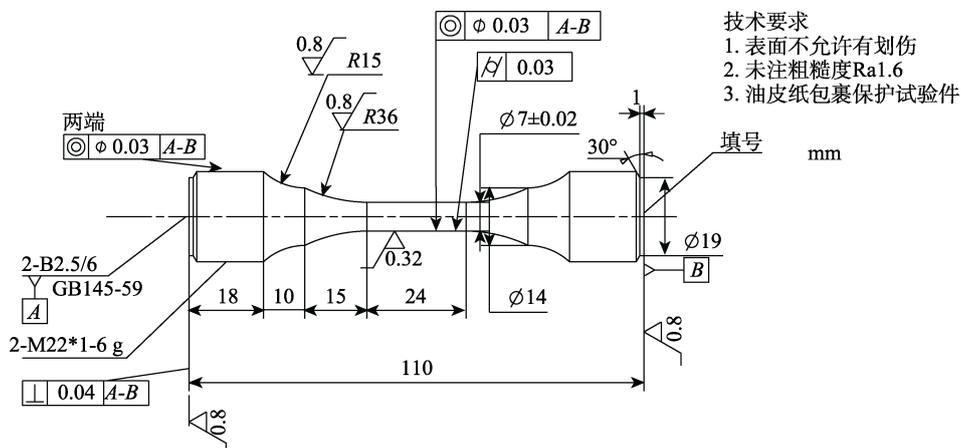


图 1 试验件
Fig.1 Drawing of sample

样, 取样方向均为轧制方向。厚度方向位置的具体取样信息见图 2 和表 1。试验件编号为: A-B-C-D, 其中 A 为板材的规格厚度, B 为 L 方向的编号, C 为 LT 方向的编号, D 为 ST 方向的编号。

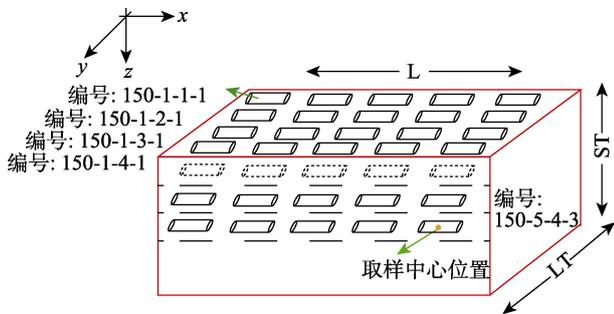


图 2 试验件取样

Fig.2 Schematic diagram of sampling loaction of samplle

表 1 试验件信息

Tab.1 Information of sample

试验件编号	厚度层编号	厚度规格/mm	取样中心厚度位置/mm	取样中心厚度位置编号
75-*-1	75-1	75	12.5	1/6
75-*-2	75-2	75	37.5	1/2
150-*-1	150-1	150	15	1/10
150-*-2	150-2	150	45	3/10
150-*-3	150-3	150	75	1/2
203-*-1	203-1	203	14.5	29/406
203-*-2	203-2	203	43.5	87/406
203-*-3	203-3	203	72.5	145/406
203-*-4	203-4	203	101.5	1/2

1.2 疲劳试验及数据处理方法

疲劳试验采用高频试验机。加载方式为拉-拉加载, 应力比 R 为 0.1。试验的加载频率为 80 Hz 左右。一共设计 9 组试验, 每一组试验均进行 3 级应力水平下的疲劳试验^[29-30]。疲劳试验的每级应力水平的目标寿命值分别为 10^4 、 10^5 、 10^6 。设定 75 mm 厚板材的初始摸索应力水平为 400 MPa, 设定 150、203 mm 厚度板材的初始摸索应力水平为 350 MPa。根据摸索应力水平下的试验数据, 升高和降低 10%~20% 应力水平作为高 1 级和低 1 级的应力水平。

试验数据采用公式 $S^m \cdot N = C$ (即 $\lg N = -m \cdot \lg S_{\max} + \lg C$) 拟合, 得到每一组试验的应力-寿命曲线 (中值 $S-N$ 曲线)。通过试验数据分析, 得到材料疲劳性能随板材厚度规格与取样厚度位置变化的演化规律。

2 试验结果

试验的原始数据见表 2。试验数据表明, 随着应

力升高, 中值寿命逐渐降低, 寿命的分散性逐渐降低。应力-寿命曲线公式 $S^m \cdot N = C$ 的参数见表 3。中值寿命曲线与原始数据如图 3 所示。从图 3 中可知, 同一厚度规格板材不同厚度层的各组试验数据曲线斜率相近, 疲劳寿命的应力敏感程度基本相同, 即参数 m 的差异不大, 但每组曲线的截距即参数 $\lg C$ 不同, 说明各组试样的疲劳性能有差异。

表 2 疲劳试验数据

Tab.2 Data of fatigue test

厚度层编号	应力水平/MPa	数量	中值对数疲劳寿命	子样标准差
75-1	360	4	6.250	0.050
	400	10	5.403	0.573
	440	5	4.586	0.069
75-2	360	5	6.104	0.041
	400	10	4.902	0.396
	440	4	4.664	0.127
150-1	350	9	5.865	0.622
	420	6	4.979	0.439
	450	4	4.336	0.129
150-2	315	7	5.345	0.327
	350	8	4.983	0.394
	385	4	4.656	0.043
150-3	300	4	6.311	0.055
	350	9	5.277	0.424
	420	4	4.488	0.015
203-1	300	6	6.491	0.279
	350	7	5.762	0.309
	450	5	4.549	0.118
203-2	280	7	6.260	0.273
	350	5	5.322	0.203
	380	5	4.632	0.085
203-3	250	9	6.072	0.497
	300	6	5.209	0.176
	350	5	4.739	0.090
203-4	250	7	6.314	0.250
	300	6	5.725	0.288
	350	6	4.959	0.221

表 3 应力寿命公式参数

Tab.3 Parameter of stress-life equation

厚度层编号	公式参数 m	公式参数 $\lg C$
75-1	-19.11	55.13
75-2	-17.39	50.36
150-1	-13.00	38.96
150-2	-7.91	25.10
150-3	-12.35	36.79
203-1	-11.04	33.83
203-2	-11.63	34.75
203-3	-9.34	28.44
203-4	-9.17	28.35

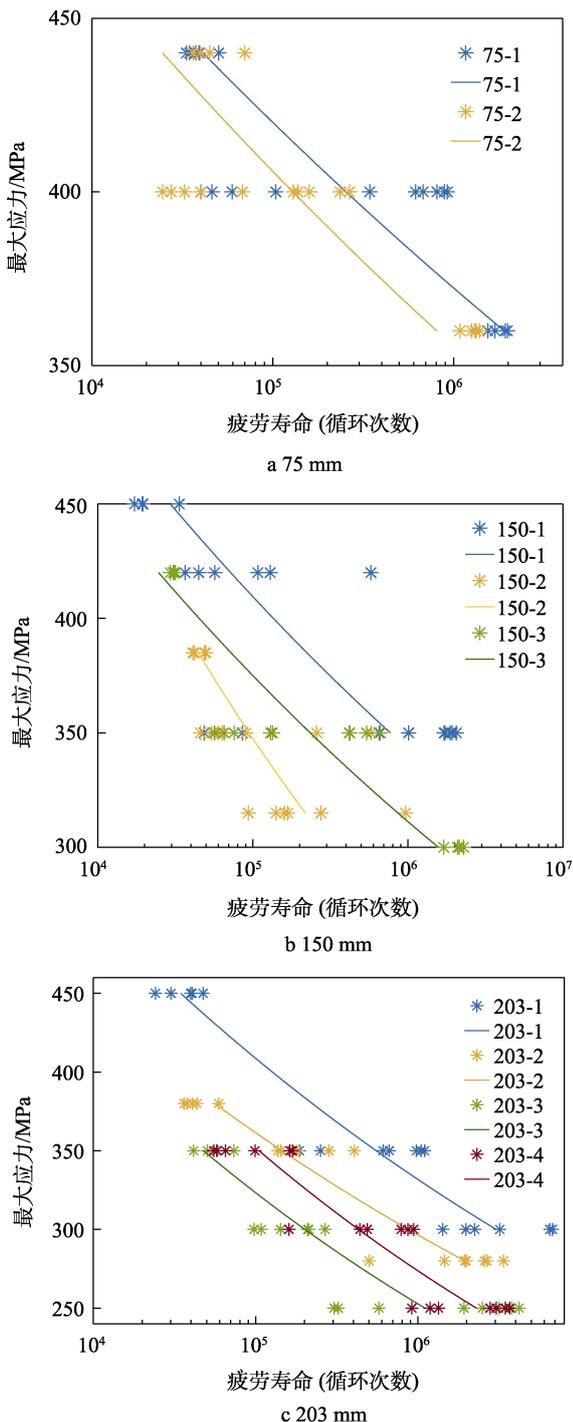


图3 不同厚度规格板材的应力-寿命曲线
Fig.3 Stress-life curve of different thickness plate

3 分析与讨论

3.1 同一厚度规格板材疲劳性能的厚度效应

通过统计分析方法,定量比较2组试验件在同一应力水平下中值疲劳寿命的差异^[31],分析得到疲劳性能随取样厚度位置增加的变化规律。首先,利用F检验来检验3组试验数据的方差齐次性,检验2个母体标准差是否相同。检验统计量F为:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \tag{1}$$

式中: S_1 、 S_2 分别为2组数据的标准差。本文中所有F检验的显著度均取为5%。

如果2组试验数据方差没有明显的差异,则进行t检验。构造检验统计量t为:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_{12} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \tag{2}$$

式中: S_{12} 为2组数据的组合标准差, $S_{12} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$ 。通过t检验可以检验2组数据的中值疲劳寿命是否有显著的差异。如果t检验表明2组试验的中值疲劳寿命有差异,可通过区间估计得到,一定置信度下2组中值疲劳寿命的比值下限。分析中,t检验显著度取5%。区间估计疲劳寿命的比值时,取单侧置信区间,置信度为95%。

3.1.1 75 mm 厚度板材

1/6层和1/2层的2组试验件的取样厚度位置分别为12.5、37.5 mm。2层试验件疲劳试验的3级应力水平相同,分别为360、400、440 MPa。试验数据可作为3级应力水平的成组对比试验。利用F检验和t检验。定量分析不同厚度层材料在3级应力水平下疲劳寿命的差异。

3级应力水平下的对比试验均通过显著度为5%的F检验,说明2层试验件的3级应力水平数据的方差没有明显的差异。然后,进行t检验分析,结果表明,440 MPa应力水平下,在显著度为5%时,1/6层的中值疲劳寿命与1/2层的中值疲劳寿命没有显著的差异。360、400 MPa应力水平下,2组试验的疲劳寿命有显著的差异,95%的置信度下,1/2层的疲劳寿命是1/6层的疲劳寿命的0.82、0.76。通过拟合的S-N曲线,插值得到1/6层及1/2层材料在疲劳寿命 10^5 循环的最大应力水平分别为419.26、405.89 MPa。综上所述,1/6层(表面层)的材料疲劳性能优于1/2层,但随着应力水平升高,二者疲劳性能的差距逐渐缩小。从材料角度分析,当板材较薄时,中心层与表面层的微观组织与织构差异应不大,再结晶晶粒较少,且晶粒尺寸较小,第二相粒子较少,再结晶织构主要为立方织构,轧制过程导致产生剪切变形,剪切织构^[6]会占有一定比例。结合以上统计分析,75 mm的7050-T7451铝合金板材的疲劳性能在厚度方向差异不大。由此建议,结构设计选材为较薄的7050-T7451板材时,可不用考虑厚度方向疲劳性能的不均匀性。

3.1.2 150 mm 厚度板材

不同厚度层试样的取样厚度位置分别为15、45、

75 mm, 编号分别为 1/10、3/10、1/2。将 3 个不同厚度层试验件在 350 MPa 下的疲劳试验作为成组对比试验, 两两成组, 分析 1/10、3/10 与 1/10、1/2 层的数据。结果均通过 F 检验, 即显著度为 5% 时, 方差没有明显差异。 t 检验结果表明, 各组中值疲劳寿命存在差异。置信度为 95% 时, 在应力水平为 350 MPa 下, 3/10 层材料疲劳寿命是 1/10 层的 0.47, 1/2 层材料疲劳寿命是 1/10 层的 0.7。从表面层到中心层疲劳寿命比例为 1 : 0.47 : 0.7。

根据表 2 和图 3b 的原始数据可知, 试样取样的厚度层从 1/10 \rightarrow 3/10 \rightarrow 1/2, 可以观察到材料 $S-N$ 曲线的截距先变小、再变大。同时, 材料疲劳寿命为 10^5 循环时的最大应力水平分别为 409.55、349.69、375.02 MPa, 最多降低 14.6%。综上所述, 150 mm 板材的疲劳性能随着厚度的增加呈非线性的变化趋势, 先降低、再升高。疲劳性能最差层是次中心层, 编号为 3/10 层, 表面层疲劳性能最优。

随着板材厚度的增加, 厚度方向的疲劳性能不均匀性逐渐增强。因为从表面层到中心层, 第二相粒子逐渐增加, 再结晶晶粒逐渐增多, 且晶粒尺寸逐渐增大。织构方面不仅是表面层和中心层出现差异, 次中心层出现为混合织构, 存在表面层的剪切织构和中心层的变形织构与再结晶织构。这导致板材厚度方向疲劳性能出现非线性的变化。假如实际工程结构关键部位的应力分布沿厚度方向较均匀, 工程师以表面层材料的疲劳性能开展设计, 会导致疲劳强度设计偏危险。因此, 应采用次中心层的疲劳数据或纳入厚度效应的修正系数, 使得设计偏安全, 保证结构的安全。

3.1.3 203 mm 厚度板材

203 mm 板材的试样取样厚度位置分别为 14.5、43.5、72.5、101.5 mm, 厚度层编号分别为 29/406、87/406、145/406、1/2。将 350 MPa 应力水平下的 4 组数据两两成对分析, 构造检验统计量进行 F 检验和 t 检验。显著度为 5% 时, 3 次 F 检验均通过, 表明方差没有显著差异。通过 t 检验, 得到置信度 95% 时, 材料在 350 MPa 下, 从表面层到中心层材料的疲劳寿命比为 1 : 0.70 : 0.28 : 0.53。从表面层到中心层 4 个厚度层在疲劳寿命为 10^5 循环的最大应力水平依次为 409.84、361.50、323.29、351.07 MPa。145/406 厚度层材料相较于 29/406 表面厚度层材料的最大应力水平下降最多, 降低幅度为 21.1%。

从表 2 与图 3c 可知, 随着取样厚度位置从 14.5 mm \rightarrow 43.5 mm \rightarrow 72.5 mm \rightarrow 101.5 mm, $S-N$ 曲线的截距先变小、后增大。疲劳性能随取样厚度位置增加, 变化趋势呈非线性的变化, 先降低、再升高。疲劳性能最差层也是次中心层, 编号为 145/406。

综上所述, 对于 75 mm 板材, 表面层与中心层

的疲劳强度仅在较低的应力水平下有明显的差异, 疲劳寿命最多下降了 24%。对于 150、203 mm 板材, 随着取样厚度位置增加, 疲劳性能呈先降低、后升高的趋势, 疲劳性能最差层相对于疲劳性能最优的表面层寿命分别下降了 53% 和 72%。各组试验件疲劳寿命为 10^5 循环对应的最大应力变化趋势如图 4 所示。可以看出, 随着 7050-T7451 板材厚度规格的增加, 材料厚度方向疲劳性能的不均匀现象越来越明显。

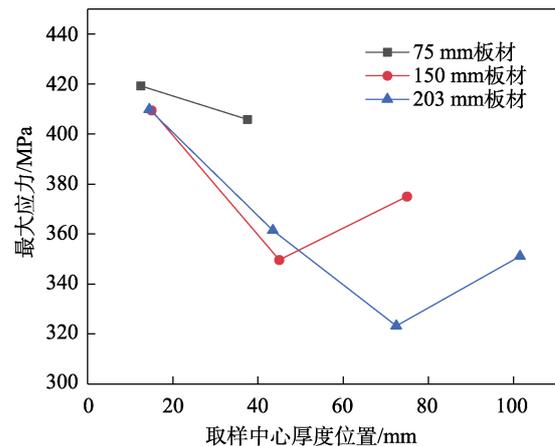


图 4 疲劳寿命 10^5 循环对应的最大应力
Fig.4 Maximum stress for fatigue life of 10^5 cycles

疲劳性能沿厚度方向的不均匀分布, 是板材的组织与织构在厚度方向的不均匀分布造成的, 材料的热处理工艺及轧制工艺均有影响。铸锭凝固过程中, 表面层的冷却速率大于中心层冷却速率, 从表层到中心, 晶粒结构呈细等轴晶-柱状晶-粗等轴晶变化, 主要合金元素在厚度层分布亦不均匀, 所以各层强度是不均匀的^[6]。同时, 7050 铝合金存在淬火敏感性, 淬火过程中表层与中心层的冷却速率也不同, 表层温度下降较快, 内部温度下降较慢^[32]。淬火冷却速率越低, 合金在晶界和 Al_3Zr 粒子等处析出粗大相, 使得固溶体中溶质原子减少, 削弱了时效强化效果, 同时会使得晶界时效相变得粗大, 无沉淀析出带宽化, 断裂韧性降低。因此, 中心处强度较低^[14,33]。

根据的 120 mm 厚 7050-T7451 铝合金纵向金相组织 (如图 5 所示)^[6]可以看出, 沿厚度方向, 组织呈不均匀的分布。随着厚度位置的增加, 呈白色的再结晶晶粒所占数量与晶粒尺寸逐渐增大, 再结晶晶粒沿轧制方向拉长, 呈扁平状。随着厚度位置增加, 粗大第二相粒子逐渐增多。材料沿厚度方向的织构分布亦不均匀, 表面层立方织构 $\{001\} <100>$ 含量最多, 1/8 层剪切织构含量最大, 中心层变形织构最大, 如图 6 所示^[6]。随着厚度增加, 再结晶织构与变形织构组分先减少、后增加, 剪切织构逐渐减少。相关试验^[6]结果表明, 120 mm 厚 7050-T7451 铝合金板材的强度随着厚度增加, 呈非线性的变化趋势。

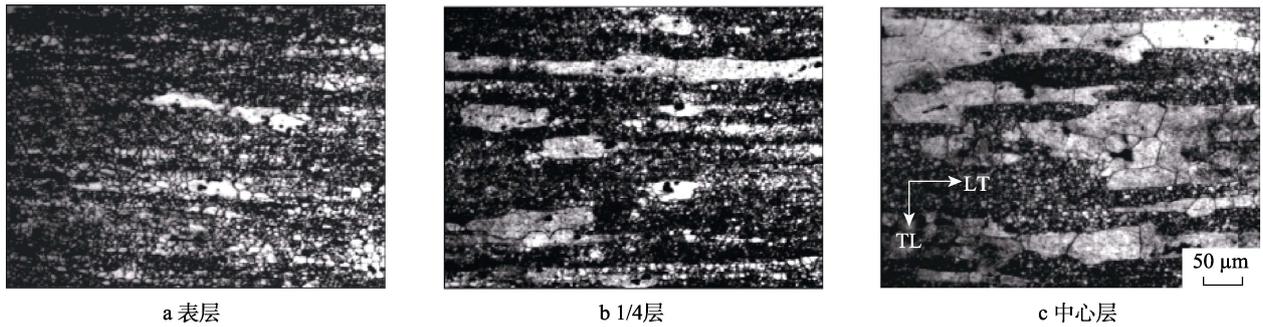


图5 120 mm厚7050铝合金纵向面的金相组织^[6]

Fig.5 Optical micrographs of 7050 aluminum alloy plate (thickness: 120 mm)^[6]: a) near layer surface; b) at 1/4 of layer; c) at central layer

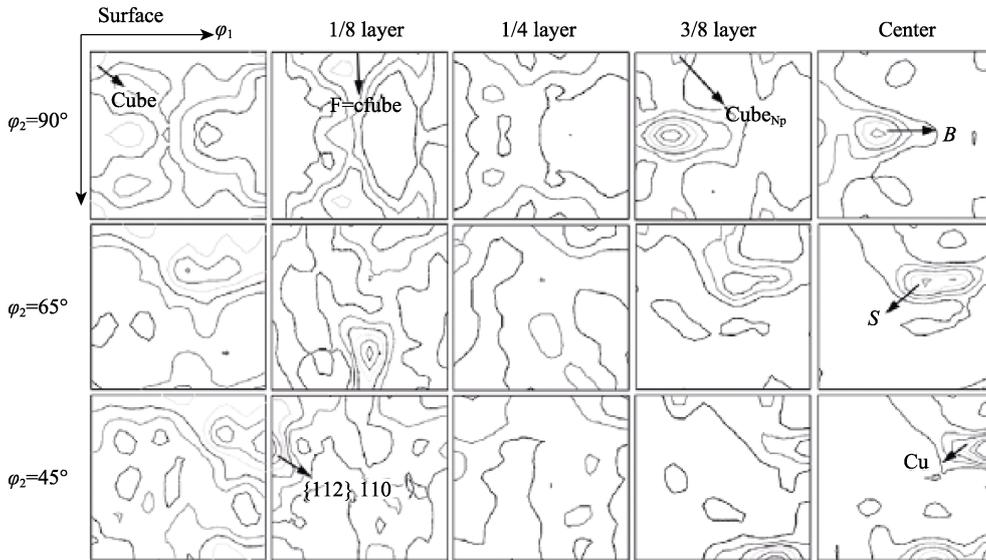


图6 120 mm厚7050铝合金不同厚度层的织构^[6]

Fig.6 Textures of 7050 aluminum alloy plate (thickness: 120 mm) in different thickness layers^[6]

当板材厚度越厚，厚度方向的组织与织构越不均匀，从而导致材料的疲劳性能在厚度方向越不均匀。结合以上的统计分析数据可知，板材的厚度较薄时，中心层和表面层的疲劳性能不均匀性较小；当板材厚度逐渐增加，表面层与中心层的疲劳性能不均匀性逐渐明显。因此，工程设计及结构生产忽略厚度效应对板材疲劳性能的影响，会对结构的疲劳强度设计产生较大的影响。

3.2 不同厚度规格板材疲劳性能的厚度效应

为了对比不同厚度规格板材疲劳性能的差异，罗列了3种不同厚度规格疲劳性能最差和最优厚度层的S-N曲线，如图7所示。不同厚度规格板材疲劳性能最优的厚度层都是表面层。从图7b可以看出，厚度层的编号分别是75-1、150-1、203-1，通过拟合S-N曲线可以得到疲劳寿命为 10^5 、 10^6 循环时的最大应力水平，具体数据见表4。随着板材的厚度规格从75 mm增加至203 mm，疲劳寿命为 10^5 循环时的最大应力水平逐渐下降，但降幅较小仅2.4%左右；当疲劳寿命为 10^6 循环时，最大应力水平下降幅度变大，降

幅为11.5%。

75 mm厚板材疲劳性能最差层是中心层，编号为75-2；150、203 mm厚板材疲劳性能最差层均为次中心层，编号为150-2和203-3。通过表5数据可知，随着板材厚度的增加，疲劳性能逐渐下降。203-3层材料的最大应力水平相比75-2层材料降低了20%左右。因此，随着板材厚度的增加，疲劳性能最差的次中心厚度层的疲劳性能的下落幅度远大于表面层的疲劳性能的下落幅度。

轧制过程和热处理过程造成不同厚度规格板材表面层的微观组织和织构差异较小。因此，不同厚度规格表面层的疲劳性能数据差距不大。随着板材厚度增加，中心层和次中心层在轧制过程的应变状态与表面层差异变大，织构的不均匀性增强。经过热处理工艺，材料的微观组织在厚度方向的不均匀性会随厚度的增加而更加明显。因此，随着厚度增加，较厚的板材次中心层材料的疲劳性能相较表面层材料衰减得更加明显。当工程结构包含不同厚度规格的7050-T7451铝合金板材时，应考虑不同厚度规格板材疲劳性能的差异。

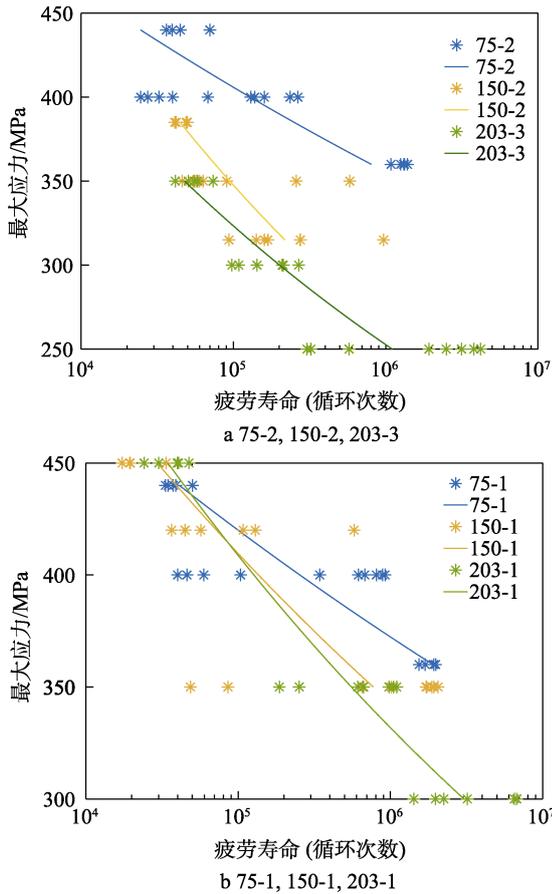


图 7 不同厚度层的应力-寿命曲线
Fig.7 Stress-life curve of different thickness lager

表 4 表面层材料指定寿命下的最大应力
Tab.4 Maximum stress at the specified fatigue life of the surface layer

厚度层编号	最大应力 (疲劳寿命: 10 ⁵)	最大应力 (疲劳寿命: 10 ⁶)
75-1	419.29	398.06
150-1	409.55	361.86
203-1	409.84	352.26

表 5 疲劳性能最差层材料指定寿命下的最大应力
Tab.5 Maximum stress at the specified fatigue life of the layer with the worst fatigue property

厚度层编号	最大应力 (疲劳寿命: 10 ⁵)
75-2	405.89
150-2	349.69
203-3	323.29

4 结论

本文通过分析 7050-T7451 铝合金板材不同厚度位置试样的应力疲劳试验数据表明, 7050-T7451 铝合金板材的疲劳性能存在明显的厚度效应。随着板材厚度规格和材料在板材厚度方向位置变化, 材料的疲

劳性能变化明显。所有厚度的板材, 表面层疲劳性能最优; 对于厚度较薄的板材, 中心层材料疲劳性能最差; 厚度较厚的板材, 次中心层疲劳性能最差。随着板材厚度规格增加, 表面层材料疲劳性能差异较小, 疲劳性能最差层的疲劳性能逐渐降低。

本文的研究结果对工程设计具有一定的指导意义, 建议工程结构选材为厚度规格较薄的板材时, 可不考虑不同厚度位置材料疲劳性能的差异。当选材为厚度较厚时, 应采用疲劳性能最差的厚度层的材料数据进行工程设计, 从而使得疲劳设计偏安全, 保证工程结构的疲劳寿命裕度。本文后续可研究材料微观组织与宏观疲劳性能变化的联系, 阐释材料出现疲劳性能厚度效应的机理。

参考文献:

- [1] RAMBABU P, ESWARA PRASAD N, KUTUMBARAO V V, et al. Aluminium Alloys for Aerospace Applications[M].Singapore: Springer, 2016.
- [2] HEINZ A, HASZLER A, KEIDEL C, et al. Recent Development in Aluminium Alloys for Aerospace Applications[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 280(1): 102-107.
- [3] 蹇海根, 姜锋, 徐忠艳, 等. 航空用高强韧 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金的研究进展[J]. 热加工工艺, 2006, 35(6): 61-66.
JIAN Hai-gen, JIANG Feng, XU Zhong-yan, et al. Study Progress of High Strength and Tenacity Al-Zn-Mg-Cu Aluminum Alloy for Aviation[J]. Hot Working Technology, 2006, 35(6): 61-66.
- [4] 江志邦, 宋殿臣, 关云华. 世界先进的航空用铝合金厚板生产技术[J]. 轻合金加工技术, 2005, 33(4): 1-7.
JIANG Zhi-bang, SONG Dian-chen, GUAN Yun-hua. Global Advanced Process Technology of Aluminium Alloy Plates for Aircraft and Aerospace[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2005, 33(4): 1-7.
- [5] 王胜玉, 肖柱, 王正安, 等. 工业化制备 7050 铝合金厚板显微组织与力学性能[J]. 有色金属科学与工程, 2017, 8(3): 48-53.
WANG Sheng-yu, XIAO Zhu, WANG Zheng-an, et al. Microstructure and Tensile Properties of Industrially Prepared 7050 Aluminum Alloy Thick Plate[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2017, 8(3): 48-53.
- [6] 张新明, 韩念梅, 刘胜胆, 等. 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, et al. 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.
- [7] 叶凌英, 黄心悦, 范世通, 等. 差温轧制工艺对 7050 铝合金厚板组织与性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科

- 学版), 2018, 49(9): 2160-2167.
YE Ling-ying, HUANG Xin-yue, FAN Shi-tong, et al. Effects of Differential Temperature Rolling on 7050 Aluminum Alloy Thick Plate[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(9): 2160-2167.
- [8] 曾舟, 黄琼, 苗景国, 等. 固溶处理制度对 7050 铝合金组织与性能的影响[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(10): 109-111.
ZENG Zhou, HUANG Qiong, MIAO Jing-guo, et al. Effect of Solution Treatment on Microstructure and Properties of 7050 Aluminum Alloy[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2021, 57(10): 109-111.
- [9] 廖杨. 高应变速率轧制及热处理工艺对 7050 铝合金组织及性能的影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
LIAO Yang. Effect of High Strain Rate Rolling and Heat Treatment Process on Microstructure and Properties of 7050 Aluminum Alloy[D]. Changsha: Hunan University, 2021.
- [10] 冯伟, 罗宁, 严志, 等. 7050 铝合金单峰时效热处理工艺及性能研究[J]. 失效分析与预防, 2020, 15(5): 288-291.
FENG Wei, LUO Ning, YAN Zhi, et al. Study on Peak Ageing Heat Treatment Process and Properties of 7050 Aluminum Alloy[J]. Failure Analysis and Prevention, 2020, 15(5): 288-291.
- [11] ZHANG Xin, LUO Zong-an, XIE Guang-ming, et al. Effect of Annealing Process on the Interfacial Microstructure Evolution and Mechanical Properties of 7050 Aluminum Alloy Clad Plates[J]. Materials Letters, 2022, 324: 132608.
- [12] ZHANG Xin, LUO Zong-an, XIE Guang-ming, et al. Interface Microstructure and Bonding Mechanisms of 7050 Aluminum Alloy Thick Plates Produced by Vacuum Roll Cladding[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 850: 143582.
- [13] CARVALHO A L M, RENAUDIN L B, ZARA A J, et al. Microstructure Analysis of 7050 Aluminum Alloy Processed by Multistage Aging Treatments[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 907: 164400.
- [14] 刘文军. Al-Zn-Mg-Cu 铝合金淬火析出行为及淬火敏感性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
LIU Wen-jun. The Research about the Quench Induced Precipitation and Quenching Sensitivity of Al-Zn-Mg-Cu Alloys[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [15] 冯迪, 张新明, 刘胜胆. 非等温回归再时效对 7055 铝合金中厚板的厚向组织及性能均匀性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(11): 3000-3010.
FENG Di, ZHANG Xin-ming, LIU Sheng-dan. Effect of Non-Isothermal Retrogression and re-Ageing on Through-Thickness Homogeneity of Microstructure and Properties in 7055 Aluminum Alloy Medium Thick Plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(11): 3000-3010.
- [16] 李承波, 张新明, 韩素琦, 等. 时效对 7085 铝合金厚板淬火引起的不均匀性影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(9): 1823-1831.
LI Cheng-bo, ZHANG Xin-ming, HAN Su-qi, et al. Effect of Aging on Quench-Induced Inhomogeneity of 7085 Aluminum Alloy Thick Plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(9): 1823-1831.
- [17] 谈琦. 淬火速率和时效工艺对 7085 铝合金厚板非均匀性的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
TAN Qi. Effects of Quenching Rate and Aging Process on the Inhomogeneities of Thick Plate of Aluminum Alloy 7085[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [18] 王东, 马宗义. 轧制工艺对 7050 铝合金显微组织和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2008, 44(1): 49-54.
WANG Dong, MA Zong-yi. Effects of Rolling Process on Microstructure and Mechanical Property of 7050 Aluminum Alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(1): 49-54.
- [19] 孙玉崇, 高安妮, 徐振, 等. 轧制工艺对 7050 铸铝板组织及性能的影响[J]. 辽宁科技大学学报, 2022, 45(2): 99-103.
SUN Yu-chong, GAO An-ni, XU Zhen, et al. Effects of Rolling Process on Microstructure and Property of 7050 Twin-Roll-Cast Plate[J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2022, 45(2): 99-103.
- [20] 罗丽梅. 7050 铝合金形变热处理过程中组织性能演变行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
LUO Li-mei. Evolution of Microstructure and Mechanical Property of 7050 Aluminium Alloy during TMT[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [21] 沈忱, 孙会. 中间形变热处理对 7050 铝合金再结晶组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(2): 122-127.
SHEN Chen, SUN Hui. Effects of Intermediate Deformation Heat Treatment on Recrystallization Structure and Mechanical Properties of 7050 Aluminum Alloy[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(2): 122-127.
- [22] SALAZAR-GUAPURICHE M, ZHAO Y Y, PITMAN A, et al. Variations of Properties Across Plate Thickness for Al Alloy 7010[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2005, 15(6): 1258-1263.
- [23] ROBINSON J S, CUDD R L, TANNER D A, et al. Quench Sensitivity and Tensile Property Inhomogeneity in 7010 Forgings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 119(1/2/3): 261-267.
- [24] 刘胜胆, 张新明, 黄振宝, 等. 7055 铝合金的淬火敏感性研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(5): 846-849.
LIU Sheng-dan, ZHANG Xin-ming, HUANG Zhen-bao, et al. Quench Sensitivity of 7055 Aluminum Alloy[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2006, 37(5): 846-849.
- [25] 李培跃, 熊柏青, 张永安, 等. 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): 513-521.

- LI Pei-yue, XIONG Bai-qing, ZHANG Yong-an, et al. Hardenability Characteristic and Microstructure of 7050 Al Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(3): 513-521.
- [26] 李承波. 淬火速率和自然时效对 7055 铝合金厚板组织性能不均匀性的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
LI Cheng-bo. Influence of Quenching Rates and Natural Aging on Inhomogeneity of Microstructures and Properties of 7055 Aluminum Alloy Thick Plate[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [27] 曹平. 时效处理对 2519A 铝合金厚板组织与性能不均匀性的影响[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2020.
CAO Ping. Effect of Aging Treatment on Microstructure and Mechanical Properties Heterogeneity of a 2519A Aluminum Alloy Thick Plate[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2020.
- [28] HB 5287—96, 金属材料轴向加载疲劳试验方法[S].
HB 5287—96, Axial Loading Fatigue Testing of Metallic Material[S].
- [29] GB/T 3075—2008, 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法[S].
GB/T 3075—2008, Metallic Materials—Fatigue Testing—Axial-Force-Controlled Method[S].
- [30] 高镇同. 疲劳性能试验设计和数据处理: 直升机金属材料疲劳性能可靠性手册[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999.
GAO Zhen-tong. Fatigue Performance Test Design and Data Processing: Reliability Manual for Fatigue Performance of Helicopter Metal Materials[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 1999.
- [31] HB/Z 112—86, 材料疲劳试验统计分析方法[S].
HB/Z 112—86, Statistical Analysis of Material Fatigue Testing[S].
- [32] 尹德都, 刘艳, 张德清, 等. 7050 铝合金厚板淬火过程的数值模拟研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2022, 44(6): 1227-1232.
YIN De-du, LIU Yan, ZHANG De-qing, et al. Numerical Simulation Study on Quenching Process of 7050 Aluminum Alloy Thick Plate[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2022, 44(6): 1227-1232.
- [33] 何道广. 固溶和淬火工艺对 7050 铝合金厚板断裂韧性的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
HE Dao-guang. Effect of Solution and Quenching Process on Fracture Toughness of 7050 Aluminum Alloy Thick Plate[D]. Changsha: Central South University, 2012.

责任编辑: 刘世忠