

平贮 ZL205A 铝合金微观缺陷与宏观力学性能关系研究

闫路¹, 刘斌斌^{2*}, 曲斌瑞¹, 孙文东³

(1.北京宇航系统工程研究所, 北京 100076; 2.北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083; 3.中国航天标准化研究所, 北京 100071)

摘要: **目的** 评估长期贮存 ZL205A 铝合金的微观缺陷对性能的影响。**方法** 利用 X 射线无损检测研究平贮合金的缺陷等级分布, 并进一步研究合金室温拉伸、高温拉伸、室温疲劳和室温冲击性能。**结果** 经过平贮 12 a 后的 ZL205A 铝合金, 其微观缺陷即针孔等级位于 1~6 级, 仅发现少量的伴生带状偏析。室温拉伸时, 1~3 级针孔样品的抗拉强度为 380 MPa, 而 5 级针孔样品的抗拉强度大幅下降到 340.5 MPa, 表明室温下 4 级及以上针孔对于拉伸强度有着重要影响。高温拉伸时, 仅在 100 °C 表现为样品缺陷等级越高, 抗拉强度越高的趋势。常温疲劳试验表明, 在 10⁷ 周的使用寿命下, 合金的疲劳极限为 99.2 MPa。常温冲击试验发现, 1 级针孔样品的平均冲击吸收能量为 3.19 J, 明显优于其他针孔等级样品。**结论** 室温拉伸和室温冲击时, 材料的力学性能与缺陷等级密切相关。高温拉伸时, 温度上升导致材料强度下降的作用超过了缺陷自身对性能的影响。

关键词: ZL205A; 微观缺陷; 室温拉伸; 高温拉伸; 室温疲劳; 室温冲击

中图分类号: TG146.2+1

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)10-0022-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.10.003

Relationship between Microdefects and Mechanical Properties of ZL205A Aluminum Alloy after Long-time Storage

YAN Lu¹, LIU Bin-bin^{2*}, QU Bin-rui¹, SUN Wen-dong³

(1. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China; 2. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. China Astronautics Standards Institute, Beijing 100071, China)

ABSTRACT: The work aims to evaluate the effect of microdefects on the properties of ZL205A aluminum alloy after long-time storage. The X-ray non-destructive testing was firstly introduced to study the distribution of microdefect levels and then mechanical properties including room temperature and high temperature tensile, room temperature fatigue and room temperature impact were investigated. After storage at room temperature for 12 years, the microdefect levels of ZL205A aluminum alloy ranged from 1 to 6, while a few associated band segregations were determined as well. The room temperature tensile strength of

收稿日期: 2023-09-15; 修订日期: 2023-10-10

Received: 2023-09-15; Revised: 2023-10-10

基金项目: 航天部金属材料预研课题 (JPPT-2016-010)

Fund: Pre-research project of metallic materials of Department of Aerospace (JPPT-2016-010).

引文格式: 闫路, 刘斌斌, 曲斌瑞, 等. 平贮 ZL205A 铝合金微观缺陷与宏观力学性能关系研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(10): 22-29.

YAN Lu, LIU Bin-bin, QU Bin-rui, et al. Relationship between Microdefects and Mechanical Properties of ZL205A Aluminum Alloy after Long-time Storage[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(10): 22-29.

*通信作者 (Corresponding author)

samples with microdefect level from 1 to 3 was around 380 MPa, but it decreased to 340.5 MPa in the samples with microdefect level 5. The results indicated that microdefect level higher than 4 had great impact on the tensile strength at room temperature. However, the trend of higher microdefect level leading to larger tensile strength was only observed at 100 °C during high temperature tensile. Room temperature fatigue tests indicated that the fatigue limit of ZL205A alloy was 99.2 MPa under the fatigue life capability of 10^7 cycles. The average impact absorbed energy of samples with microdefect level 1 was 3.19 J, obviously higher than that of samples with lower microdefect levels. The room temperature tensile and impact properties show strong dependence on the microdefect levels. At high temperature tensile, the decrease of strength is determined by temperature rather than microdefect levels.

KEY WORDS: ZL205A; microdefects; room temperature tensile; high temperature tensile; room temperature fatigue; room temperature impact

高强铝合金具有密度低、强度高、加工性能及焊接性能良好等特点,被广泛应用于航空、航天及民用领域。铸造铝合金是航天主承力结构材料之一,适用于铸造生产形状复杂、比强度要求高、整体性能要求均一的整体机加网格舱段零件^[1-2]。其中,通过复杂熔炼工艺和多级热处理工艺,ZL205A 铸造铝合金的强度可达 390 MPa,超过了美国的 KO-1 和俄罗斯的 BAl14 合金^[3],同时还具有比强度高、抗应力腐蚀、可整体机械加工、可电镀等良好的综合性能,适合生产大型受力舱段结构件,并可以用于生产以铸代锻、以铝代钢、整体铸造等构件^[3-4]。研究人员对 ZL205A 的定性凝固铸造、低压铸造、铸造缺陷、性能以及热处理工艺等进行了深入的研究^[3-9]。

目前关于不同时效制度对 ZL205A 合金力学性能影响的研究较多,但是关于合金在使用或长期贮存过程中发生的自然时效对合金性能的影响则鲜有报道。赵小莲等^[10]研究发现,人工时效前增加自然时效可以优化 7A04 铝合金的组织性能,使其晶内析出相的尺寸更加细小,分布更加均匀,进而提高强度和耐腐蚀性。Chen 等^[11]也研究发现,自然时效可以提高 A201-T7 铝合金的力学性能和抗应力腐蚀性能。张建波等^[12]研究了自然时效 60 d 的 7N01 铝合金的电导率和性能的变化,当自然时效时间达到 20 d 时,合金的电导率和抗拉强度趋于稳定,但是伸长率在 1 d 就达到稳定值。对于 6061 型铝合金,自然时效 7 d 后,合金的硬度趋于稳定,但是 Cu 的添加则会抑制自然时效^[13]。Zhang 等^[14]研究了 AA2024 铝合金在自然时效过程中的力学性能,发现随着时间的增加,合金的强度先上升、再下降,拉伸断口处的韧窝越来越少,意味着合金的塑性逐渐降低。张萧笛等^[15]进一步发现,自然时效 2 个月后,喷砂件均存在回弹现象,即存在尺寸不稳定性。

由上可知,自然时效对铝合金的力学、电以及腐蚀性能都有重要影响,但目前研究的自然时效时间通常较短,对于长时间贮存的铝合金组织和性能的报道则较少。董春林等^[16]比较了自然时效 3 d 和 730 d 后 7050 铝合金搅拌摩擦焊接头性能,结果表明,自然

时效 730 d 后,合金接头的屈服强度、抗拉强度和断后伸长率较自然时效 3 d 都有明显提升,焊核区和热力影响区的硬度也有所提升。接头性能的变化与焊接头的焊核区、热力影响区、热影响区的组织、位错密度、第二相粒子等密切相关^[17-18],也受合金时效热处理制度的影响^[19]。Abouarkoub 等^[20]研究了室温储存超过 3 a 的 AA6611 合金的微观组织和硬度,结果表明,长时间的贮存会改变合金的析出相,但是对合金的硬度影响较小。Aruga 等^[21]也研究了经过室温自然时效 325 d 后的 Al-Mg-Si 合金的硬度,发现随着室温储存时间的增加,合金的硬度逐渐增大。章国伟等^[22]研究了喷射成形 Al-Zn-Mg-Cu 合金的自然时效行为,开始时合金的抗拉强度和屈服强度随自然时效时间的延长而增强,而伸长率则逐渐下降;随着自然时效的增加,合金的抗拉强度开始减小,但是伸长率有所回升;进一步延长自然时效时间,合金的抗拉强度再次增加,塑性则再次减小。

以上研究都表明,Al 合金平贮时发生自然时效会对合金的性能产生重要影响,合金组织演变和性能下降将影响航天结构件的寿命,需要进一步深入研究。但是,目前关于铝合金自然时效对其性能影响的研究中主要存在 2 个问题:自然时效时间的通常不超过 3 a,缺少 10 a 及以上的研究报道;用于评价材料性能的指标主要是硬度和室温拉伸性能,其他性能如高温拉伸、疲劳和冲击等研究缺失。因此,本研究以经室温贮存 12 a 的 ZL205A 铝合金为研究对象,在获得合金微观缺陷特征的基础上,研究了合金室温拉伸、高温拉伸、室温疲劳和室温冲击性能,建立了长时贮存后 ZL205A 的微观缺陷与宏观力学性能的关系。这些研究不仅有助于揭示长期自然时效过程中 ZL205A 的性能变化,更为预测平贮铸件的寿命和稳定性提供有益的参考。

1 试验

1.1 材料及设计

本研究的试验材料为经过 12 a 室温贮存的

ZL205A 铝合金, 样品的热处理状态为 T6。为了评估平贮后的铸件性能, 对铸件进行整体剖切后, 通过 X 射线无损检测研究合金经过平贮后的微观缺陷, 并进一步通过高温拉伸、室温拉伸、室温疲劳和室温冲击等试验评估平贮铸件的力学性能。

1.2 X 射线无损检测

为了研究铸件中微观缺陷与其室高温力学性能的关系, 所有用于力学性能测试的样品在加工完成后均进行 X 射线无损检测。送检样品共计 264 件, 其中对比样品 16 件, 室温冲击试样 128 件, 高温拉伸试样 32 件, 疲劳试样 28 件及室温拉伸试样 60 件。试验执行标准为 Q/6S 977—2004、GJB 1187A—2001《射线检验》和 GB 11346—1989《铝合金铸件 X 射线照相检验针孔(圆形)分级》。

1.3 室高温拉伸试验

室高温拉伸试验均使用 MTS809 力学试验机, 拉伸试验的样品制备及试验条件执行 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸实验》。其中高温拉伸的试验温度为 250、200、150、100 °C。板状试样平直, 表面无划痕、损伤及锈蚀, 圆弧与工作部分连接圆滑。

1.4 室温疲劳试验

室温疲劳包括 2 个部分: 成组法测试中值疲劳寿命、升降法测量疲劳极限, 执行标准为 GB/T 3075—2008《金属材料疲劳实验轴应力控制方法》, Q/Y 322—2009《金属材料理化检测试样加工规定》。成组法测试中值疲劳寿命的频率为 90 Hz, 应力比为 0.5, 4 个应力水平分别是 240、200、160、140 MPa。疲劳试样在加工过程中无冷作硬化或过热, 表面无划痕、损伤及锈蚀, 表面精加工方向使用纵向抛光。

1.5 室温冲击试验

室温冲击试验的块状样品尺寸为 55 mm×10 mm×10 mm, V 形缺口夹角为 45°, 缺口深度为 2 mm, 底部曲率半径为 0.25 mm, 参考标准为 GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》。冲击样品总数为 128 件, 其中符合标准要求的样品为 119 件, 不符合标准的样品主要来源于开口处放大观察后存在微孔等缺陷。

冲击试验使用的摆锤刀刃半径为 2 mm, 因此使用冲击吸收能量 KV_2 评价试样的室温冲击性能, 试验机的分辨率为 0.1 J。为保证数值的有效性, 依据标准规定试样吸收能量不应超过实际初始势能 K_p 的 80%, 建议吸收能量 K 的下限应不低于试验机最小分辨力的 25 倍。因此, 冲击吸收能量 KV_2 的最小值应为 2.5 J。冲击试验后, 使用 Zeiss Ultra55 场发射扫描电子显微镜 (SEM) 对断口形貌进行观察。

2 结果及分析

248 件铸件不同力学性能测试试样(常温冲击、常温疲劳、常温拉伸和高温拉伸)及 16 件对比样的针孔等级分布如图 1 所示。整体而言, 在所有 264 件样品中, 样品的针孔等级位于 1~6 级, 仅在冲击试验样品中检测发现 3 件存在 1 级带状偏析的试样。1 级针孔的数量为 122 块, 占总送检数的比例为 46.21%; 3 级以上针孔的试样总数为 87 块, 占总送检数的 32.95%; 5 级及以上针孔的试样总数为 15 块, 占总送检数的 5.68%。在常温冲击试验样品中, 没有 5 级及以上针孔, 其余性能测试的试验样品中均存在 5 级和 6 级。

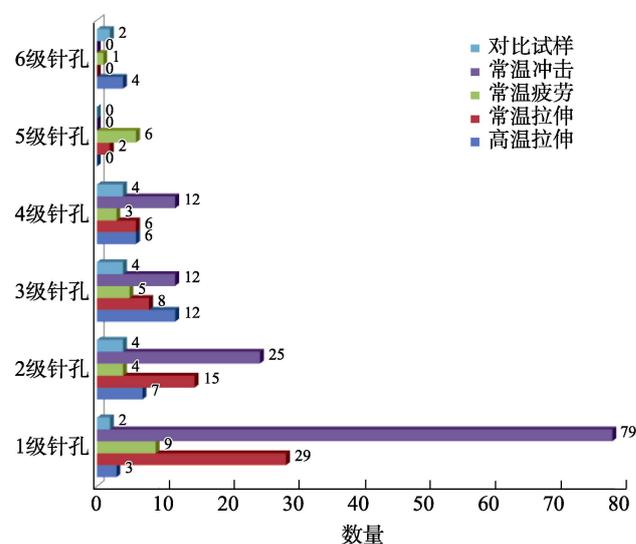


图 1 试验样品及对比样品的针孔等级分布
Fig.1 Distribution of microdefect levels in test samples and contrast samples

从图 1 可以看出, 室温拉伸样品中, 1 级和 2 级针孔等级的试样共 44 件, 占比为 73.33%。不同针孔等级样品室温拉伸时的抗拉强度对比如图 2 所示。由于拉伸过程中试样的伸长率较低, 其中 10 根试样的伸长率不足 0.2%, 因此此处以抗拉强度 (σ_p) 作为参照对象, 比较室温拉伸性能与样品微观缺陷

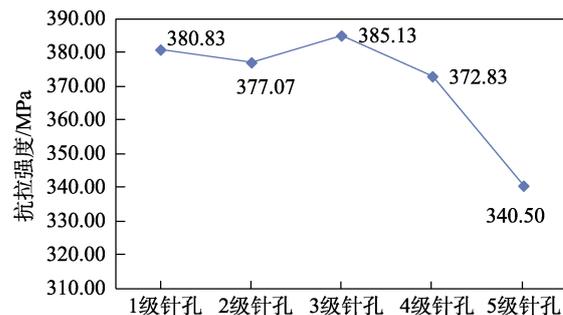


图 2 不同等级针孔的抗拉强度对比
Fig.2 Comparison of tensile strength with different microdefect levels

即针孔等级的关系。从图 2 可以看出, 1~3 级针孔样品的抗拉强度在 380 MPa 附近, 平均抗拉强度分别是 380.83、377.07、385.13MPa。4 级针孔样品的抗拉强度略微下降, 为 372.83 MPa, 而 5 级针孔样品的抗拉强度下降明显, 仅为 340.50 MPa。这个结果表明, 常温拉伸过程中, 4 级及以上针孔对力学性能的影响较明显。

根据 QJ 3185—2003《航天用铝合金 ZL205A、ZL114A 铸件规范》, 本批次样品常温拉伸时, 伸长率较低, 样品的平均抗拉强度为 378.32 MPa, 但是平均拉伸伸长率仅为 0.55%, 平均屈服强度为 354 MPa, 平均弹性模量为 74.1 GPa。与标准要求的 390 MPa 相比, 平均抗拉强度略有降低, 平均伸长率相比于 T6 态的 3% 降低明显^[6], 平均屈服强度和弹性模量高于标准要求。这个结果说明, 长期贮存对材料的塑性有着重要的影响, 合金塑性的降低可能与长期自然时效过程中析出物的形成有关^[21]。Abouarkoub 等^[20]发现, 经过室温存储 3 a, Al-Mg-Si-Cu 合金中有序原子团簇和 GP 区的长大抑制了其他析出相的析出。这也进一步表明, 对于长期贮存的航天构件, 后续研究时, 除了宏观力学性能等指标外, 贮存条件如温度、湿度、时间等因素对于组织的影响也需要深入研究。

100、150、200、250 °C 拉伸时抗拉强度分布如图 3 所示。同样由于 250 °C 拉伸过程中试样的伸长率较低, 因此此处同样以抗拉强度 (σ_p) 作为参照对象, 比较高温拉伸性能与样品微观缺陷即针孔等级的关系。从图 3 可以看出, 随着试验温度的升高, 强度出现明显下降, 特别是温度在 250 °C 时, 抗拉强度出现急剧降低。100 °C 时样品的平均抗拉强度为 349.88 MPa, 150 °C 时则降为 325.25 MPa, 200 °C 时进一步下降到 308.43 MPa, 250 °C 时仅为 200.00 MPa。

Wang 等^[23]的研究也发现了类似的现象, 当温度达到 300 °C 时, ZL205A 的强度明显下降, 这与 300 °C 时晶界处 T 相大量形成密切相关。

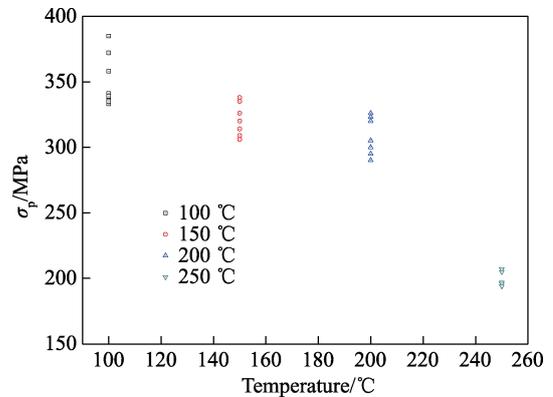


图 3 不同温度拉伸时抗拉强度的分布
Fig.3 Distribution of tensile strength at different temperature

X 射线无损检测表明, 有 22 块样品的针孔等级在 3 级及以上。图 4 比较了 4 个温度拉伸时样品的抗拉强度随针孔等级变化趋势。从图 4a 可以看出, 在 100 °C 拉伸时, 2 级针孔样品的抗拉强度明显优于 3 级和 6 级针孔的样品, 但是 3 级和 6 级针孔样品的抗拉强度与针孔等级之间没有明显的关联性。与此类似的是, 当拉伸温度在 150 °C 及以上时, 样品的抗拉强度与针孔等级均不存在明显的相关性 (图 4b~d)。如 150 °C 拉伸时, 3 级针孔的样品的性能甚至优于具有 1 级针孔的样品。这个结果表明, 随着温度上升, 材料本征因素对抗拉强度的影响大于针孔等微观缺陷。

由于所有试验温度下均有 3 级针孔等级的样品, 这里进一步比较了不同温度下所有针孔等级样品的平均抗拉强度与 3 级针孔样品的平均抗拉强度。100、

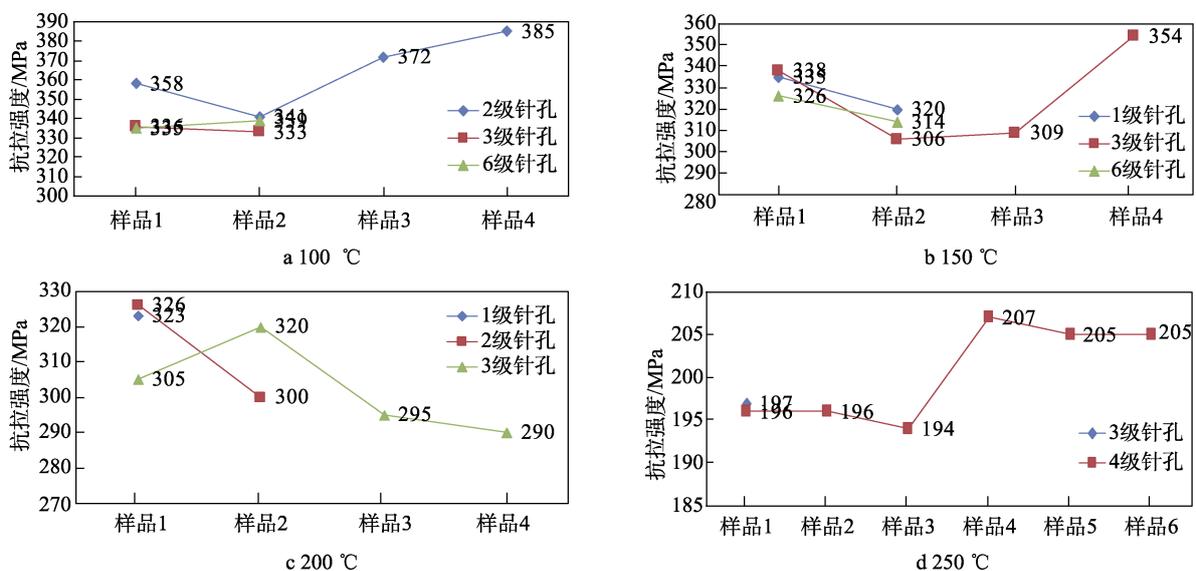


图 4 不同温度拉伸时抗拉强度随针孔等级变化趋势
Fig.4 Changes of tensile strength with different microdefect levels at different temperature

150、200、250 °C时，所有针孔等级样品的平均抗拉强度分别为 349.88、325.25、308.43、200.0 MPa，而 3 级针孔等级样品的值则分别是 334.50、326.75、302.5、197.00 MPa。可以看出，随着温度的升高，不同针孔等级样品的抗拉强度都呈现逐渐下降的趋势，特别是 250 °C拉伸时，抗拉强度较 200 °C下降了超过 100 MPa，这同样是与高温时晶界处 T 相的大量析出有关。Lu 等^[24]的研究也发现，通过热处理消除晶界处 T 相的偏析有利于改善材料的力学性能。高温变形时，晶界本身弱化也会导致强度下降。3 级针孔样品的平均抗拉强度很接近全部针孔等级的数值，这也进一步证实了上述推测，即高温拉伸时，温度上升导致

材料强度下降的作用超过了缺陷自身对性能的影响。

下面进一步研究不同等级针孔对合金室温疲劳性能的影响，不同应力水平下的中值疲劳寿命值见表 1。从表 1 中可以明显地看出，随着应力水平的下降，对数疲劳寿命中值明显增加。当应力为 240 MPa 时，对数疲劳寿命中值为 4.827，中值疲劳寿命为 67 140 周；当应力下降到 140 MPa 时，对数疲劳寿命中值则增加到 5.85，中值疲劳寿命也增加到 707 800 周。在高应力水平下，对数疲劳寿命的标准差较大，240 MPa 应力时，对数寿命的标准差为 0.527 6。随着应力水平的下降，对数疲劳寿命标准差下降到了 0.225 8，这说明高应力水平下，疲劳寿命对组织或缺陷等更加敏感。

表 1 不同应力水平下的中值疲劳寿命值
Tab.1 Mediate fatigue life capability under different stress levels

σ_{max}/MPa	疲劳寿命/ 10^3	对数疲劳寿命中值	对数寿命标准差	中值疲劳寿命
240	60.8, 21, 237	4.827	0.527 6	67 140
200	193,179,78,68,165	5.096	0.215 8	124 800
160	182,196,525,267,324	5.442	0.185 6	276 600
140	914, 290, 698, 1044, 920	5.850	0.225 8	707 800

采用升降法测量疲劳极限的应力升降图如图 5 所示。其原理是，首先预估一疲劳极限，在略高于疲劳极限的应力水平下进行疲劳试验，若前一个试样未达到指定寿命即发生破坏，则在随后的一次试验就在低 1 级的最大应力下进行；若前一个试样达到指定寿命仍未发生破坏，随后的一次试验就在高 1 级的最大应力下进行，直到全部完成试验为止。随后，根据应力升降图，将相邻应力等级的各数据点配对，配对从第一次出现相反结果的 2 个数据开始，按照上述方法安排试验。当升降图闭合时，各数据点均可配对。闭合的条件是。根据有效数据的终点为越出或破坏，可设想在某一应力水平还存在一数据点，若该数据点与有效数据的起点位于同一应力水平则表示闭合。通常试验时，会选取 6 组配对对子，即为闭合。

根据疲劳极限应力对照表。疲劳极限的计算方法为：

$$\sigma = (\sigma_{A1} * B1 + \sigma_{A2} * B2 + \sigma_{A3} * B3 + \sigma_{A4} * B4) / (B1 + B2 + B3 + B4) \quad (1)$$

根据计算，在 10^7 的寿命下的疲劳极限为 99.2 MPa。最终结合中值疲劳寿命和疲劳极限的相关结果，采用以下方程拟合疲劳曲线：

$$\lg N_f = 9.754 2 - 2.249 3 \lg(\sigma_{max} - 82.5) \quad (2)$$

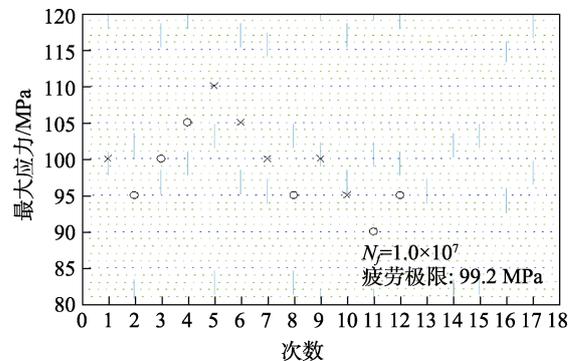


图 5 升降法测量疲劳极限的应力升降图
Fig.5 Stress up-down curves of fatigue limit measured by up-down method

表 2 疲劳极限应力对照
Tab.2 Ultimate stresses of fatigue

序号	应力-1/MPa	应力-2/MPa	平均值 A/MPa	应力对数 B	强度中值	子样标准差	变异系数
1	110	105.0	107.5	1	107.5	—	—
2	105	100.0	102.5	1	105.0	3.535 5	0.0336 7
3	100	95.0	97.5	3	100.5	4.472 1	0.0445 0
4	95.0	90.0	92.5	1	99.2	5.164 0	0.0520 7

拟合后的疲劳曲线如图 6 所示，其中拟合相关系数 R 为 0.998 8。为了进一步分析针孔等级对于疲劳寿命的影响，选取了 200、160、140 MPa 等 3 个应力水平，并比较了疲劳寿命与样品自身针孔等级的关

系。在 200 MPa 的应力水平下，同为 4 级针孔样品的疲劳寿命分别为 193 000 周和 68 000 周；在 160 MPa 的应力时，具有 3 级针孔的样品的疲劳寿命可以达到 525 000 周，而 2 级针孔样品的寿命为 196 000 周。

可以发现, 在这 2 个应力水平下, 样品的疲劳寿命与微观缺陷等级没有明显的关联性。然而, 当应力水平为 140 MPa 时, 具有 1 级针孔的样品疲劳寿命达到了 1 044 000 周, 而 5 级针孔样品的疲劳寿命仅为 290 000 周, 1 级针孔样品的疲劳寿命是 5 级针孔样品的 3.6 倍。这说明在低应力水平下, 样品的微观缺陷等级对合金的疲劳性能有着重要影响。Li 等^[25]研究了实际使用过程中失效的 ZL205A 铸件的失效机理, 发现铸造过程中的缺陷(如微孔等)是服役过程中疲劳裂纹的萌生点, 导致构件在使用过程中的破坏。其他研究也表明, 微孔等铸造缺陷能够使得材料的疲劳损伤容限降低 40%^[25]。文中的结果进一步表明, 在低应力水平下, 缺陷对疲劳寿命的影响更大。

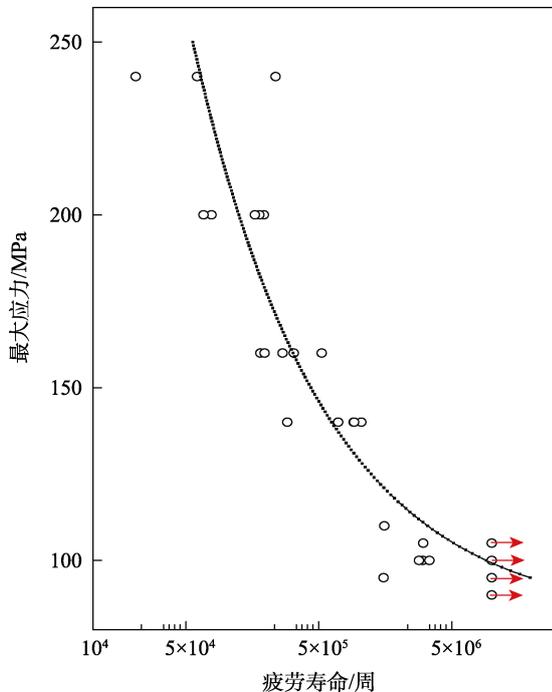


图 6 拟合的疲劳曲线
Fig.6 Fitted fatigue curve

符合国标测试标准要求的 89 个室温冲击样品冲击吸收能量 (KV_2) 的针孔等级分布如图 7 所示。可以看出, 在 89 块符合标准的样品中, 1 级针孔的最大 KV_2 值能够超过 4.0 J, 2 级针孔样品都未达到 4.0 J, 而对于 3 级及以上针孔的试样, KV_2 基本集中在 2.50~2.60 J (实测值均为 2.58 J)。进一步分析了同一针孔等级样品的平均冲击吸收能量, 1 级针孔样品的平均冲击吸收能量为 3.19 J, 2 级针孔样品则降为 2.86 J, 较 1 级针孔样品下降了 11.3%; 3 级和 4 级针孔样品的平均冲击吸收能量比较接近, 分别为 2.58、2.60 J, 分别较 1 级针孔样品下降了 19.2% 和 18.5%。这说明随着样品针孔等级下降, 即微观缺陷尺寸的增加, 试样的冲击性能下降明显。

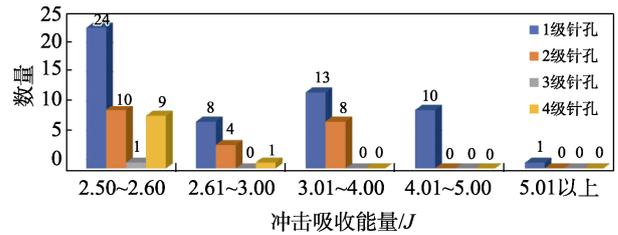


图 7 室温冲击样品的冲击吸收能量 (KV_2) 的针孔等级分布

Fig.7 Distribution of room temperature impact energy (KV_2) in different microdefect levels

室温冲击样品断口形貌如图 8 所示。从图 8a 可以看出, 在断口上存在明显的未闭合的孔洞, 这与某失效件断口附近形貌一致, 被认为是铸造过程大的应力集中造成的^[26]。在进一步放大的图 8b 中, 除了铝合金基体典型的韧窝形貌外, 还观察到了明显粗大的析出物以及其内部的裂纹, 呈现出沿晶断裂的特征, 这与长期自然时效过程中析出物在晶界处的析出有关^[27]。

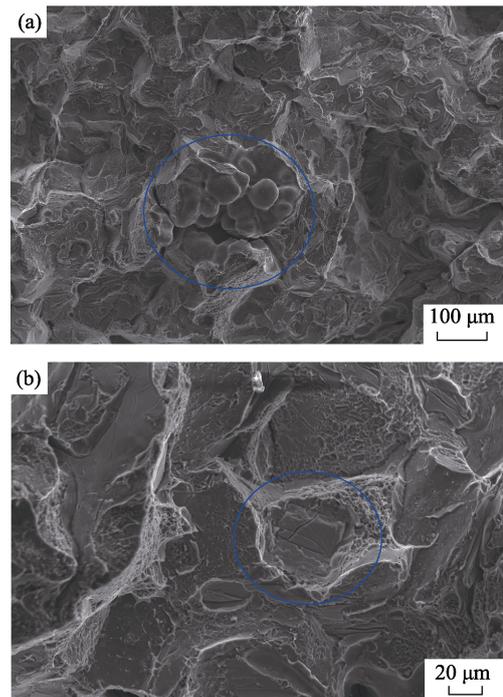


图 8 室温冲击样品断口形貌
Fig.8 Fracture surface of sample after room temperature impact

3 结论

1) 经过平贮 12 a 后的 ZL205A 铝合金样品的微观缺陷, 即针孔等级位于 1~6 级, 仅发现少量的伴生带状偏析, 5 级及以上针孔缺陷的比例为 5.68%。

2) 室温拉伸试验结果表明, 4 级及以上针孔等级的样品明显低于 1~3 级针孔等级样品, 但高温拉伸时仅在 100 °C 表现为样品缺陷等级越高, 抗拉强度越

高的趋势。这表明在高温拉伸时,温度上升导致材料强度下降的作用超过了缺陷自身对性能的影响。

3) 常温疲劳试验表明,在 10^7 的寿命下,ZL205A合金的疲劳极限为99.2 MPa,低应力水平下疲劳寿命与针孔等级有明显的相关性。

4) 常温冲击试验表明,样品的冲击性能与缺陷等级密切相关。1级针孔样品的平均冲击吸收能量为3.19 J,2级针孔样品则降为2.86 J,3级和4级针孔样品的平均冲击吸收能量分别下降到2.58、2.60J。这说明样品针孔等级下降,不利于试样的冲击性能。

参考文献:

- [1] 夏德顺. 新型轻合金结构材料在航天运载器上的应用与分析(上)[J]. 导弹与航天运载技术, 2000(4): 18-22.
XIA De-shun. The Application and Analysis of New Light Alloys in Aerospace Vehicle(1)[J]. Missiles and Space Vehicles, 2000(4): 18-22.
- [2] STAKEY J T. Aluminum Alloys: Contemporary Research and Applications[M]. San Diego: Academic Press, 1989.
- [3] 贾泮江, 陈邦峰. ZL205A 高强铸造铝合金的性能及应用[J]. 轻合金加工技术, 2009, 37(11): 10-12.
JIA Pan-jiang, CHEN Bang-feng. The Properties and Application of High Strength ZL205A Casting Aluminum Alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2009, 37(11): 10-12.
- [4] WANG Liang, FAN Xue-yi, LUO Liang-shun, et al. Influence of Traveling Magnetic Field on Solidification Defects and Mechanical Properties of ZL205A Alloy Sheet Casts[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(12): 3177-3180.
- [5] WANG Ru-jia, WU Shi-ping, CHEN Wei. Effect of Vibration on Seepage Feeding during Low-Pressure Casting of ZL205A Alloy[J]. China Foundry, 2019, 16(1): 40-45.
- [6] WU Shi-ping, WANG Ru-jia, WANG Ye, et al. Reduction of Shrinkage Porosities in Aluminum Alloy Castings by External Pressure Fluctuation under Gravity Field[J]. China Foundry, 2018, 15(5): 372-377.
- [7] 李玉, 张国伟, 徐宏, 等. ZL205A 合金热处理工艺研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(1): 68-69.
LI Yu, ZHANG Guo-wei, XU Hong, et al. Study on Heat Treatment Process for ZL205A Alloy[J]. Foundry Technology, 2017, 38(1): 68-69.
- [8] LEI L, LUO L, SU Yan-qing, et al. Optimizing Microstructure, Shrinkage Defects and Mechanical Performance of ZL205A Alloys via Coupling Travelling Magnetic Fields with Unidirectional Solidification[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 74: 246-258.
- [9] 郭廷彪, 冯瑞, 王炳, 等. 固溶及时效处理对 ZL205A 合金腐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(4): 87-94.
GUO Ting-biao, FENG Rui, WANG Bing, et al. Effect of Solution and Aging Treatment on Corrosion Properties of ZL205A Alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(4): 87-94.
- [10] 赵小莲, 刘东, 张珂星, 等. 自然时效对 7A04 铝合金力学性能和电化学腐蚀行为的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(18): 122-125.
ZHAO Xiao-lian, LIU Dong, ZHANG Ke-xing, et al. Effect of Natural Aging on Mechanical Properties and Electrochemical Corrosion Behavior of 7A04 Aluminum Alloy[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(18): 122-125.
- [11] CHEN M C, WEN M C, CHIU Y C, et al. Effect of Natural Aging on the Stress Corrosion Cracking Behavior of A201-T7 Aluminum Alloy[J]. Materials, 2020, 13(24): 5631-5631.
CHEN M C, WEN Ming-che, CHIU Y C, et al. Effect of Natural Aging on the Stress Corrosion Cracking Behavior of A201-T7 Aluminum Alloy[J]. Materials, 2020, 13(24): 5631.
- [12] 张建波, 张永安, 何振波, 等. 自然时效对 7N01 铝合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属, 2012, 36(2): 191-195.
ZHANG Jian-bo, ZHANG Yong-an, HE Zhen-bo, et al. Effect of Natural Ageing on Properties and Microstructure of 7N01 Aluminum Alloys[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2012, 36(2): 191-195.
- [13] 纪艳丽, 陈林, 郭世杰, 等. 自然时效及 Cu 对 6061 型铝合金塑性的影响[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(10): 28-32.
JI Yan-li, CHEN Lin, GUO Shi-jie, et al. Influence of Natural Ageing and Cu on the Ductility of 6061 Al Alloys[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2021, 49(10): 28-32.
- [14] ZHANG Peng, CHEN Ming-he, XIE Lan-sheng, Effect of Natural Aging Time on Tensile Properties and Fracture of Heat-Treated AA2024-O Al-Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(3): 819-824.
- [15] 张萧笛, 廖凯, 黄鑫, 等. 铝合金薄壁喷砂件自然时效下的尺寸不稳定性分析[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(8): 145-150.
ZHANG Xiao-di, LIAO Kai, HUANG Xin, et al. Shape Instability Analysis of Al Alloy Thin Walled Shot-Peened Component under Natural Aging[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(8): 145-150.
- [16] 董春林, 张坤, 栾国红, 等. 自然时效对 7050 铝合金搅拌摩擦焊接头性能的影响[J]. 焊接学报, 2014, 35(4): 15-18.
DONG Chun-lin, ZHANG Kun, LUAN Guo-hong, et al. Effect of Natural Aging on Mechanical Properties of 7050 Aluminum Alloy Friction Stir Welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(4): 15-18.
- [17] JARIYABOON M, DAVENPORT A J, AMBAT R, et al. The Effect of Welding Parameters on the Corrosion Behaviour of Friction Stir Welded AA2024-T351[J]. Corrosion Science, 2007, 49(2): 877-909.
- [18] SU J Q, NELSON T W, MISHRA R, et al. Microstruc-

- tural Investigation of Friction Stir Welded 7050-T651 Aluminium[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(3): 713-729.
- [19] RHODES C G, MAHONEY M W, BINGEL W H, et al. Effects of Friction Stir Welding on Microstructure of 7075 Aluminum[J]. *Scripta Materialia*, 1997, 36(1): 69-75.
- [20] ABOUARKOUB A, THOMPSON G E, ZHOU X, et al. The Influence of Prolonged Natural Aging on the Subsequent Artificial Aging Response of the AA6111 Automotive Alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, 46(9): 4380-4393.
- [21] ARUGA Y, KOZUKA M, TAKAKI Y, et al. Formation and Reversion of Clusters during Natural Aging and Subsequent Artificial Aging in an Al-Mg-Si Alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 631: 86-96.
- [22] 章国伟, 陈刚, 翟景, 等. 喷射沉积超高强铝合金自然时效行为分析[J]. *兵器材料科学与工程*, 2013, 36(2): 56-58.
ZHANG Guo-wei, CHEN Gang, ZHAI Jing, et al. Natural Aging Behavior of Spray Formed Superhigh Strength Aluminum Alloys[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2013, 36(2): 56-58.
- [23] WANG Wen-guang, GUO Guan-nan, WANG Gang. Microstructure Effects on Tensile Brittleness of as-Quenched ZL205A at Elevated Temperature[C]// *Proceedings of 28th Heat Treating Society Conference (Heat Treating 2015)*. Ohio: ASM-International, 2015.
- [24] LU Gang, CHEN Yi-si, YAN Qing-song, et al. Effects of Continuous and Pulsed Ultrasonic Treatment on Microstructure and Microhardness in Different Vertical Depth of ZL205A Castings[J]. *Materials*, 2020, 13(19): 4240.
- [25] LI Bo, SHEN Yi-fu, HU Wei-ye. Casting Defects Induced Fatigue Damage in Aircraft Frames of ZL205A Aluminum Alloy—A Failure Analysis[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(5): 2570-2582.
- [26] GAO Y X, YI J Z, LEE P D, et al. A Micro-Cell Model of the Effect of Microstructure and Defects on Fatigue Resistance in Cast Aluminum Alloys[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(19): 5435-5449.
- [27] YI Gao-song, CULLEN D A, LITTRELL K C, et al. Characterization of Al-Mg Alloy Aged at Low Temperatures[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, 48(4): 2040-2050.

责任编辑: 刘世忠