

分级淬火对 7N65 铝合金微观组织和断裂韧性的影响^①

林立健¹, 张勇¹, 郑许^{1,2}, 唐建国^{1,3}

(1.中南大学材料科学与工程学院,湖南长沙 410083; 2.广西南南铝加工有限公司广西铝合金材料与加工重点实验室,广西南宁 530031; 3.中南大学有色金属材料科学与工程教育部重点实验室,湖南长沙 410083)

摘要:通过分级淬火实验研究了 7N65 合金在不同保温温度与不同保温时间下的硬度(HV)和单位裂纹形核功(UIE)变化,绘制了合金的 TTP-HV 曲线及 TTP-UIE 曲线。结合扫描电镜、透射电镜等表征方法,对不同温度下的第二相析出行为进行了研究。结果表明,高温(390~450 °C)保温时,晶界析出相以 S(Al_2CuMg)相为主,随着保温时间延长,其尺寸与数量增大,合金断裂韧性下降,断裂方式为沿扁平晶粒断开的脆性断裂;低温(250~390 °C)保温时,晶界析出相以 η ($MgZn_2$)相为主,随着保温时间延长,晶界特征变化不大,晶内 η 相数量增加、尺寸增大,导致晶内强度降低,晶内-晶界强度差减小,合金断裂韧性上升,断裂方式为穿晶断裂。

关键词: 7N65 合金; 分级淬火; 断裂韧性; 铝合金; 固溶处理; 时效; 裂纹形核功; TTP 曲线

中图分类号: TG156

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.05.034

文章编号: 0253-6099(2023)05-0149-05

Effect of Interrupted Quenching on Microstructure and Fracture Toughness of 7N65 Aluminum Alloy

LIN Lijian¹, ZHANG Yong¹, ZHENG Xu^{1,2}, TANG Jianguo^{1,3}

(1.School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2.Guangxi Key Laboratory of Materials and Processes of Aluminum Alloys, ALG Aluminum Inc, Nanning 530031, Guangxi, China; 3.Key Laboratory of Nonferrous Metallic Materials Science and Engineering, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Interrupted quenching experiments were conducted to investigate the hardness (HV) and unit initiation energy (UIE) of 7N65 alloy samples at various temperatures with different hold time, and the relative TTP-HV and TTP-UIE contour diagrams were also plotted. The precipitation behavior of second phases at various temperatures was characterized by adopting scanning electron microscope and transmission electron microscope. The findings reveal that S-phase (Al_2CuMg) is the dominant grain boundary precipitate after the alloy is held at a temperature between 390 °C and 450 °C, and increases in grain size and numbers as hold time is prolonged. Thus the alloy has less fracture toughness and is prone to fragile fracture along with the broken grains. When the alloy sample is held at a temperature between 250 °C and 390 °C, precipitates at grain boundaries are predominated by η -phase ($MgZn_2$), which increases in the numbers and grain size as hold time is prolonged, leading to lower strength of inner grain, smaller difference in strength between inner grains and grain boundaries. Thus, the alloy has higher fracture toughness and is more prone to ductile fracture with more transgranular dimples.

Key words: 7N65 aluminum alloy; interrupted quenching; fracture toughness; aluminum alloy; solid solution treating; aging; unit initiation energy (UIE); TTP curve

高强度 7×××系铝合金(Al-Zn-Mg-Cu)因具有强度高、密度小的优点而被广泛应用于航空航天领域^[1-2]。7N65 合金是在 AA7065 合金基础上发展的具有自主

知识产权的下一代新合金。与其他厚板材料相比,该合金具有较高的断裂韧性。影响 7×××系铝合金断裂韧性的因素包括轧制、固溶、淬火、时效等热加工工艺

① 收稿日期: 2023-04-20

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3403701); 广西科技重大专项(桂科 AA22068075)

作者简介: 林立健(1997—),男,浙江湖州人,硕士研究生,主要研究方向为高强铝合金及其制备技术。

因素^[3-4],以及初生粗大化合物、晶粒结构、晶界析出相、晶内析出相尺寸和分布等微观组织因素^[5-7]。以往的研究主要集中在时效处理导致的微观组织变化对于合金断裂韧性的影响,而对于淬火工艺方面的研究较少。本文采用分级淬火的实验方法,研究了分级淬火过程中微观组织变化对合金断裂韧性的影响规律,为后续合金的热处理工艺优化提供科学依据。

1 实验材料及方法

实验样品为广西南南铝加工有限公司生产的厚度 80 mm 的 7N65 铝合金热轧板,其化学成分如表 1 所示。其轧制温度 400 °C,铸锭初始厚度 400 mm,轧制速度 1.2 m/min。分级淬火实验采用两台盐浴炉同时进行。首先将样品放置于一台盐浴炉中进行 473 °C/1 h 的固溶处理,然后迅速转移到另一台已经预设好温度的盐浴炉中进行等温保温处理(预设温度分别为 250 °C、290 °C、330 °C、370 °C、410 °C、450 °C,保温时间分别为 10 s、20 s、30 s、60 s、300 s、900 s)。保温完毕后立即放入 25 °C 室温水淬冷却,以上所有转移过程均在 3 s 内完成。随后置于恒温油浴槽中进行 121 °C/24 h 的人工时效。时效后对不同保温温度与保温时间下的试样进行硬度与 Kahn 撕裂测试。另取一块试样只进行固溶+淬火+人工时效处理,不进行等温保温处理,记作 T6 状态试样。

表 1 7N65 合金实测化学成分(质量分数) %

Zn	Mg	Cu	Zr	Si	Fe	Al
7.78	1.81	2.07	0.10	<0.03	<0.02	余量

采用 HV-10B 显微硬度计测试试样硬度,载荷 0.5 kg,加载时间 10 s,每个试样测 5 个点取平均值。参照 ASTM B871-01 标准,采用 MTS Landmark 万能拉伸试验机进行 Kahn 撕裂测试,拉伸速率 2 mm/min,拉伸方向为 ND 方向,试样尺寸及取样方向如图 1 所示。测试完成后,根据位移-载荷曲线计算单位面积裂纹形核功(UIE)和撕裂强度(TS),计算公式为:

$$UIE = \frac{W}{bt} \quad (1)$$

$$TS = \frac{4P}{bt} \quad (2)$$

式中 W 为位移-载荷曲线上裂纹扩展前的积分面积,即裂纹在扩展前做的功; b 为试样缺口尖端至对边的距离; t 为试样厚度; P 为峰值载荷,即撕裂过程中所需的最大载荷。

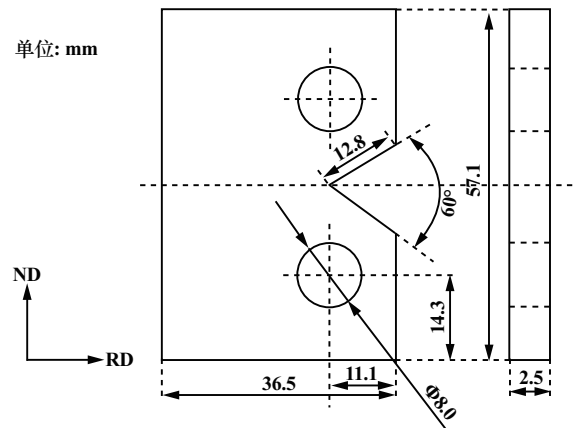


图 1 Kahn 撕裂试样尺寸示意图

采用 ZEISS EVO MA10 型钨灯丝扫描电子显微镜(SEM)进行扫描电镜组织分析,观察第二相粒子的尺寸、形貌和分布特征。样品取自 V 型缺口附近,使用砂纸打磨后机械抛光至表面光亮无划痕。断口扫描主要观察裂纹形核区(Kahn 撕裂曲线上升区域)的断口形貌。采用牛津 Oxford X-MaxN 型能谱分析仪(EDS)分析第二相粒子成分。

在 Kahn 撕裂样品 V 型缺口附近取样,采用 Tecnai G2 F20 型透射电子显微镜(TEM)分析透射电镜组织,观察析出相形貌特征,加速电压为 200 kV。

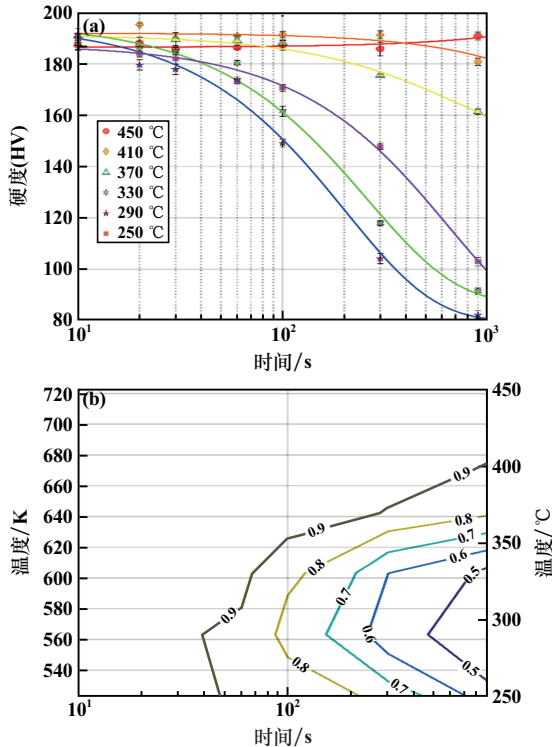
2 结果分析与讨论

2.1 硬度及 TTP 曲线

图 2(a) 为不同保温温度下时效态硬度随保温时间的变化。在同一保温温度下,随着保温时间延长,合金时效态硬度总体上逐渐降低。高温(450 °C、410 °C 和 370 °C)保温时,时效硬度随时间延长而减小的趋势要明显小于低温(330 °C、290 °C 和 250 °C)保温时。保温温度 290 °C 和 330 °C 时硬度曲线变化显著,相比最短保温时间(10 s)的硬度值,900 s 时效硬度值分别下降了 57.07% 和 51.13%。高温保温时,如 410 °C 保温,最低硬度值较最高硬度值仅降低了 4.96%;450 °C 保温时,硬度值略微上升。

根据图 2(a) 分别计算出不同温度下到达峰值硬度(T6 状态为 196.33HV)10%~90% 所需的保温时间,并将这些等高点连接,绘制出该合金的 TTP-HV 曲线,如图 2(b) 所示。可以看出,该合金的 TTP 曲线呈 C 字形,与同系的其他合金如 7050、7010 等形状相似。铝合金的 C 曲线最早于 1947 年被 Fink 和 Willey^[8] 提出,一般基于硬度和屈服强度的 TTP 曲线都呈 C 字形。这是因为在等温保温过程中,高温保温时原子扩

散速率快,但过饱和程度低,淬火析出相析出速率慢;而低温保温时,过饱和程度高,但原子扩散速率慢,析出速率也慢。只有在中间温度区间等温保温时,对于硬度和屈服强度不利的淬火析出相的析出速率最快,合金硬度和屈服强度对保温时间最敏感。



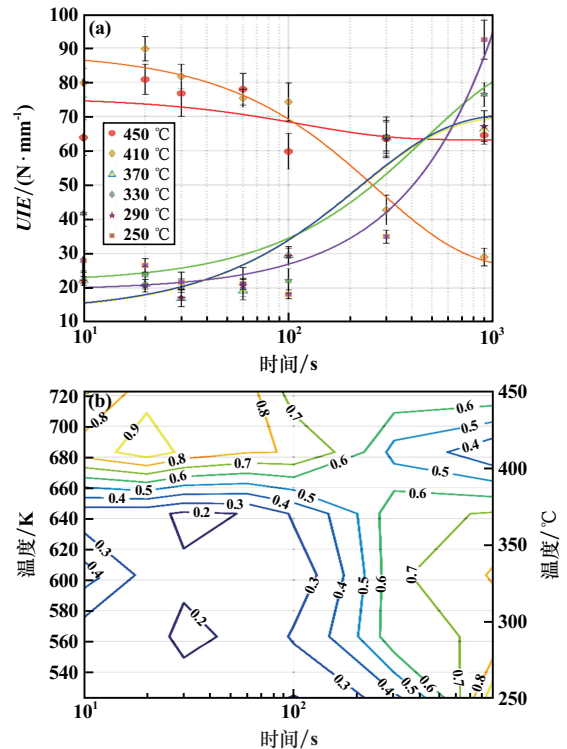
(a) 时间-硬度曲线; (b) 时间-温度-硬度 TTP 曲线
图 2 时间-硬度曲线及时间-温度-硬度 TTP 曲线

2.2 单位裂纹形核功及 TTP 曲线

在不同温度下保温一定时间,淬火时效后试样的 UIE 值见图 3(a)。可以看到,高温(410 °C、450 °C)保温时,试样 UIE 值随着保温时间延长而下降;低温(250 °C、290 °C、330 °C、370 °C)保温时,试样 UIE 值随着保温时间延长而上升。410 °C 高温保温时 UIE 变化较剧烈,相比最短保温时间(10 s)的 UIE 值,900 s 时的 UIE 值下降了 63.59%;而 450 °C 保温时, UIE 值下降了 20.13%。250 °C 低温保温时 UIE 变化最为剧烈,相较于保温 10 s 时的 UIE 值,900 s 时的 UIE 值增加了 229.59%。

根据绘制 TTP-HV 曲线的方法,计算不同温度保温试样达到峰值状态下 UIE 值(T6 状态为 93.35 N/mm) 10%~90%所需的保温时间,然后将这些等高点连接,得到试样 TTP- UIE 曲线,如图 3(b)所示。TTP- UIE 曲线主要分为 4 个区域:高温区域(370~450 °C)短时(10~200 s)保温和长时(200~900 s)保温 2 个区域、低温区域(250~370 °C)短时(10~200 s)保温和长时

(200~900 s)保温 2 个区域。从图 3(b)可以看出,高温保温时,短时保温的 UIE 值相对较高,达到了 T6 状态下的 90%左右,长时保温的 UIE 值相对较低,只有 T6 状态的 40%左右。低温保温时,短时保温的 UIE 值较低,只有 T6 状态的 20%左右,而长时保温的 UIE 值较高,达到了 T6 状态的 70%。



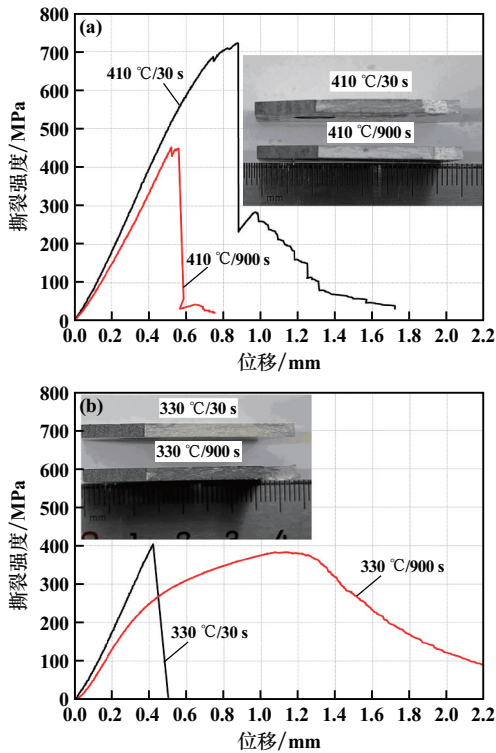
(a) 时间-单位裂纹形核功曲线;
(b) 时间-温度-单位裂纹形核功 TTP 曲线

图 3 时间-单位裂纹形核功曲线及时间-温度-单位裂纹形核功 TTP 曲线

2.3 Kahn 撕裂曲线与断口形貌分析

为了进一步研究 TTP- UIE 曲线所呈现的 UIE 值变化规律,在曲线的 4 个典型区域各选取 1 个试样进行撕裂曲线分析及断口形貌观察,结果见图 4。表 2 给出了对应试样的 UIE 值及撕裂强度。从图 4 可以看出,410 °C 保温 30 s 试样撕裂强度(714.3 MPa)要比保温 900 s 试样撕裂强度(448.3 MPa)大,且完成裂纹形核过程所需的位移(即时间)也更长(保温 30 s 时裂纹形核所经过的位移为 0.88 mm,保温 900 s 时的位移为 0.56 mm)。330 °C 保温 30 s 和保温 900 s 试样峰值载荷相差不大,撕裂强度分别为 404.3 MPa 和 383.8 MPa。但保温 900 s 试样在形核过程所经过的位移(1.14 mm)要比保温 30 s 试样的位移(0.42 mm)大得多。从试样宏观断口形貌来看,410 °C 保温 30 s 试样和 330 °C 保温 900 s 试样的宏观断口较为平整,而 410 °C 保温 900 s

试样和 330 °C 保温 30 s 试样的断口呈现粗糙、不规则的特点,展现出更好的断裂韧性,与 UIE 值结果一致。



(a) 410 °C 保温; (b) 330 °C 保温
图4 试样撕裂曲线及断口形貌

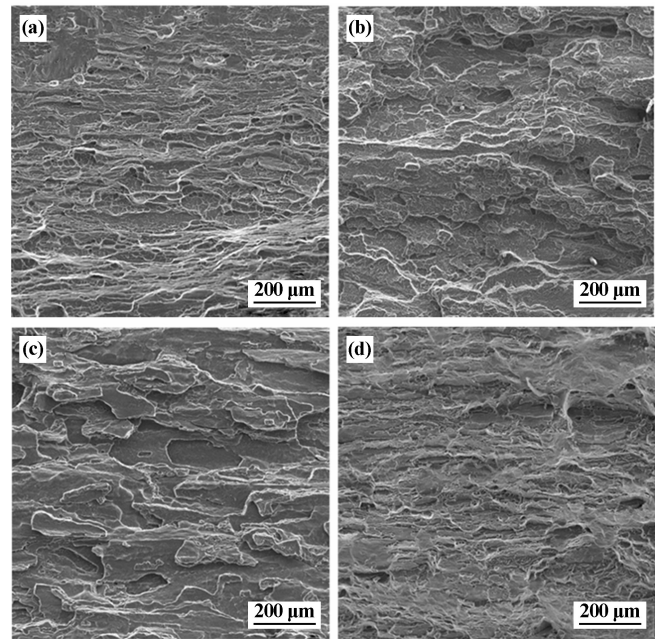
表2 试样 UIE 值及撕裂强度

样品名称	$UIE/(N \cdot mm^{-1})$	撕裂强度/MPa
410 °C/30 s	81.6 ± 3.5	714.3 ± 7.6
410 °C/900 s	29.0 ± 2.6	448.3 ± 6.7
330 °C/30 s	19.9 ± 2.6	404.3 ± 7.3
330 °C/900 s	76.3 ± 3.5	383.8 ± 5.9

图5为试样在410 °C和330 °C下分别保温30 s和900 s的断口形貌。410 °C保温30 s试样断口以穿晶韧窝断裂机制为主,观察到大量韧窝;当保温时间延长至900 s时,试样断口以沿晶断裂为主,可以清晰地看到沿着晶粒断裂的完整平面;330 °C保温30 s试样断口以沿晶断裂为主,断口形貌与410 °C保温900 s试样相似,且晶界轮廓比410 °C保温900 s试样断口更清晰,是典型的脆性断裂形貌;330 °C保温900 s试样断口以穿晶断裂为主,断口观察到大量穿晶韧窝。以上结果表明,410 °C保温30 s和330 °C保温900 s试样断口穿晶断裂比例较大,具有更好的断裂韧性,与 UIE 值结果一致。

2.4 微观组织

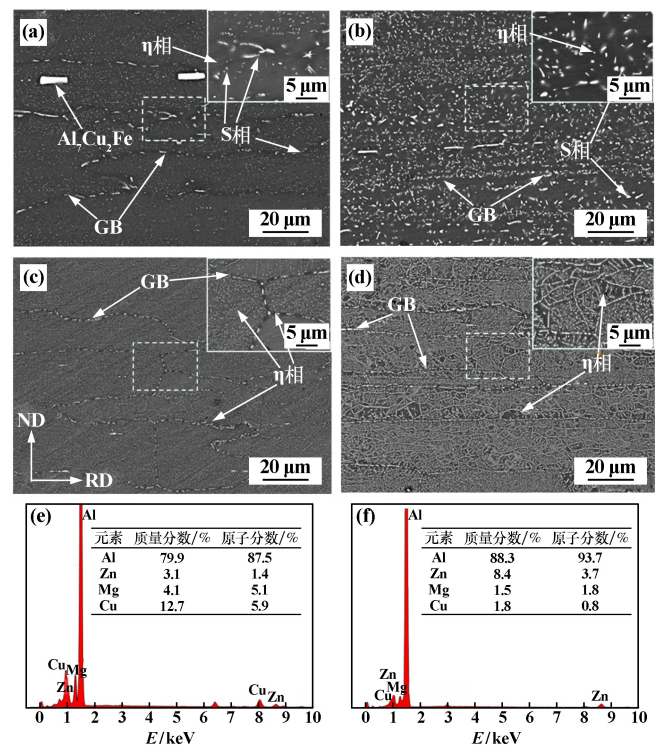
图6为试样在410 °C和330 °C分别保温30 s和900 s的背散射SEM照片及EDS分析结果,其中白色



(a) 410 °C 保温 30 s; (b) 410 °C 保温 900 s;
(c) 330 °C 保温 30 s; (d) 330 °C 保温 900 s

图5 试样断口形貌

颗粒为第二相粒子。410 °C保温30 s时,大角度晶界和亚晶界上都有少量的析出相析出,根据EDS能谱分析结果,结合相关文献^[9],可以判断该相为高温析出S相(Al_2CuMg)。保温时间延长至900 s时,晶界上S相

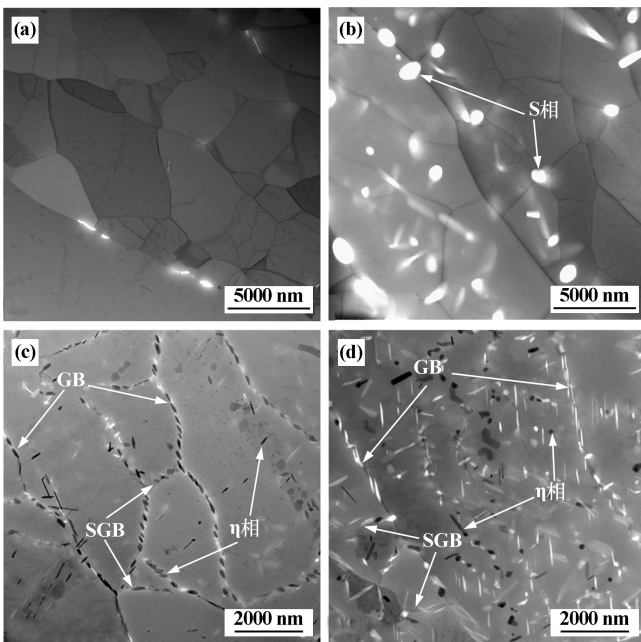


(a) 410 °C 保温 30 s; (b) 410 °C 保温 900 s; (c) 330 °C 保温 30 s;
(d) 330 °C 保温 900 s; (e) S 相 EDS 能谱; (f) η 相 EDS 能谱

图6 不同试样SEM照片及EDS分析结果

数量明显增加,同时也伴随着另一种棒状析出相的析出,根据 EDS 分析结果,结合相关文献^[10],可以判断该相为 η 相(MgZn_2)。330 °C 保温 30 s 时,晶界上析出大量 η 相,晶内也有少量析出。保温时间延长至 900 s 时, η 相在晶界和亚晶界上析出。这与保温 30 s 时的晶界特征相似。除此之外,在晶内和亚晶内有大量 η 相析出。

图 7 为试样的 TEM 明场像照片,其中黑色颗粒为析出相,白色部分为双喷时第二相粒子脱落留下的孔洞。410 °C 保温 30 s 试样中,晶界有少量大尺寸析出相留下的孔洞,尺寸 0.7~1.1 μm ,晶内几乎没有大尺寸析出相析出。保温时间延长至 900 s 时,晶界上有大尺寸的颗粒留下的圆形孔洞,尺寸 1~2 μm ,据图 6(e) 结果可以判断这些是高温下析出的 S 相;同时,晶内也观察到少量析出相,尺寸 0.5~0.9 μm 。330 °C 保温 30 s 试样的晶界上观察到了粗大的棒状 η 相,尺寸 0.2~0.3 μm ,晶内也有少量析出相。保温时间延长至 900 s 时,晶界上 η 相发生粗化,尺寸达到 0.4~0.5 μm ;同时,晶内有大量 η 相析出,尺寸 0.4~0.6 μm 。



(a) 410 °C 保温 30 s; (b) 410 °C 保温 900 s;

(c) 330 °C 保温 30 s; (d) 330 °C 保温 900 s

图 7 不同试样 TEM 明场像照片

3 讨论与分析

在 7N65 铝合金中,断裂韧性主要反映材料对裂纹失稳扩展的抵抗能力,包括裂纹的形核和扩展。一般来说,合金中粗大第二相对合金的断裂韧性具有显著影响。由于粗大第二相与基体不共格,在变形过程中与

基体变形不协调而导致应力集中并产生微孔,微孔随着变形增加并不断聚集长大,最终形成裂纹导致断裂发生^[11]。本次所有样品均采用相同的固溶制度,基体中的粗大第二相基本一致。因此,可以认为合金断裂韧性差异主要由等温保温过程中的第二相析出行为引起。

7N65 铝合金进行分级淬火时,由于原子扩散速率和相析出驱动力的相互竞争关系,分级淬火过程中的析出行为各不相同^[12]。通过本文研究发现,410 °C 保温 30 s 时,晶界和晶内很少有大量析出相析出;保温时间延长至 900 s 时,在晶界上析出了大尺寸的 S 相。文献^[10]认为这是由于大角度晶界含有满足非均匀形核的质点,例如非共格的 Al_3Zr 和其他晶内缺陷。文献^[13]认为晶界和亚晶界是位能较高的缺陷,溶质原子优先往晶界(亚晶界)处偏聚。此外新相在此处形核需要突破的能量势垒低,第二相优先在此形核。据此可以判断,高温较短时间保温时,晶界析出相较少,晶内还未析出,合金 UIE 值较高,断裂韧性较好。保温时间增加时,晶界上 S 相增多,裂纹易于在 S 相上产生并沿着晶界扩展,此时裂纹扩展速率较快,表现为材料所需撕裂强度高,而断口呈现沿扁平晶粒断开的脆性断裂方式,此时 UIE 值呈急剧下降趋势,合金断裂韧性变差。

330 °C 低温保温时,主要以 η 相的析出为主。由于合金在此温度下析出速率较快,保温较短时间就有大量 η 相在晶界析出。当保温时间延长至 900 s 时,在晶内也析出了大量 η 相。这些相的析出速率快,消耗了基体中的 Mg 和 Zn 原子,时效析出反应大大减弱,造成了 330 °C 保温时硬度急剧下降。所以在此温度下,保温 30 s 时合金的 UIE 值较低,断裂韧性较差;保温时间延长至 900 s 时,晶内/亚晶粒内部会析出大量 η 相并发生粗化,此时晶界内强度降低,晶界-晶内强度差减小,晶界抵抗变形能力增强,合金基体塑性增加,导致裂纹能够稳定扩展,此时的 UIE 值较高,断裂韧性较好。

4 结 论

1) 7N65 合金的 TTP- UIE 曲线主要分为 4 个区域:高温(370~450 °C)短时(10~200 s)保温区域、高温(370~450 °C)长时(200~900 s)保温区域、低温(250~370 °C)短时(10~200 s)保温区域、低温(250~370 °C)长时(200~900 s)保温区域。高温短时保温区域和低温长时保温区域的 UIE 值较高,合金断裂韧性较好;高温长时保温区域和低温短时保温区域的 UIE 值较低,合金断裂韧性较差。

(下转第 158 页)

- making electrochemical water treatment a reality[J]. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2020,22:9-16.
- [2] Chandrabose G, Dey A, Gaur S, et al. Removal and degradation of mixed dye pollutants by integrated adsorption-photocatalysis technique using 2-D MoS₂/TiO₂ nanocomposite[J]. *Chemosphere*, 2021,279:130467.
- [3] TIAN Y, ZHANG J, WANG W, et al. Facile assembly and excellent elimination behavior of porous BiOBr-g-C₃N₄ heterojunctions for organic pollutants[J]. *Environmental Research*, 2022,209:112889.
- [4] 周晓燕,汤洪波,周健. Ag-AgI/Bi₂WO₆ 光催化剂的制备及其光催化性能[J]. *矿冶工程*, 2022,42(1):152-155.
- [5] CHANG S, ZHANG Q, LU Y, et al. High-efficiency and selective adsorption of organic pollutants by magnetic CoFe₂O₄/graphene oxide adsorbents: Experimental and molecular dynamics simulation study[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020,238:116400.
- [6] YAO Z, SUN H, XIAO S, et al. Synergetic piezo-photocatalytic effect in a Bi₂MoO₆/BiOBr composite for decomposing organic pollutants[J]. *Applied Surface Science*, 2021,560:150037.
- [7] WANG X, XU G, TU Y, et al. BiOBr/PBCD-B-D dual-function catalyst with oxygen vacancies for Acid Orange 7 removal: Evaluation of adsorption-photocatalysis performance and synergy mechanism[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021,411:128456.
- [8] ZHANG R, CAI L, CAI Y, et al. Lamellar insert SnS₂ anchored on BiOBr for enhanced photocatalytic degradation of organic pollutant under visible-light[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021,618:126444.
- [9] HUANG X, XU X, YANG R, et al. Synergetic adsorption and photocatalysis performance of g-C₃N₄/Ce-doped MgAl-LDH in degradation of organic dye under LED visible light[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022,643:128738.
- [10] Kokilavani S, Alaraidh I, Okla M, et al. Efficient photocatalytic degradation of methyl orange and malachite green by Ag₃PO₄ decorated BiOBr nanoflower under visible light: Performance evaluation, mechanism insights and toxicology of the by-products[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022,909:164703.
- [11] JIN Y, ZHANG J, WANG S, et al. Stress modulation on photodegradation of tetracycline by Sn-doped BiOBr[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022,10(3):107675.
- [12] Búrdos E, Múrta V, Baia L, et al. Hydrothermal crystallization of bismuth oxybromide (BiOBr) in the presence of different shape controlling agents[J]. *Applied Surface Science*, 2020,518:146184.
- [13] LI Y, YAO L, YIN Z, et al. Defect-induced abnormal enhanced up-conversion luminescence in BiOBr: Yb³⁺/Er³⁺ ultrathin nanosheets and its influence on visible-NIR light photocatalysis[J]. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 2020,7(2):519-528.
- [14] ZHANG B, HU X, LIU E, et al. Novel S-scheme 2D/2D BiOBr/g-C₃N₄ heterojunctions with enhanced photocatalytic activity[J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2021,42(9):1519-1529.
- [15] 张一兵,黄英. 掺 Fe³⁺ 锐钛型 TiO₂ 的制备及其紫外光照下催化降解苯胺[J]. *矿冶工程*, 2019,39(1):118-121.
- [16] JIANG G, WANG X, WEI Z, et al. Photocatalytic properties of hierarchical structures based on Fe-doped BiOBr hollow microspheres[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013,1(7):2406.
- [17] 胡寒梅,王韬,凌晓慧,等. BiOBr-OV/RGO 复合物的制备及其光催化 CO₂ 还原性能[J]. *无机化学学报*, 2023,39(2):234-244.

引用本文: 葛健宇,陈冬生,李军,等. Fe 掺杂 BiOBr 空心花球光催化剂的制备及其降解刚果红性能研究[J]. *矿冶工程*, 2023,43(5):154-158.

(上接第 153 页)

2) 高温保温较短时间时,合金晶界析出少量 S 相, *UIE* 值较高,断裂韧性较好;随着保温时间延长, S 相数量增加且尺寸增大,裂纹易产生并沿晶界迅速扩展, *UIE* 值减小,断裂韧性降低。

3) 低温保温较短时间时,合金晶界析出大量 η 相, *UIE* 值较低,断裂韧性较差;随着保温时间延长,晶界-晶内强度差减小,变形均匀性提高,合金塑性增加, *UIE* 值增加,断裂韧性提高。

参考文献:

- [1] Dursun T, Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. *Materials in Engineering*, 2014,56:862-871.
- [2] 潘志军,黎文献. 高强铝合金断裂韧性的研究现状及展望[J]. *材料导报*, 2002,16(7):14-17.
- [3] 刘文辉,张新明. 固溶处理对 7A55 铝合金断裂韧性的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2007,38(1):41-45.
- [4] 陈高红,李国爱,陈军洲,等. 轧制组织特征对 7B50-T7751 铝合金厚板断裂韧性的影响[J]. *轻合金加工技术*, 2018,46(6):29-33.
- [5] HAN N M, ZHANG X M, LIU S D, et al. Effect of solution treatment on the strength and fracture toughness of aluminum alloy 7050[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011,509(10):4138-4145.
- [6] LI B, WANG X, CHEN H, et al. Influence of heat treatment on the strength and fracture toughness of 7N01 aluminum alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016,678:160-166.
- [7] Kamp N, Sinclair I, Starink M J. Toughness-strength relations in the overaged 7449 Al-based alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2002,33:1125-1136.
- [8] Fink W L, Willey L A. Quenching of 75S aluminum alloy[J]. *Transactions of American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, 1948,175:414-427.
- [9] ZHANG Y, Milkereit B, Kessler O, et al. Development of continuous cooling precipitation diagrams for aluminium alloys AA7150 and AA7020[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014,584:581-589.
- [10] TANG J G, ZHANG Y, LIU S D, et al. Quench sensitivity of AA7136 alloy: contribution of grain structure and dispersoids[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2019,50(10):4900-4912.
- [11] 林亮华,刘志义,韩向楠. 过时效态 Al-Zn-Mg-Cu 合金断裂韧性与显微组织分析[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2020,51(2):301-308.
- [12] XIE P, CHEN K, CHEN S, et al. Study on quenching sensitivity of 7097 aluminum alloy[J]. *Materials Research Express*, 2019,7(1):1-14.
- [13] Minoda T, Yoshida H. Effect of grain boundary characteristics on intergranular corrosion resistance of 6061 aluminium alloy extrusion[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2002,33(9):2891-2898.

引用本文: 林立健,张勇,郑许,等. 分级淬火对 7N65 铝合金微观组织和断裂韧性的影响[J]. *矿冶工程*, 2023,43(5):149-153.