

航空航天铝 超塑性文集

[美] Roger Pearce 编
Larry Kelly

31542702

航空工业出版社

(京)新登字161号

内 容 摘 要

本书是1985年“航空航天铝超塑性”国际会议论文的汇集,表述了当代世界超塑铝合金研究与应用的水平。内容包括“空穴”、“合金”和“设计与制造”三部分,着重介绍了超塑铝合金空穴现象的成因、影响及其控制方法;多国多种超塑铝合金超塑行为的研究;航空航天超塑铝合金零件的设计与制造;等等。资料翔实,数据丰富,理论价值与实用价值兼备。

本书可供广大科研管理干部和工程技术人员参考,特别是对从事航空航天产品的设计、研究、制造的企业、集团、科研院所、高等院校的人员,以及有色冶金行业和超塑铝合金的民用部门有重要的参考价值。

航 空 航 天 铝 超 塑 性 文 集

Roger Pearce
[英] Larry Kelly 编

孙荣科 朗素芳 陈亚莉 等译

尔 冬 理 实 校
何 恽 晋 刘 树 桓 审

航空工业出版社出版发行

(北京市和平里小关东里14号)

—邮政编码: 100029—

全国各地新华书店经售

北京通县向阳印刷厂印刷

1992年6月第1版

1992年6月第1次印刷

开本: 850×1168毫米1/32 印张: 12.0625

印数: 1-1000

字数: 310 千字

ISBN 7-80046-437-7/V·106

定价: 10.00 元

应当重视铝合金超塑性及其成形 工艺的研究（代序）

航空航天工业部科学技术研究院 刘树桓

国外大力研究铝合金超塑性及其成形工艺的形势，引起了国内航空航天和有色冶金部门的重视，正在积极探索并开展研究工作。在这种情况下，《航空航天铝超塑性文集》一书的问世，无疑会受到航空航天行业，有色冶金行业及从事钣金技术的同行们的欢迎。

70年代初，美、英等国开始对钛合金超塑成形工艺进行研究。该工艺在成形飞行器复杂钣金件和减重、降低成本方面，显示了巨大的优越性，目前已进入实用生产阶段。

近几年，人们发现了铝合金亦具有超塑性，各国竞相研究。美国用7475铝合金超塑成形T-39前机身隔框获得成功。英国用8090铝锂合金超塑成形工艺制成EAP战斗机起落架舱门，并已装机试飞。目前，我国也开始进行探索性试验，但要实用还要做大量工作。

可以断言，不久，铝合金超塑成形工艺定会广泛应用于航空航天工业，并将显示出巨大的技术经济效益。

一、铝合金超塑成形工艺具有钛合金超塑成形工艺的优点，既可成形复杂钣金件、零件，又可减重、降低成本。如美国B-1B轰炸机用铝合金超塑成形工艺制成的襟翼翼肋代替原来的机械加工整体翼肋，重量减轻近15%，成本降低50%以上；又如该轰炸机机身构架，用铝合金超塑成形件代替原来的机加铆装件，重量

减轻13%，成本亦降低50%以上，零件数由15件减为3件，连接件数由212个减为45个，技术经济效益非常显著。

二、据统计，铝合金在飞机上的用量，国外无论是军机或民机都占第一位，如表所示，其中民机高达80%左右。国产飞机铝合金用量，军机或民机都高于国外飞机用量比例。

钣金零件一般占飞机机体零件50%左右，大约3~5万件，其中80%是铝合金的。因此，采用超塑成形工艺的铝合金零件是量大面广，对飞机制造业具有明显的技术经济效益。

国外飞机材料用量比例统计

型 号	铝合金%	合金钢%	钛合金%	复合材料%	其它
波音-767	81.0	14.0	2.0	3.0	0
A310	76.5	13.5	4.5	5.5	0
F-16	78.0	5.0	2.0	4.0	11
B-1B	42.0	11.0	17.0	2.0	28

三、铝合金超塑成形温度为450℃左右，仅相当于钛合金超塑成形温度(925℃)的1/2。因此，对模具材料、成形设备的要求，没有钛合金超塑成形要求那样耐高温，有利于推广应用。

四、具有超塑性的铝锂合金是一种新型铝合金，在飞机结构的应用中，具有远大的发展前途。它的减重效果和复合材料结构相当，而其成本仅是复合材料结构的1/6。专家们估计，到2000年，在飞机上复合材料用量最多可占25%，而铝锂合金可能占机体材料的33%。

五、铝合金超塑成形工艺不仅可用于航空航天工业，亦可广泛用于电子、医疗、汽车工业，有广阔的发展前途。如 **Salter** 工业计量公司利用此项技术制造工业台秤的铝合金外壳；**Vickers** 医疗设备公司制造婴儿保温箱铝外壳；还有用作制造汽

车壁板等。

综上所述，铝合金超塑成形工艺不仅可减轻飞行器结构重量，提高性能，而且大大降低成本，对成形模具材料及设备要求也不高，可军工民品两用，是宜于推广的应用量大面广的新工艺技术。

本书包括“空穴”、“合金”和“设计与制造”三部分，内容翔实，数据丰富，理论性和实用性兼备。相信，由于目前国内有关铝合金超塑性的书奇缺，它一定会对铝合金超塑性及其成形工艺的探索、研究与应用具有重要的参考价值。

1991年9月

目 录

应当重视铝合金超塑性及其成形工艺的研究(代序) (I)

第一部分 空穴

7475超塑铝合金机身结构空穴化现象成因、影响以及
控制 (3)

超塑性变形对工业生产Supral合金成形后力学性能
的影响 (33)

降低高强度铝合金超塑性空穴量的工艺方法 (50)

工业铝合金 7475 超塑性成形中成形工艺变量对空穴
形成的影响 (59)

合金成分、形变热处理工艺以及成形条件对粉末冶金
和铸锭冶金的铝锂合金超塑性的影响 (85)

应变速率和晶粒尺寸对Supral 220铝合金中空穴形成
的影响 (104)

静液压力在 Supral 220 超塑性变形过程中对空穴的
影响..... (112)

Supral 150成形后空穴的热等静压闭合 (120)

7075铝合金的超塑性 (133)

第二部分 合金

Al-Ca-Zn 合金超塑性的研究 (143)

工艺参数对Al-Li-Cu-Mg-Zr合金超塑性行为的影响 ... (153)

航空航天铝合金的超塑性和超延伸性 (168)

铝合金板材超塑性与 γ 值间的相互关系 (184)

扩散连接铝合金的剪切强度及剥离强度 (218)

航空结构用超塑性铝合金的连接 (239)

第三部分 设计与制造

机体结构用铝合金超塑性的形成和超塑成形后的机

械性能 (249)

超塑性7475铝合金的工业化生产 (274)

KS7475-Kobe Steel公司的新型超塑性铝合金 (295)

超塑成形高强度铝航空航天零件设计与制造工艺的

发展..... (310)

铝合金超塑成形辅助工艺 (327)

军用飞机超塑成形铝零件的设计与制造 (338)

工业用超塑性铝合金的机遇与挑战 (352)

结构铝超塑成形的能力与限制 (372)

第 一 部 分

空 穴

7475超塑铝合金机身结构空穴化 现象成因、影响以及控制

C. C. Bampton A. K. Ghosh
M. W. Mahoney

摘 要

细晶粒7475铝合金, 作为最有吸引力的用于机身主要结构超塑成形的高强度铝合金中的一种, 已崭露头角。与其他所有超塑结构铝合金相同, 晶间空穴化现象在这种合金的超塑变形过程中会出现。由于对7475超塑铝合金机身结构的巨大影响, 在过去的四年中, 已对空穴化问题进行了充分的研究。本文为目前对7475超塑铝合金空穴的成因、影响以及控制的综述, 重点放在产品零件的有效质量保证上。

前 言

晶间空穴化是超塑变形的结果, 在许多合金中都会产生(虽然不是所有合金)^[1~23], 对超塑变形有很少(甚至设有)促进的硬相, 看来是引起合金超塑空穴化的共同因素。

在超塑铝合金的情况下, 这种硬相事实上是不可避免的, 它以含铁及硅的金属间化合物形式出现, 即通常认为杂质构成的粒子。其他有意加入的合金成分, 如锆、铬和铜也可能在某些超塑

铝合金中形成硬金属间化合物粒子。

这里要提到的是一个最近开发的7475高强度铝-锌-镁-铜-铬^[24]超塑性合金的例子。

这种合金之所以被重视，是由于它在主要飞机结构上首次广泛应用超塑成形铝合金零件中处于优先的地位，另外还由于它有形成超塑性空穴倾向的潜在有害影响。7475铝合金以传统的半成品形式，在美国飞机工业中，作为一种标准的高强度、高韧性合金有着广泛用途，因此它的超塑半成品形式引起人们很大的兴趣，空穴问题从而受到日益广泛的研究^[25~28]。本文的重点放在问题的实际方面，以及这些方面与高价格、高重量效益的结构零件开发技术的关系。

试验观测

超塑性加工条件

细晶粒7475铝合金晶间空穴的形成及生长^[25,29]对温度、应变速率以及在超塑性变形中产生的累积变形敏感。一般说，对于给定温度、应变速率，空穴随应变发展见图1。它包括一个零空穴的潜伏期，或产生非常少空穴，然后跟着是一个空穴快速发展的阶段。提高温度(合金的初始熔化温度极限升高)可使潜伏期的应变范围变大，并使第二阶段的空穴形成率降低。

虽然通常提高应变速率可缩短潜伏期，并且对于给定应变量，可增大单位体积内空穴总数，但应变速率对空穴的影响看起来仍十分复杂。图2所示为应变速率的影响图。从图中可以看出，在较高的应变速率下，给定应变的空穴数量较多；但在较慢的应变速率下，空穴尺寸较大。细晶粒7475铝合金中的空穴化率^[25]各炉之间有很大的变化，其中包括应变速率对空穴化的影响。

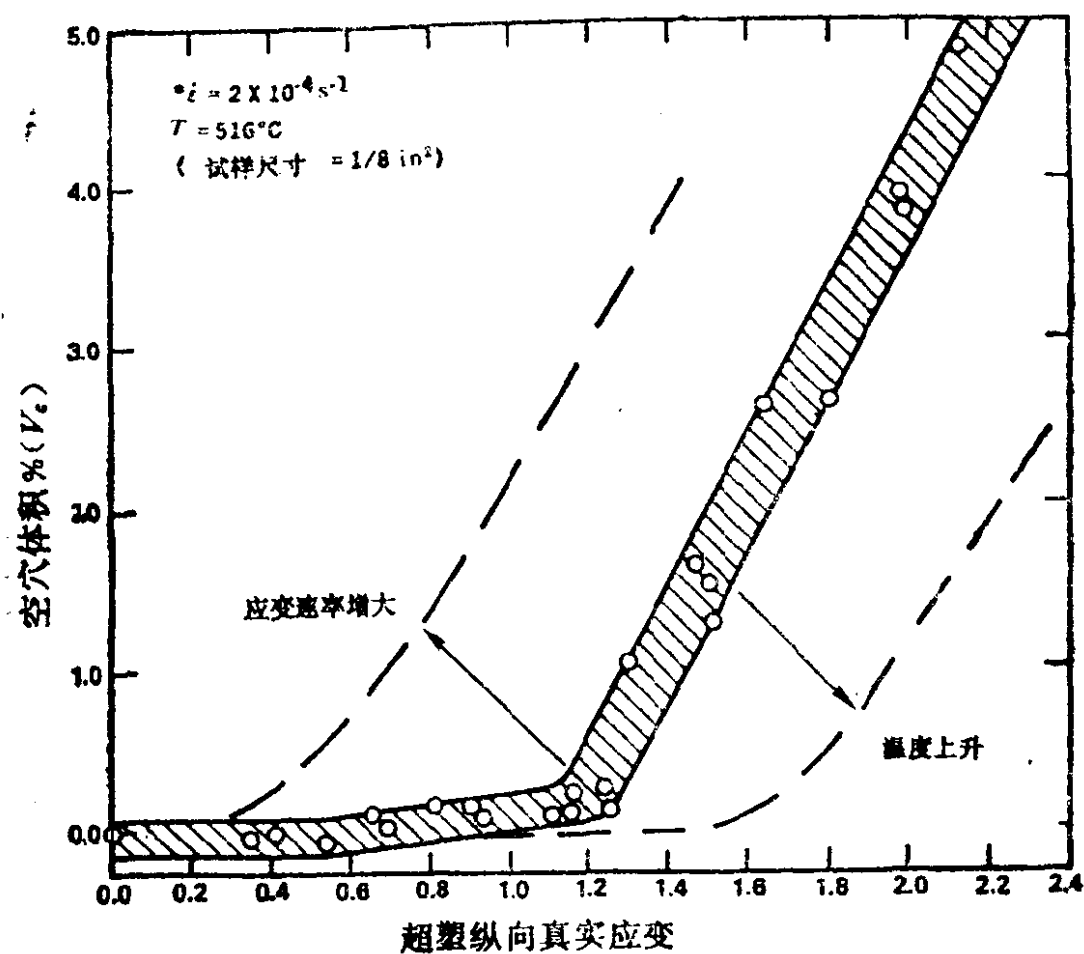


图1 细晶粒7475铝超塑变形中空穴的发展

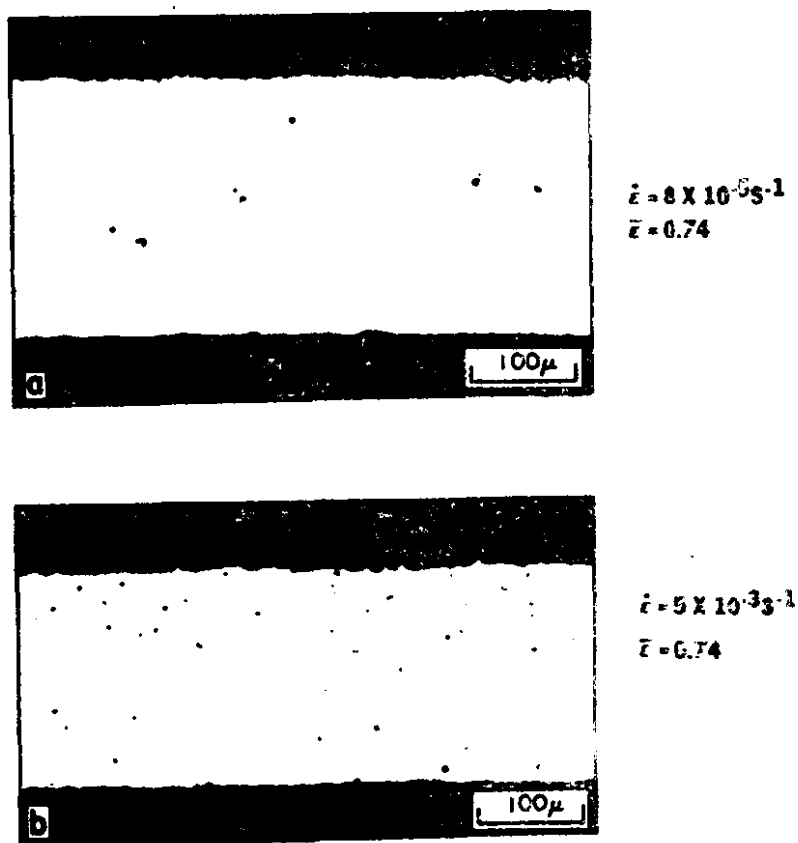


图2 7475超塑性拉伸试样的截面显微照片，
 示出变形对空穴的产生以及生长的影响

尽管超塑成形工艺通常的目标是在加工过程中获得恒定温度下的真实的应变速率，在后面的讨论中，我们将看到在合金显微组织的内部也会发生明显的动态变化，从而与简单的、静态的条件有很大不同。

显微组织

直接影响着细晶粒7475铝的空穴化的显微组织的特征有：平均晶粒尺寸、晶粒尺寸分布、晶粒形状、单位体积内各组元粒子的密度、各组元粒子的尺寸以及各组元粒子化学组成和晶体结构。虽然在超塑性变形过程当中，弥散粒子($Al_{12}Mg_2Cr$ 金属互化物)对于动态晶粒生长的控制的影响对于空穴具有间接影响，但它们尺寸太小($0.02 \sim 0.5 \mu m^{[25]}$)，对于空穴不产生直接影响，这在后面还要讨论到。图3所示为7475铝合金中空穴发展的两种特性。首先，在板材内部空穴萌生的分布是相当不均匀的。

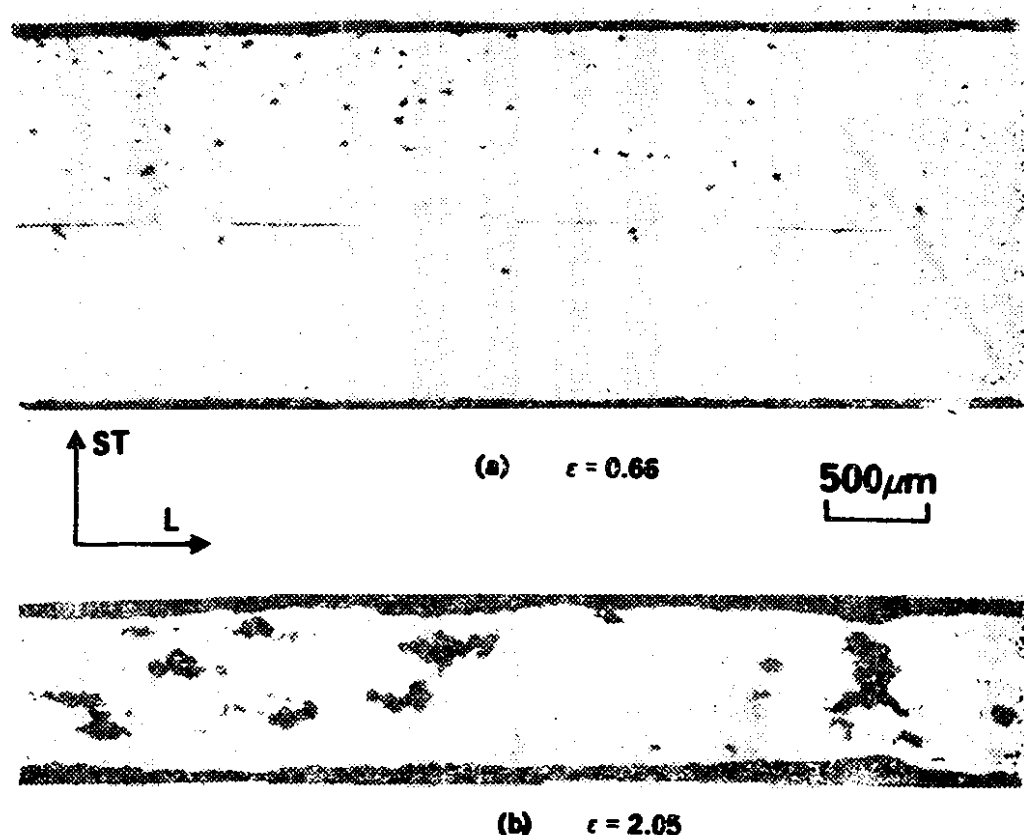


图3 细晶粒7475铝的截面，示出空穴随超塑性单轴向拉伸变形的发展

第二，虽然空穴的萌生看上去与第一阶段空穴的发展所产生的变形有关，但看不出有连续的关联。这是由于在空穴化的第二阶段具有单位体积空穴快速生长和相互连结的趋势。

各组元粒子

将空穴的产生与各组元之间建立关系的尝试^[25]表明，通常只有一小部分甚至是最大尺寸的组元粒子与空穴的形成有关，7475铝合金由一系列复杂的相和复杂形状的组元粒子组成。最普通的组元粒子，通常包括最大尺寸的粒子，是呈不规则状的单相金属间化合物，它具有平滑的圆轮廓。图4所示为一个例子，它也表明空穴附着在粒子的一端。图4为一个普通的观察结果，表

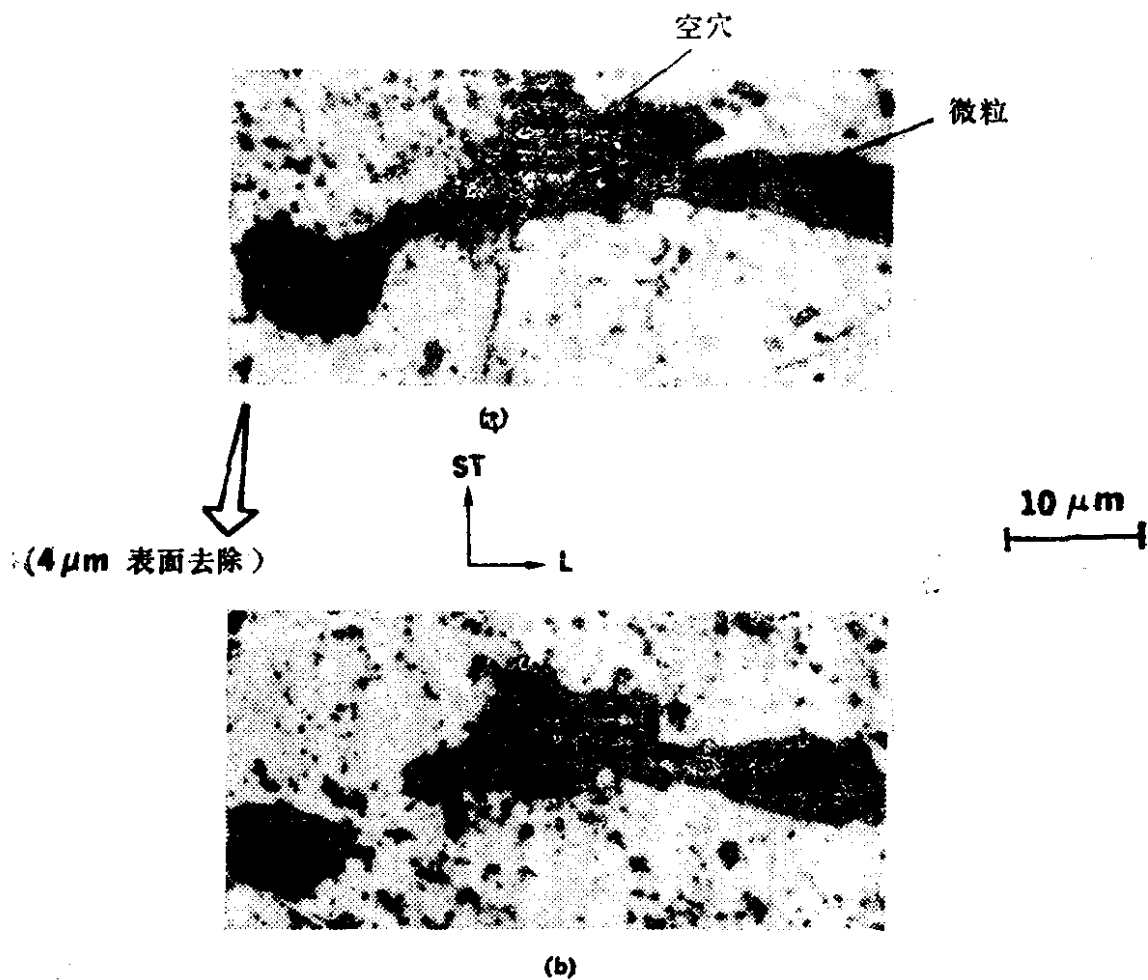


图4 细晶粒7475铝超塑性单轴向拉伸变形之后的截面，示出空穴情况

明空穴与这些大的、单相组元粒子有关，空穴的产生沿着基体晶界生长而不是沿着粒子/基体界面生长。这表明这种形式的粒子/基体界面在超塑性变形过程中不是一个薄弱点。

关于空穴形成及生长(低应变)^[25]的早期阶段的详细观测并未能直接证明一种说法，即空穴的生长源于早先存在的缺陷，如开裂的组元粒子。然而，如图5所示，在多相组元粒子中萌生空穴却得到了强有力的证明。显微分析^[25]表明，大的单相组元粒子是一个 Al-Cu-Fe 金属间化合物和一个 Al-Fe-Si 金属间化合物。有人指出^[25]，这些两相组元粒子是由 Al-Cu-Fe 固相与一种液相发生不完全包晶反应而形成的 Al-Fe-Si 金属间化合物，

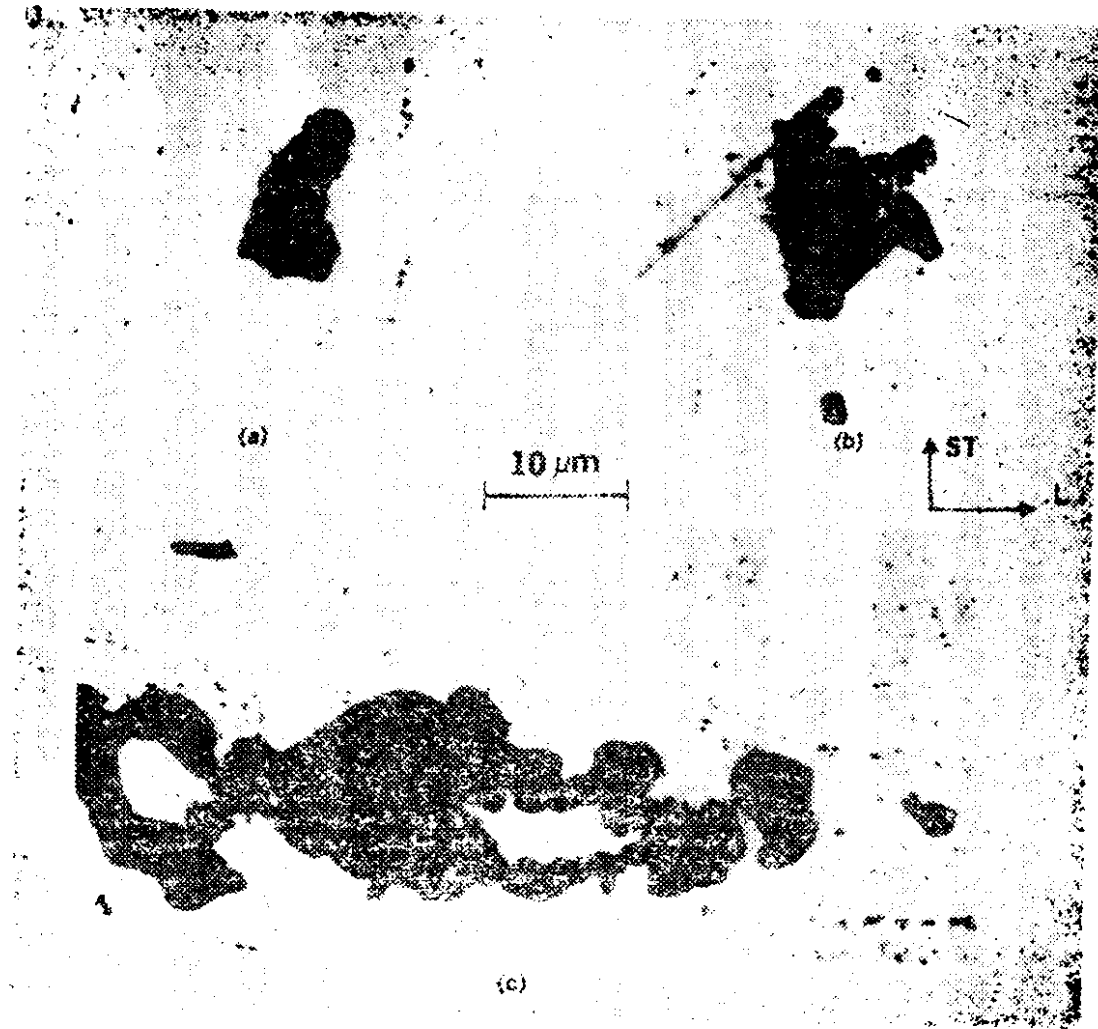


图5 细晶粒7475铝超塑性拉伸变形之后的截面，
示出小的空穴与两相杂质有关

这种反应发生在锭凝固以及均匀化时。这一反应的包晶温度为 534°C [31]，但是不平衡的质点析出使局部初熔温度远比这个温度低。

除氢

在细晶粒7475铝合金中，观查到表面气泡以及内部松孔 [25]，它与超塑成形中的空穴性质截然不同。7475铝板在多种环境中，如惰性液态盐、真空、干燥氩气、潮湿氩气以及实验室空气中的控制加热试验表明：

(a)在高温下(约 500°C)暴露一小时，或更长时间，可除去在早先加工过程中(主要是在结晶阶段)所吸收的氢气，氢气被去除这一点表现为内部的球形气孔的生长或表面气泡的形成。见图6。

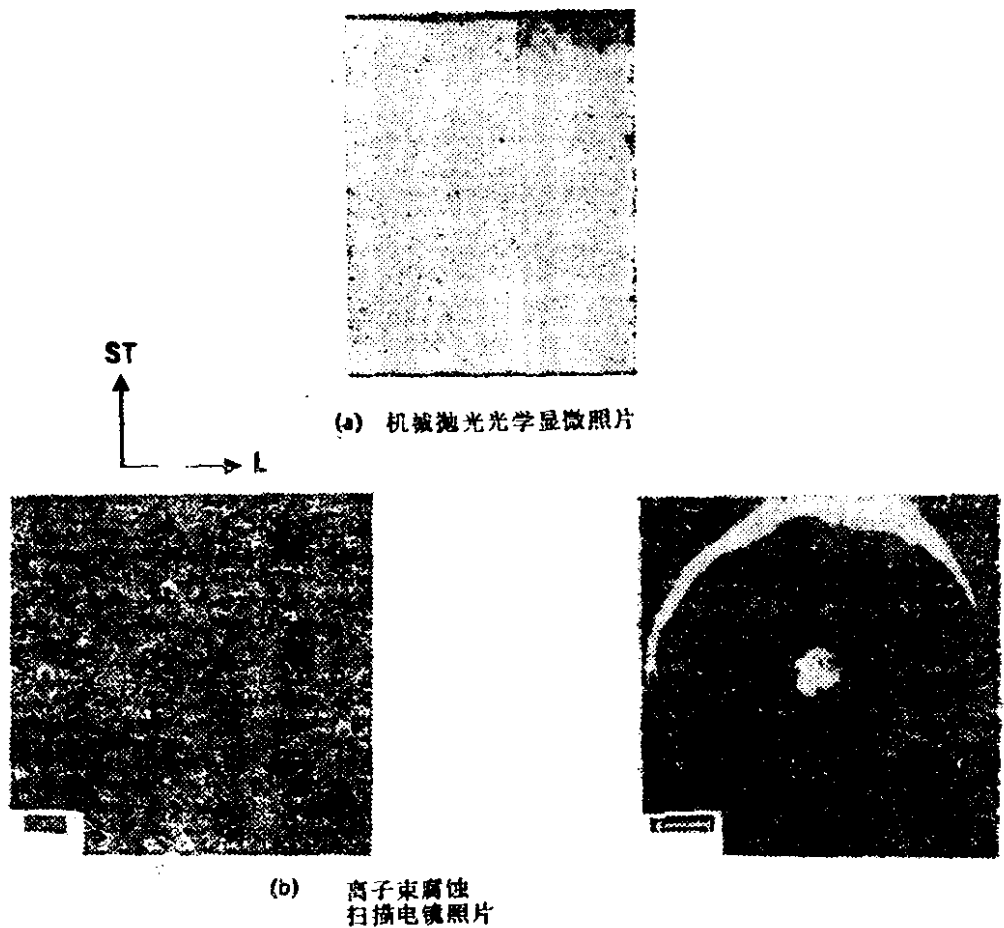


图6 在 516°C 熔盐中经200分钟的细晶粒7475铝的截面

(b)在高温下持续地暴露,如氢气可持续地从板表面上逸出时,可使内部气孔收缩。

(c)在板表面有大量氢的环境中,在高温下持续暴露,可导致内部气孔及表面气泡的持续生长。

(d)内部气孔的分布与前面讨论的超塑性空穴化的分布有定性的关系。另外,还出现了内部气孔优先在上述的两相粒子处形成。

晶粒尺寸

晶粒尺寸对于空穴化率有着直接的影响,这可认为是由以下原因引起的:(a)晶界滑移对总体变形的贡献。(b)流变应力/应变速率之间的关系。愈细的晶粒尺寸,由晶界滑移产生的变形量愈大,从而更易产生空穴化。然而,同时对于给定的应变速率,降低晶粒尺寸则使流变应力降低^[32],见图7。无论空穴初始形成及发展的详细机理是什么,有一点是明确的,即拉应力对其有强烈影响。通常,增大晶粒尺寸可导致空穴的增多^[32],这在具有不同初始晶粒尺寸的材料内得到很清楚的证明,见图8。同时,这在超塑变形过程中动态晶粒生长大的材料中也得到证明。有人认为^[33],动态晶粒生长强烈地依赖于初始弥散粒子的尺寸、所占空间以及分布的均匀程度和在超塑变形过程中这些参数的变化情况。图9所示为在大量的单向拉伸变形之后,弥散粒子的粗化和聚集。图10所示为在几种不同的应变速率下产生的加工硬化,这种硬化可归咎于动态晶粒生长。有人提出了一个模型^[34],它定量地解释粒子尺寸不断变小时由于加工硬化所导致的拉应力增大、空穴成核以及生长与加工硬化引起的拉应力增大的关系。图11所示为7475铝中动态晶粒生长的例子。