● 特种铸造 Special Casting ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.11.014

EPS 模型铝合金拉伸试样的力学性能研究

王新节
(浙江大学 城市学院 杭州市先进设计与制造技术重点实验室,杭州 310015)

摘　要:采用自制蒸缸发泡成形连体式拉伸试样和空心直浇道的 EPS 模型,制备了 ZL101A 拉伸试样。对试样的力学性能、空序曲线、微应变云图、断口形貌和能谱进行了测试,对其相关性进行了分析和探讨。结果表明,径向表层 5 mm 内平均硬度 62.63 HV_{50},抗拉强度 121.0 MPa,弹性模量 38 325.0 MPa,泊松比 0.41,断后伸长率 1.93%。断口呈脆性断裂小缺口和塑性韧窝断裂两种形貌,脆性断裂区贫 Al、Si,富 C、O 和 N,韧性断口 Al、Si 含量接近 ZL101A 合金。

关键词:消失模;铝合金;力学性能;微应变;空序曲线

中图分类号: TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)11-1061-04

Study on Mechanical Properties of Tensile Specimens of Aluminum Alloy with EPS Pattern

WANG Xinjie
(Key Laboratory for Hangzhou Advanced Design & Manufacturing Technology, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, China)

Abstract: ZL101A tensile specimen was prepared by means of EPS model and EPS model of hollow straight runner. The mechanical properties, empty overture, microstrain nephogram, fracture morphology and energy spectrum of the samples were tested, and their correlation was analyzed and discussed. The results show that average hardness of radial surface layer within 5 mm is 62.63 HV_{50}, tensile strength is 121.0 MPa, elastic modulus is 38 325.0 MPa, Poisson's ratio is 0.41, elongation after fracture is 1.93%. The fracture is characterized by small brittle fracture gap and plastic dimpling fracture. The brittle fracture zone is poor in Al and Si, rich in C, O and N, and the contents of Al and Si in the ductile fracture zone are close to those of ZL101A alloy.

Key words: EPS pattern; aluminium alloy; mechanical properties; micro-strain; space sequence curve

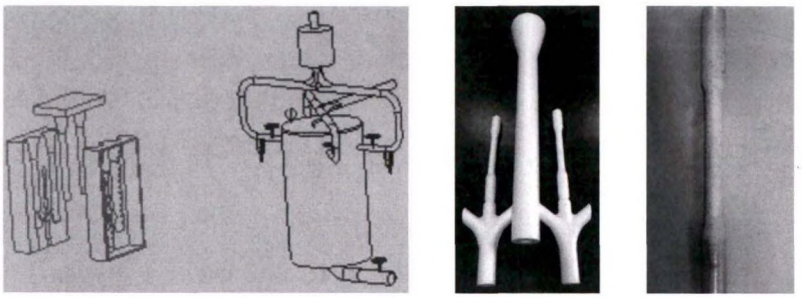
消失模铸件的力学性能测试,常采用拉伸试样 EPS 模型独立浇注凝固后机械加工成形、附铸拉伸试样 EPS 模型后机械加工成形和直接采用直浇道进行机械加工成形这 3 种方式来获得符合 GB/T 228-2002 要求的拉伸试样测试试件[1]。方式一的优点是独立浇注的试件内部组织致密且表面质量好,但不能反映消失模铸件的内在质量;方式二的优点是能够反映铸件的内在质量,但模型簇的胶合组装工序繁杂,且易与铸件模型分离;方式三的优点是省去了拉伸试样 EPS 模型的发泡成形工序,但其内部组织缺陷多,难以反映消失模铸件内在质量。

消失模工艺所使用的直浇道 EPS 模型,常采用 EPS 泡沫板切割成方形直浇道模型或采用消失模模具发泡形成实心,并带有一定锥度曲面的 EPS 直浇道模样。前者成本低廉,但方形直浇道易产生紊流,铸件内部易残留气孔和夹杂缺陷;后者的锥形曲面直浇道充型平稳,但原材料消耗和发气量均较大,对环境影响较大[2]。

1　试验方法及材料

针对现有技术存在的问题,采用 EPS 预发泡聚苯乙烯珠粒充填消失模模具,放置在自制蒸缸内发泡成形拉伸试样与空心直浇道的连体式泡沫模型,如图 1 所示。其中图 1 (a)图的左侧是消失模模具分解图,图 1(a)的右侧是自制蒸缸布局图[3],图 1(b)图是连体式 EPS 拉伸试样与空心直浇道泡沫模型。按照消失模工艺流程,将消失模产品模型与连体式浇注系统组成模型簇造型,浇注 ZL101A 凝固成形试件[4]。按照 GB/T 228-2002 进行室温拉伸试样的机加工,并对其测量区作涂敷散斑处理,在 ZL101A 试件

收稿日期:2020-07-31
基金项目:杭州市先进设计与制造技术重点实验室资助项目(204000590502)
作者简介:王新节(1966-),浙江杭州人,教授.研究方向:铸造工程材料与铸件成形技术.电话:15867132122,E-mail:wangxinjie@zucc.edu.cn



(a)消失模模具及其发泡成形的蒸缸　(b)泡沫模型　(c)ZL101A 试件

图 1 聚苯乙烯拉伸试样的发泡成形工艺流程和连体式空心直浇道泡沫模型

Fig.1 Forming process of EPS tensile sample pattern, EPS pattern of tensile test sample and hollow down sprue, cast tensile test sample

表面有效测量区域喷涂哑光漆制得白色基底上分布着大小不均的黑色斑点[5],如图 1(c)所示。分别对 ZL101A 试件进行力学性能的测试、断口形貌 SEM 观察和能谱分析,并进行拉伸性能和硬度测试。

2 结果分析

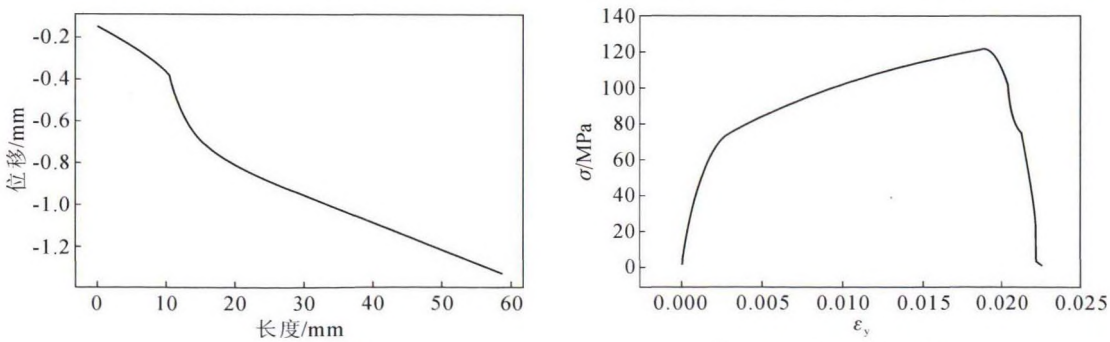
2.1 拉伸性能

采用 MTS 拉伸机进行 ZL101A 试件的拉伸试验,拉伸速率为 0.035 mm/s。采用 PMLAB DIC-3D 准静态版三维应变光学测量系统进行图像数据的采集。PMLAB DIC-3D 测量系统的采集帧率为 3 HZ,共采集 144 帧图像。相关计算的参数设置网格间距 7 个像素点，步长 29 个像素点，边界有效性 60%。拉伸机从 0.378 s 开始记录,约 0.33 秒间隔抽取 3 个，将拉伸机数据与 DIC-3D 测量系统数据保持同步。经系统标定、三维散斑相关法计算和分析后可得到位移场。以这些点的数据绘制出空序曲线,见图 2(a)所示。可以看出空序曲线有一段斜率较大,出现滑移,此段即位于试件断裂位置附近,说明断裂处附近位移变化急剧,此处应变很大。拉伸力达到最大值 9186 N 时,对应时间为 38.815 s。至 45 s,拉伸力跌落为 0。其应力应变曲线见图 2(b)所示,该曲线具有明显的线弹性、弹性、均匀塑性变形和韧性断裂四个对应的阶段,且线弹性、弹性和韧性断裂微应变的区间均较小,ε_y<0.002 5，均匀塑性变形微应变区间宽度较大,ε_y>0.017 5。其抗拉强度 121.0 MPa,弹性模量 38.325 GPa,泊松比 0.41,断后伸长率 1.93%。试件断裂处偏向上夹持端约 1/5 长度处,对应的图像帧为阶段 137，计算区域最下端处位移值为 1.316 mm。

图 3 分别对应阶段 20、79、130 和 137 的微应变。对照 DIC-3D 微应变计算云图,找到明显有局部应力集中亦即试件断裂处的那一帧图像，认为此图像所对应的时间即为拉伸机拉力数据最大的那一时刻，该时刻的微应变也同时达到最大值 97 809.255,见图 3(d)所示的红褐色条带区域,该区域就是应力集中区，其对应的应力达到了最大抗拉强度 121.0 MPa,见图 3(b)所示。应力集中区附近的两边天蓝色过渡区微应变亦达到 40 314.276，远离应力集中区的试件夹持端处深蓝色区域微应变也高达 1 984.292。

阶段 20 微应变图像显示试件整体沿轴向和径向的微应变分布是不均匀的。其中下夹持端附近的微应变最小,最小值为 273.483。上夹持端附近的微应变明显高于下夹持端附近区域，而且其微应变影响区大于下夹持端。试件中间段区域,尤其是中间段偏上区域的微应变最大,最大值为 2 474.958。该阶段试件的微应变极限差值为 2 201.475。

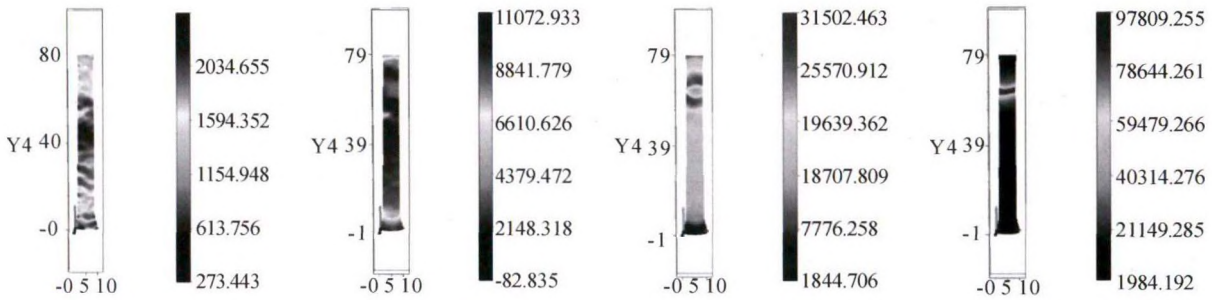
阶段 79 微应变图像显示试件整体沿轴向和径向的微应变分布是较为均匀的，只是试件上下夹持



(a)空序曲线　(b)应力应变曲线

图 2 空序曲线和应力应变曲线

Fig.2 Null overtures and stress-strain curves



(a)阶段20　(b)阶段79　(c)阶段130　(d)阶段137

图 3 Y 向应变场云图

Fig.3 Y strain field cloud map

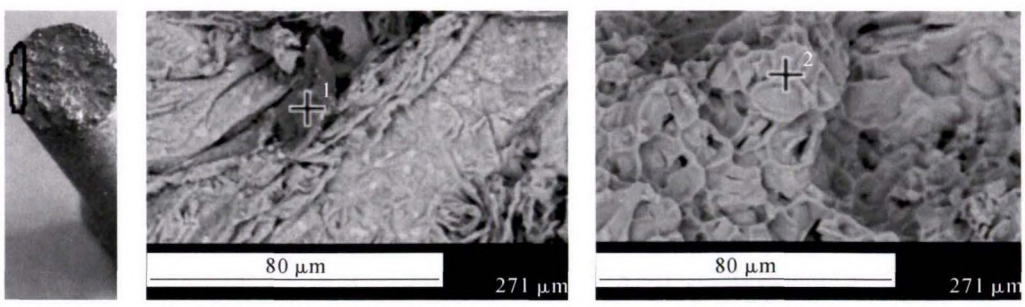
端相对于试件中间主体的微应变数字较小(但仍均大于阶段 20 所对应的微应变),其中下夹持端附近的微应变最小,最小值约 1 748.318。上夹持端附近的微应变仍高于下夹持端附近区域,表明只是上夹持端的微应变影响区缩小了。试件中间段区域的微应变较夹持端而言总体微应变较高,最大值为 11 072.933。值得注意的是中间段偏上出现了三处微应变弱不均匀现象。该阶段试件的微应变极限差值为 9 324.615。

阶段 130 微应变图像显示试件整体沿轴向和径向的微应变分布的均匀性进一步加强,该阶段的整体性应力应变对应关系同图 3(b)所示,与均匀塑性变形阶段是相一致的。试件上下夹持端相对于试件中间主体的微应变数字依然较小(但仍均大于阶段 20 和阶段 79 所对应的微应变),下夹持端附近的微应变最小,最小值约 1 844.706。上夹持端附近的微应变仍高于下夹持端附近区域,只是上夹持端的微应变影响区进一步缩小了。试件中间段区域的微应相较夹持端而言总体微应变较高,最大值为 31 502.463。值得注意的是在阶段 79 出现的中间段偏上的三处微应变弱不均匀区域进一步集聚,并分化成两个局部呈扇形的极近对称镜像的微应变集中区,其中间包裹了一个球形弱应变集中区,且球形弱应变集中区的左端微应变较高,联系到阶段 137 微应变图像中的带状微应变高度集中区的成形,该球形弱应变集中区的左端可能就是应力源,并由此扩展开来导致试件的最后断裂。该阶段试件的微应变极限差值为 29 657.757。

阶段 137 微应变图像显示试件整体除去应变高度集中区及其附近过渡区域之外所有区域的微应变(包括夹持端)沿轴向和径向的微应变分布是高度一致的,该阶段的整体性应力应变对应关系同图 3(b)所示的均匀塑性变形阶段也是相一致的。都同步达到了 1 984.292。应变高度集中区的最大值为 97 809.255,该局部的应力与应变的对应关系同图 3(b)所示的塑性断裂阶段是相一致的。该阶段试件的微应变极限差值为 95 814.963。

2.2 断口分析

图 4 为 ZL101A 拉伸试样的断口形貌。宏观看,断口上有表面氧化和二次脆性断裂小缺口(黑实线圈出部分,如图 4(a)所示),其余部分断面为韧性断裂特征的金属光泽。采用 PHENOM 扫描电镜进行观测得到图 4(b)的微观形貌、图 4(a)和表 1 的能谱组元组成。其微观形貌具有树枝晶结构特征,这些枝晶无规则地分布在严重氧化的基体表层。结合其能谱组元的组成推测该小断口面上基体元素 Al 和合金元素 Si 含量少,组元 C、O、N 的含量偏高,且各个位置点所含的质量分数不同,构成了不同形式的氧化夹杂形貌。该断口属于非正常的金相组织结构,可能是拉伸试验之前试件表层就已经存在的微裂纹,



(a)断裂面　(b)裂纹源脆性断裂面形貌特征　(c)韧性断裂韧窝形貌特征

图 4 拉伸断口 SEM 形貌

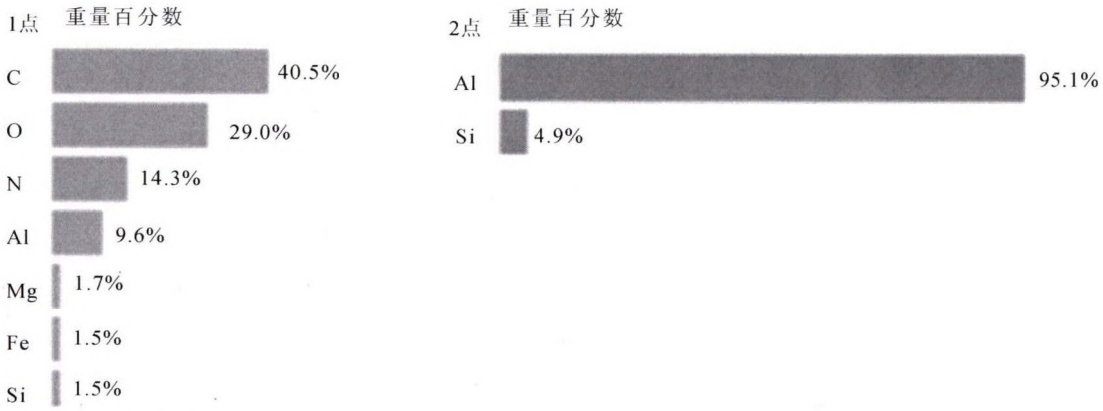
Fig.4 SEM imagesof tensile fracture morphology

该微裂纹可能是 EPS 模型发泡成形时表层珠粒的融合缺陷导致疏松结构，浸涂工序渗进了消失模涂料，在浇注 ZL101A 合金溶液时产生了冷隔缺陷，消失模模型气化燃烧产生的碳也会吸附在该部位，导致碳组元的含量较高。

采用 PHENOM 扫描电镜对图 4(a)的韧性断口进行观测得到图 4(c)的微观形貌、图 5(b)和表 2 的能谱组元组成。其微观形貌呈现出结构相似的韧窝结构，说明试件具有良好的塑性。结合各个位置点的能谱组元组成分析数据，一方面可以看到它们的基体元素 Al 和合金元素 Si 含量均较为接近 ZL101A 的成分，其余组元 O、C、Fe 的分布较为分散。

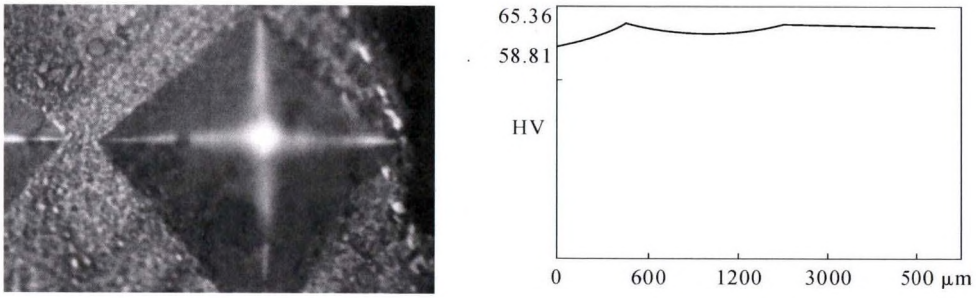
2.3 维氏硬度测试和分析

采用 HV-1000 型维氏硬度计，试验力 50 N，力保持时间 10 s，试验次数 8。其硬度分布表明材料的硬度比较均匀，基本 HV_{50}58.81~65.36。



(a)裂纹源断裂处能谱分析　　(b)韧窝断裂处能谱分析

图 5 裂纹源与韧窝处能谱分析结果
Fig.5 Results of EDS spectrum analysis of crack source and dimple



(a)维氏硬度计压痕对角线　　(b)表层径向硬度分布曲线

图 6 维氏硬度压痕及硬度分布曲线
Fig.6 Vickers hardness indentation and hardness distribution curve

3 结论

(1)采用连体式空心直浇道与拉伸试样 EPS 模型进行消失模模型簇的组装和造型浇注，可以优化铸造工艺和提高铸件力学性能检测分析的效率；

(2)ZL101A 消失模试件的应力应变曲线由线弹性、弹性、均匀塑性变形和塑性断裂四个阶段组成，其中线弹性、弹性和塑性断裂阶段的应变区间均较小，而均匀塑性变形阶段的应变区间很大，ZL101A 消失模铸件具有良好的韧性；ZL101A 消失模试件弹性变形阶段出现的整体性微应变分布不均匀现象可能与其内部组织中的组元组成及其各自所占的质量分数相关。

参考文献：

[1] 中国标准出版社第三编辑室，全国铸造标准化技术委员会. 铸造标准汇编(中)[M]. 北京：中国标准出版社，2011.
[2] 上海实型铸造小组. 实型铸造[M]. 上海：上海人民出版社，1974.
[3] 刘鸿文. 材料力学 I [M]. 北京：高等教育出版社，2014.
[4] Catrin. Kammer. Aluminium Handbook [M]. Chemical Industry Press，2008.
[5] 张红颖，陈展，王韶彬，等. 三维散斑相关法在机翼变形动态测量中的应用[J]. 测控技术，2016，35(7)：31 - 34.