

# 氢含量对 7075 铝合金组织和性能的影响

张延荣, 史明, 厉英, 陈长科

(东北大学冶金学院, 辽宁沈阳 110022)

**摘要:** 采用井式电阻炉熔炼7075合金, 制备不同氢含量的铝合金试样, 研究了不同氢含量对7075合金组织和性能的影响。结果表明: 随着铝熔体中氢含量的增加, 导致熔体在凝固过程中形成气孔, 产生大量的疏松和孔洞。随着氢含量从0.188 mL/100 g升到0.345 mL/100 g, 7075合金抗拉强度、屈服强度、伸长率和硬度分别降低了23.7%、24.7%、33.1%和22.5%。

**关键词:** 7075铝合金; 氢含量; 气孔; 力学性能

随着航天航空和工业的发展, 对铝合金制品性能的要求越来越高<sup>[1]</sup>。7075铝合金因其具有密度小、强度高、加工性能好及焊接性优良等优点, 已被广泛应用于航空和民用工业等领域<sup>[2]</sup>。提高铝铸件的质量, 其关键技术是保证在生产过程中能够提供优质的铝液。然而大量研究表明, 在实际生产过程中, 铝熔体中气体的存在(主要是氢<sup>[3]</sup>)会使铸件产生气孔、疏松孔洞等缺陷, 从而直接或者间接地影响到铝合金的强度、韧性、抗蚀性以及最终的使用性能, 使得合金难以满足行业要求<sup>[4-6]</sup>。Viswanadham等<sup>[7]</sup>发现晶界上存在过量自由镁, 容易和氢形成“Mg-H”复合体, 造成晶界上固溶氢的增加, 形成氢的偏聚, 使得晶界的结合能下降, 从而促进了裂纹的扩展。叶锦华<sup>[8]</sup>等认为铝合金的含氢量越高, 其致密性越低, 形成的气孔就越大, 严重影响铝铸件的力学性能。目前关于氢含量对铝合金组织和力学性能影响的定性或定量分析研究较少, 且没有形成完整而统一的理论体系, 而铝熔体中氢含量的研究对铝合金的实际生产具有重要指导意义。

本文研究了不同氢含量对7075铝合金组织、力学性能的影响, 为改善和提高7075铝合金的质量提供技术支持。

## 1 试验材料与方法

本试验使用7075合金, 其化学成分如表1所示。合金在井式熔炼炉中进行复熔。熔炼过程为: 先将7075合金放到坩埚中, 设定熔炼炉温度为730℃保温至合金完全熔化, 再利用六氯乙烷精炼剂进行精炼, 使用东北大学研发的测氢仪进行测氢并记录氢含量, 然后使用水冷铜模进行铸锭, 浇注之前需要先将水冷铜模和铁勺在250~350℃下烘干1 h, 避免外部水分的影响, 当达到试验预期的熔炼条件时, 使用铁勺取出熔体并迅速倒入到烘干好的水冷铜模中, 凝固后得到试样。将浇注的试样线切割成圆柱和拉伸试样如图1, 分别用于金相观察和拉伸试验。将圆柱试样打磨、抛光, 然后使用Olympus G71金相显微镜对其显微组织观察, 拉伸试样在万能拉伸试验机上进行室温拉伸试验, 拉伸速度为1 mm/min, 使用维氏硬度测试仪对铝合金试样进行硬度测试。本次研究的关键是保证氢含量测量准确, 试验采用的铝液测氢仪为

表1 7075铝合金化学成分  
Table 1 Chemical composition of 7075 aluminum alloy  $w_B/\%$

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.40	0.50	1.2~2.0	0.03	2.1~2.9	0.18~0.28	5.1~6.1	0.02	余量

作者简介:

张延荣(1995-), 男, 硕士生, 研究方向为氢对铝材组织和性能的影响。E-mail: 976394337@qq.com

通讯作者:

厉英, 女, 教授。E-mail: liying@mail.neu.edu.cn

中图分类号: TG146.2<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)03-0336-04

基金项目:

国家自然科学基金(51834004、51774076)。

收稿日期:

2021-07-31 收到初稿,  
2021-10-03 收到修稿。

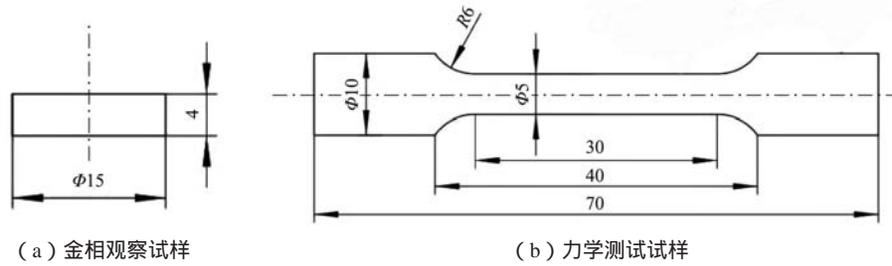


图1 试样尺寸

Fig. 1 Dimensions of specimens

课题组自主研发，其相关技术指标为：测试温度范围600~850；测试标准差 0.002 mL/100 g；量程 0~9.99 mL/100 g；测量时间3~10 min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同氢含量的铝合金气孔形貌

不同氢含量7075铝合金铸态组织金相照片如图2所示，可以看到晶内分布浅灰色颗粒状及块状的相，另外还有沿着晶界或枝晶界分布的浅灰色长条状的相以及鱼骨骼状的相，如图2b。同时，还可以观察到呈深黑色衬度的气孔，形状为圆形且尺寸较小，这些气孔主要分布在三叉晶界，也有部分沿晶界或枝晶界分布，如图2d。随着铝合金中氢含量的增加，气孔数量在增加，气孔面积也在变大，且可以看出图2e中的气孔相对较大，且形状不规则，为了更准确地研究气孔

在不同氢含量铝合金中的分布情况，用image J软件对金相照片上气孔面积分数进行统计计算。计算结果如表2所示，随着铝合金中氢含量由0.188 mL/100 g提升到0.345 mL/100 g，其气孔平均大小由7.117  $\mu\text{m}^2$ 增大到了15.501  $\mu\text{m}^2$ ，气孔面积分数由0.531%增大到了

表2 不同含氢量铝合金中气孔大小和面积分数  
Table 2 Pore size and area fraction in aluminum alloys with different hydrogen contents

试样编号	含氢量 /(mL·100 <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> )	气孔平均 面积/ $\mu\text{m}^2$	气孔面积 分数/%
a	0.188	7.117	0.531
b	0.200	7.591	0.699
c	0.222	7.908	0.919
d	0.257	13.999	1.102
e	0.345	15.501	1.284

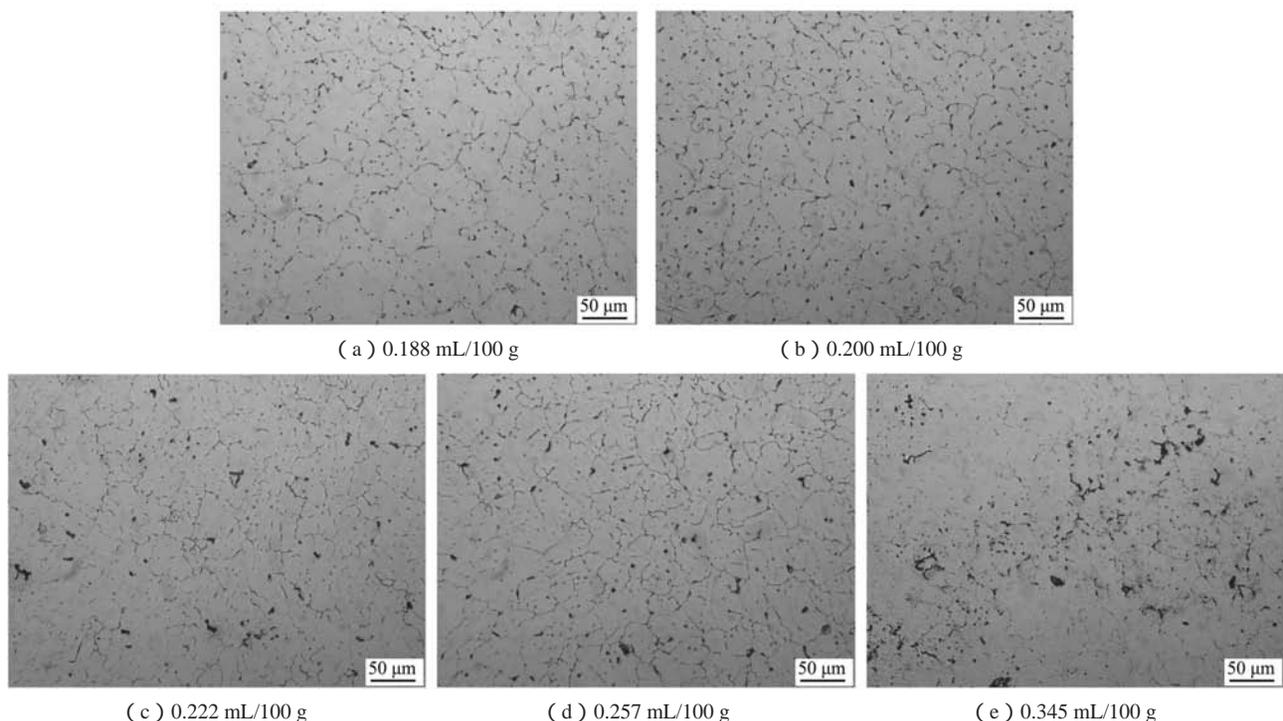


图2 不同氢含量的铝合金组织

Fig. 2 Microstructures of aluminum alloys with different hydrogen contents

1.284%。这是由于铝合金凝固由液态转变成固态时，氢在铝合金中的溶解度下降近二十倍，因此在凝固过程中，氢含量超过其溶解度时就会形成气泡，而来不及上浮的气泡就会形成气孔，而铝熔体氢含量越高，上浮的气泡就会越多，进而导致大量的显微疏松和气孔<sup>[9-10]</sup>。

## 2.2 氢对 7075 铝合金性能的影响

将不同氢含量的铸锭加工拉伸试验，测试得到的拉伸数据如图3所示。随着氢含量的升高，合金的力学性能表现整体的变化趋势是降低的，当铝熔体中氢含量由0.188 mL/100 g增大到0.345 mL/100 g时，铝合金试样的抗拉强度迅速下降，由485 MPa下降到了370 MPa，降低了23.7%；屈服强度由445 MPa下降到了335 MPa，降低了24.7%；铝熔体的氢含量由0.188 mL/100 g升高到0.222 mL/100 g时，伸长率下降了33.1%，随后氢含量由0.222 mL/100 g升到0.345 mL/100 g，伸长率在这一阶段变化较小。这与我们上面观察到的不同氢含量铝合金组织气孔分布规律相符合，由此可见氢含量和气孔

对合金力学性能的影响比较明显，使得抗拉强度和屈服强度都有较大幅度的降低，对伸长率也有一定的影响。在此基础上我们进一步通过硬度测量得到不同氢含量对铝合金硬度的影响，所得结果如图3所示，氢含量为0.188 mL/100 g的铝合金的硬度值为HV169.2，氢含量为0.345 mL/100 g的铝合金的硬度值为HV131.1，最大硬度值和最小硬度值相差HV38.1，随着氢含量的上升，铝合金试样的硬度下降了22.5%，氢含量和铝合金的硬度存在一定相关性，铝熔体中的氢含量越高，铝合金的硬度值越小。

这是由于铝熔体的吸氢行为，铝合金由液态转变为固态的过程中，熔体中氢通过异质成核形成氢气泡，最终以气孔形式析出，严重破坏了材料的连续性，降低了材料的受力面积，在拉伸应力作用下，气孔处会存在应力集中，随着氢含量的增大，显微缺陷也会增多，气孔容易萌生、长大和聚合使合金很容易产生脆性断裂。同时，气孔和铝合金基体会有一定的硬度差距，在拉伸过程中，气孔较大的影响了铝合金塑性变形过程，最终表现为材料力学性能的下降<sup>[11]</sup>。

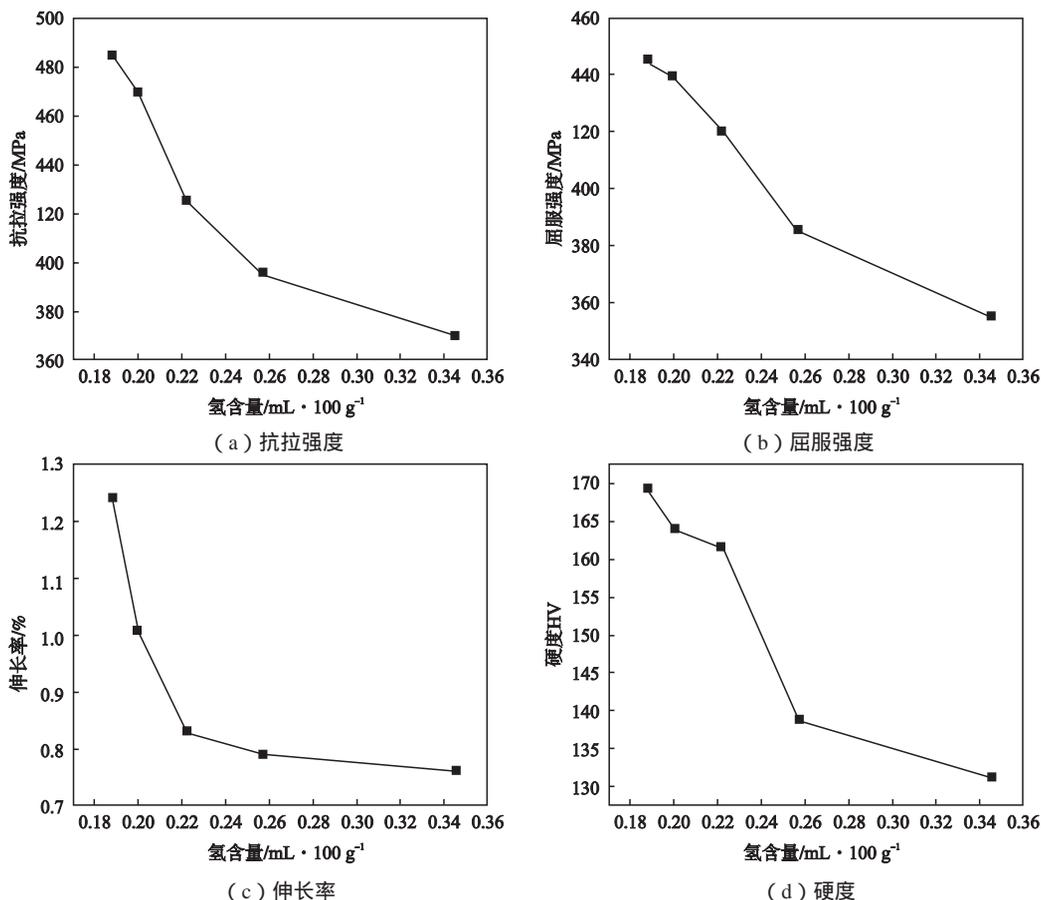


图3 不同氢含量7075铝合金的力学性能

Fig. 3 Mechanical properties of 7075 aluminum alloys with different hydrogen contents

### 3 结论

(1) 随着铝熔体中氢含量从0.188 mL/100 g升到0.345 mL/100 g, 铝合金组织中气孔呈现增多变大的趋势, 其气孔平均大小由7.117  $\mu\text{m}^2$ 增大到了15.501  $\mu\text{m}^2$ , 气孔面积分数由0.531%增大到了1.284%。

(2) 铝熔体在凝固时氢会形成气孔, 割裂材料基

体的连续性, 随着7075铝熔体氢含量从0.188 mL/100 g升到0.345 mL/100 g, 合金力学性能变差, 其抗拉强度、屈服强度和伸长率分别降低了23.7%、24.7%、33.1%。

(3) 随着7075铝熔体氢含量从0.188 mL/100 g升到0.345 mL/100 g, 合金的硬度由HV169.2减小到了HV131.1, 下降了22.5%。

#### 参考文献:

- [1] 张发明, 彭学仕. 使用SNIF净化装置应注意的几个问题 [J]. 轻合金加工技术, 1996 (3): 12-15.
- [2] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [3] 周迪生, 龙伟, 张恒华. 铝合金铸造过程中析氢动力学研究 [J]. 铸造, 2012, 61 (10): 1172-1176.
- [4] 麻向军, 金胜灿, 佟国栋, 等. 影响铝合金铸件显微疏松的因素 [J]. 铸造, 2002 (7): 403-407.
- [5] 贾征, 张志强, 乐启焯, 等. 铝合金和镁合金除氢方法及进展 [J]. 铸造, 2011, 60 (7): 635-640.
- [6] 孙荣滨. 4004铝合金扁铸锭气孔缺陷问题的解决 [J]. 金属世界, 2009 (2): 28-31.
- [7] VISWANNADHAM R K, SUN T S. The Mg-H composite theory of stress corrosion cracking in aluminum alloys [J]. Metal Trans, 1980, 11 (6): 85-89.
- [8] 叶锦华. 含氢量对铝合金致密性检测的影响 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2008.
- [9] 杨长贺, 高钦. 有色金属净化 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1989: 14-16.
- [10] 李谢华. 氢与夹杂对铝合金的组织与性能的影响 [D]. 东北大学, 2013.
- [11] ANSON J P, GRUZLESKI J E. The quantitative discrimination between shrinkage and gas microporosity in cast Aluminum alloys using spatial data Analysis [J]. Materials Characterization, 1999, 43: 319-335.

---

## Effect of Hydrogen Content on Microstructure and Mechanical Properties of 7075 Aluminum Alloy

ZHANG Yan-rong, SHI Ming, LI Ying, CHEN Chang-ke

(School of metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110022, Liaoning, China)

#### Abstract:

7075 alloy was smelted in a pit-type resistance furnace, and the ingot was prepared into aluminum alloy samples with different hydrogen contents. The paper studied the influence of different hydrogen contents on the microstructure and properties of 7075 alloy. The results showed that as the hydrogen content in the aluminum melt increased, it will cause the melt to form pores during the solidification process, resulting in a large number of porosity and pores. As the hydrogen content increased from 0.188 mL/100 g to 0.345 mL/100 g, the tensile strength, yield strength, elongation and hardness of 7075 alloy decreased by 23.7%, 24.7%, 33.1% and 22.5%, respectively.

#### Key words:

7075 aluminum alloy; hydrogen content; blowhole; mechanical properties