



超高强7055铝合金无缝管 生产试制



案例制作：林高用 教授
中南大学材料科学与工程学院



目录

01

案例背景与来源

02

热处理优化方案

03

试验结果与分析

04

总结与思考



案例来源与背景：福建某铝加工企业



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

超高强7055铝合金无缝管

特点

- ◆超高强
- ◆无焊缝，均匀，致密
- ◆密度低；比强度高

应用领域

高铁和轨道交通、
航空航天、核电、
国防军工、汽车
等行业应用广泛

产品缺点

空心锭反挤压制备无缝管。常规T6热处理后，强度仅可达到**600MPa**，且**耐腐蚀性能较差**。

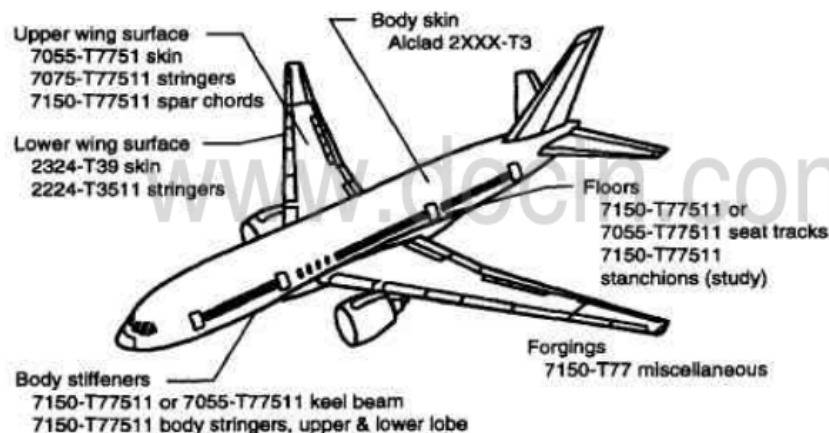


案例来源与背景



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

本案例来源于国内某铝加工企业的生产试制。该企业生产试制了一种大口径超高强7055铝合金无缝管，经常规T6态热处理后抗拉强度仅可达到600MPa左右，同时耐腐蚀性能较差，不能满足用户需求。表明其**热处理工艺不合理**，有待试验确定。本案例通过产学研合作，设计了双级固溶和三级固溶热处理方案，经系统的工艺试验和检测分析，探明了固溶、时效及“**停放效应**”对7055铝合金无缝管力学性能与耐蚀性能的影响规律，确定了较佳的热处理工艺方案。由此为某型号装备关键材料形成了小批量生产能力。





热处理优化方案



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

试验材料为企业试制的7055铝合金无缝管。采用**反向挤压**方法将熔铸的7055铝合金**空心锭坯**，经热挤压成 $\phi 150\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的无缝管，挤压比为8.4。7055铝合金名义化学成分如下表所示。

表1 7055铝合金名义化学成分（质量分数，%）

元素	Zn	Cu	Mg	Zr	Mn	Ti	Fe	Si	Cr	Al
含量	7.60~8.40	2.00~2.60	1.80~2.30	0.08~0.25	0.05	0.06	0.15	0.10	0.04	余量



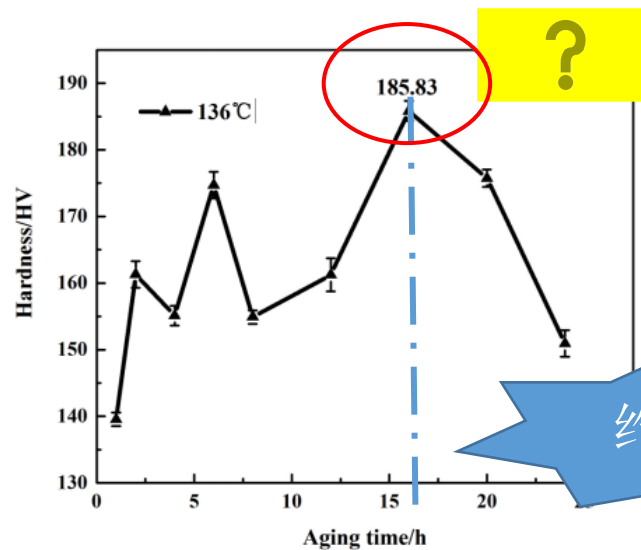
企业制备的7055铝合金空心铸锭图片和大口径无缝管的实物图

(a) 空心铸锭； (b) 大口径无缝管剖切试样



热处理优化分析——双级固溶+“停放效应”

双级固溶制度：
 $475^{\circ}\text{C} \times 2\text{h} + 485^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$



晶内析出大量的
 η' 相, η' 相为
7055铝合金的主
要强化相

约16h

双级固溶后 136°C下时效不同时间硬度折线图

表2 7055铝合金双级固溶+“停放效应”制度

固溶处理制度	室温停放时间/h	人工时效制度
$475^{\circ}\text{C} \times 2\text{h} + 485^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$	0	$136^{\circ}\text{C} \times 16\text{h}$
	6.5	
	10.5	
	15	
	48	
	54	



热处理优化分析——双级固溶+“停放效应”



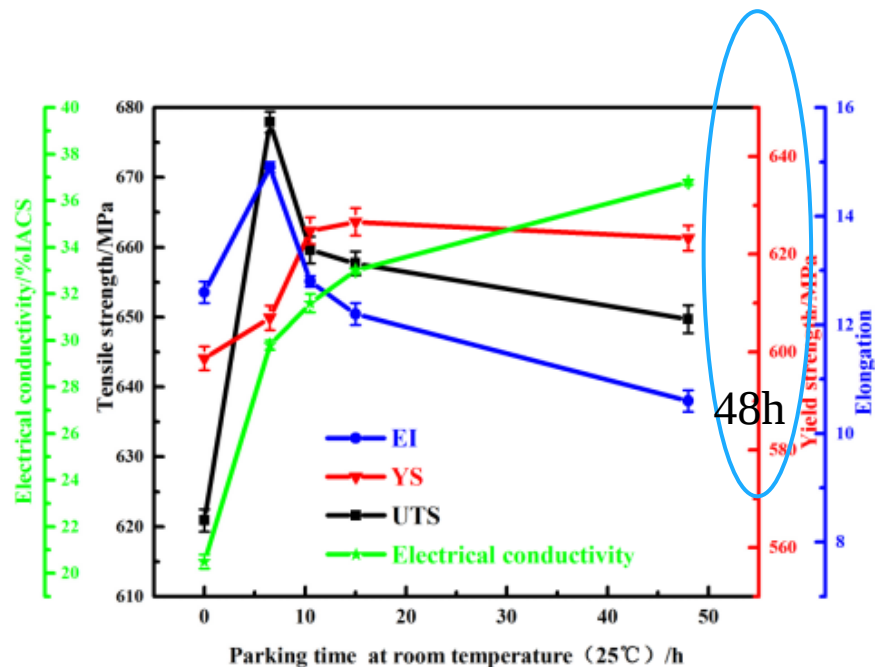
中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

表3 最佳停放时间与未经停放性能对比

性能	室温停放时间 /h	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断后伸长率 /%	电导率 /% IACS
	0	620.9	598.7	12.6	20.5
	48	649.7	626.6	10.8	36.8

最佳停放时间

可见，室温“停放效应”
对7055无缝管的耐蚀性
（与电导率有关）和强
度有明显影响



双级固溶制度下不同室温停放时间的铝合金性能变化曲线



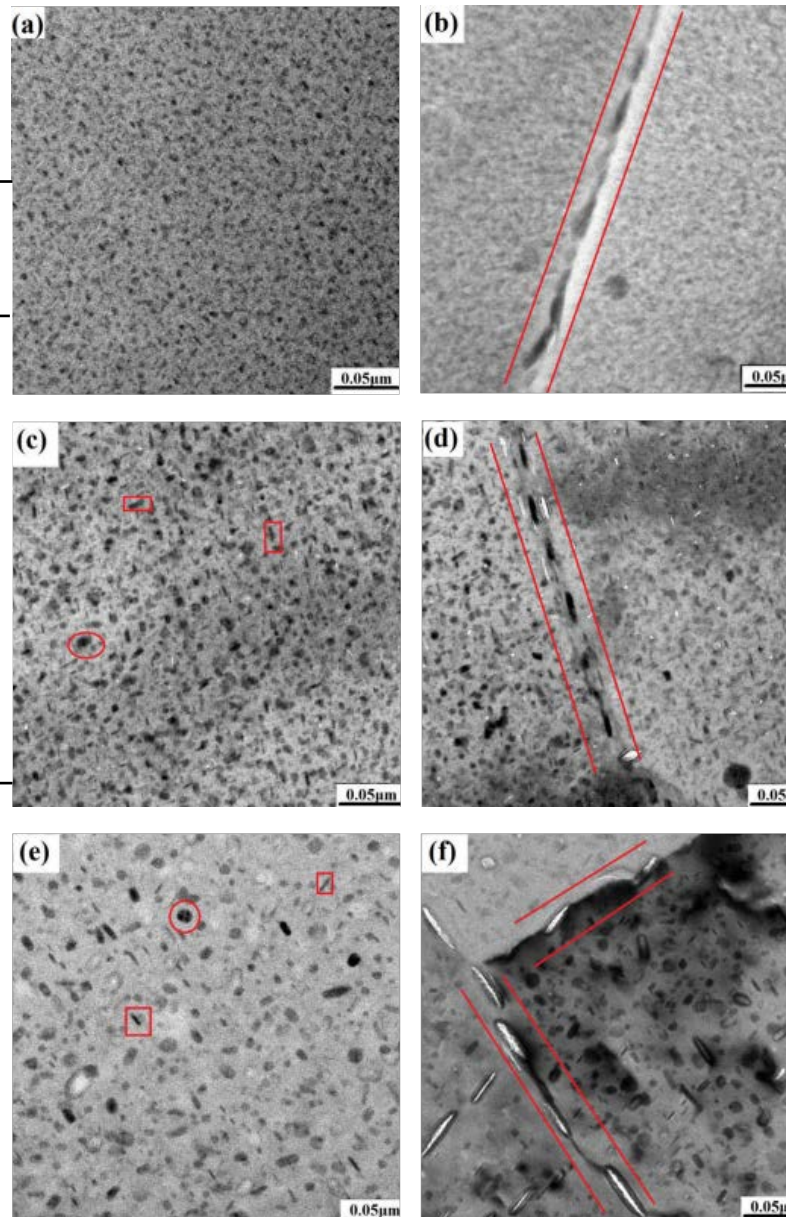
热处理优化分析——双级固溶+“停放效应”



中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

显微组织

不同停放时间	晶内析出相	晶界析出相
0h	细小弥散的共格GP区和半共格的 η' 相	细小且连续分布
6.5h	析出相 η' 数量增多	析出相带呈现半连续状态
48h	析出相发生了粗化, η' 相含量减少, η 相含量增多	不连续分布状态,无沉淀析出带附近有粗化的第二相



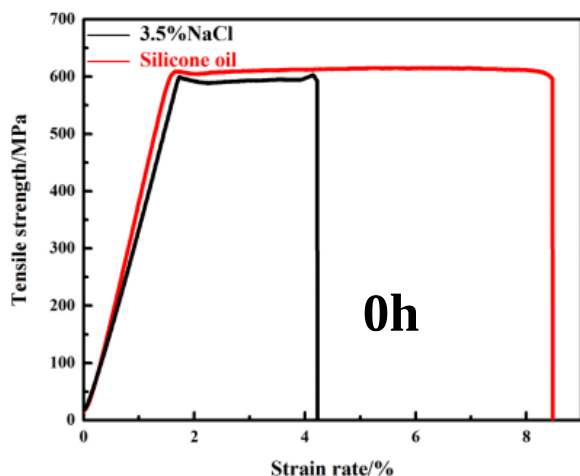
不同室温停放时间的7055铝合金的明场像 (TEM)

(a-b) 0h, (c-d) 6.5h, (e-f) 48h

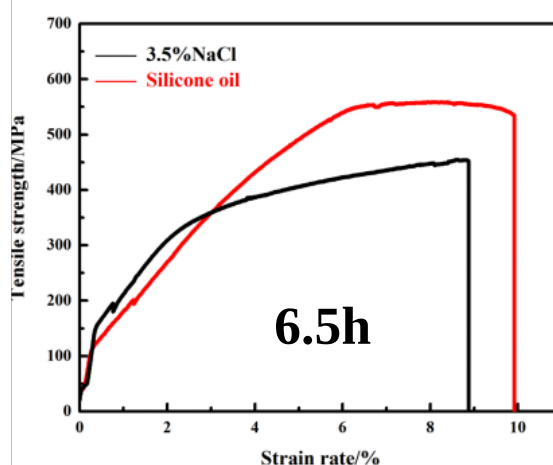


耐应力腐蚀性能

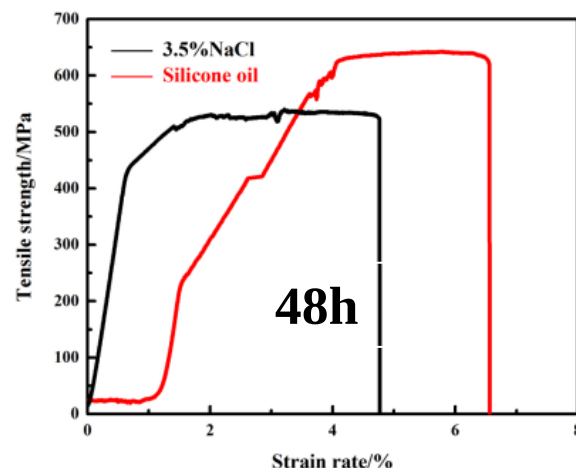
腐蚀介质： 3.5%NaCl



$$I_{SSRT}=0.238$$



$$I_{SSRT}=0.218$$



$$I_{SSRT}=0.176$$

7055 铝合金不同室温停放时间的耐应力腐蚀性能曲线

$$I_{SSRT}=1-\frac{\sigma_{fw}(1+\delta_{fw})}{\sigma_{fA}(1+\delta_{fA})}$$

I_{SSRT} 的值越接近于1，说明合金耐应力腐蚀性能越差，反之越好

σ_{fw} 在腐蚀介质中的断裂强度，MPa

σ_{fA} 在惰性介质中的断裂强度，MPa

δ_{fw} 腐蚀介质中的断后伸长率，%

δ_{fA} 惰性介质中的断后伸长率，%



热处理优化分析——三级固溶+“停放效应”



中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

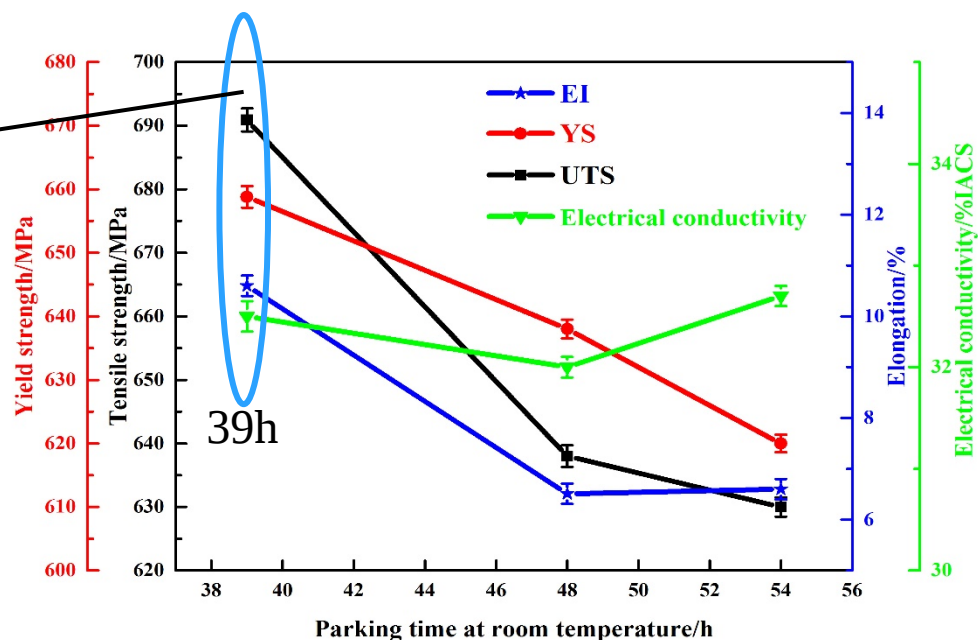
性能

表4 7055铝合金三级固溶+“停放效应”制度表

固溶处理制度	室温停放时间/h	人工时效制度
	39	
$475^{\circ}\text{C} \times 2\text{h} + 480^{\circ}\text{C} \times 1\text{h} + 485^{\circ}\text{C} \times 0.5\text{h}$	48	$136^{\circ}\text{C} \times 16\text{h}$
	54	

抗拉强度：690.9MPa
断后伸长率：10.6%
电导率：32.5% IACS

最佳性能





热处理优化分析——三级固溶+“停放效应”



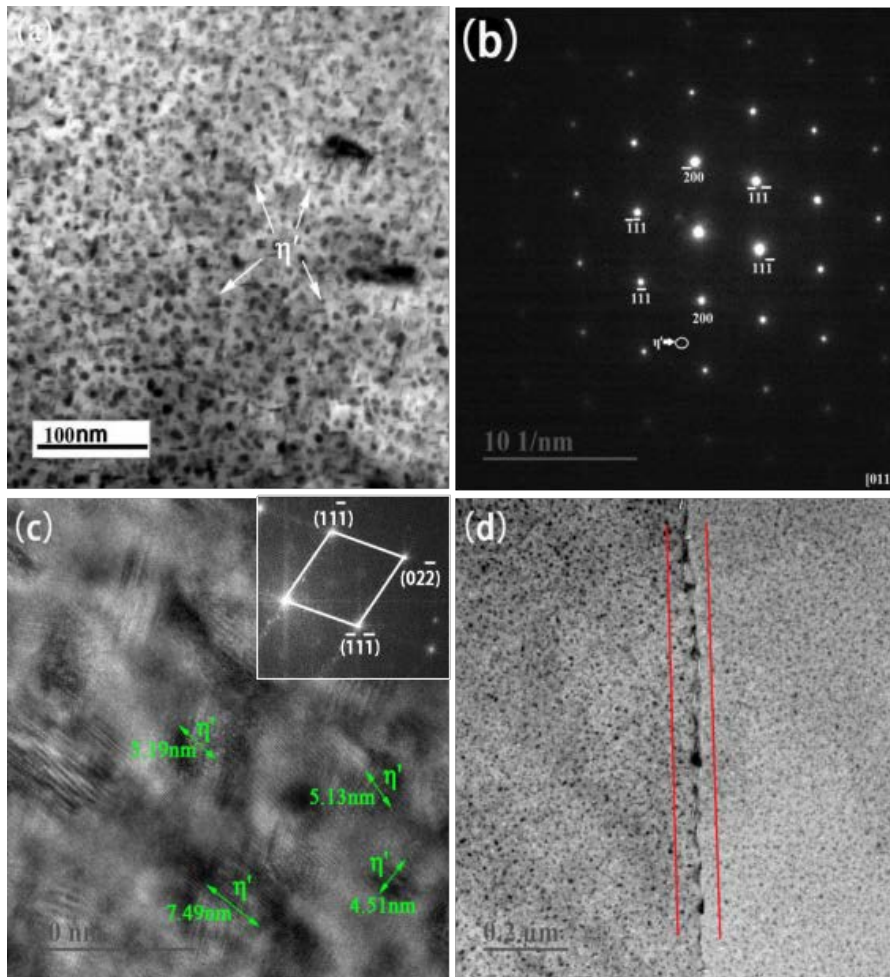
中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

显微组织

热处理制度：

$475^{\circ}\text{C} \times 2\text{h} + 480^{\circ}\text{C} \times 1\text{h} + 485^{\circ}\text{C} \times 0.5\text{h}$
+ 水淬 + 39h 室温停放 + $136^{\circ}\text{C} \times 16\text{h}$

由图 (a-b) 可知，晶界内部析出大量弥散细小的非平衡第二相 η' 相， η' 相呈针状、短棒状和圆盘状。从图 (c) 中可得，析出的 η' 相为在较小直径 $4.0\text{nm} \sim 7.5\text{nm}$ 范围内的圆盘形 η' 相，且 η' 相与基体呈完全共格状态，位错运动时需要绕过或者切过这些较硬的第二相质点，具有很好的强化效果。由图 (d) 中可以看出**晶界析出相**呈现不连续态，且具有粗化现象，这种特征晶界可以有效地阻断**腐蚀通道**，有效地提高合金的耐腐蚀性能。



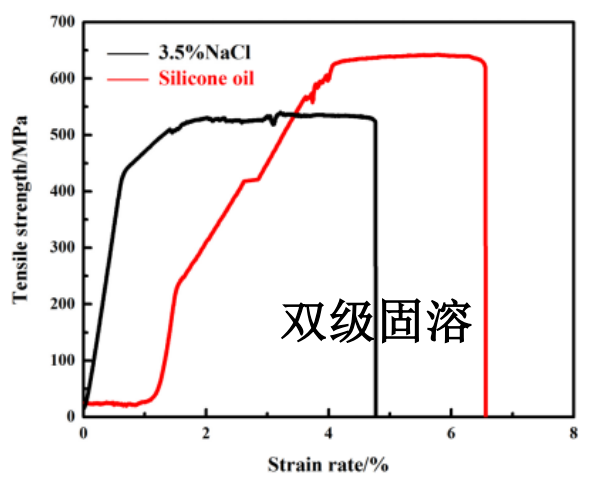
7055铝合金的TEM微观组织（ $\langle 011 \rangle$ 晶带轴入射）（TEM）
(a) 沉淀相明场像图片；(b) 与图 (a) 对应的衍射斑图像；
(c) 沉淀相高分辨图像；(d) 晶界明场像图片



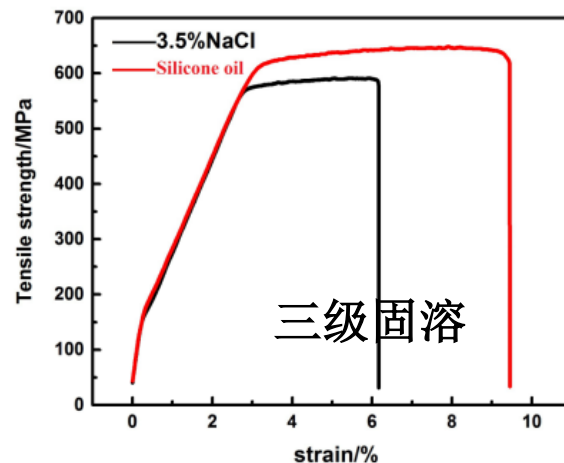
热处理优化分析——双级固溶和三级固溶最佳工艺比较

表5 双级固溶和三级固溶最佳工艺性能

不同固溶方式	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断后伸长率 /%	电导率 /% IACS
双级固溶	649.7	626.6	10.8	36.8
三级固溶	690.9	658.8	10.6	32.5



$$I_{SSTR}=0.176$$



$$I_{SSTR}=0.225$$

不同固溶制度下7055 铝合金的耐应力腐蚀性能曲线

对比发现，三级固溶使强度提高41.2MPa，断后伸长率变化不明显，电导率降低4.3% IACS。



总结与思考



本案例通过产学研合作，经系统的工艺试验和检测分析，探明了双级/三级固溶、时效及“**停放效应**”对7055铝合金无缝管力学性能与耐蚀性能的影响规律，确定了可行的热处理工艺方案：

采用**双级固溶**方案，该铝合金的综合性能达到最佳的热处理制度为：
 $475^{\circ}\text{C} \times 2\text{h} + 485^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$ 固溶后，室温停放48h，再进行 $136^{\circ}\text{C} \times 16\text{h}$ 的人工时效。在此制度下，该合金的抗拉强度、屈服强度、断后伸长率和电导率分别达到649.7MPa，626.6MPa、10.8%，和36.8%IACS，耐应力腐蚀指数 $I_{\text{SSRT}}=0.176$ 。

采用**三级固溶**方案，该铝合金的综合性能达到最佳的热处理制度为：
 $475^{\circ}\text{C} \times 2\text{h} + 480^{\circ}\text{C} \times 1\text{h} + 485^{\circ}\text{C} \times 0.5\text{h}$ 固溶后，室温停放39h，再进行 $136^{\circ}\text{C} \times 16\text{h}$ 的人工时效。在此制度下，该合金的抗拉强度、屈服强度、断后伸长率和电导率分别达到690.9MPa，658.8MPa、10.6%，和32.5%IACS，耐应力腐蚀指数 $I_{\text{SSRT}}=0.225$ 。



总结与思考



引申思考：

本案例属于工程试制案例，涉及的关键要点是通过热处理工艺优化，使7055 铝合金无缝管获得力学性能和耐腐蚀性能的综合提高。**室温停放**实际上也是热处理过程中的具体环节，对合金组织与性能均有一定影响。但是，在企业生产条件下，常常容易忽视室温停放的影响。所以，本案例的结果凸显了**室温停放效应**的作用，为合作企业的超高强铝合金生产提供了科学依据，为公司特种装备材料的研制积累了宝贵经验，具有重要的现实意义。



思考题：

- 1、对于铝合金的抗应力腐蚀性能的测定，有哪些主要方法？
- 2、对于7055这种**高合金化**超高强铝合金无缝管，还有哪些制备方法？
- 3、导电率与抗应力腐蚀性能之间有何关联？

谢谢!

