



# 6061铝合金型材表面划伤

## 原因分析与解决措施



案例制作：林高用 教授  
中南大学材料科学与工程学院

# 内容提纲

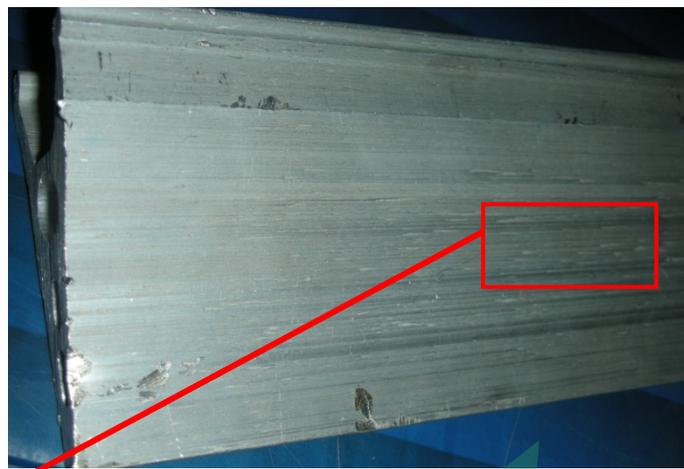
- 案例来源与背景
- 现场跟踪
- 问题型材的材质分析
- 工艺优化
- 改进后工艺的试生产
- 总结与思考



# 一、案例来源与背景

➤ 案例来源：山西某铝业公司

## 表面存在明显划伤的问题型材



不仅影响外表美观性，更影响散热性能和耐蚀性。



# 一、案例来源与背景

型材表面产生划伤、划痕的**根本原因**在于硬质颗粒通过划伤模具工作带而划伤型材或者直接划伤型材表面。

除了硬质颗粒外，模具**工作带**的表面状况也和型材的表面质量息息相关。模具工作带表面硬度越低，**定径带**表面越不光滑，越容易划伤型材表面。但是不同的公司因生产工艺、现场操作以及模具等因素的不同，其型材产生表面划伤的原因也各不相同。

探求本公司生产的散热型  
材表面存在划伤的原因

现场生产跟踪

问题型材材质分析



## 二、现场跟踪

### 现场跟踪

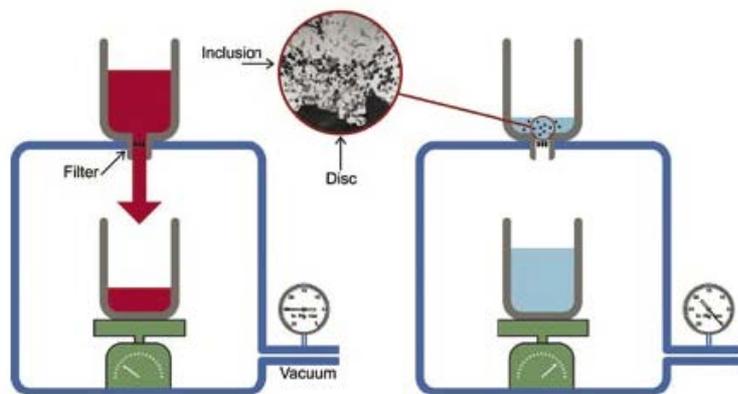
在公司常规的挤压开始前，挤压筒、模具内表面确实存在少量的异物未清理干净，但是在将工模具上的异物全部清理干净，并保证挤压时留有一定压余的条件下，发现型材的表面质量稍有改善，但是还是存在较严重的划伤。

挤压问题型材时的模具是经重新渗氮的H13钢模具，其表面有一定的光洁度，但对其进行硬度测试发现，其硬度仅为870-920HV，比渗氮前回火态的硬度仅高约50HV。

到底是什么硬质颗粒划伤如此高硬度的模具表面？

## 二、现场跟踪

### ➤ PoDFA法测渣



Principle of operation

加拿大铝业公司PoDFA法示意图

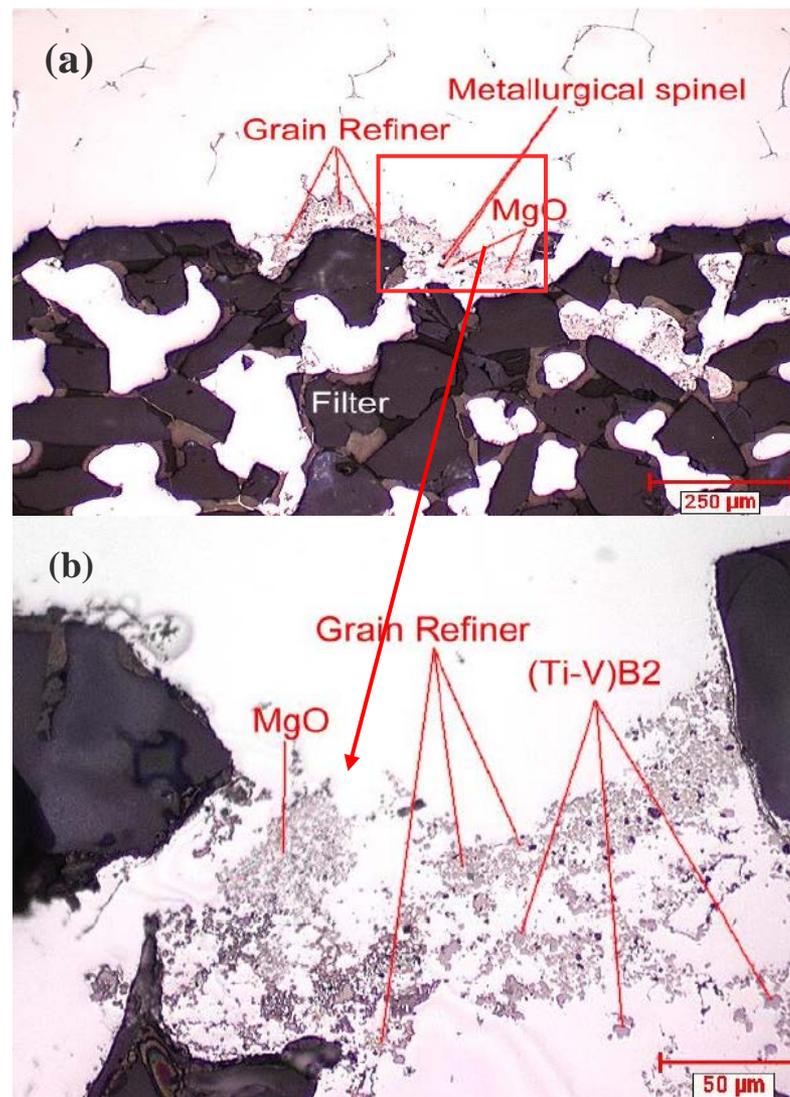
- **PoDFA法**：该法将一定量的铝液在一定的控制条件下通过极细的滤片进行过滤，铝熔体中的夹杂物在滤片表面浓缩，浓度提高10000倍，带有残留金属的滤片被剖切、镶嵌和抛光，然后由专业的PoDFA金相分析人员在光学显微镜下进行分析。该法是目前唯一的既可对夹杂物性质进行定性分析也可对夹杂物浓度进行定量分析的质量控制工具。
- **Qualiflash法**：一种评价铝液洁净度的过滤技术。当铝液进入一个底部带有过滤器的温控罩内时，氧化物会堵塞过滤器，过滤的金属被保留在锭模中，根据铝液停止流动时锭模中铝的数量来确定铝液洁净度。可用于炉前分析，一次测试仅需20s。

## 二、问题型材的材质分析——杂质分析（PoDFA）

### 问题型材的杂质分析结果

Inclusion types		Content	
		mm <sup>2</sup> /kg	%
Carbides	Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub> <3μm	-	-
	Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub> >3μm	0.002	1
Magnesium Oxides	MgO	0.018	9
	Cuboid MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.004	2
	Spinel MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.014	7
Refractory Materials	Spinel-like	0.002	1
	αAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,CaO,SiO...	-	-
	C (Graphite)	-	-
Metal Treatment	MgCl <sub>2</sub> ,NaCl,CaCl <sub>2</sub> ...	Trace	
	Flux/salt,Boneash,...	-	-
others	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	-	-
	Al <sub>4</sub> C <sub>4</sub> B	-	-
	γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-
Additions	(Ti,V) B <sub>2</sub>	0.029	15
	TiB <sub>2</sub> /TiC	0.127	65
Total Inclusion Content		<b>0.195</b>	
Total without Grain Refiner		0.068	

### PoDFA测渣结果(SEM)



## 二、问题型材的材质分析——杂质分析

◆ 取自实际生产现场，为本公司生产的6061铝合金散热问题型材。采用**PoDFA法**进行杂质分析。

◆ 试样中杂质的总含量为 **$0.195\text{mm}^2/\text{kg}$** ，达不到客户的要求（ $\leq 0.08\text{mm}^2/\text{kg}$ ）。

◆ 主要杂质类型是晶粒细化剂（ $\text{TiAl}_3$ 、 $\text{TiB}_2$ 、 $(\text{Ti},\text{V})\text{B}_2$ ）、和**镁的化合物**（ $\text{MgO}$ 、 $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ），其中 $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 呈立方晶和尖晶石状。

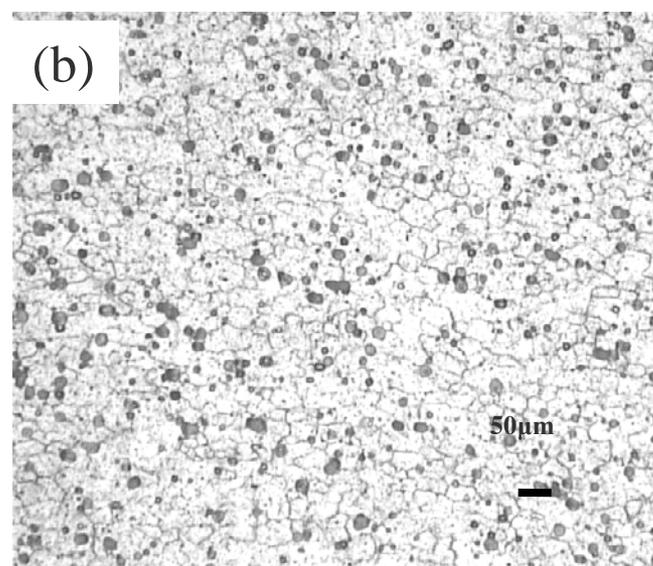
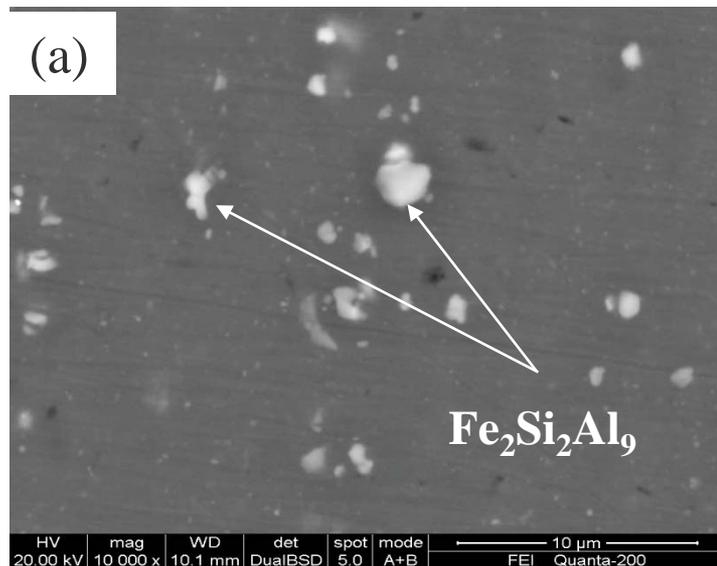
◆  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 具有的特殊形态以及其和 $\text{MgO}$ 都具有较高硬度的特点导致两者在加工过程中都易划伤模具工作带而降低型材的表面质量。



## 二、问题型材的材质分析——成分与组织分析

### 实测化学成分(w/%)

Mg	Si	Cu	Cr	Ti	Zn	Fe	Mn	Ni	Al
1.15	0.27	0.25	0.17	0.02	0.02	0.25	0.11	0.004	Bal.



■ 成分分析结果表明：型材中 Fe 含量较高，易与铝和硅形成 AlFeSi 系列硬质金属间化合物；Mg 与 Si 的质量比偏大，Mg 易被氧化而生成 MgO、MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 等硬质化合物。

■ 组织分析结果表明，型材中存在较多大块状、不均匀分布的硬质 Fe<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>Al<sub>9</sub> 相。

**影响表面质量！！**



## 二、现场跟踪

根据跟踪结果可推测，产生划伤主要有两个方面的原因：

(1) 模具的表面硬度偏低；

(2) 材料本身存在**硬质杂质相**或其它**硬质颗粒**，划伤模具表面，导致粘铝现象的发生，进而划伤型材表面。

渗氮工艺改进

措施

熔体净化工艺改进

在降低了杂质含量的同时也提高了表面质量和导热性能，一举三得！

### 三、熔体净化工艺的优化

#### 目的

降低合金内部以 $\text{MgO}$ 、 $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 和 $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$ 为代表的硬质杂质相和杂质总含量，以提高型材表面质量和导热性能。

#### 优化方案——炉内和在线联合净化

- ◆ 保温炉内采用 $\text{N}_2 + \text{C}_2\text{Cl}_6$ 喷粉净化代替原来的 $\text{CCl}_4$ 泡沫砖净化；
- ◆ 炉外在线精炼系统，将DFU单旋转石墨喷头在线除气装置改成双旋转喷头装置DFU II，并对装置的运行参数进行了优化；
- ◆ 将原有的泡沫陶瓷单级过滤器改成泡沫陶瓷双级复合过滤器。



### 三、熔体净化工艺的优化



### 公司的铝型材生产线

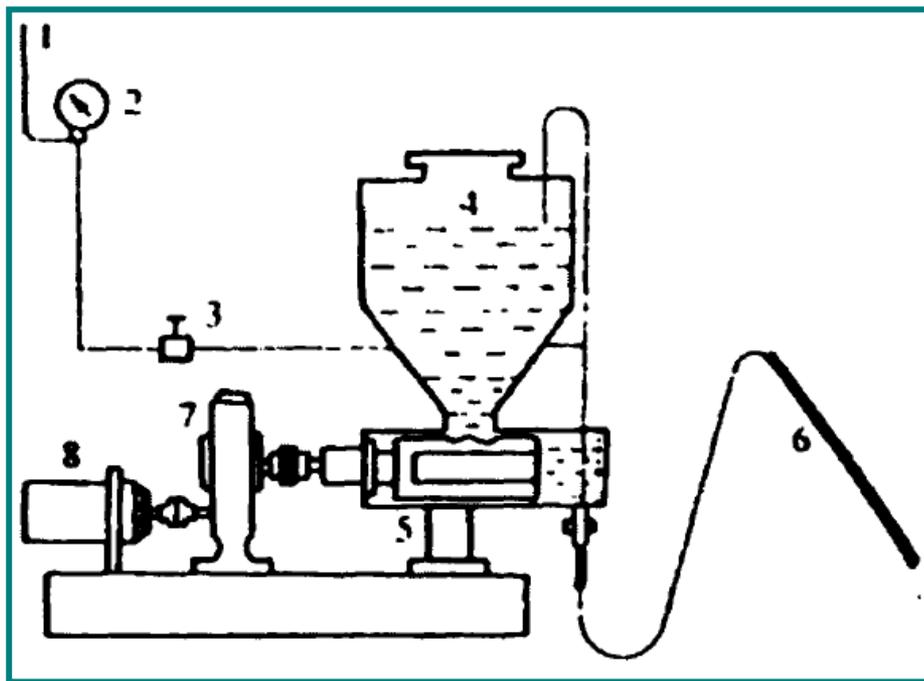
(a)(b)(c)熔铸生产线; (d)1000 t 挤压生产线



### 三、工艺优化——熔体净化工艺的优化：保温炉净化

#### 保温炉净化工艺优化

采用 $\text{N}_2 + \text{C}_2\text{Cl}_6$ 喷粉净化代替原有的 $\text{CCl}_4$ 泡沫砖净化；

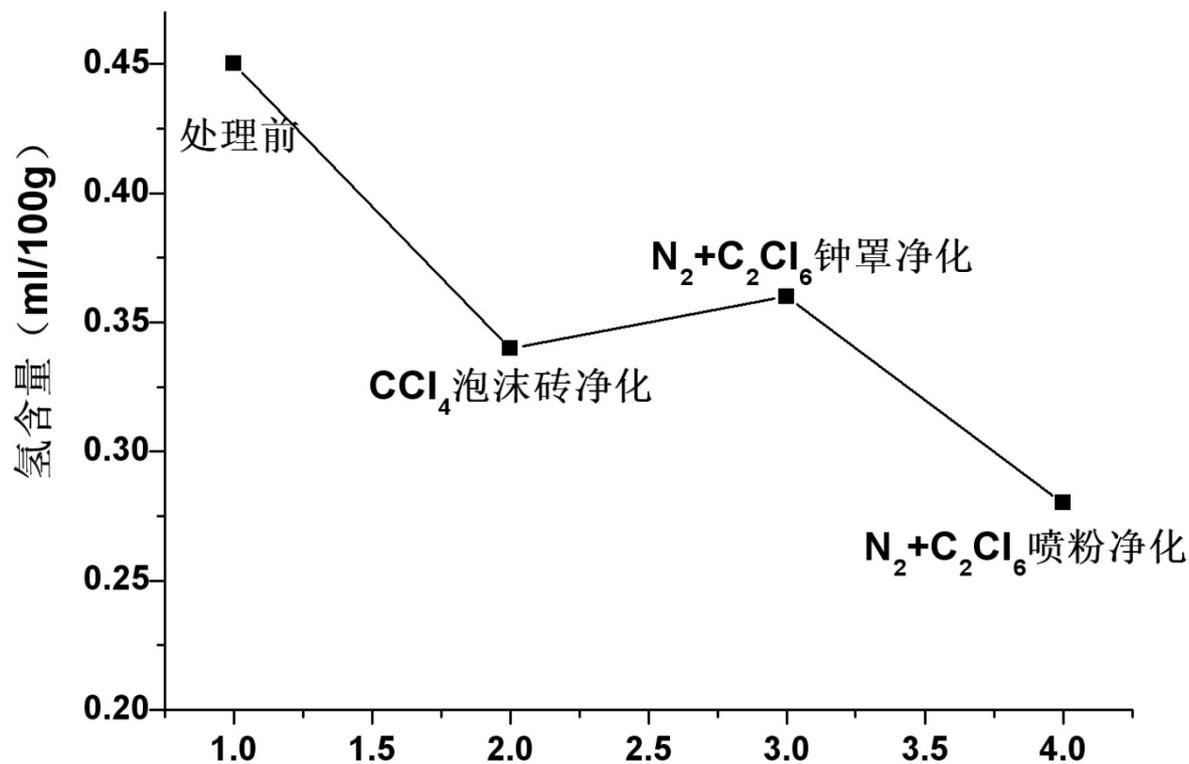


喷射装置工作原理图

综合考虑净化效果以及对人身安全的影响， $\text{N}_2$ 流量的确定以铝液表面沸腾而不产生开花飞溅为原则、 $\text{C}_2\text{Cl}_6$ 流量以能产生较大效果而基本上不污染车间环境为标准，确定几个参数的最佳值分别为： $\text{N}_2$ 流量1 L/min， $\text{C}_2\text{Cl}_6$ 流量40g/min，处理时间15min。



### 三、熔体净化工艺的优化——保温炉净化



不同精炼方式的精炼效果比较

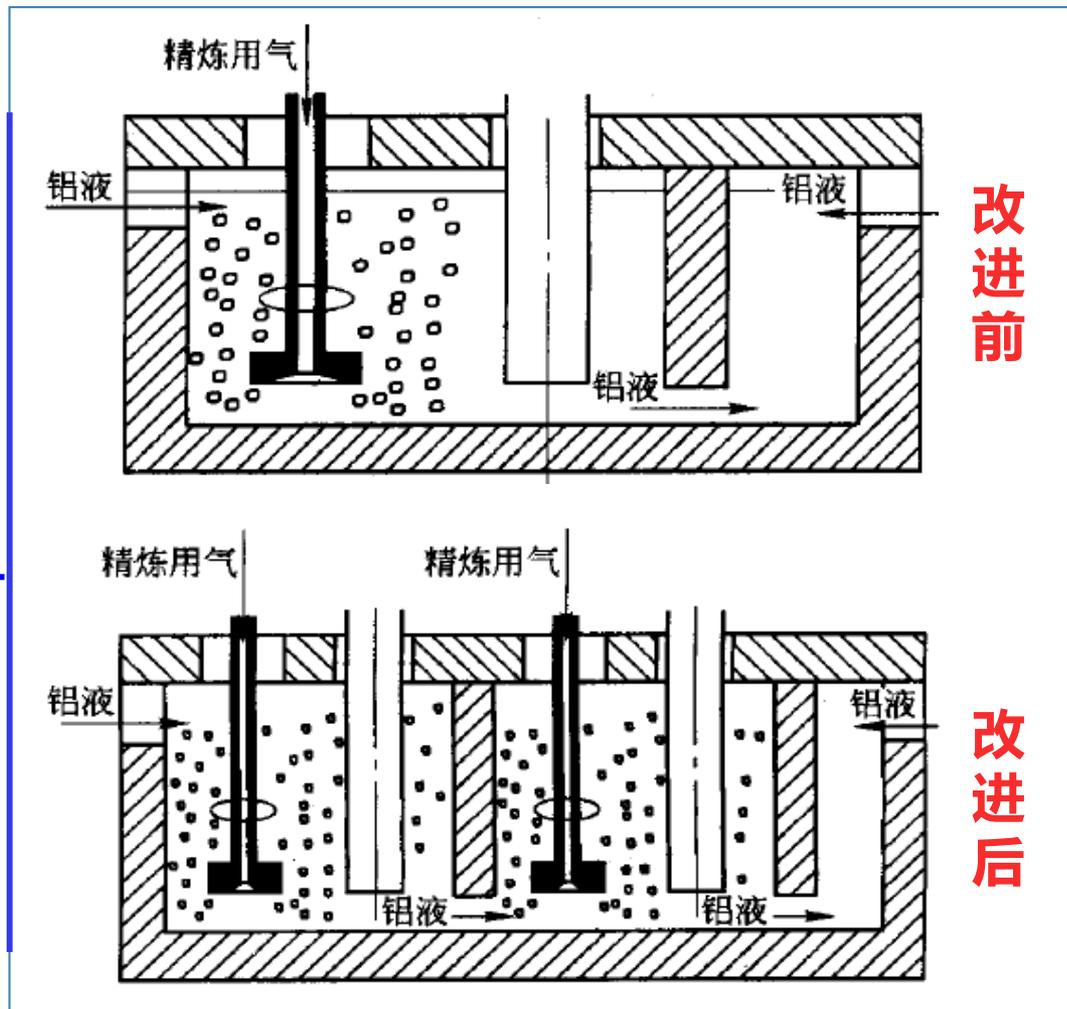
**$\text{N}_2 + \text{C}_2\text{Cl}_6$  喷粉净化具有比  $\text{N}_2 + \text{C}_2\text{Cl}_6$  钟罩净化和  $\text{CCl}_4$  泡沫砖净化更明显的净化效果。**

### 三、工艺优化——熔体净化工艺的优化：在线净化

#### 在线除气工艺优化

➤ 将原来的单旋转石墨喷头除气改成了双旋转石墨喷头除气，通入的主要是氩气（含1%-3%的 $\text{Cl}_2$ 气体）。

➤ 利用改进的装置和工艺参数后，除氢效率高达43%，高于公司原来使用单旋转石墨喷头装置除氢时的效率（29%）。



DFU和DFUI旋转喷头除气装置

### 三、工艺优化——熔体净化工艺的优化：在线净化

#### 单级和双级泡沫陶瓷过滤效果的比较

过滤器类型	大夹杂物 (>20 $\mu\text{m}$ )		小夹杂物 (<20 $\mu\text{m}$ )			过流量 Kg/min
	处理前	处理后	处理前	处理后	效率	
单级	150	20	95	78	18%	135
双级		0		19	80%	119

和单级过滤器相比，泡沫陶瓷双级过滤器对大小夹杂物的过滤效果都更好。虽然其过流量比不上单级过滤器，但是由于连铸工艺要求的金属流量为110kg/min，使用双级过滤器也能满足流量的要求，能保证连铸过程中不断流。



# 三、工艺优化——熔体净化工艺的优化：PoDFA法分析

## 经双级陶瓷板过滤后熔体中的杂质含量

Conclusion types		Composite Filtering	
		mm <sup>2</sup> /kg	w/%
Carbides	Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub> (>3μm)	-	-
Magnesium Oxides	MgO	-	-
	Cuboid MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.001	6
	Spinel MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-	-
Refractory Materials	Spinel-like (Reacted)	-	-
	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, SiO (Unreacted)	-	-
Metal Treatment	Potential Chloride (MgCl <sub>2</sub> , NaCl, CaCl <sub>2</sub> )	0.009	55
	Flux/salt, Bone ash	-	-
Additions	Boron Treatment (Ti, V) B <sub>2</sub>	0.002	11
	Grain Refiner (TiB <sub>2</sub> /TiC)	0.004	28
Total Inclusion Content		0.016	100
Total without Grain Refiner		0.012	80

工艺改进后合金的PoDFA测渣结果



采用优化后的保温炉和在线净化工艺得到的熔体中的杂质总含量仅为0.016 mm<sup>2</sup>/kg，达到了客户的要求，且其中对表面质量影响较大的硬质MgO和尖晶石状MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>的含量接近0。



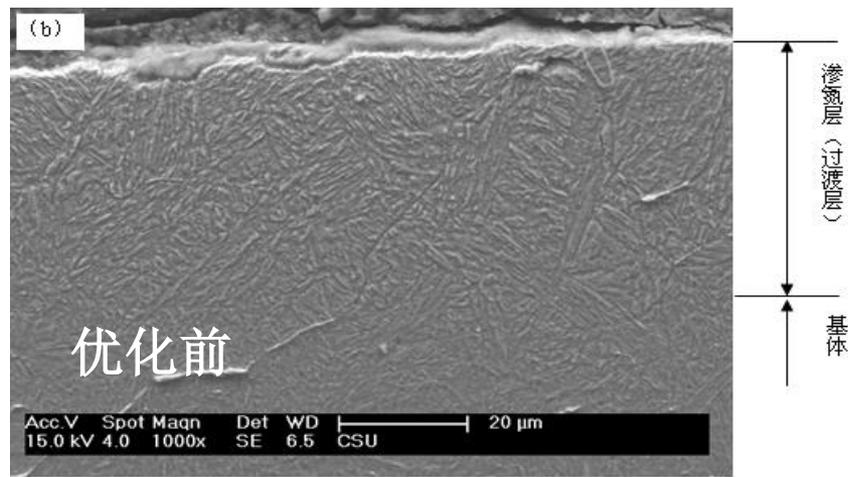
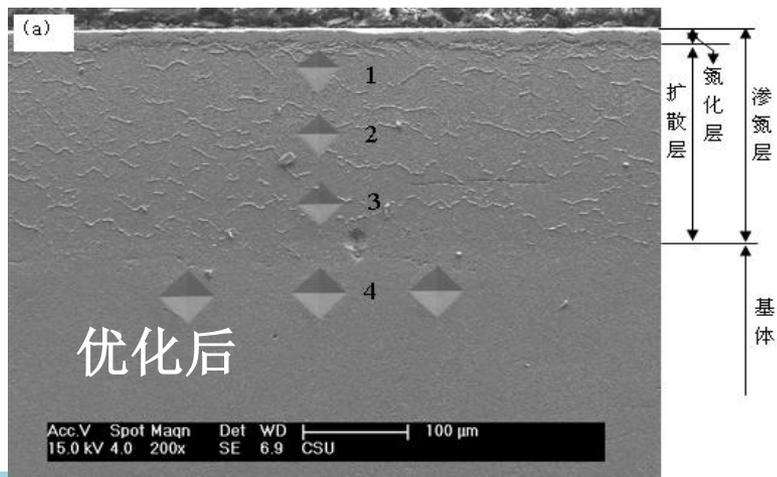
## 四、工艺优化——挤压模具渗氮工艺优化

### 渗氮工艺

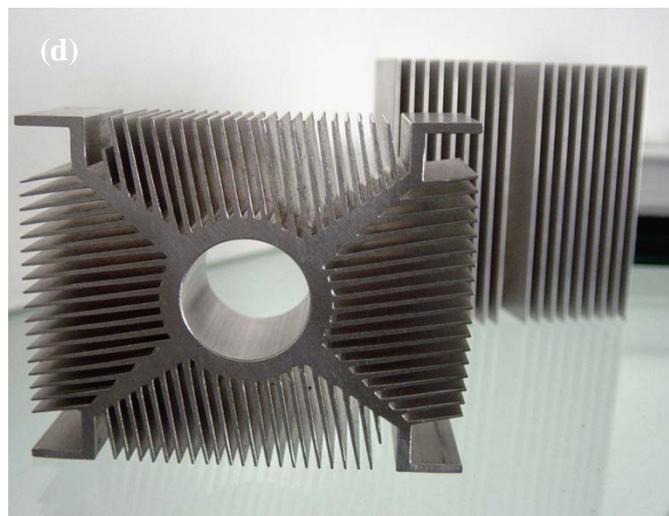
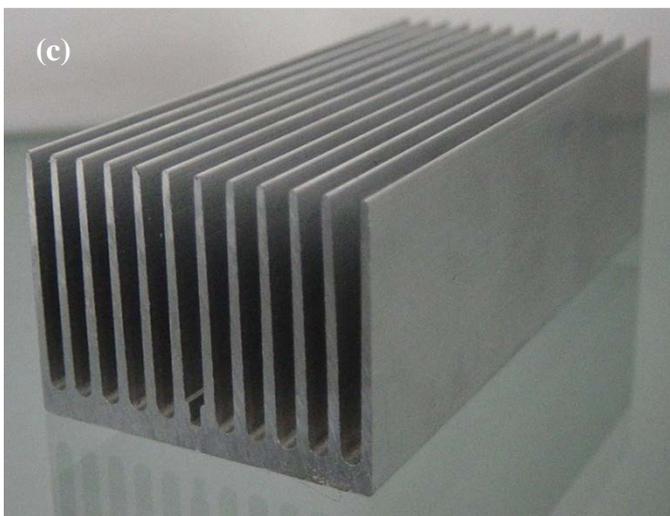
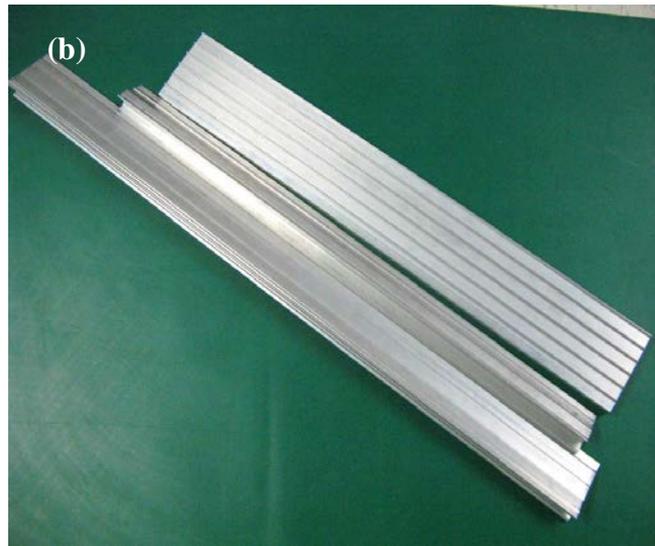
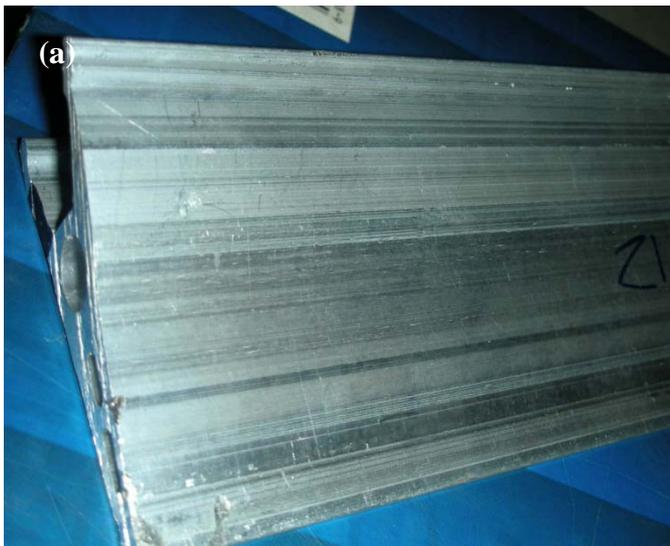
采用在560°C下直接渗氮12小时的等温渗氮法（氨分解率为35%）取代原来的两段渗氮法，即先在380°C下渗氮0.5小时（氨分解率24%），再在510°C下渗氮8个小时（氨分解率50%）。

### 渗氮结果

经渗氮工艺改进后，H13钢挤压模具表面渗氮层厚度由原来的31 $\mu$ m增加到0.22mm，且形成致密氮化物层；表面硬度由51HRC提高到67HRC。

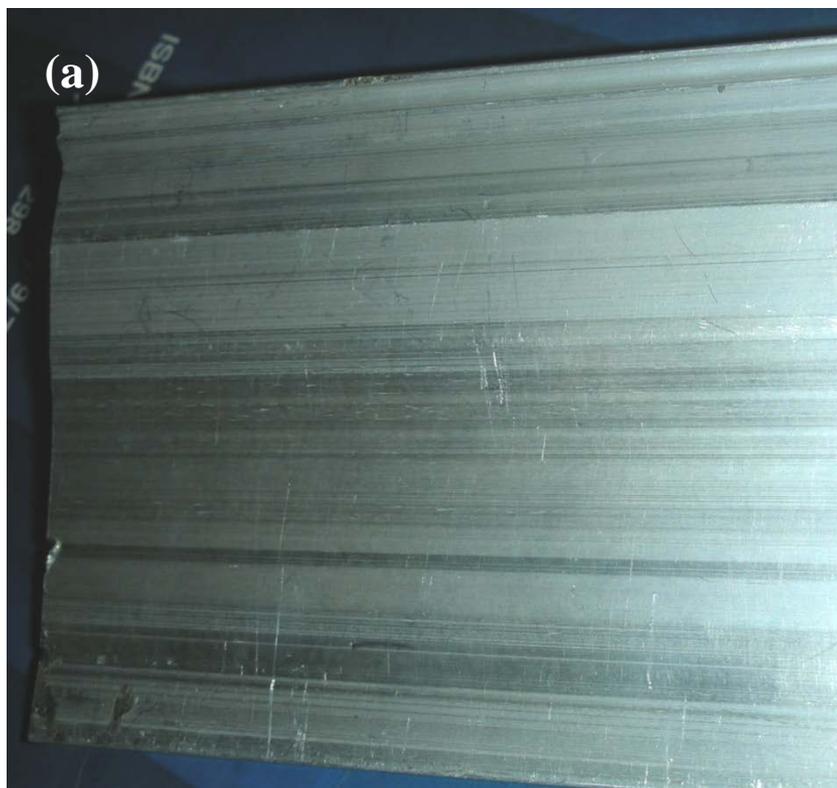


## 五、改进后工艺的试生产



试生产的四种6061散热铝型材的外观

## 五、改进后工艺的试生产



改进前、后两种工艺下型材的表面细节图

(a) (b) 优化后 (c) 优化前

**经工艺改进后，型材表明平整，划痕很少，表面质量较好。**



## 五、改进后工艺的试生产

### 性能测试

新工艺条件下四种型材的性能测试结果如右表所示。由表可知，四种型材的抗拉强度、伸长率和热导率均能达到客户的要求。

试样类型	试样编号	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%	热导率 /W · (m · K) <sup>-1</sup>
1	1-1	312	14.8	176
	1-2	319	14.6	175
	1-3	307	15.2	178
	平均	313	14.9	176
2	2-1	301	15.7	180
	2-2	315	14.8	175
	2-3	308	15.0	176
	平均	308	15.2	177
3	3-1	330	13.7	168
	3-2	329	13.5	168
	3-3	314	14.3	172
	平均	324	13.8	169
4	4-1	315	15.0	176
	4-2	337	13.6	167
	4-3	340	13.2	164
	平均	331	13.9	169
	客户要求	300	11.5	165

## 六、总结与思考

(1) 问题型材中的杂质总含量为 $0.195\text{mm}^2/\text{kg}$ ，达不到客户的要求。杂质中镁的化合物 ( $\text{MgO}$ 、 $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) 具有特殊的形态和较高硬度，易划伤模具工作带而降低型材的表面质量。型材中还存在较多大块状、不均匀分布的 $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$ 硬脆相。

(2) 对**熔体净化工艺**进行的优化主要体现在三个方面：保温炉内采用 $\text{N}_2+\text{C}_2\text{Cl}_6$ 喷粉净化代替原来的 $\text{CCl}_4$ 泡沫砖净化；将DFU单旋转石墨喷头在线除气装置改成双旋转喷头装置；将原来的泡沫陶瓷单级过滤器 (30ppi) 改成泡沫陶瓷双级复合过滤器 (20/40ppi)。经工艺改进后，熔体中的杂质总含量仅为 $0.016\text{mm}^2/\text{kg}$ ，达到了客户的要求，且其中对表面质量影响较大的硬质 $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 和 $\text{MgO}$ 颗粒大大减少。

(3) 经**渗氮工艺改进**后，H13钢挤压模具表面渗氮层厚度由原来 $31\mu\text{m}$ 增加到 $0.22\text{mm}$ ，表面硬度由51HRC提高到67HRC。

(4) 采用改进后的工艺试生产的型材表明光洁，划痕很少，且其热导率和力学性能均满足高端客户的要求。



## 六、总结与思考

### ◆ 引申思考:

本案例详细描述了铝型材企业的一个典型综合性工程技术问题的分析与解决方案。该案例有力印证了行业中的一种共识,即金属材料加工产品的质量问题的,大部分与其坯料的冶金质量有关。由此进一步启发我们的大学生和行业工程技术人员,应高度重视熔炼与铸造环节的工艺控制。然而,问题的解决方案并不是仅仅从熔铸入手,提高挤压模具表面硬度,同样可以改善铝型材的表面质量。关于挤压模具(H13 钢)的表面强化技术,目前已研发形成离子镀膜、气体软氮化、多元共渗等多种先进技术,甚至通过模具结构改进和选材,实现模具“免氮化”。这些先进技术和创新思路,正是铝型材行业的工程技术人员应掌握的核心知识。可见,要想成为铝加工行业的顶级技术专家,不仅需要长期深入生产现场,不断积累实践经验,而且还需要持续学习,紧跟科技前沿,融通理论与实际。

### ◆ 深入思考:

- 铝熔体中的C、N有何影响?
- 铝熔体在线净化技术还有哪些?
- 还有哪些技术可以实现挤压模具表面强化?
- 是否可以实现挤压模具“免氮化”处理?



谢谢!

