

低成本汽车轻量化用铝合金压铸结构件的 工艺开发

长安汽车制造中心总工程师：泉城弘毅

2019年9月 26日



目录 table of contents

1 项目背景

2 低成本汽车轻量化铝合金结构件的要求

3 低成本铝合金减震塔开发案例

项目简介

- 名称：科技部“新能源汽车”试点专项6.2“轻量化纯电动轿车集成开发技术”
- 周期：2016-2020
- 团队：长安牵头+12家单位
- 目标：车身与底盘共计减重 $\geq 30\%$ 、C-NCAP五星、最高车速 $\geq 150\text{km/h}$ 、续航里程 $\geq 300\text{km}$
- 策略：低成本碳纤维车身、闭合件+铝、镁、高强车架及零部件

目录 table of contents

1 项目背景

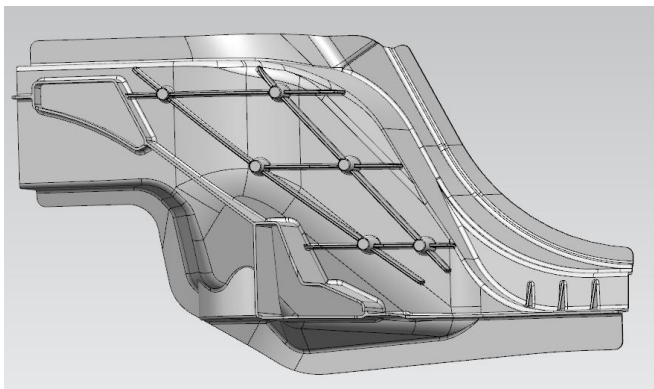
2 低成本汽车轻量化铝合金结构件要求

3 低成本铝合金减震塔开发案例

2.1 汽车结构件要求

- 轻量化结构：薄壁 $\leq 3\text{mm}$ 、大尺寸 $\geq 1000\text{mm}$
- 机械性能：碰撞安全和连接（铆接），延伸率 $\geq 10\%$ ，一般压铸铝合金 \times
- 内部质量：满足焊接、铆接、热处理（T6），铸件内部含气量 $\leq 3\text{cc}/100\text{gAl}$

减重？%
成本达到钢制
件水平



薄、大、结构复杂

产品	屈服强度 Mpa	抗拉强度 Mpa	延伸率 %
结构件	≥ 120	≥ 180	≥ 10
缸体 (F)	115-130	130-160	0.5-1.2
缸体 (T5)	135-160	170-200	1-1.5

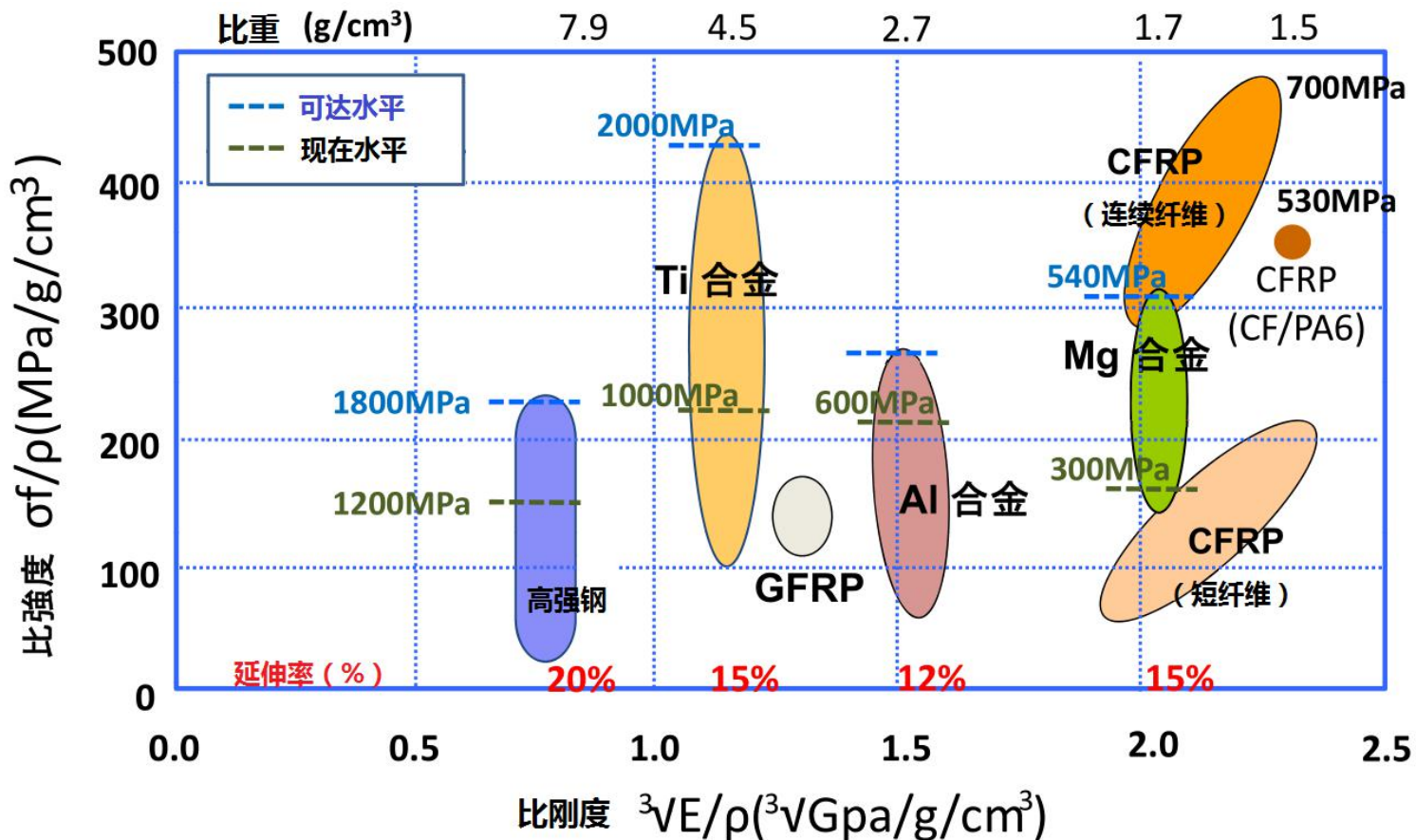
机械性能



焊接、铆接

2.2 工艺路线选择

2.2.1 结构件材料选择→轻量材料



汽车结构件材料选择

- 1, 碳纤维比强度、比刚度高但各向异性、压缩强度低, 不可用
- 2, 镁合金较铝合金比刚度、比强度高, 但疲劳强度低, 暂不可用于结构件, 有待开发
- 3, 铝合金用于结构件较成熟, 但需要成本控制

2.2 工艺路线选择

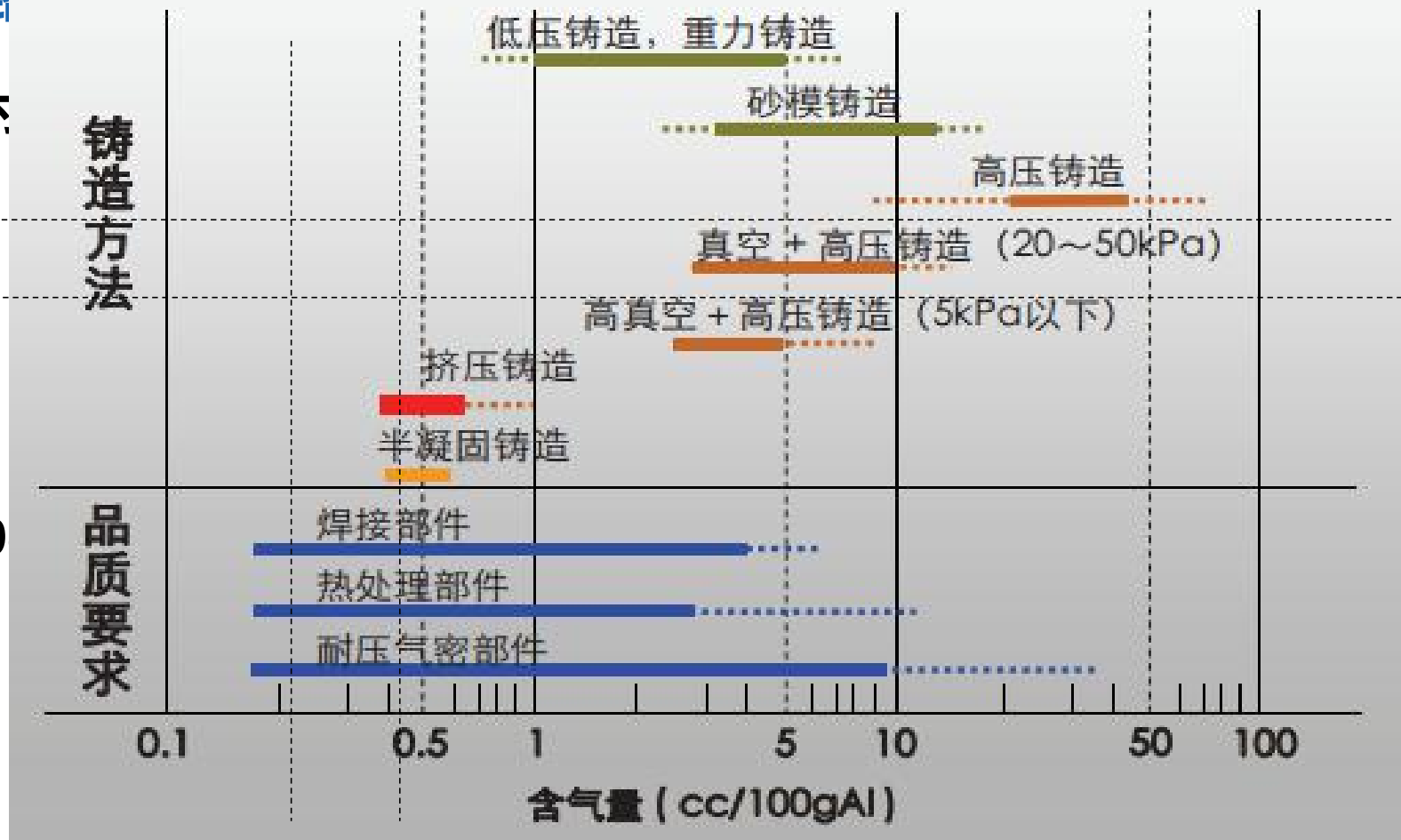
2.2.2 铝合金结构件的工艺路线

➤ 复杂、薄壁 $\leq 3\text{mm}$ 、大尺寸

➤ 延伸率 $\geq 10\%$

➤ 铸件内部含气量 $\leq 3\text{cc}/100$

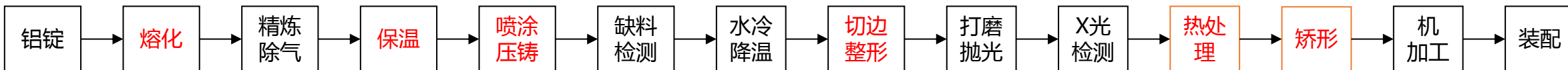
各种铸造工艺下的铸件含气量比较



2.2 工艺路线选择

2.2.2 铝合金结构件的工艺路线

➢ 高真空压铸工艺质量控制（红字工序设置质量门）：



➢ 工艺难点及工艺质量保障：

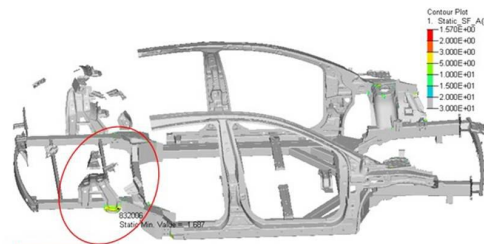
工艺项	现工艺	新工艺要求	难点分解	工艺保障措施
铝合金材料	牌号： ADC12	牌号： AlSi10MgMn	1.常规牌号不可用>验证新材料 2.铝液质量要求较常规材料高 3.成分控制严格，其Fe含量 < 0.2%	1. 新材料的铸造性能和机械性能验证； 2. 开发非热处理材料 3.铝液精炼、除气、保温过程严控Fe含量，提高检测频率，保证铝水质量
模具方案设计	普通压铸模具 (缸体)	高真空压铸模具 (车身结构件)	1.产品薄、结构复杂>充型困难，容易变形 2.模具要求高真空>密封设计 3.模具温度平衡设计难度大>油温	1.产品开发时协同设计，CAE分析验证浇注系统、充填顺序及凝固补缩合理性； 2.与有经验的模具厂家共同开发
压铸工艺	真空度： < 500mbar 模具温度： 150-300℃	真空度： < 50mbar 模具温度： 190-230℃	1.铝液质量持续保证 2.生产中高真空控制 3.压铸过程中模温稳定控制 4.铸件内部质量监控	1.使用定量保温炉进行铝液保温； 2.采用压室与模具共同抽真空方式保证高真空； 3.压铸过程对关键工艺参数进行重点监控。
热处理及矫形工艺	热处理：T5 矫形：无变形	T6/T7（风淬） 处理 需变形矫正	1.热处理工艺选择和工艺稳定性控制 2.薄壁且尺寸大>热处理中产品变形的控制 3.变形后>如何矫形	1.前期采用压铸试片进行热处理性能验证； 2.样件调试时进行多轮验证，找出热处理变形规律。 3、根据变形规律设计反变形热处理夹具。

目录 table of contents

1 项目背景

2 低成本汽车轻量化铝合金结构件要求

3 低成本铝合金减震塔开发案例


金属车架

元/件


目标:
≤125元/件

节拍90s, 年产30万件 (2件/模)
 ←250天/年, 15小时/天
 材料: 2.6kg × 20元/kg = 52元
 (废料回收, 计入能耗)
 设备: 投影面积 → 2700T (进口), 4000万元, 维护4000万元, 10年折旧 → 8000万 / (10年 × 30万件) = 26.67元/件
 模工装500万元 (含维护), 寿命15万件 (模框模芯平均)
 500万元 / 15万件 = 33.33元
 能耗按3.7元/kg × 4.559kg (单件废料(1.805+0.154)kg) = 16.86元
 废件损失按30%计算

3.1 低成本思路

技术降本目标测算

项目	现单件成本	含废成本	含废占比 (%)	降本措施	目标含废成本
设备	26.67	38.10	22.17	<ul style="list-style-type: none"> 降低铸造压力小型化, 设备 2700T → 2000T 模具 ↓ 10% 设备国产化 ↑ 材料利用率 提升良品率 70% → 95% 非热处理材料 取消热处理减1000万元, 小型国产化减500万元, 良品率 70% → 95%	22.82
工模具	33.33	47.62	27.72	<ul style="list-style-type: none"> 提高模具寿命 标准化、系列化 快速换模、维护保养 降低铸造压力 → 模具 ↓ 10% 提升良品率 70% → 95% 寿命提升10%, 良品率 70% → 95%	31.82
能耗	16.87	24.10	14.03	<ul style="list-style-type: none"> 保温涂料 提升良品率 70% → 95% 提高液位控制精度, 小型化 ↑ 材料利用率 能耗降10%, 良品率 70% → 95%	16.28
人工辅料	7.00	10.00	5.82	<ul style="list-style-type: none"> 精益生产 库存等节约5%, 良品率 70% → 95%	6.98
小计	83.87	119.81			77.89
材料	52.00	52.00	30.27	<ul style="list-style-type: none"> 材料国产化 提升良品率 70% → 95% 国产降10%	46.80
合计	135.87	171.81			124.69

3.1 低成本思路

技术研究思路

- 高精度铸造CAE→工艺参数优化+高真空→减少铸孔→降低铸造压力→铸造设备+模具小型化
设备2700T→2000T+模具→↓设备+模具成本
- 工艺参数优化+产品优化设计→提高良品率 70%→90%
- 加强设备维护管理→减少设备故障→国产化 降本>10%
- 开发非热处理压铸铝合金→降低原材料成本 降本10%
- 开发非热处理压铸铝合金→取消热处理工序、简化矫形→减少固投+能耗
- 3D打印水道镶块→提高温度控制精度→提高良品率+模具设备小型化
- 模具维护保养+表面处理+快速换模技术→提高模具寿命 ↑10%
- 模具标准化、系列化+快速换模技术→延长模框寿命→降低模具成本 ↓50%
- 保温涂料→降低能耗 能耗降低>10%
- 精益生产→降低库存+提升良品率 降库存5%

3.2 铸造材料开发

国产材料
↓10%

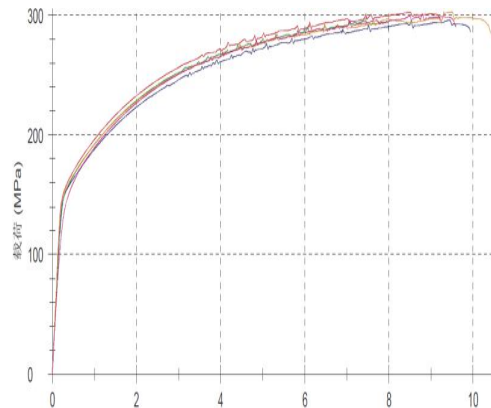
材料

多轮多批次压铸试验

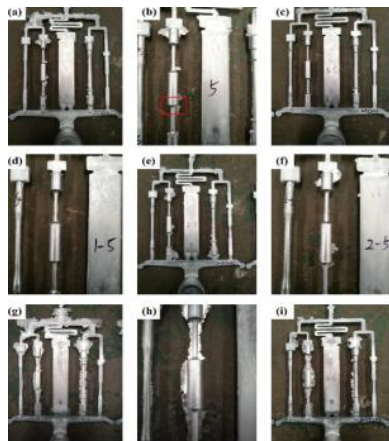
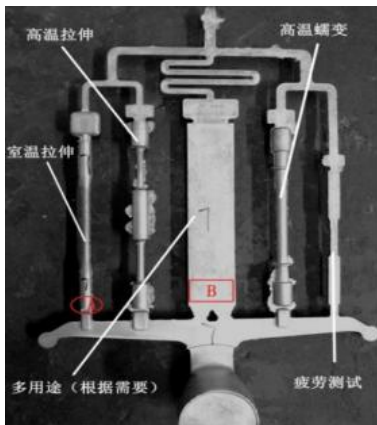
铸造、机械性能测试

结论：目标达成

Al-Mg
系非热处理高强韧压铸铝合金
Al-6.5Mg-0.6Si-0.6Cr-0.5Cu
(专利)



第三方检测主要结论
 密度：2.63 (g/cm³)
 弹性模量：70-80 (KN/mm²)
 抗拉强度：300-330 (MPa)
 屈服强度：160-180 (MPa)
 延伸率：10-14 (%)
 硬度/HV0.2：80-85
 盐雾试验：通过
 疲劳试验：优于Silafont-36



3.3 铸造CAE计算精度提升

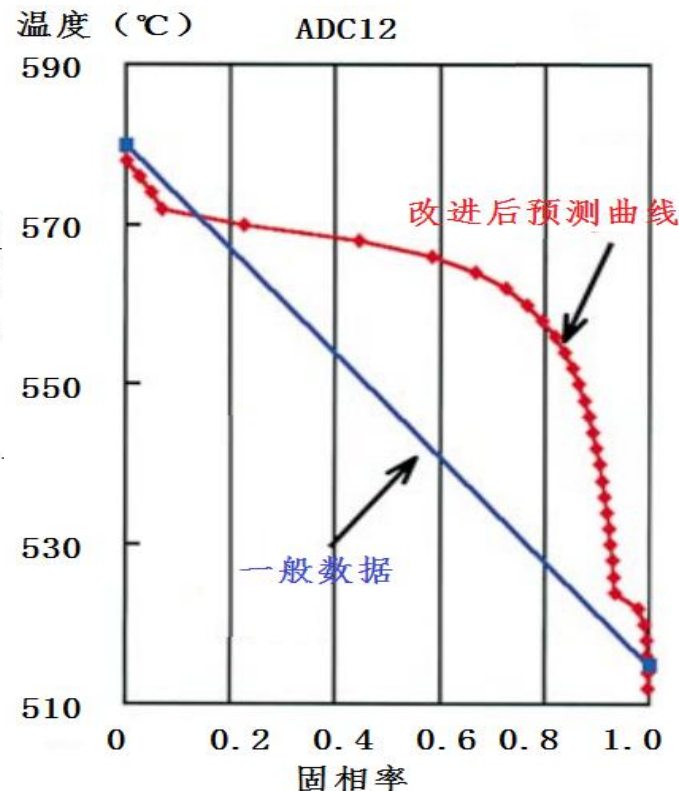
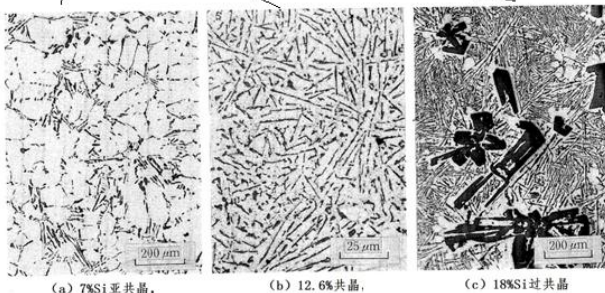
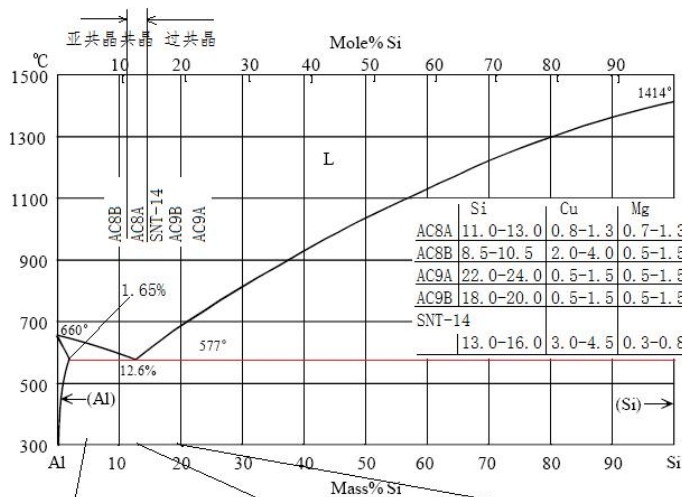
铸造CAE计算公式Navier-Stokes方程

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 v + g \quad (1)$$

①Time ②Velocity ③Pressure ④Viscosity ⑤Gravity

- 1, 动粘性系数 ν ✗
- 2, 流动停止 ✗
- 3, 溶液-模具热传导 ✗
- 4, 网格-实际 ✗
- 5, 模具状态等 ✗

☆ 计算不准! → 修改参数



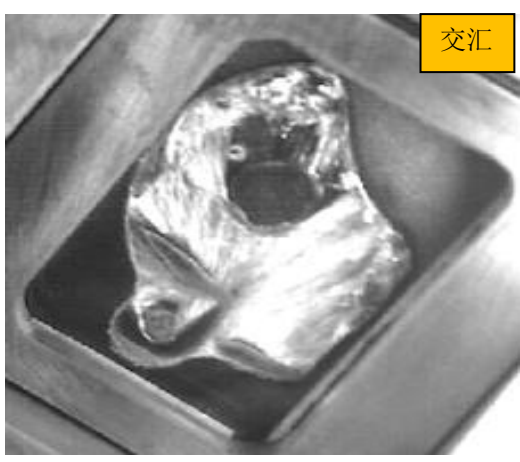
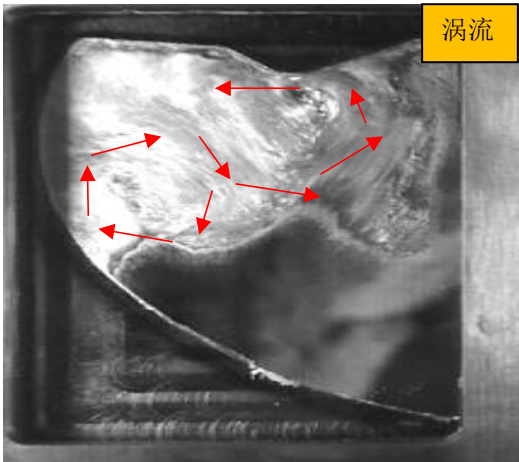
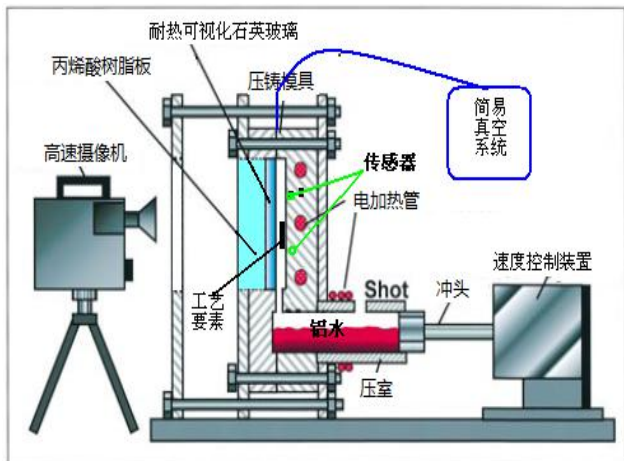
$$T = T_f - \sum a_j C_{0j} (1 - f_s)^{k_j - 1}$$

T: 温度; T_f : 熔点 (纯铝660°C); a_j : 液相线下下降系数; C_{0j} : 液体初始扩散; f_s : 固相率; k_j : 平衡分配系数 = $(C_s/C_L) < 1$ (铝合金)

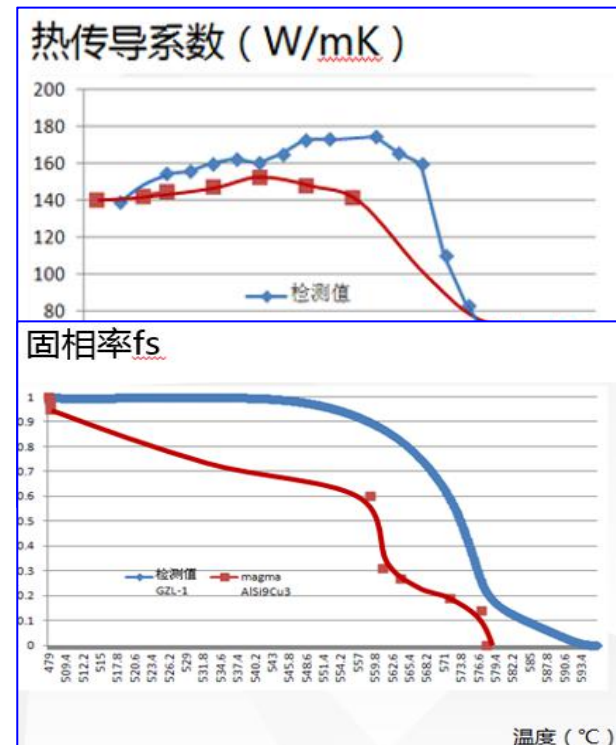
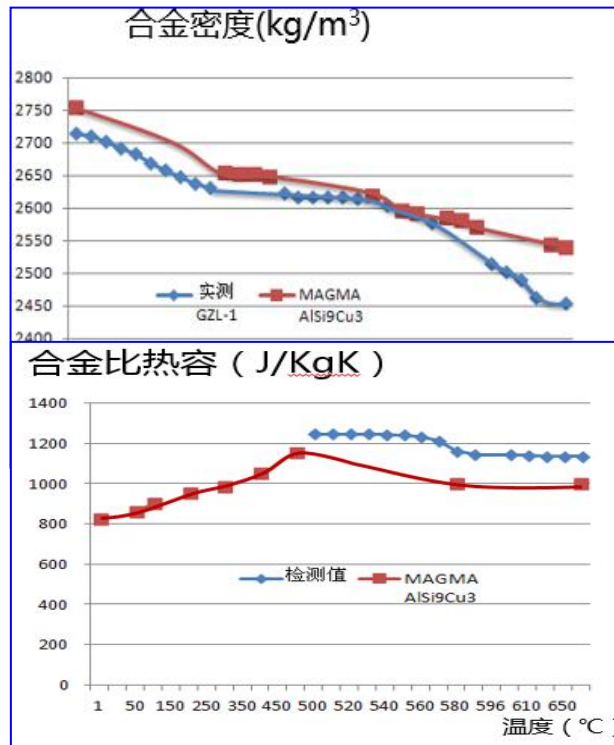
C_s : 固体极限扩散 C_L : 液体极限扩散

3.3 铸造CAE计算精度提升

精度 50%



实际物性参数测试



+ 温度场、CT扫描缺陷对标

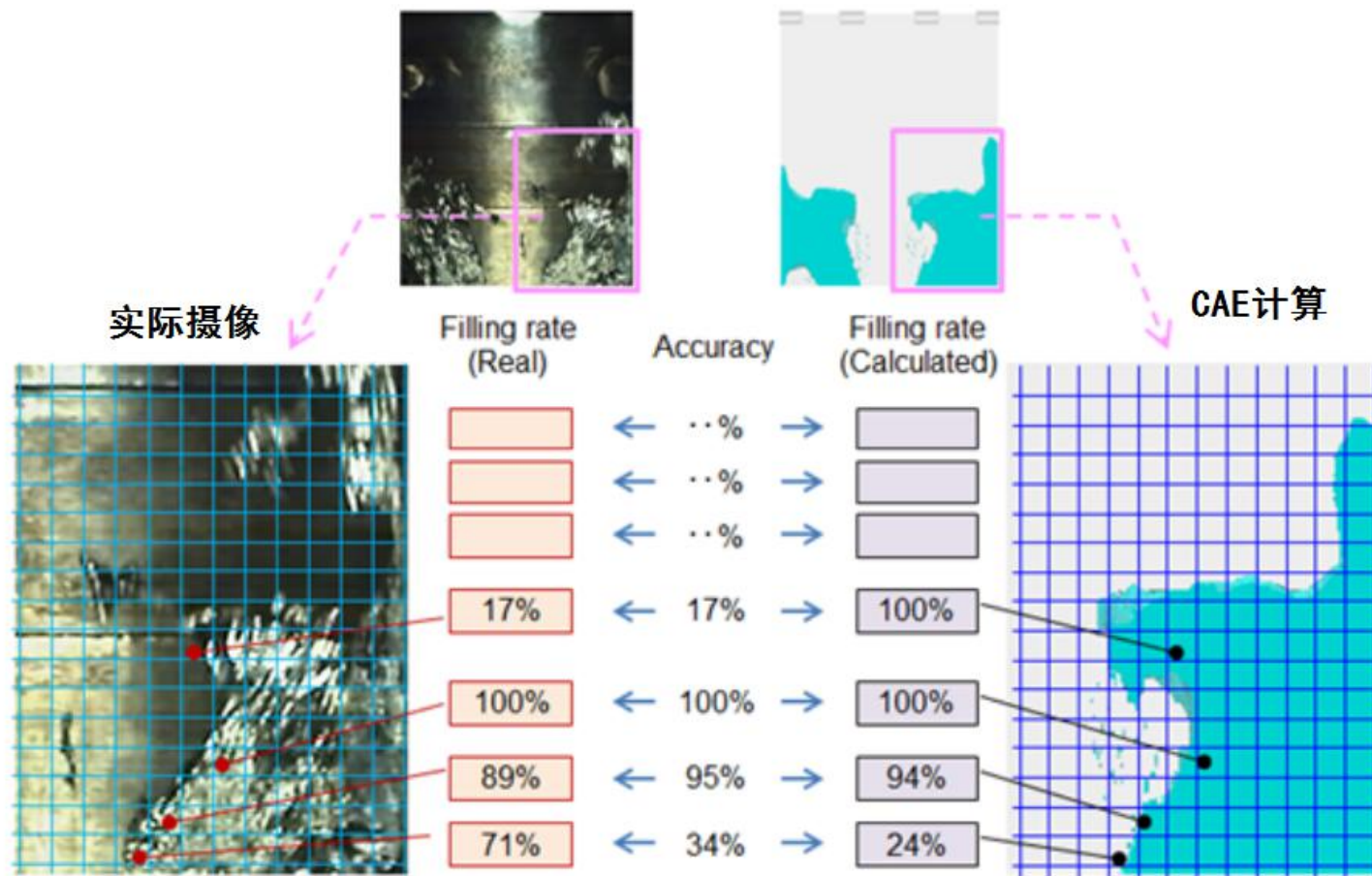
精度提升

>85%

3.3 铸造CAE计算精度提升

冲型计算精度评价

- ◆ 对同一时间的分解照片按相同坐标分区
- ◆ 分别计算各区的充填率，未冲型处为0%，充满处100%，其余按面积占比计算
- ◆ 将两种合计值进行对比，计算一个网格的精度，取平均值作为最终计算精度

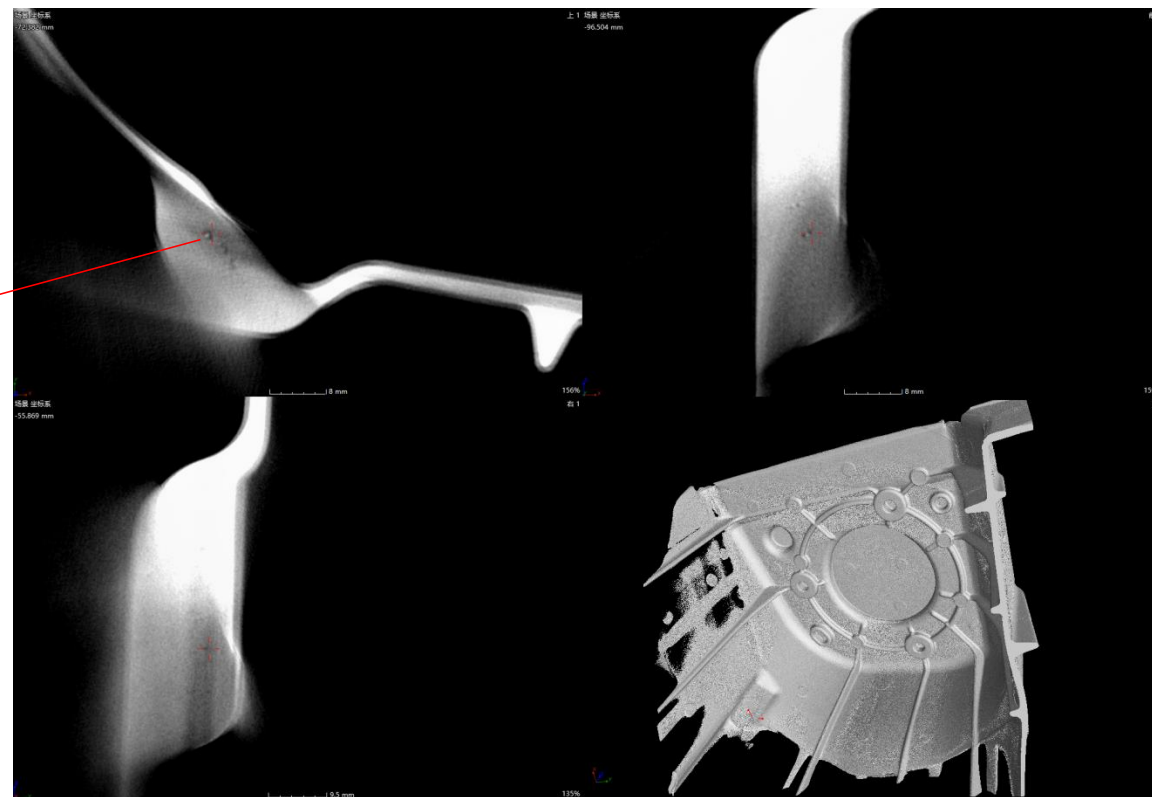
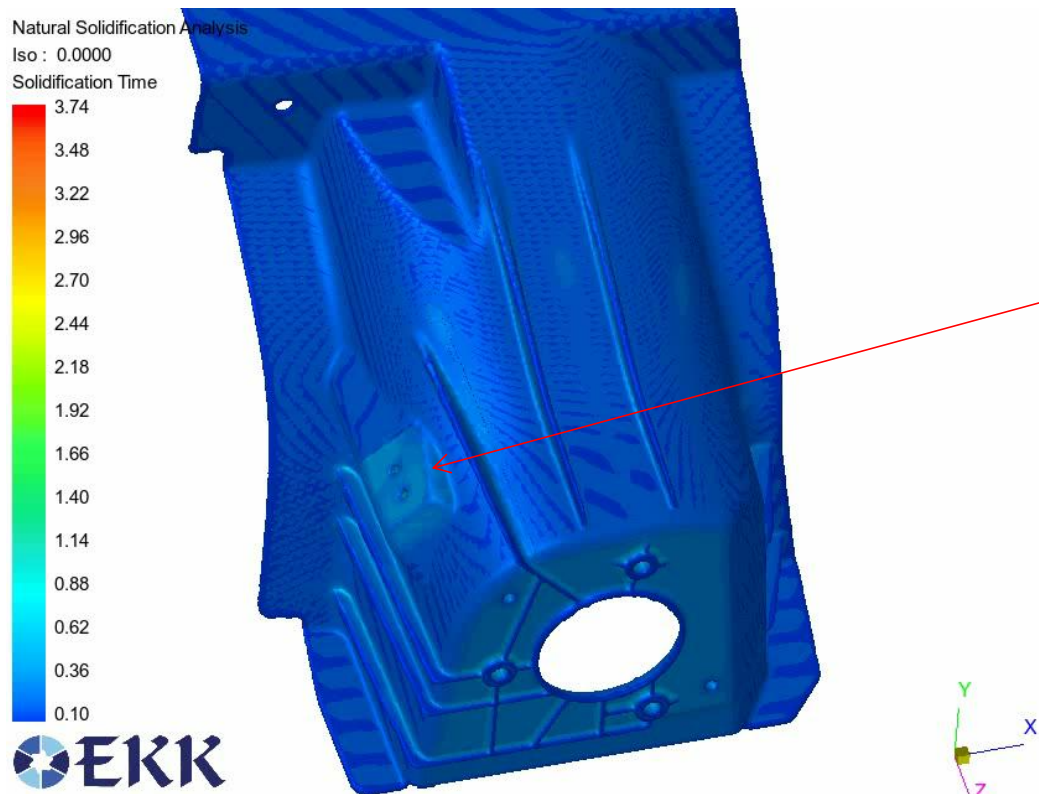


冲型CAE计算精度的评价方法

3.3 铸造CAE计算精度提升

凝固计算精度评价

◆ 缩孔缺陷位置、大小、数量：
热节风险与实际产品

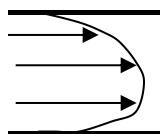


产品CT扫描

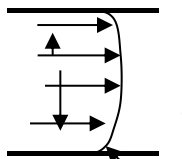
3.3 铸造CAE计算精度提升

充型过程的基本现象（流动、传热、凝固）

低压、重力铸造

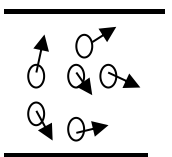


层流
(速度同方向)

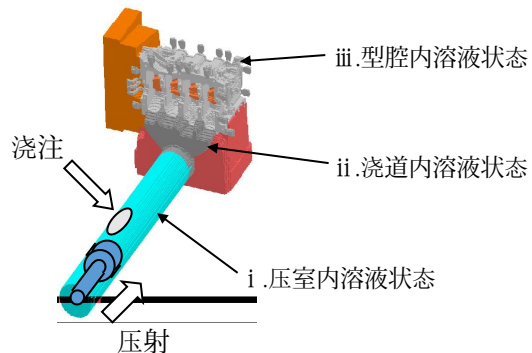


紊流
(有横向流动)

表面接触
面积增大



飞散喷射
(颗粒分散各向
运动、雾化等)



浇道部
之前

至内浇口充满可认为是连续液体
(伯努利原理)

型腔充填

从内浇口出来至型腔充满的过程

型腔加压

剩下没有充满的部分通过加压成形

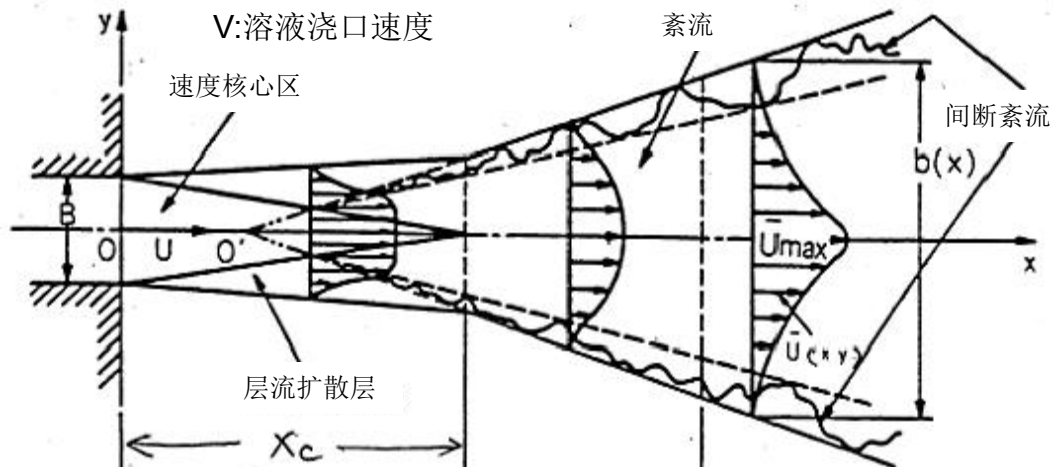
$$J=D*M*V^{1.71}$$

D:内浇口系数=内浇口断面积/(口深+总长)

喷射

M: 溶液密度

V: 溶液浇口速度



领域1

领域2

领域3

(存在速度核心区)

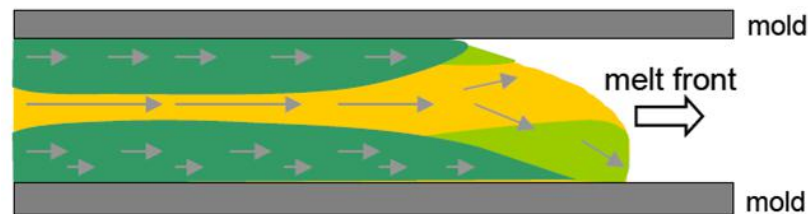
(速度分布变动)

(速度分布相似)

雷诺数

$$Re_{xc}=Vx/C=7*10^4$$

(临界雷诺数)

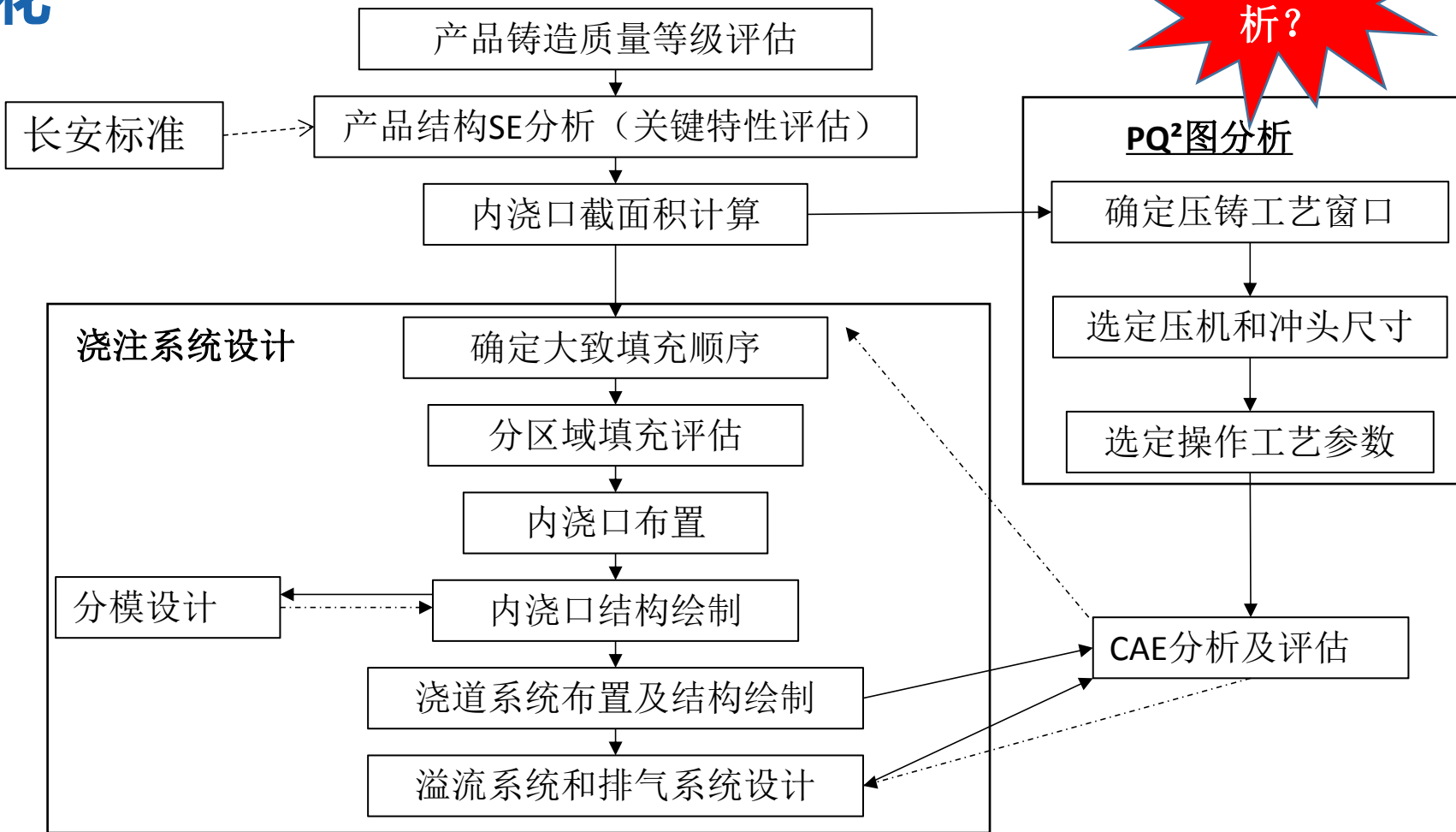


low < high fraction solid

Schematic drawing of velocity profile and narrowing the flow channel.

3.4 铸造方案优化

模具设计流程图

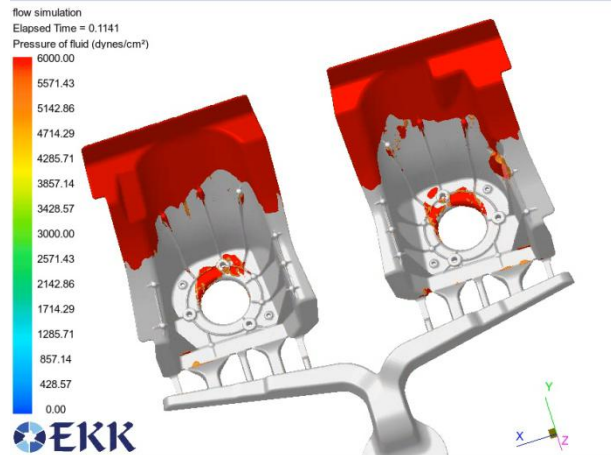


自动SE+分析?

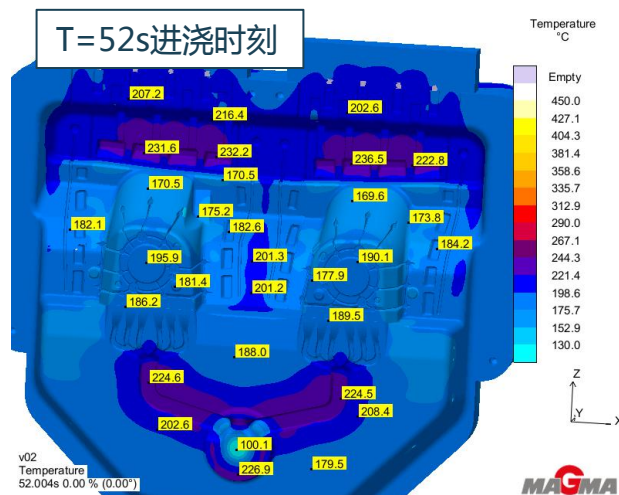
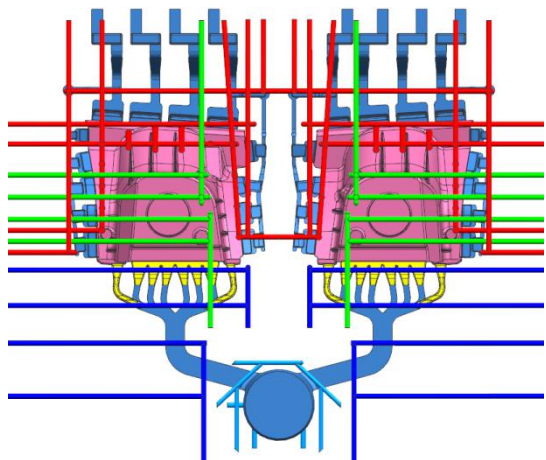
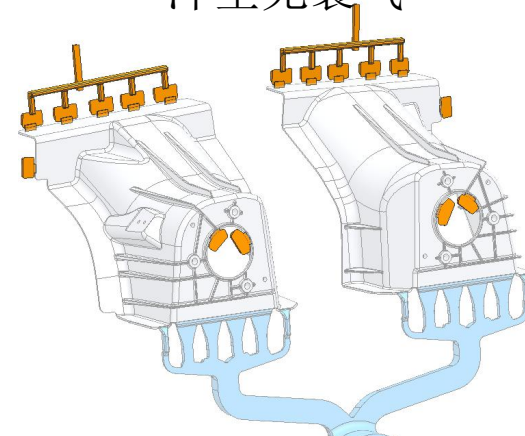
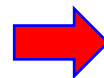
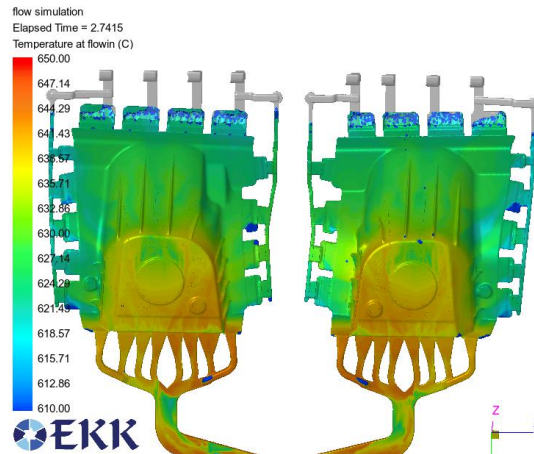
自动分析?

遗传算法优化方案?

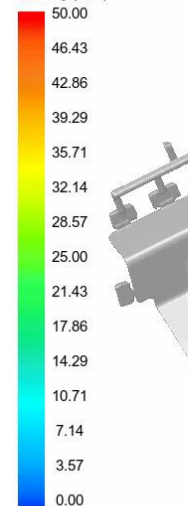
3.4 铸造方案优化



多轮方案优化



flow simulation
Elapsed Time = 3.0580
Velocity (m/s)

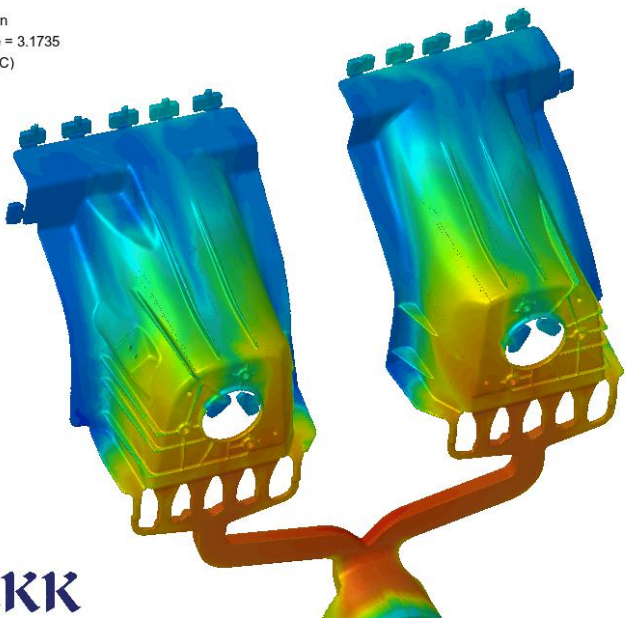


3.4 铸造方案优化

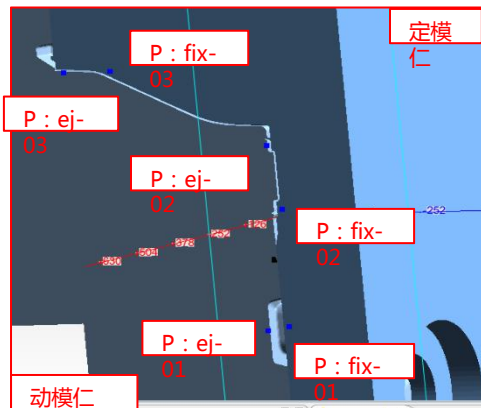
模拟多轮铸造过程
基本实现顺序凝固

flow simulation
Elapsed Time = 3.1735

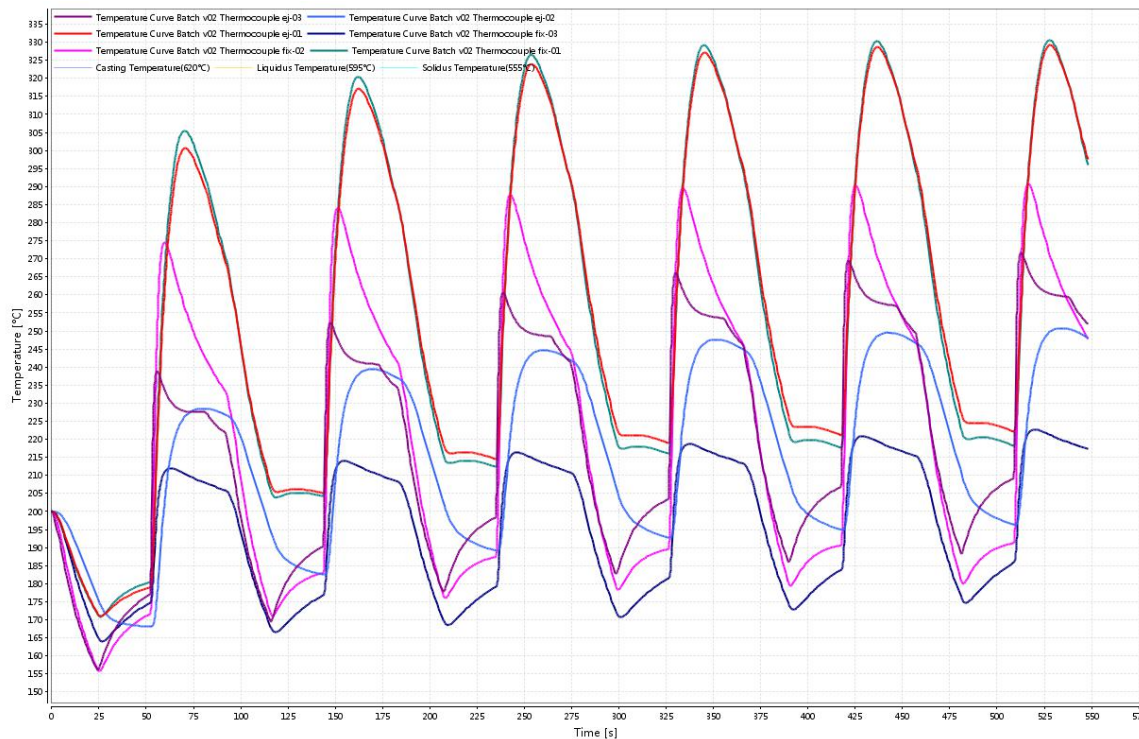
Temperature(C)



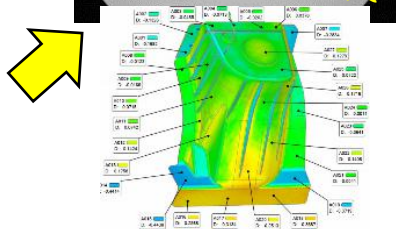
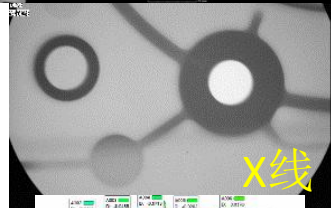
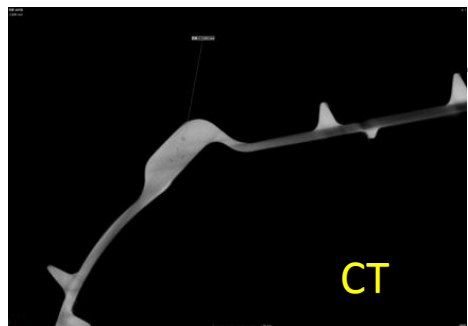
模具不同位置测温点



温度变化与实际生产过程吻合



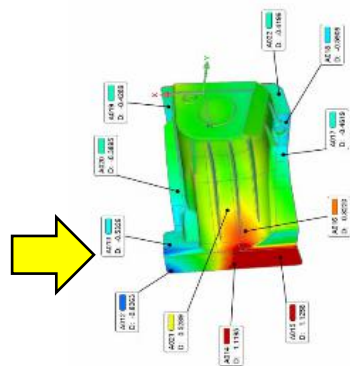
3.5 铸造结果



缺陷、尺寸检测



热处理、工艺验证



抗拉强度MPa	规定非比例延伸强度MPa	断后伸长率%
190	127	11.0
186	119	13.0
189	113	15.5
190	184	16.0
192	134	15.5
197	134	18.5
184	125	16.0
189	131	15.0
189.6	133.4	15.1

尺寸、性能检测 (延伸率11-18.5%)

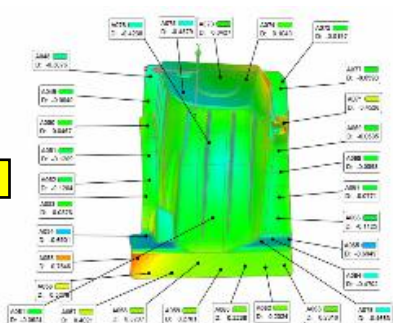


国产设备、模具
铸造、工艺验证

SCIVEDA	产品编号 Name	03	0385或类似(空)	SD 激光检测	Sample No	合格	不合格
4	图样尺寸 198C	基本尺寸	公差	测量方法	量具	实测值	公差
5	Diam	mm	±	游标卡尺	0.02	0.10	0.14
6	0.5	0.00	0.26	0.26	A	0.15	0.10 0.14
7	0.5	0.00	0.26	0.26	A	0.23	0.25 0.17
8	0.5	0.00	0.26	0.26	A	0.01	0.14 0.20
9	870	111.00	10.00	10.10	A	10.09	10.09 10.07
10	0.14	0.00	-0.50	0.50	A	0.14	0.05 0.13
11	0.14	13.00	14.00	14.10	A	14.10	14.10 14.08
12	0.14	0.00	-0.50	0.50	A	0.04	0.05 0.23
13	870	113.00	13.00	13.10	A	13.06	13.06 13.08
14	0.14	0.00	0.50	0.50	A	0.13	0.14 0.20

3坐标检测

连接、DV



3D尺寸检测



矫形 (手工)、机加

3.6 低成本化进展

元/件

项目	现单件成本	含废成本	含废占比 (%)	降本措施	目标含废成本	当前状况	
设备	26.67	38.10	22.17	<ul style="list-style-type: none"> 降低铸造压力小型化, 设备2700T→2000T 设备国产化 ↑材料利用率 提升良品率70%→95% 非热处理材料 	取消热处理减1000万元, 小型国产化减500万元, 良品率70%→95%	22.82 国产设备、非热处理材料、良品率90%	25.92
工模具	33.33	47.62	27.72	<ul style="list-style-type: none"> 提高模具寿命 标准化、系列化 快速换模、维护保养 降低铸造压力→模具↓10% 提升良品率70%→95% 	寿命提升10%, 良品率70%→95%	31.82 提高模具寿命、良品率90%	34.72
能耗	16.87	24.10	14.03	<ul style="list-style-type: none"> 保温涂料 提升良品率70%→95% 提高液位控制精度, 小型化 ↑材料利用率 	能耗降10%, 良品率70%→95%	16.28 保温涂料、良品率90%	17.73
人工辅料	7.00	10.00	5.82	精益生产	库存等节约5%, 良品率良品率70%→95%	6.98 库存、良品率90%	7.38
材料	52.00	52.00	30.27	<ul style="list-style-type: none"> 材料国产化 提升良品率70%→95% 	国产降10%	46.80 材料国产、良品率90%	49.40
合计	135.87	171.81				124.69	135.15

3.7 今后计划

- 连接实验
- DV试验
- 国产非热处理材料试验及批量应用
- 降低铸造压力优化试验
- 模具标准化、系列化、开发快速换模技术、提高模具寿命技术
- 优化工艺提升良品率 $\geq 95\%$
- 批量生产验证
- 优化缺陷标准

谢谢！

Thank You !

