

团 体 标 准

T/CESA XXXX—202X

单晶炉热平衡和热效率及综合能耗的计算 方法

Calculation method of thermal equilibrium, thermal efficiency
and comprehensive energy consumption for silicon single crystal grower

征求意见稿

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。
已授权的专利证明材料为专利证书复印件或扉页，已公开但尚未授权的专利申请证明材料为专利公开通知书复印件或扉页，未公开的专利申请的证明材料为专利申请号和申请日期。

202X-XX- XX 发布

202X-XX- XX 实施

中国电子工业标准化技术协会 发布



版权保护文件

版权所有归属于该标准的发布机构，除非有其他规定，否则未经许可，此发行物及其章节不得以其他形式或任何手段进行复制、再版或使用，包括电子版，影印件，或发布在互联网及内部网络等。使用许可可于发布机构获取。

目 次

前 言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 热平衡测试与计算基准 1

4 测定项目及测定方法 1

5 物料平衡计算方法 2

6 热平衡计算方法 3

7 热效率计算方法 8

8 综合能耗计算方法 8

前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009《标准化工作导则：标准化工作导则 第1部分 标准的结构和编写》给出的规则起草。

注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由工业和信息化部节能与综合利用司提出。

本标准由中国电子技术标准化研究院归口。

本标准起草单位：

本标准主要起草人：

单晶炉热平衡和热效率及综合能耗的计算方法

1 范围

本标准规定了单晶炉热平衡、热效率和综合能耗的计算方法。

本标准适用于单晶硅棒生产工序的单晶炉热平衡、热效率及综合能耗的计算。对于其它类型的电阻炉热平衡、热效率及综合能耗的计算可参照采用本标准。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2589 综合能耗计算通则

3 热平衡测试与计算基准

物料平衡和热平衡计算单位

物料平衡、热平衡的计算单位分别为kg、kJ。

基准温度与基准压力

以单晶炉车间内的环境平均温度为基准温度。

基准压力为1个标准大气压，即101325 Pa。

热平衡测试范围

以单晶炉炉体为边界，即炉体外壳、进气口端口及真空管道排气端口为边界设定的热平衡系统。

热平衡测试工况和测试频次

单晶炉至少正常运行一个生产周期后方可进行测试，每次测试要覆盖一个完整的生产周期，且测试次数不低于2次。

4 测定项目及测定方法

测定前的准备

4.1.1 准备好测定用仪表；进行必要的校正，使之达到规定的精度。

4.1.2 布置测量点，开设测量孔，安装测量仪表，进行单项检测。

热平衡方框图

4.2.1 单晶炉的热平衡如图 1 所示。

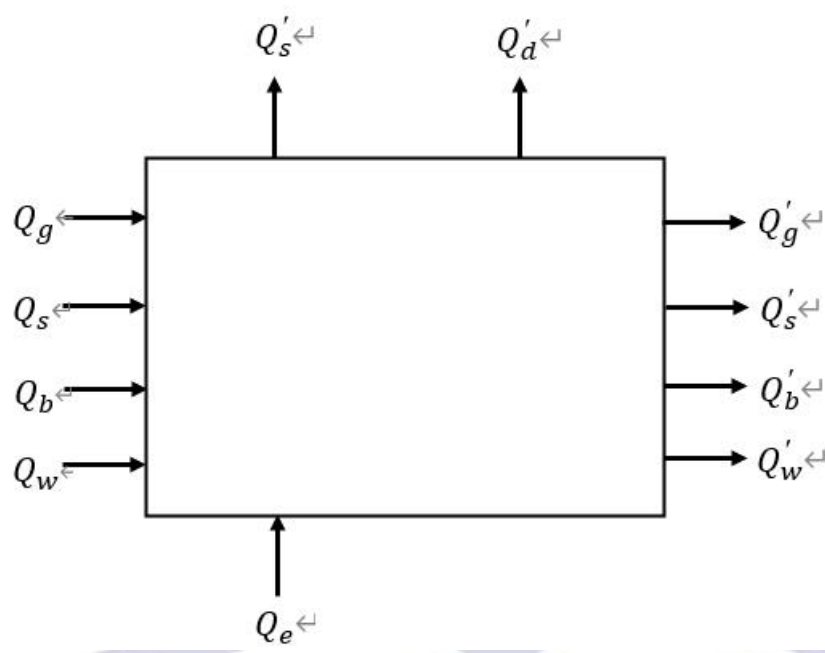


图 1 热平衡方框图

注：

收入热量（kJ）：

- | | | |
|--------------------|-----------------------|---------------------|
| Q_g ——入炉气体带入的显热； | Q_s ——入炉多晶硅原料带入的显热； | Q_b ——入炉加料管带入的显热； |
| Q_e ——电加热的输入热量； | Q_w ——进口冷却水的显热。 | |

支出热量（kJ）：

- | | | |
|---------------------|-----------------------|----------------------|
| Q'_g ——出炉气体带出的显热； | Q'_s ——出炉单晶硅棒带出的显热； | Q'_b ——出炉加料管带出的显热； |
| Q'_w ——出口冷却水的热量。 | Q'_i ——壁面热损失； | Q'_d ——炉体孔口热辐射损耗。 |

4.2.2 单晶炉体系的划分，以炉体外壳和端口为界，气体以离炉体进出口最近的测点为界。

测定时间

在生产稳定的条件下，总连续测定时间不少于一个生产周期。
注：生产周期是指从设备二次加料状态开始，完成一个完整二次加料工艺后重新回到二次加料初始状态的时间。

测定项目

测定项目包括温度、气体成分、电加热功率、质量。

温度项目：进口气体温度 t_g 、出口气体温度 t'_g 、入炉多晶硅原料温度 t_s 、出炉硅单晶棒温度 t'_s 、入炉加料管温度 t_b 、出炉加料管温度 t'_b 、进口冷却水温度 t_w 、出口冷却水温度 t'_w 、第i段炉体结构外壁面的温度 t_{cir} 、环境温度 t_a 。

气体成分及其质量浓度项目：进口气体组分及每个组分气体对应的质量浓度、出口气体成分及每个组分气体对应的质量浓度。

电加热功率：电加热功率 P_{ei} （炉体沿轴向分段加热， i 代表第 i 段电加热的功率）。

质量测定项目：进口气体质量流量 $\dot{m}_g$ 、出口气体质量流量 $\dot{m}'_g$ 、冷却水质量流量 $\dot{m}_w$ 、入炉多晶硅原料质量 m_s 、出炉硅单晶棒质量 m'_s 。

5 物料平衡计算方法

物料平衡图

见图2。

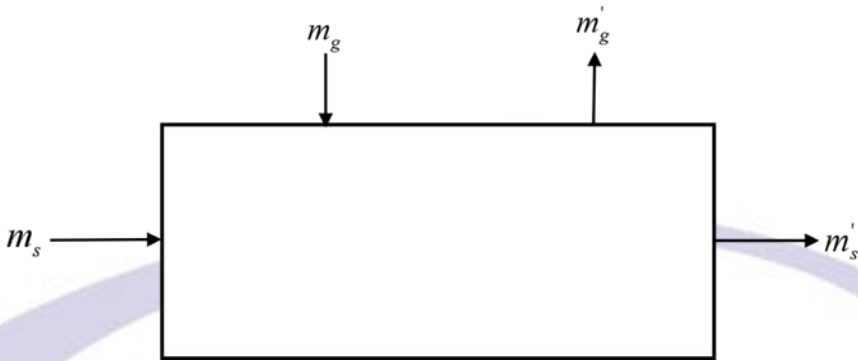


图 2 物料平衡图

收入项

5.2.1 入炉多晶硅原料质量 m_s

单位为千克（kg）。

5.2.2 入炉气体质量 m_g

单位为千克（kg），按公式（1）计算：

$$m_g = \Delta\tau \times \sum \dot{m}_{g\tau} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$\dot{m}_{g\tau}$ ——时刻 τ 的进口气体质量流量，单位为千克每秒（kg/s）；

$\Delta\tau$ ——在线数据采集仪器的数据采集时间间隔，单位为秒（s）。

支出项

5.3.1 出炉硅单晶棒质量 m'_s

单位为千克（kg）。

5.3.2 气体出炉质量 m'_g

单位为千克（kg），按公式（2）计算：

$$m'_g = \Delta\tau \sum \dot{m}'_{g\tau} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$\dot{m}'_{g\tau}$ ——时刻 τ 的出口气体质量流量，单位为千克每秒（kg/s）；

$\Delta\tau$ ——在线控制器的数据采集时间间隔，单位为秒（s）。

物料平衡

$$m_s + m_g = m'_s + m'_g \cdots \cdots \cdots (3)$$

式中：

m_s ——入炉多晶硅原料质量，单位为千克（kg）；

m_g ——入炉气体质量，单位为千克（kg）；

m'_s ——出炉硅单晶棒质量，单位为千克（kg）；

m'_g ——出炉气体质量，单位为千克（kg）。

6 热平衡计算方法

根据试验测得的气体组分及每个组分气体对应的质量浓度，计算气体的平均比热容。

热收入

6.1.1 入炉气体带入的显热 Q_g

单位为千焦（kJ），按公式（4）计算：

$$Q_g = c_g m_g t_g - c_{g0} m_g t_a \cdots \cdots \cdots (4)$$

式中：

c_g ——温度 t_g 对应的入炉气体比热容，单位为千焦每千克摄氏度（kJ/（kg·℃））；

c_{g0} ——温度 t_a 对应的入炉气体比热容，单位为千焦每千克摄氏度（kJ/（kg·℃））；

m_g ——入炉气体质量，单位为千克（kg）；

t_g ——入炉气体温度，单位为摄氏度（℃）；

t_a ——环境温度，单位为摄氏度（℃）。

6.1.2 入炉多晶硅原料带入的显热 Q_s

单位为千焦（kJ），按公式（5）计算：

$$Q_s = c_s m_s t_s - c_{s0} m_s t_a \cdots \cdots \cdots (5)$$

式中：

c_s ——温度 t_s 对应的入炉多晶硅原料比热容（kJ/（kg·℃））；

c_{s0} ——温度 t_a 对应的入炉加料管比热容（kJ/（kg·℃））；

m_s ——入炉多晶硅原料质量，单位为千克（kg）；

t_s ——入炉多晶硅原料温度，单位为摄氏度（℃）；

t_a ——环境温度，单位为摄氏度（℃）。

6.1.3 入炉加料管带入的显热 Q_b

单位为千焦（kJ），按公式（6）计算：

$$Q_b = c_b m_b t_b - c_{b0} m_b t'_a \dots\dots\dots (6)$$

式中：

c_b ——入炉加料管的比热容，单位为千焦每千克摄氏度（kJ/（kg·℃））；

c_{b0} ——入炉加料管的比热容，单位为千焦每千克摄氏度（kJ/（kg·℃））；

m_b ——入炉加料管总质量，单位为千克（kg）；

t_b ——入炉加料管温度，单位为摄氏度（℃）；

t'_a ——旋板阀打开前加料管温度，单位为摄氏度（℃）。

6.1.4 冷却水带入的显热 Q_w

单位为千焦（kJ），按公式（7）计算：

$$Q_w = \Delta\tau \times \sum (c_w t_w - c_{w0} t_a) \dot{m}_{wt} \dots\dots\dots (7)$$

式中：

$\Delta\tau$ ——在线控制器的数据采集时间间隔，单位为秒（s）；

t_w ——入口冷却水温度，单位为摄氏度（℃）；

c_w ——入口冷却水温度 T_w 对应的比热容，单位为千焦每千克摄氏度（kJ/（kg·℃））；

$\dot{m}_{wt}$ ——时刻 τ 对应的冷却水质量流量，单位为千克每秒（kg/s）；

c_{w0} ——环境温度下，冷却水的比热容，单位为千焦每千克摄氏度（kJ/（kg·℃））；

t_a ——环境温度，单位为摄氏度（℃）。

6.1.5 电加热的输入热量 Q_e

单位为千焦（kJ），按公式（9）计算：

$$Q_e = \Delta\tau \times \sum (\sum_{i=1}^N P_{ei\tau}) \dots\dots\dots (9)$$

$\Delta\tau$ ——在线控制器的数据采集时间间隔，单位为秒（s）；

$P_{ei\tau}$ ——时刻 τ 对应的第 i 段电加热功率，单位为千瓦（kW）；

N ——加热器数量。

6.1.6 总热收入 Q_{in}

单位为千焦（kJ），按公式（10）计算：

$$Q_{in} = Q_g + Q_s + Q_b + Q_e + Q_w \dots\dots\dots (10)$$

式中：

Q_g ——入炉气体带入的显热，单位为千焦（kJ）；

Q_s ——入炉多晶硅原料带入的显热，单位为千焦（kJ）；

Q_b ——入炉加料管带入的显热，单位为千焦（kJ）；

Q_e ——电加热的输入热量，单位为千焦（kJ）；

Q_w ——进口冷却水的热量，单位为千焦（kJ）。

热支出

6.2.1 出炉气体带出的显热 Q'_g

单位为千焦（kJ），按公式（11）计算：

$$Q'_g = c'_g m'_g t'_g - c'_{g0} m'_g t_a \dots\dots\dots (11)$$

式中：

c'_g ——温度 t'_g 对应的出炉气体比热容，单位为千焦每千克摄氏度（kJ/（kg·℃））；

c'_{g0} ——温度 t_a 对应出炉气体的比热容，单位为千焦每千克摄氏度（kJ/（kg·℃））；

m'_g ——出炉气体质量，单位为千克（kg）；

t'_g ——出炉气体温度，单位为摄氏度（℃）；

t_a ——环境温度，单位为摄氏度（℃）。

6.2.2 出炉硅单晶棒带出的显热 Q'_s

a)

单位为千焦（kJ），按公式（12）计算：

$$Q'_s = c'_s m'_s t'_s - c'_s m'_s t_a \quad (12)$$

式中：

c'_s ——出炉硅单晶棒的比热容，单位为千焦每千克摄氏度（kJ/（kg·℃））；

c_{s0} ——出炉硅单晶棒的平均比热容（kJ/（kg·℃））；

m'_s ——出炉硅单晶棒质量，单位为千克（kg）；

t'_s ——出炉硅单晶棒温度，单位为摄氏度（℃）；

t_a ——环境温度，单位为摄氏度（℃）。

6.2.3 出炉加料管带出的显热 Q'_b

单位为千焦（kJ），按公式（13）计算：

$$Q'_b = c'_b m_b t'_b - c_{b0} m_b t_a \quad (13)$$

式中：

c'_b ——出炉加料管的比热容，单位为千焦每千克摄氏度（kJ/（kg·℃））；

m_b ——加料管的总质量，单位为千克（kg）；

t'_b ——出炉加料管的温度，单位为摄氏度（℃）；

c_{b0} ——环境温度下加料管的比热容，单位为千焦每千克摄氏度（kJ/（kg·℃））；

t_a ——环境温度，单位为摄氏度（℃）。

6.2.4 冷却水带出的显热 Q'_w

单位为千焦（kJ），按公式（15）计算：

$$Q'_w = \Delta\tau \times \sum (c'_w t'_w - c_{w0} t_a) \dot{m}_{wt} \quad (14)$$

式中：

$\Delta\tau$ ——在控制器的数据采集时间间隔，单位为秒（s）；

t'_w ——出口冷却水温度，单位为摄氏度（℃）；

c'_w ——冷却水温度 t'_w 对应的比热容，单位为千焦每千克摄氏度（kJ/（kg·℃））；

c_{w0} ——环境温度 t_a 下冷却水的比热容，单位为千焦每千克摄氏度（kJ/（kg·℃））；

$\dot{m}_{wt}$ ——时刻 τ 对应的冷却水质量流量，单位为千克每秒（kg/s）；

t_a ——环境温度，单位为摄氏度（℃）。

6.2.5 壁面热损失 Q'_l

单位为千焦（kJ），按公式（16）计算：

$$Q'_l = \frac{\Delta\tau}{1000} \sum \{ \sum_i \{ h_{ci} A_{ci} (t_{citr} - t_a) + C_0 \varepsilon_i A_{ci} (T_{citr}^4 - T_a^4) \} \} \quad (15)$$

式中：

$\Delta\tau$ ——在线数据采集仪的数据采集时间间隔，单位为秒（s）；

N ——炉子外壁面分段数量， N 值依据炉子外壁面的几何形状、表面温度、表面黑度值合理选取；

h_{ci} ——第 i 段炉体结构外壁面的对流换热系数，单位为瓦每平方米摄氏度（W/（m²·℃））；

t_{cit} ——时刻 τ 对应的第 i 段炉体结构外壁面的温度，单位为摄氏度（℃）；

T_{cit} ——时刻 τ 对应的第 i 段炉体结构外壁面的温度，单位为摄氏度（K）；

A_{ci} ——第 i 段炉体结构外壁面的面积，单位为平方米（m²）；

ε_{ci} ——第 i 段炉体结构外壁面的黑度；

C_0 ——黑体辐射常数；

t_a ——环境温度，单位为摄氏度（℃）。

T_a ——环境温度，单位为摄氏度（K）。

6.2.6 炉体孔口热辐射损耗 Q'_d

$$Q'_d = \frac{\Delta\tau}{1000} \sum \{ \sum_i^N C_0 A_{di} \psi_i (T_{dir} - T_a) \} \dots\dots\dots (16)$$

$\Delta\tau$ ——在线控制器的数据采集时间间隔，单位为秒（s）；

N ——炉子孔口数量；

C_0 ——黑体辐射常数；

T_{dir} ——时刻 τ 对应的第 i 个孔口内部温度，单位为摄氏度（K）；

A_{di} ——第 i 个孔口开口面积，单位为平方米（m²）；

ψ_i ——第 i 个孔口的遮蔽系数，孔口处有玻璃盖板时，公式中 ψ_i 值乘 0.9，孔口处有镀金玻璃盖板

时，公式中 ψ_i 值乘 0.3，孔口处有金属盖板时，公式中 ψ_i 用 $\frac{\psi_i}{1+\psi_i}$ 替换；

T_a ——环境温度，单位为摄氏度（K）。

6.2.7 热平衡的确定

热平衡各项收入热量总和与已测各项支出热量总和之差即为差值 ΔQ （kJ），按式（17）计算：

$$b) \quad \Delta Q = Q_{in} - (Q'_g + Q'_s + Q'_b + Q'_w + Q'_l + Q'_d) \dots\dots\dots (17)$$

式中：

Q'_g ——出炉气体带出的显热，单位为千焦（kJ）；

Q'_s ——出炉硅单晶棒带出的显热，单位为千焦（kJ）；

Q'_b ——出炉加料管带出的显热，单位为千焦（kJ）；

Q'_w ——出口冷却水的显热，单位为千焦（kJ）；

Q'_l ——壁面热损失，单位为千焦（kJ）；

Q'_d ——炉体孔口热辐射损耗，单位为千焦（kJ）。

差值包括未测出的支出热量及误差。热平衡允许相对误差值为 $\pm 5\%$ 以内，按式（18）计算：

$$c) \quad \left| \frac{\Delta Q}{Q_{in}} \right| \leq 5\% \dots\dots\dots (18)$$

式中：

Q_{in} ——单晶炉的收入热量，单位为千焦（kJ）；

6.2.8 总热支出 Q_{out}

单位为千焦（kJ），按公式（19）计算：

$$Q_{out} = Q'_g + Q'_s + Q'_b + Q'_w + Q'_l + Q'_d + \Delta Q \dots\dots\dots (19)$$

式中：

Q'_g ——出炉气体带出的显热，单位为千焦（kJ）；

Q'_s ——出炉硅单晶棒带出的显热，单位为千焦（kJ）；

Q'_b ——出炉加料管带出的显热，单位为千焦（kJ）；

Q'_w ——出口冷却水的显热，单位为千焦（kJ）；

Q'_l ——壁面热损失，单位为千焦（kJ）；
 Q'_d ——炉体孔口热辐射损耗，单位为千焦（kJ）；
 ΔQ ——热平衡各项收入热量总和与已测各项支出热量总和之差即为差值，单位为千焦（kJ）。

热平衡表

将单晶炉热平衡各项收、支项热量的计算结果列入表1中。

表 1 热平衡表

收入				支出			
符号	项目	热量		符号	项目	热量	
		kJ	%			kJ	%
Q_g	入炉气体带 入的显热			Q'_g	出炉气体带 出的显热		
Q_s	入炉多晶硅 原料带 入的显热			Q'_s	出炉硅单晶 棒带出的 显热		
Q_b	入炉加料管 带 入的显热			Q'_b	出炉加料管 带出的显热		
Q_e	电加热的输 入热量			Q'_l	壁面热损失		
Q_w	进口冷却水 的热量			Q'_w	出口冷却水 的显热		
				Q'_d	炉体孔口热 辐射损耗		

7 热效率计算方法

单晶炉热效率计算按式（20）计算：

$$\eta = \frac{H \frac{m_s}{M} + (c_r m_s t_r - c_s m_s t_s)}{Q_{in} - \{H \frac{m_s}{M} + (c_r m_s t_r - c_s m_s t_s)\}} \times 100\% \dots\dots\dots (20)$$

式中：

η ——单晶炉热效率，%；
 H ——多晶硅融化热，单位为千焦每摩尔（kJ/mol）；
 m_s ——入炉多晶硅原料质量，单位为千克（kg）；
 M ——硅材料摩尔质量，单位为千克每摩尔（kg/mol）；
 c_r ——温度 t_r 对应的入炉多晶硅原料比热容（kJ/（kg·℃））；
 c_s ——温度 t_s 对应的入炉加料管比热容（kJ/（kg·℃））；
 t_r ——多晶硅原料熔点，单位为摄氏度（℃）；
 t_s ——入炉多晶硅原料温度，单位为摄氏度（℃）；
 Q_{in} ——单晶炉的收入热量，单位为千焦（kJ）。

8 综合能耗计算方法

根据 GB/T 2589，综合能耗计算按式（9）计算。

