

多晶硅还原炉底盘温度场均匀性分析

王晓静, 崔萌*, 张芳
(天津大学化工学院, 天津 300072)

摘要: 针对一种 24 对棒多晶硅还原炉底盘的冷却模式, 应用 Fluent 对多晶硅还原炉底盘内流体进行模拟分析, 得出底盘的上盖板温度分布图, 并引入平均算数温度和均匀系数的概念分析底盘温度场的均匀性。总结概括出温度场均匀性分布随冷却液进口流量的变化趋势, 提出判别温度场均匀化的判据, 提供合适的流量参考。

关键词: 多晶硅还原炉; 底盘; 温度场; 均匀系数

中图分类号: TK175

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2014)02-0160-04

Analysis of temperature field uniformity on polysilicon reduction furnace chassis

WANG Xiao-jing, CUI Meng*, ZHANG Fang

(School of Chemical Engineering and technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: According to a cooling mode of 24 rods polysilicon reduction furnace chassis, the software Fluent is used to simulate the fluid in the chassis of the furnace. The temperature field distribution of the upper board of chassis is drawn and introduced the concept of Arithmetic Average Temperature and Uniformity Coefficient to analyze the temperature field uniformity of the chassis. Finally, the trend that temperature field uniformity is changed along with the inlet flow of cooling fluid is summed up. The criterion of judging temperature field uniformity is put forward with an appropriate cooling flow as reference.

Key words: polysilicon reduction furnace; chassis; temperature field; uniformity coefficient

随着人们对能源需求的不断增长,加之地球化石能源的逐渐枯竭,太阳能作为一种可再生的清洁能源无疑是备受关注的重点之一。太阳能光伏产业已经发展了几十年,多晶硅是光伏产业的最上游,国际市场上 98% 以上的光伏电池都是利用高纯多晶硅制备的^[1],因此多晶硅是制约整个太阳能光伏产业发展的核心问题。

目前,国际上有多种多晶硅生产工艺,如改良西门子法、硅烷法、冶金法、流化床法、热线法等^[2-5]。其中改良西门子法生产多晶硅产量占世界总产量的 80% 以上^[6],是多晶硅生产的主要工艺^[7-8],且其产业化技术垄断的局面在短期内不会有所改变。该工艺的关键设备是多晶硅还原炉^[9],并逐步向大型化多对棒节能型还原炉推进^[10]。多晶硅还原炉的大型化将对还原炉的能耗和强度问题提出更高的要求,更是近 10 年来国内外多晶硅工程技术研究的重点^[11]。多晶硅还原炉底盘结构复杂,几乎所有的进、出气体或液体以及硅棒、电极均集中在底盘上,是还原炉安全生产中最重要的构件。

本文中研究的 24 对棒多晶硅还原炉最主要的

反应过程发生在炉膛内,反应条件需要高温(1 100℃),多晶硅硅棒通电辐射大量的热量,然而要求壁面温度不能高于 575℃,因此冷却问题是研究还原炉不可避免的难题。同时,还原炉众多部件都布置在底盘上,尤其是上盖板直接与电极座接触,其温度不均会导致温差应力,造成电极座大角度偏转,致使硅棒倾斜,将直接影响其结构及其他部件的安全性。由此可见对底盘温度场的均匀性进行研究的重要性。此外,在采用限制射流直喷式切向进液的模式下,通过分析多晶硅还原炉底盘内部流体温度场的分布情况,确定底盘合适的冷却液进口流量,对还原炉的节能优化研究具有一定的现实意义。

1 底盘结构和模型的建立

还原炉底盘结构如图 1 所示,底盘上开有 48 个均布电极座口、中心 1 个混合气进气口、6 个均布盲管、冷却液进出口,内部结构及相关部件间的连接结构较为复杂,利用 SolidWorks 三维软件建立实体模型。电极座和盲管外均布有六棱角扩散口,形成限

制射流直通扩散流道。限制射流直通扩散流道采用切向进液形式,形成射流,提高湍流强度,可以更好地与炉内高温气体进行换热,直接影响底盘的冷却效果。

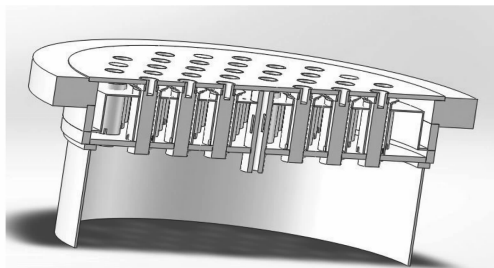


图1 底盘内部结构

2 边界条件的设定

本文中所研究的底盘温度场属于连续性操作,进口源源不断地注入新的冷却液,通过新型限制射流直通扩散流道,从底盘外侧流出,故设置进口为质量入口,根据初步研究分析提出冷却液进口流量200 t/h。

为简化计算量,选取1/3底盘作为计算模型。进口直径 $d_i = 94$ mm,进口冷却液设计压力0.6 MPa。

底盘上盖板处流场温度由还原炉内部温度场决定,靠近上盖板温度为573 K;底盘筒体及下盖板处流场温度由常温流通空气换热情况决定,温度为298 K。

3 模拟结果讨论

通过数值模拟计算,可获得底盘上盖板温度场的分布情况,如图2所示。底盘内部流场由于流道阻力及能量的吸收等原因,底盘流场出现了总温度的不均匀化。底盘上盖板中心位置温度较高,这是由于此处是冷却液流动的死角,故温度会较为偏高;靠近冷却液出口环向位置的温度也出现温度偏高现

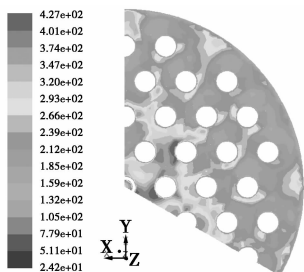


图2 上盖板温度分布图

象,这是由于冷却液换热后的温度自然升高,导致总能量增加。同时,在底盘上盖板与电极座连接的局部区域,呈现出较高温度。这是由于上盖板电极座处不但存在冷却液漩涡,并且与炉腔内的高温反应气体直接接触,炉膛内温度持续恒态偏高700℃,钢材导热性好,故而出现了上盖板与电极座局部接触位置温度相对偏高的现象。

4 均匀系数

图2虽然可以直观地看出上盖板温度场分布情况,但不能直接评价其温度场的均匀性。因此,引入均匀系数来直接反映底盘温度场分布状况。

均匀系数是指总域中所有不同温度区域的摄氏温度与该区域对总域中心的截面系数的乘积的总和同总域平均算术温度及其中心截面系数乘积的比例,如式(2)所示。

平均算术温度:

$$T_j = \sum A_i T_i / A_0 \quad (1)$$

均匀系数:

$$\xi = 3 \int T_i R_i dA_i / T_j \int R dA_0 \quad (2)$$

式中, A_0 是研究总域的表观面积, m^2 ; A_i 是总域中任一温度域的表观面积, m^2 ; T_i 是总域中任一温度域的摄氏温度, $^{\circ}C$; R 是总域的当量半径, m ; R_i 是总域中任一温度域的当量半径, m 。

4.1 平均算术温度

已知流场半径,即底盘内直径 $D_i = 1\ 926$ mm;电极座外径 $d_{20} = 112$ mm;取1/3模型作为计算标准,则流场上表面积为:

$$A_0 = \pi \times (D_i^2 - 54 \times d_{20}^2) / (3 \times 4) = 0.8 \text{ m}^2$$

1/3模型上盖板温度分布如表1所示。其中上

表1 上盖板温度分布表

温度 $T/^{\circ}C$	所占比例/%	A_i/m^2
<91	0	0
91 ~ 141	0.083	0.000664
141 ~ 190	16.81	0.13448
190 ~ 240	41.48	0.33184
240 ~ 290	21.83	0.17464
290 ~ 340	12.57	0.10056
340 ~ 388	5.31	0.04248
388 ~ 438	1.91	0.01528
>438	0.007	0.000056

花板上温度低于 91℃ 面积占总面积的 0%；温度 91 ~ 141℃ 及温度高于 438℃ 的区域面积占据比例都很低，分别为 0.093% 和 0.007%，影响不大，可以忽略；其余温度区间面积占据比例较大，是计算平均算术温度需要重点考虑的数据。

综上所述，取所有区域内最小及最大温度分别进行计算，由式(1)分别得最小、最大平均算术温度：

$$T_{jmin} = \sum A_i T_{imin} / A = 216.9^\circ\text{C}$$

$$T_{jmax} = \sum A_i T_{imax} / A = 266.6^\circ\text{C}$$

故算得平均算术温度：

$$T_j = (T_{jmax} + T_{jmin}) / 2 = 241.75^\circ\text{C}$$

4.2 均匀系数

在求得平均算术温度的基础上，可以求解温度场的均匀系数。

分别求出底盘上花板各温度区段所占的底盘面积的值 A_i ，如表 1 所示。温度区间 $[-\infty, 91]$ 、 $[91, 141]$ 、 $[340, 388]$ 、 $[388, 438]$ 和 $[438, +\infty]$ 在底盘温度场分布中所占面积较小，可忽略其影响，分别将 $[-\infty, 91]$ 和 $[91, 141]$ 合并到 $[141, 190]$ ，其面积为 0.1351 m^2 ； $[340, 388]$ 、 $[388, 438]$ 和 $[438, +\infty]$ 合并到 $[290, 438]$ ，其面积为 0.1585 m^2 。

由 CFD 后处理软件 Tecplot 对上花板进行分析处理可得， $[141, 190]$ 、 $[190, 240]$ 、 $[240, 290]$ 和 $[290, 438]$ 所占底盘上花板温度场面积形心距上花板中心的距离分别为 0.745、0.666 7、0.497、0.264 m。

由式(2)可求得：

$$\xi_{min} = (3 \int T_i R_i dA_i / T_i \int R dA_0)_{min} = 268 / 406 = 0.66$$

$$\xi_{max} = (3 \int T_i R_i dA_i / T_i \int R dA_0)_{max} = 347 / 498 = 0.70$$

故

$$\xi_j = (\xi_{max} + \xi_{min}) / 2 = 0.68$$

按照上述定义，综合考虑温度场均匀系数与温度场的分布情况有关。其中，温度场均匀系数大于 1，则表明温度场周边位置温度偏高；同理，温度场均匀系数小于 1，则表明温度场中心位置温度偏高；温度场均匀系数趋近于 1，则表明温度场分布较为均匀。

针对还原炉底盘而言，均匀系数越大，算术平均温度越低，说明底盘冷却结构越有利于冷却过程。

可以看出，均匀系数微观上真实地反映的是上花板在炉膛内辐射热能以及底盘的限制射流直通扩散冷却流道冷却的综合作用下所呈现出的温度场的分布情况，宏观地反映底盘冷却流道的冷却效果，直观地评判了不同温度场分布的优劣。

4.3 不同进口流量条件下的均匀系数

从底盘冷却液进口流量 125 ~ 225 t/h 之间另选取 4 组进口流量进行计算分析，对比进口流量分别是 125、150、175、200、225 t/h 时底盘上花板温度场的均匀系数，其值分别为 0.65、0.70、0.72、0.68、0.63。

将 5 种进口流量情况下得到的平均算术温度、均匀系数分别进行拟合，得到平均算术温度 T_j - 进口流量 Q 、均匀系数 ξ - 进口流量 Q 关系图，如图 3、图 4。

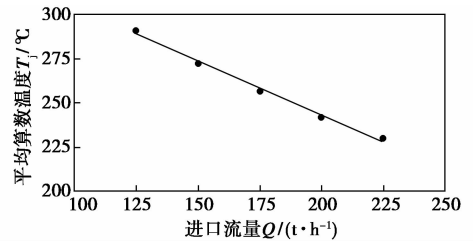


图 3 平均算术温度-进口流量图

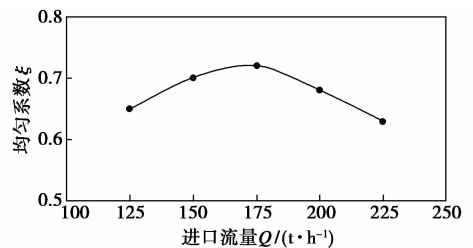


图 4 均匀系数-进口流量图

底盘上花板的温度场平均算术温度随底盘限制射流直喷流道的流量大小呈线性变化，流量越大，平均算术温度越低。而均匀系数则呈抛物线状变化，存在最优化选择。

考虑到底盘上花板温度场的平均算术温度越高，对底盘的结构构成的威胁越大。但是对比 3 种进口流量下的平均算术温度，均未超过限制温度 (300℃)，单就考虑温度场的平均算术温度而言，进口流量为 225 t/h 是比较优先的选择。

同时，温度场的均匀系数越趋近于 1，则表示其温度场越均匀。由此可知冷却液进口流量为 175 t/h 时底盘上花板温度场更加均匀。

5 结论

通过 Fluent 对还原炉底盘进行流场模拟,分析其上盖板温度场分布情况。引入均匀系数的概念,定量地探讨上盖板温度场分布的均匀程度。对比不同冷却液进口流量下,上盖板温度场的均匀性,总结其规律,直观地评判不同温度场分布的优劣,确定底盘合适的冷却液进口流量。主要总结如下:

(1)引入均匀系数的概念,对影响还原炉底盘流场因素进行分析。底盘上盖板平均算数温度对设备影响不大时,均匀系数越高,底盘结构的温差应力越小,底盘安全性越高;底盘上盖板均匀化系数相同或相近前提下,平均算数温度越高,多晶硅还原炉工作条件越恶劣,安全性越低。

(2)确定进口流量大小,需要综合考虑温度场的均匀性及其温度场的平均算术温度。从温度场的均匀系数看,底盘选择进口流量为 175 t/h 更为合理;而考虑温度场的平均算术温度而言,进口流量为 225 t/h 是比较优先的选择。但是对比 5 种进口流量下的平均算术温度,均未超过限制温度,其影响较小。综合考虑能耗等问题,选定进口流量 175 t/h 为最优值。

(3)在研究基础上,可以进一步对多晶硅还原炉底盘内部的三维流场进行速度、压力的分析,综合多方条件来进行讨论。

参考文献

- [1] 徐华毕,沈辉,梁宗存,等.太阳能级多晶硅生产与发展概况[J].材料导报,2008,9(22):86-90.
- [2] 王晓英,王宇光,谷新春,等.多晶硅制备工艺及发展趋势[J].化工进展,2013,32(6):1336-1340.
- [3] 杨涛.改良西门子法生产多晶硅工艺设计探讨[J].贵州化工,2009,34(3):7-11.
- [4] Michael G Mauk. Silicon solar cells: Physical metallurgy principles [J]. Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 2003, 55(5):38-42.
- [5] Schropp R E I, Alkemade P F A, Rath J K. Poly-silicon films with low impurity concentration made by hot wire chemical vapour deposition [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2001, 65(1/2/3/4):541-547.
- [6] 柯曾鹏,杨志国,刘继三.多晶硅行业生产节能有效途径探讨[J].化学工程,2013,41(3):75-78.
- [7] 赵贤俊,朱英敏,帅虎,等.多晶硅产业现状及发展趋势[J].化学工业,2007,25(9):19-22.
- [8] 罗发亮,林剑飞,赵天生.多晶硅生产现状[J].石油化工应用,2007,26(1):1-5.
- [9] 李世振.多晶硅还原炉的电器设备[J].东方电气评论,2010,95(24):62-68.
- [10] 王新刚.太阳能级多晶硅生产技术研究现状及展望[J].化工技术与开发,2012,41(9):27-33.
- [11] 王子松,黄志军,覃攀,等.西门子 CVD 还原炉内硅棒生长环境的数值模拟[J].人工晶体学报,2012,41(2):507-512. ■

六氯环三磷腈合成过程中副产物的利用方法 (CN103555307)

本发明涉及六氯环三磷腈合成过程中副产物的利用,它是以五氯化磷、氯化铵为起始原料,氯苯为溶剂,经过高选择的合成反应,过滤得到高纯度的六氯环三磷腈的氯苯溶液,再将六氯环三磷腈精制过程中的废液与苯酚钾反应得到一种具有高阻燃性能的混合磷腈。本发明实现了废物利用,解决了因六氯环三磷腈产率较低而废液处理造成的生产成本高的问题,提高了生产收益,并且废液处理降低了对环境的污染,有利于实现磷腈类阻燃剂的工业化。

铝合金型材生产废水回用及污泥回收的方法 (CN 103553242)

本发明涉及污水处理方法,具体是一种铝合金型材生产废水回用及污泥回收的方法。本方法是将铝合金型材生产工序中产生的碱蚀废液、碱蚀后水洗液和洗模废液汇入碱性液储槽,脱脂水洗液、氧化后水洗液、氧化废液和中和、脱脂废液汇入酸性液储槽;然后在调解反应池中将碱性液和酸性液中和反应,使混合废液的 pH 达到 6.5~7.5,反应

后的混合液由浓缩分离器进行固液分离,分离后得到的废水可以回用于铝合金型材生产工序中,得到的泥饼作为副产品应用。本发明方法简单,投入、运行、维护成本低,适宜铝材企业应用,对铝合金型材氧化产生的废水、废液可以全部进行综合循环处理,解决了原来废液处理产生的废水和污泥直接排放而造成的环境污染问题。

一种超疏水性复合膜的制备方法 (CN 103551052)

本发明公开了一种超疏水性复合膜的制备方法,载玻片浸入到聚酰亚胺溶液后提拉出来,重复浸渍提拉数次,干燥得到基层膜;将聚二甲硅氧烷-g-聚砜和聚砜中空纤维的混合物加热至熔融状态得到混合液,将混合液放入到容器中;将容器通电喷射出聚物流,在接受板上进行富集得到疏水层;将疏水层覆盖在基层膜上,得到超疏水性复合膜。通过上述方式,本发明的超疏水性复合膜的制备方法,得到的超疏水性复合膜结合牢固,具有很强的疏水性,机械性能好,具有较高的孔隙率和膜强度,整个制备过程安全性好,对环境污染小,操作简单易行,能够有效降低生产成本。