

碳 / 碳复合材料在直拉单晶硅生产中的应用

黄旭光 杨运忠 彭豪豪 董彦萌

(晶龙实业集团有限公司 河北 邢台 055550)

(收稿日期:2016-02-16)

摘要:单晶硅是太阳能电池的基础材料,在直拉法单晶硅生产工艺中需要使用大量的等静压石墨材料制作热场,随着单晶硅生产规模的扩大和所用热场日渐大型化,应用新型的碳 / 碳复合材料制作单晶炉热场成为必然趋势.碳 / 碳复合材料适合于制作大尺寸耐高温热场,并且使用寿命长、稳定性高、节能效果好.

关键词:碳 / 碳复合材料 单晶炉 热场

1 研发背景

当前,国内光伏产业迅猛发展,已成为为数不多的中国在国际上保持优势地位的制造业之一.晶硅电池产业链分为硅原料制备、单晶硅棒多晶硅锭制备、硅片多线切割、电池片生产、组件生产、终端发电系统应用6个主要环节.在单晶硅棒生产环节中,为提高生产效率、降低成本,各企业均不断进行技术革新,而其中最为重要的两项内容是降低耗材使用成本和降低电耗.原有单晶炉普遍采用等静压石墨材料制作耐高温热场,但石墨材料使用寿命有限,并且受限于机械强度很难做薄或加工成异型结构.新型的碳 / 碳复合材料具有使用寿命长、稳定性高、节能效果好、易于超薄加工及可加工成异型结构等优势,并且随着其生产规模的扩大,价格下降明显,未来必将在单晶炉热场中广泛使用.

2 技术分析

2.1 直拉法生长单晶硅

直拉法生长单晶硅是一种十分成熟的硅单晶生长方法,其特点是通过电阻加热方式使盛放在石英坩埚中的硅原料熔化成液态,通过控制加热器的功率,升高或降低熔硅的温度,使其达到晶体生长的适宜温度,此时将特定晶向的籽晶与熔硅接触并生长放大,同时通过提拉机构向上旋转提拉,从而逐渐生长出一根特定晶向、直径均匀的单晶硅棒.

热场是单晶硅生长的最重要条件,现阶段热场的主要部件多由石墨材料构成,图1为典型的直拉单晶硅石墨热场结构.石墨热场主要分为3层结构:内层是石墨坩埚、坩埚托、坩埚杆,主要作用是支撑石英坩埚及其内部的高温熔硅并带动其旋转升降;中层是石墨加热器,主要作用是通过电阻加热的方式,使硅原料升温到 1420°C 以上熔化,并时刻控制热场内温度,保证拉晶环境;外层是上下保温盖和中段保温桶及其配套保温碳毡,作用是将炉腔内的高温区与单晶炉不锈钢炉体隔绝,最大限度降低热量散失并保护炉体及人员安全.热场的设计必须科学合理,热场温度梯度的分布(图2)直接影响着能否顺利拉制单晶以及成品单晶硅的品质优劣.

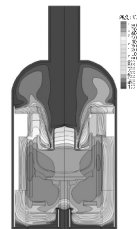


图1 石墨热场实物图 图2 单晶炉内热场温度梯度分布

2.2 碳 / 碳复合材料

碳 / 碳复合材料是以碳纤维及其织物为增强材料,以碳为基体的复合材料,具有比强度高、比模量高、热膨胀系数低、导电性好、断裂韧性大、比重低、抗热震、耐腐蚀、耐高温等一系列优良性能,目前作为新型耐高温材料已广泛应用于航空航天、赛车、生

物材料等领域。

在直拉单晶硅生产的应用中,碳/碳复合材料对比石墨材料的优势主要有:

(1) 表1所示为碳/碳复合材料与石墨材料的物理特性对比数据,从中可以看出碳/碳复合材料的强度远大于石墨材料,其尺寸稳定性、耐冲击性、抗震性和综合机械性能都要好于石墨材料。因此,碳/碳复合材料能够做的更薄,并且能够加工成异型工件。

表1 碳/碳复合材料与石墨材料物理特性对比

物理特性	碳/碳复合材料	石墨材料
密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.64 ~ 1.69	1.72 ~ 1.90
孔隙度 / %	2 ~ 15	9 ~ 12
热导率 / $\text{W}(\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	100	70 ~ 130
断裂韧度 / MPa	13	1
耐压强度 / Pa	11 ~ 33	4.2 ~ 22
抗弯强度 / Mpa	16 ~ 42	1.3 ~ 7

(2) 在直拉单晶硅生产中,随着单晶尺寸的加大,热场尺寸也逐年扩大,由早期的18英寸(1英寸=0.025 m)、20英寸、22英寸热场,逐步扩展为24英寸、26英寸,甚至28英寸热场。在加工工艺方面,目前大尺寸石墨均是等静压成型,尺寸越大成本越高,而且等静压石墨是首先制备实心棒料或块料,再按图纸尺寸加工成配件,在加工过程中材料浪费严重;而碳/碳复合材料可以根据产品需要编织出任意尺寸和形状的预制件,再通过一定的增密工艺(浸渍或气相沉积)制造出所需产品,因此产品尺寸越大其性价比也就越高。由于等静压石墨材料尺寸加大所付出的成本代价很大,而碳/碳复合材料尺寸加大对成本的负荷不重,因此随着单晶炉热场加大,碳/碳复合材料将具有更大优势。

(3) 在同等使用条件下,碳/碳复合材料的使用寿命比石墨材料延长1倍,因此其综合性价比更高。

3 项目实施

3.1 热场设计

碳/碳复合材料保温件和结构件能够做的很薄,这更好地满足了企业在不更换原有单晶炉设备的基础上,直接更换更大尺寸热场的需求。

方案1:原有汉虹95炉采用石墨材质22英寸热场,在整体石墨热场完全不用调整的前提下,利用碳

/碳复合材料能够加工的更薄且支撑强度仍然足够的特性,仅更换23英寸碳/碳材质坩埚,在投入极小的情况下,使原有22英寸热场升级为23英寸热场。经验证,23英寸热场能增加投料量9%,有效提高拉晶单产,降低生产成本。

方案2:原有汉虹95炉采用石墨材质22英寸热场,将整体热场全部更换为碳/碳复合材料,可升级为24英寸热场。经验证,24英寸热场能增加投料量19%,有效提高拉晶单产,降低生产成本。在能耗方面,实际使用证明,使用碳/碳复合材料可节电10%~20%。

3.2 防护涂层改进

直拉单晶炉内微量氧的存在,会氧化碳/碳热场部件,降低热场的使用寿命。因此,对直拉单晶炉内碳/碳热场部件的抗氧化防护显得尤为必要,其中涂层技术是一个最佳选择。

经分析,涂层材料应具有以下几个特点:能够提供有效防护屏障,以防止氧在材料界面和组织结构内部扩散,即具有较低的氧渗透率;防护涂层与基体材料之间应具有良好的化学相容性与物理相容性和稳定性;涂层材料不能对碳/碳材料的氧化反应有催化作用;涂层材料应具有较低的挥发性,以防止涂层材料在高速气流中或高温环境下工作时,涂层因过度损耗而失效;涂层不能降低复合材料的优良机械性能;涂层与基体材料之间具有较为接近的热膨胀系数,不易剥落;涂层应较为致密,且具有高温自愈合能力。

由于单层涂层无法同时兼顾抗氧化防护和良好的结合性能,因此我们采用多层涂层技术。SiC与碳/碳材料具有相近的热膨胀系数、良好的物理化学相容性、耐高温性能,用作内涂层;外涂层材料则选用耐火氧化物、高温玻璃或高温合金作为密封层。

4 结论

技术分析与实际使用情况均表明,碳/碳复合材料完全可以直接应用于直拉单晶硅行业,其使用效果良好。碳/碳复合材料的使用为直拉单晶硅行业积极研发新型热场材料取代高耗能、高耗材的石墨材料,实现节能减排提供了新的思路。虽然目前国内大部分直拉单晶硅制备企业依然在使用传统的石墨材料制作热场,但随着碳/碳复合材料在国内外同行业中的大范围应用和技术人员对其性能更深入的了解,碳/碳复合材料势必会受到越来越多的关注。