

绪 论

1.1 太阳能的发展

据记载,人类利用太阳能已有 3000 多年的历史,将太阳能作为一种能源和动力加以利用,也已有 300 多年的历史,而真正将太阳能作为“近期急需的补充能源”、“未来能源结构的基础”则是近年来的事情。

20 世纪 70 年代以来,太阳能技术突飞猛进,太阳能利用日新月异。近代太阳能利用历史可以从 1615 年法国工程师所罗门·德·考克斯在世界上发明第一台太阳能驱动的发动机算起,该发明是一台利用太阳能加热空气使其膨胀做功而抽水的机器。1615—1900 年,世界上又研制成多台太阳能动力装置和一些其他太阳能装置,这些动力装置几乎全部采用聚光方式采集阳光,发动机功率不大,工质主要是水蒸气,价格昂贵,实用价值不大,大部分为太阳能爱好者个人研究制造。20 世纪的 100 年间,太阳能科学技术发展历史大体可分为 7 个阶段,下面分别予以介绍。

1. 第一阶段(1900—1920)

在这一阶段,世界上太阳能研究的重点仍是太阳能动力装置,但采用的聚光方式多样化,且开始采用平板集热器和低沸点工质,装置逐渐扩大,最大输出功率达 73.64kW,实用目的比较明确,造价仍然很高。建成的典型装置有:

(1) 1901 年,在美国加州建成一台太阳能抽水装置,采用截头圆锥聚光器,功率为 7.36kW;

(2) 1902—1908 年,在美国建造了 5 套双循环太阳能发动机,采用平板集热器和低沸点工质;

(3) 1913 年,在埃及开罗以南建成一台由 5 个抛物槽镜组成的太阳能水泵,每个长 62.5m,宽 4m,总采光面积达 1250m²。

2. 第二阶段(1920—1945)

在这 20 多年中,太阳能研究工作处于低潮,参加研究工作的人数和研究项目大

为减少,其原因与矿物燃料的大量开发利用和发生第二次世界大战(1939—1945)有关,而太阳能又不能解决当时对能源的急需,因此使太阳能研究工作逐渐受到冷落。

3. 第三阶段(1945—1965)

在第二次世界大战结束后的20年中,一些有远见的人士已经注意到石油和天然气资源正在迅速减少,呼吁人们重视这一问题,从而逐渐推动了太阳能研究工作的恢复和开展,并且成立太阳能学术组织,举办学术交流和展览会,再次兴起太阳能研究热潮。在这一阶段,太阳能研究工作取得了一些重大进展,比较突出的有以下几个。

(1) 1952年,法国国家研究中心在比利牛斯山东部建成一座功率为50kW的太阳炉。

(2) 1954年,美国贝尔实验室研制成实用型硅太阳电池,为光伏发电大规模应用奠定了基础。

(3) 1955年,以色列泰伯等在第一次国际太阳热科学会议上提出选择性涂层的基础理论,并研制成实用的黑镍等选择性涂层,为高效集热器的发展创造了条件。

(4) 1960年,在美国佛罗里达建成世界上第一套用平板集热器供热的氨-水吸收式空调系统,制冷能力为5冷吨。

(5) 1961年,一台带有石英窗的斯特林发动机问世。

在这一阶段里,加强了太阳能基础理论和基础材料的研究,取得了如太阳选择性涂层和硅太阳电池等技术上的重大突破。平板集热器有了很大的发展,技术上逐渐成熟。太阳能吸收式空调的研究取得进展,建成了一批实验性太阳房。对难度较大的斯特林发动机和塔式太阳能热发电技术进行了初步研究。

4. 第四阶段(1965—1973)

这一阶段,太阳能的研究工作停滞不前,主要原因是太阳能利用技术处于成长阶段,尚不成熟,并且投资大,效果不理想,难以与常规能源竞争,因而得不到公众、企业和政府的重视和支持。

5. 第五阶段(1973—1980)

自从石油在世界能源结构中担当主角之后,石油就成了左右经济和决定一个国家生死存亡、发展和衰退的关键因素。1973年10月爆发中东战争,石油输出国组织采取石油减产、提价等办法,支持中东人民的斗争,维护本国的利益。其结果是使那些依靠从中东地区大量进口廉价石油的国家,在经济上遭到沉重打击。于是,西方一些人惊呼:世界发生了“能源危机”(有的称“石油危机”)。这次“危机”在客观上使人们认识到,现有的能源结构必须彻底改变,应加速向未来能源结构过渡,从而使许多国家,尤其是工业发达国家,重新加强了对太阳能及其他可再生能源技术发展的支持,在世界上再次兴起了开发利用太阳能热潮。

1973年,美国制定了政府级阳光发电计划,太阳能研究经费大幅度增长,并且成立太阳能开发银行,促进太阳能产品的商业化。日本在1974年公布了政府制定的“阳光计划”,其中太阳能的研究开发项目有太阳房、工业太阳能系统、太阳热发电、太

阳电池生产系统、分散型和大型光伏发电系统等。为实施这一计划,日本政府投入了大量人力、物力和财力。

20 世纪 70 年代初世界上出现的开发利用太阳能热潮,对我国也产生了巨大影响。一些有远见的科技人员,纷纷投身太阳能事业,积极向政府有关部门提建议,出书办刊,介绍国际上太阳能利用动态;在农村推广应用太阳灶,在城市研制开发太阳能热水器,空间用的太阳电池开始在地面应用等。1975 年,在河南安阳召开的“全国第一次太阳能利用工作经验交流大会”,进一步推动了我国太阳能事业的发展。这次会议之后,太阳能研究和推广工作纳入了我国政府计划,获得了专项经费和物资支持。一些大学和科研院所,纷纷设立太阳能课题组和研究室,有的地方开始筹建太阳能研究所。当时,我国也兴起了开发利用太阳能的热潮。这一时期,太阳能开发利用工作处于前所未有的大发展时期,具有以下特点。

(1) 各国加强了太阳能研究工作的计划性,不少国家制定了近期和远期阳光计划。开发利用太阳能成为政府行为,支持力度大大加强。国际间的合作十分活跃,一些第三世界国家开始积极参与太阳能开发利用工作。

(2) 研究领域不断扩大,研究工作日益深入,取得一批较大成果,如 CPC、真空集热管、非晶硅太阳电池、光解水制氢、太阳能热发电等。

(3) 各国制定的太阳能发展计划,普遍存在要求过高、过急问题,对实施过程中的困难估计不足,希望在较短的时间内取代矿物能源,实现大规模利用太阳能。例如,美国曾计划在 1985 年建造一座小型太阳能示范卫星电站,1995 年建成一座 500 万 kW 空间太阳能电站。事实上,这一计划后来进行了调整,至今空间太阳能电站还未升空。

(4) 太阳能热水器、太阳电池等产品开始实现商业化,太阳能产业初步建立,但规模较小,经济效益尚不理想。

6. 第六阶段(1980—1992)

20 世纪 70 年代兴起的开发利用太阳能热潮,进入 80 年代后不久开始落潮,逐渐进入低谷。世界上许多国家相继大幅度削减太阳能研究经费,其中美国最为突出。导致这种现象的主要原因是:世界石油价格大幅度回落,而太阳能产品价格居高不下,缺乏竞争力;太阳能技术没有重大突破,提高效率 and 降低成本的目标没有实现,以致动摇了一些人开发利用太阳能的信心;核电发展较快,对太阳能的发展起到了一定的抑制作用。

受 20 世纪 80 年代国际上太阳能低落的影响,我国太阳能研究工作也受到一定程度的削弱。有人甚至提出,太阳能利用投资大、效果差、储能难、占地广,认为太阳能是未来能源,主张外国研究成功后我国再引进技术。虽然持有这种观点的人是少数,但十分有害,对我国太阳能事业的发展造成了不良影响。

然而,在这一阶段,虽然太阳能开发研究经费大幅度削减,但研究工作并未中断,有的项目进展较大,而且促使人们认真地去审视以往的计划和制定的目标,调整研究

工作重点,争取以较少的投入取得较大的成果。

7. 第七阶段(1992 年至今)

由于大量燃烧矿物能源,造成了全球性的环境污染和生态破坏,对人类的生存和发展构成威胁。在这种背景下,1992 年联合国在巴西召开了“世界环境与发展大会”,会议通过了《里约热内卢环境与发展宣言》、《21 世纪议程》和《联合国气候变化框架公约》等一系列重要文件,把环境与发展纳入统一的框架,确立了可持续发展的模式。这次会议之后,世界各国加强了清洁能源技术的开发,将利用太阳能与环境保护结合在一起,使太阳能利用工作走出低谷,逐渐得到加强。

世界环境与发展大会之后,我国政府对环境与发展十分重视,提出了 10 条对策和措施,明确要“因地制宜地开发和推广太阳能、风能、地热能、潮汐能、生物质能等清洁能源”,制定了《中国 21 世纪议程》,进一步明确了太阳能重点发展项目。1995 年国家计委、国家科委和国家经贸委制定了《新能源和可再生能源发展纲要(1996—2010)》,明确提出我国在 1996—2010 年新能源和可再生能源的发展目标、任务以及相应的对策和措施。这些文件的制定和实施,对进一步推动我国太阳能事业发挥了重要作用。

1996 年,联合国在津巴布韦召开“世界太阳能高峰会议”,会上讨论了《世界太阳能 10 年行动计划(1996—2005)》、《国际太阳能公约》、《世界太阳能战略规划》等重要文件,并在会后发表了《哈拉雷太阳能与持续发展宣言》。这次会议进一步表明了联合国和世界各国对开发太阳能的坚定决心,要求全球共同行动,广泛利用太阳能。1992 年以后,世界太阳能利用又进入一个发展期,其特点是:太阳能利用与世界可持续发展和环境保护紧密结合,全球共同行动,为实现世界太阳能发展战略而努力;太阳能发展目标明确,重点突出,措施得力,有利于克服以往忽冷忽热、过热过急的弊端,保证太阳能事业的长期发展;在加大太阳能研究开发力度的同时,注意科技成果转化为生产力,发展太阳能产业,加速商业化进程,扩大太阳能利用领域和规模,经济效益逐渐提高;国际太阳能领域的合作空前活跃,规模扩大,效果明显。

通过以上回顾可知,在 20 世纪的 100 年间太阳能发展道路并不平坦,一般每次高潮期后都会出现低潮期,处于低潮的时间大约有 45 年。太阳能利用的发展历程与煤、石油、核能完全不同,人们对其认识差别大,反复多,发展时间长。

这一方面说明太阳能开发难度大,短时间内很难实现大规模利用;另一方面也说明太阳能利用还受矿物能源供应、政治和战争等因素的影响,发展道路比较曲折。尽管如此,从总体来看,20 世纪太阳能取得的科技进步仍比以往任何一个世纪都大。

1.2 能源现状

能源的生产和消耗与整个国民经济发展及人民生活水平的提高有着密不可分的关系,提高现有能源的利用、开发可再生能源是保证我国能源长期供应平衡的先决条

件。就我国目前能源利用的状况看,我国要实现经济高速增长,保证资源的可持续发展,只有开发利用可再生能源或是创造出比发达国家更高的能源效率。

1.2.1 中国的能源状况

我们的日常生活与能源息息相关。无论是在发展农业、工业、科学技术、国防和提高人民生活水平的过程中,能源是这些项目当中面临的首当其冲的问题。随着我国经济的快速增长,人们对能源的需求量大幅度增加,因此,能源的合理应用与高效有规划的开发成为20世纪人类现代社会文明的标志。但是,能源的开发与利用会受到多种因素的限制,比如技术因素、经济状况、资源量和地理环境因素等。相关统计资料表明,人们对地球矿物采取的无节制的开采最终将导致能源殆尽。从已探明储量来看,天然气只够开采60年,煤炭只够开采200年,而石油只够开采40年。20世纪80年代以来,我国以每年约5%的增长率提高对能源的需求量,这个数值是世界平均增长率的3倍。从20世纪90年代开始,我国就已经成为能源的净进口国;从2004年开始,我国进口原油量为1.2亿t,占世界贸易量的6%。据相关专业人士估算,中国未来的能源供需的缺口将越来越大。从现在国际能源利用的形式上来看,在不断产生并且采用新技术、推进节能、加速可再生能源开发利用以及依靠市场力量优化资源配置的条件下,到2010年为止,我国短缺能源达到8%,到2050年将达到24%,在这期间,石油的短缺量将达到4.4亿tce(吨标准煤)。

目前,从国内外形势来看,经济发展带来的能源安全和环境问题已日益突出,对我国的可持续发展带来了潜在的压力和威胁。在未来,如果在能源的使用过程中,大气环境的污染得不到有效治理,到2020年,城市中受到污染的人口将达到4.9亿,这个数目要占同期全国总人口的1/3。自古以来,在我国,由于煤炭具有存储量大、使用简单方便等优点而被广泛应用,但煤炭在燃烧过程中会产生二氧化碳、氮氧化物和硫化物等有害气体,对环境造成了极大的伤害,我国成为世界上已经出现酸雨的第三大片区域。每年 $\text{pH} < 5.6$ 的酸雨城市主要分布在长江以南、四川盆地和青藏高原以东的广大地区。西南、华东、华中以及华南地区一直以来都是酸雨污染严重的区域。因此,面对能源危机和环境保护的双重压力,我们必须立即调整和改善我国能源使用结构,开发利用安全、可靠的清洁能源即新能源和可再生能源,并且在能源结构中提高新能源所占的比重,这同样是实现经济社会可持续发展的重要保证。

1.2.2 我国对使用可再生能源的重视

我国的能源结构呈多元化发展,可再生能源和新能源逐步占据主力能源的地位。我国一直都关注可再生能源的利用和发展,并在各项法律法规上颁布了相关技术规范。在法律法规层面,已具备的相关法律法规有《节约能源法》、《城市规划法》、《可再生能源法》、《城市用地分类与规划建设用地标准》、《民用建筑节能管理规定》和《建

建筑节能管理条例》。正在进行的工作有：制订“新能源和可再生能源资源开发利用管理条例”、“新能源和可再生能源促进法”等。

在标准规范层面，已有的相关标准规范有《采暖通风和空气调节设计规范》、《建筑照明设计标准》、《民用建筑节能管理规定》、《民用建筑节能设计标准（采暖居住建筑部分）》、《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》、《采暖居住建筑节能检验标准》、《公共建筑节能设计标准》、《建筑能耗统计标准》和《建筑节能工程施工验收规范》等。

在政策措施层面，已经具备的政策和文件有《可再生能源建筑应用城市示范实施方案》、《加快推进农村地区可再生能源建筑应用的实施方案》、《财政部、建设部关于推进可再生能源在建筑中应用实施意见》、《财政部、建设部关于印发〈可再生能源建筑应用专项资金管理暂行办法〉的通知》、《财政部、建设部关于加强可再生能源建筑应用示范管理的通知》、《建筑节能技术政策》、《关于实施〈夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准〉的通知》、《建筑节能“十一五”计划纲要》、《关于新建居住建筑严格执行节能设计标准的通知》和《建筑节能经济激励政策》等。国家对建筑垃圾的分类正在进行的工作有：进一步完善各级经济激励政策体系，逐步建立健全税收、信贷、投资、价格、补贴等方面的经济激励政策，刺激新能源和可再生能源市场需求增长的培育政策等。

1.3 太阳能利用的意义

1.3.1 太阳能资源利用

几乎所有存在的自然能源广义上讲全部来自太阳能。由陆地、海洋、生物和大气等所接受的太阳能是各种自然能源的动力及源泉。现代绿色能源包括太阳能、热能、地热能和海洋能等。相比于另外几种绿色能源，太阳能的利用具有以下明显的特点：

(1) 可以利用的领域辽阔。无论海洋或陆地，无论岛屿或高山都可以接收到太阳光的普照，太阳能处处有、时时有，太阳能不但可以直接被开发和利用，而且不需要运输。

(2) 无污染型的清洁能源。开发利用太阳能，不会造成环境污染，是最清洁的能源利用形式之一。在环境污染越来越严重的今天，这一优点极其宝贵。

(3) 能量巨大，但是存在能量密度低的缺点。每年到达地球表面上的太阳辐射能约相当于 130 万亿 tce，其总量是现今世界上可以开发的最大的可再生资源。

(4) 取之不尽。根据目前对太阳产生的核能速率估算，其内部氢的储量足够维持上百亿年，而目前地球的寿命也约为几十亿年，从这个意义上讲，太阳的能量是取之不尽、用之不竭的。

(5) 太阳能的热利用较易实现热能能级的匹配，尽可能做到热尽其用。

鉴于以上论述的特点,太阳能必然会成为新能源中的佼佼者,利用太阳能代替传统能源将成为当今乃至今后促进经济可持续发展、解决能源危机的首要选择,可以称得上是世界上最丰富的永久性能源。

1.3.2 我国利用太阳能的条件

我国能源从总体角度上说是相当丰富的,水力资源理论存储量居世界第一位,煤炭存储量居第三位,石油存储量居第八位,天然气居第十六位。但是,尽管我国把发展能源放在优先的地位,但是我国人口众多,造成人均资源相当不足,基础较差。

在我国发展太阳能可再生能源的利用有相当广阔的前景。我国国土幅员辽阔,太阳能资源非常丰富。地球上太阳能资源一般用全年总辐射量($\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)和年日照时数(h)表示。相关气象资料表明,我国陆地表面每年接收的太阳辐射能约 $5.0 \times 10^{19} \text{kJ}$,全国范围内的各地区全年总辐射量达 $(3.35 \sim 8.37) \times 10^6 \text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;全国总面积的 $2/3$ 以上地区,年日照时数大于 2200h,总辐射量高于 $5.86 \times 10^6 \text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。青海、甘肃、新疆、宁夏、西藏、内蒙古高原的总辐射量和日照时数均为全国最高,属太阳能资源较为丰富的地区;除贵州省、四川盆地地区的资源稍差外,东北、南部及东部等其他地区为资源较丰富或中等地区。图 1.1 为我国太阳能资源分布图。

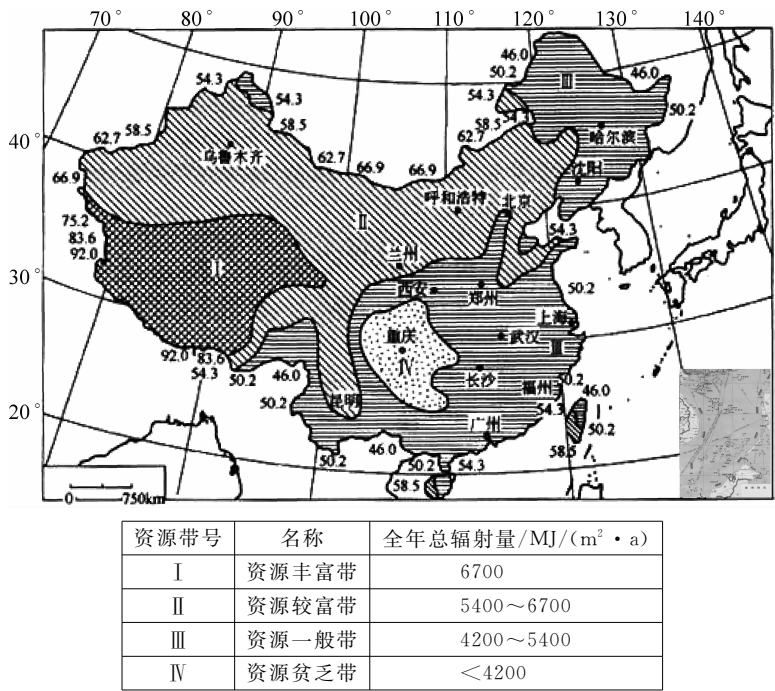


图 1.1 我国太阳能资源分布图

1.4 本课程学习的主要内容

本课程学习的主要内容包括：

- (1) 太阳能利用的基础知识；
- (2) 平板型太阳能集热器和真空管型太阳能集热器的基础理论；
- (3) 家用太阳能热水器的设计选用；
- (4) 太阳能热水工程的设计。

最后,通过实际工程案例对太阳能热水系统的设计进行系统的总结。

太阳能利用基础知识

2.1 太阳和太阳辐射能

2.1.1 太阳的构造

太阳是一个炽热的气态球体,它的直径约为 $1.39 \times 10^6 \text{ km}$,质量约为 $2.2 \times 10^{27} \text{ t}$,为地球质量的 3.32×10^5 倍,体积则比地球大 1.3×10^6 倍,平均密度为地球的 $1/4$ 。其主要组成气体为氢(约 80%)和氦(约 19%)。由于太阳内部持续进行氢聚合成氦的核聚变反应,所以不断地释放出巨大的能量,并以辐射和对流的方式由核心向表面传递热量,温度也从中心向表面逐渐降低。由核聚变知识可知,氢聚合成氦在释放巨大能量的同时,每 1g 质量将亏损 0.00729g。根据目前太阳产生核能的速率估算,其氢的储量足够维持 600 亿年,因此太阳能可以说是用之不竭的。

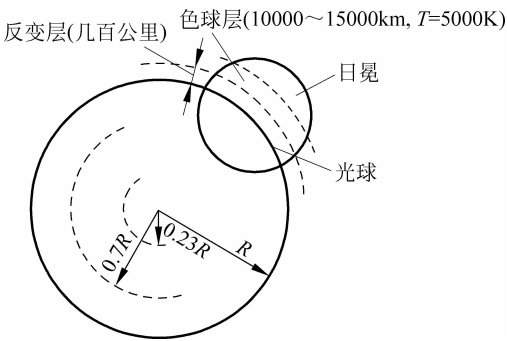


图 2.1 太阳的结构

太阳的结构如图 2.1 所示。在太阳平均半径 23%($0.23R$)的区域内是太阳的内核,其温度约为 $8 \times 10^6 \sim 4 \times 10^7 \text{ K}$,密度为水的 80~100 倍,占太阳全部质量的 40%、总体积的 15%。这部分产生的能量占太阳产生总能量的 90%。氢聚合时放出 γ 射

线,当它经过较冷区域时由于消耗能量,波长增长,变成 X 射线或紫外线及可见光。从 $0.23R \sim 0.7R$ 的区域称为辐射输能区,温度降到 $1.3 \times 10^5 \text{K}$,密度下降为 0.079g/cm^3 。 $0.7R \sim 1.0R$ 之间称为对流区,温度下降到 $5 \times 10^3 \text{K}$,密度下降到 10^{-8}g/cm^3 。太阳的外部是一个光球层,它就是人们肉眼所看到的太阳表面,其温度为 5762K ,厚约 500km ,密度为 10^{-6}g/cm^3 ,它是由强烈电离的气体组成,太阳能绝大部分辐射都是由此向太空发射的。光球外面分布着不仅能发光,而且几乎是透明的太阳大气,称为反变层,它是由极稀薄的气体组成,厚约数百公里,它能吸收某些可见光的光谱辐射。反变层的外面是太阳大气上层,称为色球层,厚约 $(1 \sim 1.5) \times 10^4 \text{km}$,大部分由氢和氦组成。色球层外是伸入太空的银白色日冕,温度高达 $100 \text{万}^\circ\text{C}$,高度有时达几十个太阳半径。

从太阳的构造可见,太阳并不是一个温度恒定的黑体,而是一个多层的有不同波长发射和吸收的辐射体。不过在太阳能利用中,通常将它视为一个温度为 6000K ,发射波长为 $0.3 \sim 3 \mu\text{m}$ 的黑体。

2.1.2 太阳能辐射

太阳能是太阳内部连续不断的核聚变反应过程产生的能量。地球轨道上的平均太阳辐射强度为 1367kW/m^2 ,地球赤道的周长为 40000km ,从而可计算出,地球表面获得的太阳能能量可达 173000TW 。在海平面上的标准峰值强度为 1kW/m^2 ,地球表面某一点 24h 的年平均辐射强度为 0.2kW/m^2 ,相当于有 102000TW 的能量。人类依赖这些能量维持生存,其中包括所有其他形式的可再生能源(地热能资源除外)。虽然太阳能资源总量相当于现在人类所利用的能源的一万多倍,但太阳能的能量密度低,而且它因地而异、因时而变,这是开发利用太阳能面临的主要问题。太阳能的这些特点会使它在整个综合能源体系中的作用受到一定的限制。

太阳是一个巨大、久远、无尽的能源。尽管太阳辐射到地球大气层的能量仅为其总辐射能量(约为 $3.75 \times 10^{26} \text{W}$)的 22 亿分之一,但已高达 173000TW ,也就是说太阳每秒钟照射到地球上的能量就相当于 500 万 tce。地球上的能流图如图 2.2 所示。由图可知,地球上的风能、水能、海洋温差能、波浪能和生物质能以及部分潮汐能都是来源于太阳,即使是地球上的化石燃料(如煤、石油、天然气等)从根本上说也是远古以来储存下来的太阳能。所以广义的太阳能所包括的范围非常大,狭义的太阳能则限于太阳辐射能的光热、光电和光化学的直接转换。

太阳能既是一次能源,又是可再生能源。它资源丰富,既可免费使用,又无需运输,对环境无任何污染。但太阳能也有两个主要缺点:一是能流密度低,二是其强度受各种因素(季节、地点、气候等)的影响不能维持常量。这两大缺点大大限制了太阳能的有效利用。