

下一百年的能源

雷奕安

能源是一切自然活动和社会活动的基础。自宇宙诞生以来，大到星系形成，恒星发光，小到细菌繁殖，原子核衰变，没有任何自然过程不是由能源驱动的。生命在地球上出现后，经过了数十亿年的演化，无数的生命种类在地球上产生并消亡，但基本的趋势是，越是高级的、适应能力强的生命形式，对能量的需求越高，消耗的能量越多。人类社会也是一样。在人类诞生后的数百万年内，不仅人口数量不断增长，每个人消耗的能量也在不断增加，从个体采集，到集体狩猎，制造工具，蓄养动物，生火取暖烹煮……直到工业革命发生，每个人的衣食住行无不消耗大量额外能源。越是先进的社会，越是文明的国家，每个人消耗的能源越多。以中国为例，1965年到2010年间，煤炭消耗从每年2.3亿吨增加到33亿吨，增长近15倍，而同期人口增长不到一倍。世界范围来看，从1965年到2005年，全世界初级能源消耗从5太瓦增加到15太瓦（ 10^{12} 瓦），同期人口增长也不到一倍。

能源是社会发展的根本保证。只要社会继续向前发展，对能源的需求就会越来越大。从今往后的100年之内，可以看见的社会发展过程有：新兴工业化国家及其他发展中国家的城市化和大规模基础设施建设，航空与航海的持续稳步发展，工业化国家的基础设施更新，宇宙开发起步，等等。这些都需要消耗大量的能源。然而，目前世界能源的主要来源——化石能源不能满足上述发展的需求，因此，新能源的开发和利用将构成下一百年能源利用的主线。本文试图对下一百年能源的构成做一个预测，并讨论各种能源方案的特点和前景。

一、能源及其基本特性

世界能源构成

工业革命以来，世界主要能源消耗是不可再生能源，包括化石能源和核能。根据美国能源信息署（EIA）的统计，单化石能源（煤、石油、天然气）一项就占总初级能源消耗的86%，核能占6%。其他能源包括水力，风力，地热，太阳能等加在一起才占不到8%，其中水力一项又占了7%。也就是说，除了传统的水力以外，所有其他可再生能源只占全

世界初级能源消耗的1%。

长期以来，世界化石能源消耗中，石油占大头，约占40%，而煤和天然气大约各占30%，煤略多。这与中国能源消耗构成有很大的差别。中国初级能源近80%依靠煤炭。目前中国煤炭消耗量已占世界煤炭消耗量的40%强。正是因为近年来中国煤炭消耗大幅增加，世界化石能源消耗中，天然气所占比例才与煤炭逐渐拉开。

以可再生能源为代表的新能源虽然近年发展很快，但占人类消耗总能源比重仍然很低。如果不计传统的水力和核能，其他新能源（风力、太阳能、潮汐、生物能源、地热等）对全世界能源消耗的贡献几乎可以忽略。

地球能量平衡

对于整个地球而言，能量（温度）平衡的主要因素是太阳能。根据美国航空航天署（NASA）的统计，太阳辐射能占地球获得能量的99.97%，约174 PW（ 10^{15} 瓦）。其他还有：约45太瓦的地热能，来自于地球内部放射性元素衰变及与月球和太阳之间的潮汐活动，表现为地热和地质活动；约3太瓦的潮汐能，主要来自地球与月球和太阳之间的潮汐作用；约13太瓦的化石燃料燃烧，这是工业革命以来，人类活动额外引起的。

地球获得的所有能量都将释放到太空。大体来说，大约30%的入射太阳能直接反射出去，其中大气反射6%，云反射20%，地球表面反射4%。19%的太阳能被大气和云吸收，并辐射到太空。剩下的51%被地表吸收，其中的23%以相变潜热的方式用于蒸发水分，7%加热地表空气，6%直接辐射到太空，15%辐射到大气，再辐射到太空损失掉。全球光合作用转换的功率大约是100太瓦，但考虑代谢分解与光和作用总体平衡，实际上不用另外考虑。

地球吸收的能量和辐射的能量应该平衡，否则就会引起全球温度变化。温室气体能够减少辐射损失，所以会引起全球气温升高。

化石能源峰值

相对于目前的消费量，已探明的化石能源储量相当有限，考虑到能源需求的刚性增长，如果不采

取措施，仍然按照目前的方式发展，石油大约会在 50 年内枯竭，煤炭也只有 100 余年的时间。

围绕化石能源峰值理论有许多争论，但是大的油气田越来越难发现，剩下的油藏也越来越难开采也是不争的事实。虽然每年还有新增的储量，但是按照目前的需求增长速度，储采平衡将越来越难维持。即使按非常乐观的估计，21 世纪前半叶，石油生产峰值出现几乎是没有疑问的。

世界能源消耗增长

从 1980 年到 2008 年，世界一次能源消耗大约每年增长 2%，28 年增加 75%。同期人口增加了 50%。如果维持这一增速，到本世纪末，一次能源消耗将达到现在的六倍。但如果考虑世界人口增长减缓并稳定在 100 亿左右，即比 2008 年增长 50%，则可以认为到本世纪末，世界能源消耗大约是 2010 年的三倍，也就是 50 太瓦左右。换句话说，在现在主要的一次能源不能增长，甚至减少的情况下，世界还需要额外两倍于目前总量的能源。

100 年内，中国、印度及其他发展中国家要到目前发达国家的平均能源消耗水平，再考虑人口增长，50 太瓦都不够。

100 年的时间很长，很多变化可能会发生，即使人口增长也有不同的估算方法。技术的进步，能源利用效率的提高，社会的发展，很多事情难以预料，但 100 年后 50 太瓦也许是一个比较适宜的能源消耗估计。下面我们将以此为依据，估计一下下 100 年世界能源的构成。

二、各种能源及其前景

石油

石油无疑是现代社会最重要的能源，无论是从应用范围、不可替代性，还是从总量上看。由于石油的重要性，以及石油资源的不平衡性，石油一直是国际政治的中心议题之一。但石油也是所有化石能源中将最早枯竭的。2010 年，全球石油消耗折合功率约为 5.8 太瓦。很多人认为这已经是石油开采和消费的峰值了，但也许还能维持到 2030 年或者更后，峰值不会超过 8 太瓦，以后随着社会向其他能源转移，并且由于石油高昂的价格，石油产量逐步下降。到 2110 年，产量会降到现在的三分之一左右，也就是 2 太瓦。2030 年之后，开采的石油中，非常规石油将占很大的一部分。

石油作为常规能源，在很多如飞行、海运等未

来还将大力发展的领域中很难替代。除了作为能源之外，石油还是重要的化工原料。

煤炭

煤炭目前主要用于发电、供暖和化工原料。作为发电用途的煤炭增长到 2030 年左右后会维持较长时间，然后缓慢下降。相对石油，煤的储量更丰富，分布更广泛，在相当长的一段时间内，将是发展中国家最经济可靠的能源。出于对环境污染和全球气候变化影响的考虑，煤炭不会发展得很快。2010 年世界煤炭消耗功率约为 4.8 太瓦，2030 年左右会增加到 6 太瓦，并维持到 2050 年左右，之后缓慢下降。

水能

主要指利用河流湖泊水位差发电的大小水电，不包括潮汐发电。世界水能总蕴藏量约为 7.2 太瓦，目前已经利用到 1.1 太瓦左右。考虑环境因素，总的开发率不会太高。另外因为季节因素、防汛考虑等，总的水能利用率也不会太高。但是开发数量仍会稳定缓慢增长，估计到 2110 年，水能利用功率能达到 2.5 太瓦。

海洋的洋流、温差、波浪和潮汐能等资源量在 10 太瓦左右，目前的开发程度还很低，一百年内能够得到一定程度的开发。到 2110 年，估计海洋能源利用能达到 0.5 太瓦。

核能（裂变）

由于对环境及气候问题的担心，曾经让人谈核色变的核能，现在已归到清洁能源和新能源一类，因为没有排放问题。核能在本世纪中，将成为最重要的能量来源之一。

关于核能大家需要知道一些事实：现在所有的在役包括在建的反应堆只能利用大约 1% 的燃料铀。剩下的 99% 是高放射性乏燃料，短期内无法处理。

核电原料铀或钍在自然界非常丰富。常见的世界铀资源总量只有 550 万吨的说法（世界能源组织报告）非常误导。该报告的前提是开发成本在每千克 130 美元（2007 年价格）以下。实际上到 2010 年铀的价格就跌到了每千克 100 美元以下（最近又回升到 140 美元左右）。如果将铀的价格提高一倍，可开采储量将增加 10 倍。海洋中有 110 亿吨铀，从海里提取铀的成本是每千克 300 美元左右。由于地壳中铀的丰度是海洋的 1000 倍，因此海里的铀是取之不尽，用之不竭的。地壳中每吨土壤中的铀和钍

含有的裂变能大约相当于 30 吨煤。因此发展核能，铀或钍资源不是问题。一千克铀的热值大约相当于三千吨煤，而目前一千克铀的价格大致与一吨煤相当。在一座核电站中，铀燃料的成本几乎可以忽略。而同样规模的燃煤电厂中，煤的成本要占 70%。所以铀的价格再涨几倍也没有问题。

裂变核能的主要问题是安全性。反应堆装核燃料数十吨，还可能数百吨本地堆放的乏燃料。裂变堆临界工作，中子浓度和堆芯温度与裂变反应速度是正反馈的，需要时刻精确控制反应堆中子浓度和堆芯温度，一旦超临界失控将导致融堆和大规模泄漏，影响范围广，危害大，时间长。前苏联切尔诺贝利及刚在日本福岛发生的核事故都说明核安全的重要性。即使反应堆设计很好，事故概率低，但在人为破坏和军事打击之下，核反应堆是没有任何抵抗力的。当前的做法是在受到重大地质灾害或军事威胁的时候，反应堆停堆卸载燃料。如果核能是社会的主要能量来源，这种做法意味着能源安全没有保障。

未来核能需要解决的主要技术问题是核燃料利用率的提高，方案有实现燃料循环(乏燃料后处理)，增殖反应堆，聚变裂变混合堆等。这些方案是目前核能利用的主要研究方向。燃料后处理的主要问题是成本，增殖堆需要消耗大量危险裂变元素，混合堆的前提是成熟的聚变技术。

核能(聚变及聚变裂变混合堆)

聚变能源无疑可以成为人类终极能源，但根据现在研究的进展情况，聚变能源要真正为人类所用，还有很长的路要走。聚变其实不难实现。磁约束聚变也早就实现了输出输入能量比大于 1。惯性约束聚变应该也能在较短的时间内实现这一目标。但由于设备和技术的复杂性，要维持聚变装置持续稳定运行，并且源源不断地输出能量，还有很多困难，也存在相当的不确定性。但似乎也没有原则性的困难。根据国际热核聚变实验堆(ITER)组织的路线图，第一座商业磁约束聚变堆应该在 2035 年左右开始建造。个人认为，第一座经济上可行的纯聚变堆在 2050 年左右投入使用就非常乐观了。考虑到聚变能源的清洁性，安全性和燃料的丰富程度，人类无论是在 50 年或者 100 年内解决聚变能源利用问题，都是非常了不起的成就，因为这奠定了人类以后千万年的发展基础。100 年即使对短暂的人类历史，也

不算很长。100 年内，传统的能源也还够用。

另外一个基于聚变的思路是，聚变装置本身太大太复杂，如果能够降低对聚变能量输出的要求，简化聚变装置，利用氘氚聚变产生的高能中子轰击铀钍等裂变燃料，可以直接燃烧铀 238、钍 232 等裂变惰性核，这样可以直接烧掉天然裂变燃料的 99%，废料的放射性也会大大降低。这就是聚变-裂变混合堆方案。混合堆方案还有链式反应亚临界，反应不会失控的显著优势。方案早在 20 世纪 50 年代就已经提出，20 世纪 80 年代美苏研究较多，但因混合堆裂变燃料的使用量很大，核扩散问题不好解决，研究一度中断。近几年重新引起大家关注。

混合堆除了裂变燃料使用量过大，停堆后需要持续强制冷却问题外，装置的复杂性、高放射性运行环境都是很大的问题。由于对聚变装置能量输出要求较低，它可能与第一座商用纯聚变堆同时出现。

美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室声称，基于惯性约束概念的聚变裂变混合堆在 2020 年左右就能投入使用，但其实还有很多问题没有解决，估计会和其他商用聚变堆差不多同时出现。这些聚变堆或混合堆会差不多同时成功的一个原因是他们很多关键技术是相同的，比如第一壁的材料和构成。

快中子增殖堆用到的技术有所不同，但要技术成熟，以及积累足够的燃料和运营经验，也差不多要这个时候。

其他方案目前都有很多问题。由于核能技术复杂、危险、投入大，建设和研究的周期都很长，任何一种新方案没有三五十年的研究很难成熟。到本世纪中叶，应当有一到两种先进核能技术可以利用，用来代替常规化石能源。在这之前，也可以大规模采用常规三代核能技术，在人才、技术、法规、商业运营方面做好准备。另外也可以储备大量下一代核能需要的核燃料。

从可靠性来说，包括聚变在内的核能应该是本世纪最重要的能源。目前核能利用总功率是 1 太瓦左右，到 2110 年要逐渐攀升到 20 太瓦左右，占总一次性能源消耗的 40%。

三、可再生能源

以太阳能、风能、生物质能等为代表的可再生能源是目前能源领域最重要的话题，但到目前为止，即使经过了十来年的飞速发展，可再生能源对社会的贡献仍然停留在概念层面，实质贡献不大。下面

分别讨论。

太阳能

地球每年获得的太阳能总量极大，是目前人类消耗初级能源总量的一万多倍，因此很多人认为只要利用上很小比例的太阳能，人类能源需求就可以得到满足。比方说中国 2010 年底电力装机为 1 太瓦左右，地球每平方米平均获得的太阳能是 350 瓦，因此只需要 $10^{12}\text{W}/350\sim 3\times 10^9$ 平方米 = 3000 平方千米，算 10% 左右的发电效率，也只要 3 万平方千米。到本世纪末，用电再增加 3 倍左右，也只要 10 万平方千米。中国西部有上百万平方千米的荒漠，完全可以满足要求。

然而事情没有那么简单。首先，算辐射能必须去掉大气和云层反射和吸收的部分，这样在中国大概只剩下 200 瓦，人口密集和经济发达地区更低。其次，由于太阳的角度是不停变化的，实际上需要更多的土地来放置能够跟踪太阳的光伏板，否则不能充分利用光伏板的发电能力。占用的土地面积一般是光伏板面积的数倍。第三，由于太阳能是间歇性的，实际发电能力只有铭牌功率的四分之一左右，也就是要发 1 太瓦电，需要安装 4 太瓦太阳能板。经过多年快速发展，中国 2010 年的太阳能电池产量是 8 吉瓦 (10^9 瓦)，占全世界一半。即使如此，也需要 500 年才能把这些电池生产出来，而太阳能电池的使用寿命只有 20~30 年。第四，数十万平方千米的发电厂建设需要极大的基础材料消耗，如钢材、铝、铜、玻璃、晶体硅等，如果每百瓦（约 1 平方米太阳能电池板）需要 10 千克钢材作为支架，1 千克铜做导线，则 4 太瓦需要 4 亿吨钢材，4 千万吨铜，其中铜为中国铜年产量的 10 倍。现在的太阳能电池都用铅酸蓄电池蓄能。哪怕只是将 1 太瓦 1 天的能量储存起来，也需要 6 亿吨铅酸蓄电池，大约是中国 2010 年铅酸蓄电池生产能力的 200 倍，而铅酸蓄电池使用寿命只有 3~4 年。第五，太阳能电池并不是不需要维护，除了故障以外，灰尘也是一个很大的问题。一般每平方米降尘 1 克，就可以导致太阳能板发电减少 10%，而中国每平方米年降尘量在数百克量级，也就是说，每天都要除尘。大城市，工业发达地区，荒漠（戈壁）等地降尘量犹大。另外，太阳能电厂完全占用土地。到 2010 年，中国所有城镇建设用地还不到 4 万平方千米，要将数十万平方千米荒漠土地开发出来（平整，安装设备，建

设规则全面的交通和维护网络，等等），是一项非常巨大的任务。

由于太阳能的普遍性，本世纪太阳能利用还是会有较大的发展，但不会成为主要能量来源。利用方式主要是供热。到 2110 年，太阳能发电可占到初级能源消耗总量的百分之一，即 0.5 太瓦左右。

风能

与人类消耗的能源相比，风能资源量是非常大的。美国在 2010 年初发布的一份报告称美国大陆 48 州陆上现有技术可开发风能（80 米高空）为 13 太瓦。中国应该也差不多（国家气象局在 2005, 2009 年出的两个报告称中国风能资源量分别为 0.25 太瓦（10 米）和 2.4（50 米）太瓦，该数据没有国外文献引用）。

从能量密度上来说，典型的风力资源区可以达到 1 千瓦每平方米，远远高于太阳能。风能开发占用土地资源很少，不需要每天维护，发电可以直接上网。因此，与太阳能相比，风力发电优势明显。

风能的限制因素是它的不稳定性。气候条件不佳时需要后备传统电源填补空缺。因此电网中风能所占比例不能太大，一般认为极限在 20% 左右。考虑到风电实际发电能力只有装机容量的五分之一到三分之一，20% 的风力发电贡献已经意味着其他装机容量的总和了。即使考虑部分电力需求可以以间歇的方式提供，风能在全部一次能源中的比例应该不会太高，以 20% 计，到 2110 年风能大约能达到 10 太瓦（装机 40~50 太瓦）。这个数字在 2010 年是约 0.04 太瓦（装机 0.2 太瓦），一百年内还需要增长数百倍。

生物能源（生物质能和生物燃料）

地球是个生命世界，每天有大量太阳能被光合作用生物转化为生物质能。2010 年世界粮食产量约 23 亿吨，对应的残留物（秸秆等）大约也是这个数量，再加上树木及木材的老化废弃等，全球每年可利用的生物质能在 50~100 亿吨左右。折合功率约为 2~4 太瓦，考虑到 100 年内粮食产量至少还应该提高一倍，在加上农业工业化、集约化，生物质能利用规模化，到 2110 年，生物质能的利用应该能逐步发展到 3 太瓦左右，是目前的约 100 倍。

生物燃料（乙醇，生物柴油等）的来源是粮食、植物油、农牧业有机废弃物等，在农牧业发达、土地资源丰富的地区有比较大的发展潜力。考虑到太

太阳能非常丰富,地球上的荒漠及未利用土地还很多,随着高技术、高投入农业的逐步发展,及其他生物燃料技术的发展和成熟,生物燃料到2110年,能增加到0.5太瓦左右。

地热能

地热资源量相当大(45太瓦),但能量密度低并且分散。用作发电投入也比较大,并且效益会逐年递减,但用来采暖就要好得多。

大规模地热开发有一个很重要的用途是用来抑制火山爆发。对一些潜在危害非常大,能大规模摧毁人类社会的火山,比如美国的黄石公园超级火山,应该迅速大规模开发地热,从而抑制它的喷发。

目前的地热资源利用率还非常低,随着技术的开发和推广,以及超级火山爆发预防的需要,到2110年,地热能利用能达到1.5太瓦。

四、蓄能技术

蓄能技术(主要是蓄电)是能源有效利用非常重要的一部分。风能太阳能这些资源量很大的能源不稳定,没有大规模蓄能技术难以有效利用,但大规模蓄能很困难。用机械或化学的方法蓄能,能量密度都很低。比如将一百万千瓦一天的能量存起来,需要60万吨铅酸电池,或12万吨钠硫电池,或15万吨锂电池,或9000万吨水提升100米。可是2010年中国电力装机已接近10亿千瓦。

由于蓄能技术在物理和化学方面的原理性限制,蓄能能量密度不太可能有质的提高,因此电网蓄电在总的能源利用总的比例不太可能很高。

随着农业工业化的发展,有可能发展出对能源稳定性要求不高的农业生产方式(植物工厂等),从而大量吸纳不稳定电源供电。

五、似是而非的未来能源

可燃冰(天然气水合物) 有人认为可燃冰资源量巨大,是未来清洁能源的重要组成部分。但最近的研究发现,可燃冰没有以前以为的那么多,而且分布不集中,大规模开采将带来巨大的环境问题,只有很少的地方可以开采。

空间太阳能 有人建议在空间建立大型太阳能电站,并以微波形式传回能量。即使不考虑空间电厂的巨大费用,微波往地球传送能量是极端危险的,因此这类方案不太可能得到管理部门的批准。

高空风能与太阳能 平流层几乎没有云,大气环流强烈并且稳定,有人认为可以大规模开发。这

些方案安全性难以保证,不太可能产业实现。

基于如上分析,我们可以画出2010年到2110年世界各种能源消耗的情况如图1。可以看出,100年后,最重要的能量来源是核能(包括聚变和裂变),占总能源的40%强,另外一个重要的来源是风能,占20%强。传统化石能源在2030年左右达到峰值,然后缓慢下降,到100年后,将从目前的80%降到20%左右。水能大致维持总的贡献比例。太阳能(发电)增长虽然非常大,但占总能源比例不超过1%。地热和生物能源有很大的发展潜力,在100年后的能源构成中将占据相当重要的地位。来自传统能源的贡献中,石油下降最快,因为资源相对较少,并且替代能源大规模出现;煤炭下降最慢,因为资源丰富,利用的技术和成本都比较低,大量发展中国家的现代化离不开煤炭。

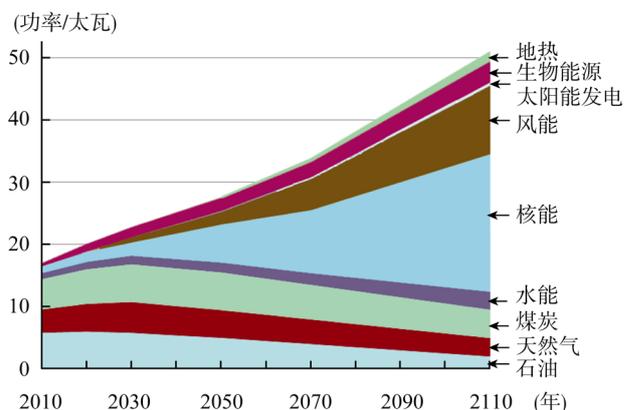


图1 下一百年世界各种能源消耗变化图。横坐标是年份,纵坐标是功率,单位是太瓦。从2010年到2110年,世界总能源消耗增加两倍到51太瓦左右。传统化石能源将下降,但仍占据相当重要地位,主要新增能源来自核能和风能。

(北京大学物理学院 100871)

