

# 高速切削 TiAl6V4 温度和切削力动态变化规律研究

叶贵根<sup>1,2</sup>, 薛世峰<sup>1</sup>, 仝兴华<sup>1</sup>, 戴兰宏<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国石油大学(华东); <sup>2</sup>中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室

**摘要:** 切削温度和切削力是反映高速切削加工过程的两个重要物性指标, 是高速切削研究的主要内容。本文基于实验验证的有限元数值模拟技术, 系统研究了高速切削 TiAl6V4 过程中切削温度与切削力随切削速度的变化规律, 揭示了其中的物理起源, 并对 Salomon 假设的存在性进行了初步探索。研究结果表明, 刀具与切屑接触区温度总是随着切削速度的增加而上升, 而工件加工表面温度则在切削速度达到一定临界值后随切削速度增加而降低。另一方面, 切削速度的增加将引起主、次剪切区温度上升以及刀-屑接触长度的缩短, 进而导致切削力减小。

**关键词:** 高速切削; 切削温度; 切削力; 数值模拟

中图分类号: TG501

文献标志码: A

## Dynamic Changing Regularity of Temperature and Cutting Force during High Speed Machining of TiAl6V4

Ye Guigen, Xue Shifeng, Tong Xinghua, Dai Lanhong

**Abstract:** Cutting temperature and cutting force are two important physical characteristics to describe the high speed machining process; they are the chief contents of high speed machining research. Based on the FEM numerical simulation which was validated by cutting experiments, the changing regularities of temperature and cutting forces with cutting speed in high speed machining of TiAl6V4 are researched systematically. The physical origins of these changing regularities are revealed, and the existence of Salomon's assumptions is further discussed. The results of the study indicate that, with increasing the cutting speed, the tool chip contact temperature always increases, while the workpiece temperature decreases after the cutting speed reaches a certain critical point. Furthermore, increasing the cutting speed rises the primary and secondary shear zone temperature and shortens the tool chip contact length, which finally decreases the cutting force.

**Keywords:** high speed machining; cutting temperature; cutting force; numerical simulation

## 1 引言

高速切削技术是近几十年来迅速崛起的一项先进制造技术, 它具有提高生产率、提高加工精度和表面质量、降低生产成本、可加工高硬度的难加工材料等优点<sup>[1,2]</sup>。高速切削代表了现代加工技术的主流方向, 已成为国内外学者关注的热点, 关于高速切削的研究也越来越深入。

高速切削这一理念源自于德国切削物理学家 Carl Salomon<sup>[3]</sup>在 1931 年提出的一个关于高速加工的专利。Salomon 认为: 在常规的低速切削范围内, 切削温度随着切削速度的增大而提高; 但是, 当切削速度超过某一临界值进入高速加工区后, 切削温度以及所需的切削力反而随切削速度的增加而下降。按照这一理念, 在具有一定速度的高速区进行切削加工, 会有比较低的切削温度和比较小的切削力, 不仅有可能用现有的刀具进行高速切削, 大幅度缩短切削时间, 成倍提高生产率, 而且还将给切削过程带

来一系列的优良特性。Salomon 假说吸引了众多学者对其进行不断探索, 然而由于高速切削实验条件的制约, 至今仍没有精确的令人信服的证据可以证实 Salomon 曲线的存在, 关于 Salomon 的高速切削假设也存在很大的争议<sup>[4]</sup>。

切削温度与切削力是反映高速切削加工过程最为重要的两个物性指标, 是影响刀具磨损、刀具寿命和加工表面完整性及加工质量的重要因素<sup>[5,6]</sup>。另外, 切削温度和切削力随切削速度减小是 Salomon 假设的精髓, 是高速切削技术的发端, 因此进一步研究高速切削过程中温度和切削力的变化规律对于高速切削机理研究具有重要意义。本文将基于实验验证的有限元模拟技术, 针对航天航空常用材料 TiAl6V4, 系统研究高速切削过程中切削温度与切削力随切削速度的变化规律, 并进一步揭示其物理起源。

## 2 高速切削有限元模拟

本文采用大型通用有限元软件 ABAQUS 实现 TiAl6V4 高速切削过程的数值模拟。高速正交切削

基金项目: 国家重点基础研究项目(2009CB724401); 国家自然科学基金资助项目(10725211, 11021262); “NSAF”联合基金资助项目(10976100)  
收稿日期: 2011年3月

的初始有限元网格划分如图 1 所示。工件和刀具均采用稳定性较好的双线性缩减积分、热一位移耦合、平面应变四边形单元 CPE4RT, 并进行局部细化。模拟过程中刀具假定为刚体并以恒定速度运动, 工件底端及远端固定。

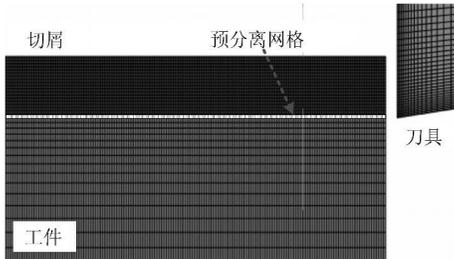


图 1 切削有限元模型

为实现切屑和工件的分离, 建模过程中在切屑和工件间加入预分离网格(见图 1)。预分离网格材料受到刀具挤压后发生变形, 当其等效累积塑性应变达到临界值  $\tilde{\epsilon}_p$  时网格发生断裂失效, 从而实现切屑和工件的分离。在本文中  $\tilde{\epsilon}_p$  设置为 2, 这样能保证预分离网格的断裂破坏速度(切屑与工件的分离速度)与刀具移动速度一致<sup>[7]</sup>。

关于刀-屑间的接触摩擦, 根据 Zorev<sup>[8]</sup> 的研究, 将刀具与切屑的接触区域分为滑动摩擦区和黏着摩擦区。整个刀-屑摩擦区域可描述为

$$\begin{cases} \tau = \mu \sigma_n, & (\mu \sigma_n < k_{\text{chif}}) \\ \tau = k_{\text{chif}}, & (\mu \sigma_n \geq k_{\text{chif}}) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\tau$  为摩擦应力,  $\sigma_n$  为法向应力,  $k_{\text{chif}}$  为材料剪切屈服应力, 取为 455MPa,  $\mu$  为刀-屑摩擦系数, 取为  $0.3^{[9]}$ 。

模拟过程中采用 Johnson Cook 本构模型来描述工件材料在高温、高应变率和大应变情况下的塑性流动行为, 具体可表示为

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (2)$$

式中,  $\sigma$  为等效流动应力,  $\epsilon$  和  $\dot{\epsilon}$  为等效应变和应变率,  $A$  为准静态条件下的屈服强度,  $B$ 、 $n$  为应变强化参数,  $C$  为应变率强化参数,  $m$  为热软化参数,  $\dot{\epsilon}_0$  为参考应变率,  $T$ 、 $T_0$ 、 $T_m$  分别为工件温度、室温及工件熔化温度。TiAl6V4 的各参数取值见表 1<sup>[9]</sup>。

表 1 TiAl6V4 材料本构参数

A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	$T_0$ (K)	$T_m$ (K)	$\dot{\epsilon}_0$
789	529	0.028	0.28	1	293	1873	1E-5

### 3 模拟结果的可靠性验证

为验证数值模拟方法的可靠性, 针对 TiAl6V4

进行了不同速度的正交切削实验, 通过对比相同切削条件下模拟与试验所获得的切屑形貌来验证数值模拟方法的有效性。切削实验在 MIKRON UCP710 数控车床上进行, 刀具选用 YT15 硬质合金刀具, 刀具前角  $0^\circ$ , 后角  $7^\circ$ , 进给速度  $0.1 \text{ mm/r}$ , 切削速度  $3\text{--}90 \text{ m/min}$ 。切削结束后, 对切屑进行镶样、打磨抛光、腐蚀, 并进一步对其形貌进行显微观测。不同切削速度下的切屑形貌如图 2 所示。

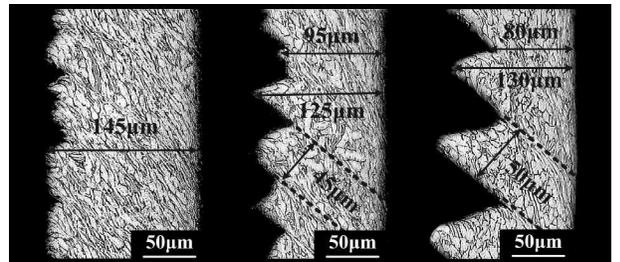


图 2 不同切削速度下的切屑形貌

采用与切削实验相同的切削参数(刀具倾角  $0^\circ$ , 后角  $7^\circ$ , 切削厚度  $0.1 \text{ mm}$ ), 对 TiAl6V4 在不同速度下的正交切削过程进行了模拟, 模拟结果如图 3 所示。通过对比图 2 和图 3 可以发现, 在相同的切削条件下, 数值模拟和实验所得到的切屑形貌非常相似, 通过数值模拟所得到的切屑宽度、锯齿间距、锯齿最大及最小宽度与实际切削时的切屑形态能很好的吻合, 这表明本文所采用的数值模拟方法是有效和可行的。

## 4 切削温度变化规律研究

### 4.1 刀-屑接触区温度变化规律

通过在不同的切削速度下进行高速切削数值模拟( $3\text{--}600 \text{ m/min}$ ), 发现刀-屑接触区的平均温度随切削速度的增加而增加。但当切削速度达到一定值后, 温度的变化率开始减小, 如图 4 所示, 可见该规律与 Salomon 假设相矛盾。在高速切削加工过程中, 大量的切削热是由金属变形以及刀-屑间的摩擦产生的。随着切削速度的提高, 切削层金属变形增加, 切削做功增大, 单位时间内产生的切削热相应增多, 导致刀-屑接触区温度上升; 同时随着切削速度的提高, 单位时间内切屑与刀具之间的摩擦热增多, 也会引起刀-屑接触区温度的升高。但是当切削速度达到一定值后, 随着切削速度的提高切削层金属的变形程度减缓, 由此使得刀-屑接触区温度增长率降低。

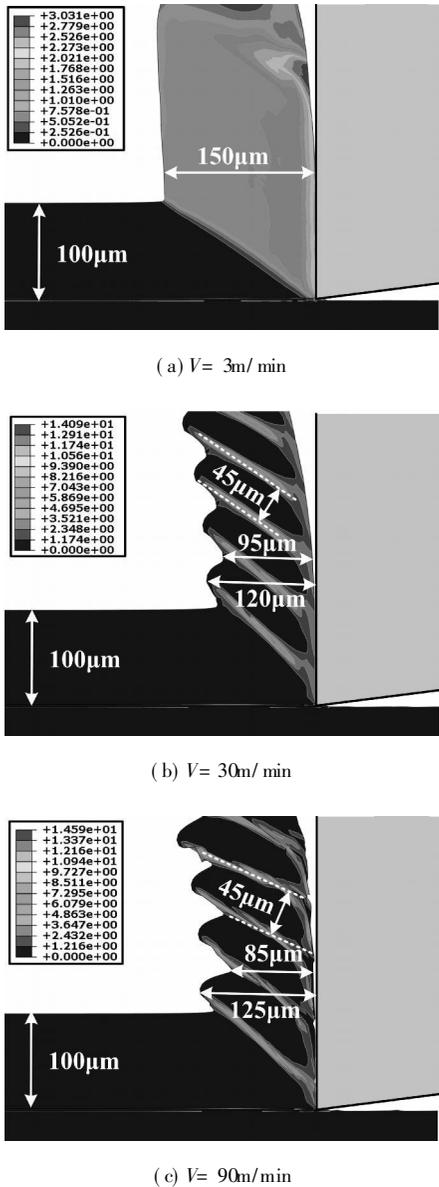


图3 数值模拟结果(等效塑性应变云图)

### 4.2 加工表面温度变化规律

不同切削速度下的模拟结果显示,在切削速度较小时工件加工表面温度随着切削速度的增加而上升,但是当切削速度达到一定临界值后,工件加工表面温度却随着切削速度的进一步增加而减小,如图5所示。这一变化趋势与Salomon假设完全一致。在速度较低的时候,切削速度的提高会导致切削热的增多,使得切屑温度上升。而这个时候由于切屑流动速度较小,切屑内的热量有充分的时间向工件扩散,从而引起工件加工表面温度升高。但是在高速切削条件下,由于切屑能够迅速从工件表面脱离并沿刀具前刀面快速流走,工件塑性变形与刀-屑摩擦产生的热量绝大部分都被切屑带走,导致切削热向工件的扩散受到限制,由此使得工件加工表面

温度降低。

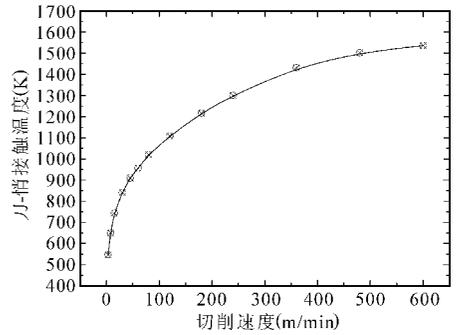


图4 刀-屑接触温度随切削速度变化曲线

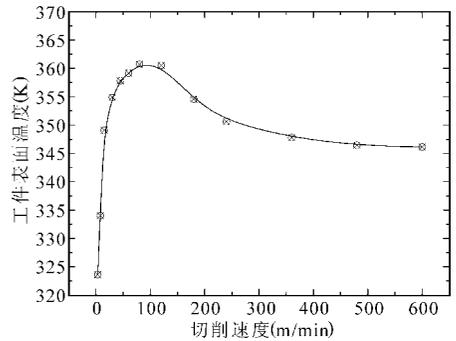


图5 工件加工表面温度随切削速度变化曲线

由此可见,刀-屑接触区温度与工件加工表面温度随切削速度的变化规律存在相当大的差异。根据Shaw<sup>[10]</sup>的研究,高速切削过程中90%以上的热量由切屑带走,而传入工件的热量仅为5%左右。由于高速切削过程中大部分的热量都流入切屑,导致刀-屑接触区温度上升而工件加工表面温度却相对降低。因此,当关注于刀-屑接触区的温度时,Salomon假设就难以证实,切削温度总是随着切削速度的增加而增加;而将切削温度定义为工件加工表面温度时,Salomon假设就得到了很好的验证。由此可见,怎样给切削温度以统一而准确的定义是研究Salomon假设的前提。由于刀-屑接触区的温度变化规律和分布规律是影响刀具耐用度最重要的因素,具有更高的工程实践意义,从这一角度来说,Salomon假设还远未证实。

### 5 切削力变化规律研究

切削力的大小直接影响切削热的多少并进一步影响着刀具的磨损、加工表面质量及加工零件的精度。模拟结果显示,在相同切削条件下,水平切削力和垂直切削力都随切削速度的增大而减小,但是当切削速度达到一定临界值后水平切削力和垂直切削力趋于稳定状态,如图6所示,这与Salomon假说中

关于切削力的变化规律是一致的。

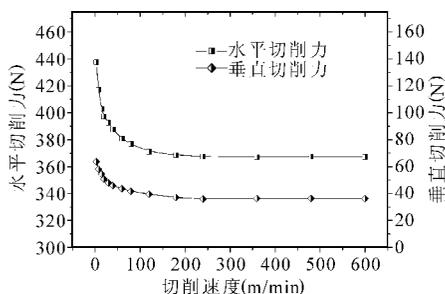


图6 水平及垂直切削力随切削速度变化曲线

由于切削过程中的能量全都由水平切削力提供,因此水平切削力是描述切削过程最为重要的一个参数,它的大小直接体现了切削过程中能量的消耗情况。切削过程中的能量主要消耗于主剪切和次剪切区的塑性变形以及刀-屑摩擦<sup>[11]</sup>,因此水平切削力的大小取决于主、次剪切区的塑性变形能及刀-屑摩擦耗能。

主、次剪切区的塑性变形能与工件材料的流动应力相关,流动应力越小,工件材料在主、次剪切区发生塑性变形所消耗的能量就越少,水平切削力也会相应降低。图7给出了主剪切区及次剪切区平均温度随切削速度的变化规律。由图7可知,随着切削速度的提高,主、次剪切区温度都不断升高,直到切削速度达到某一临界值后才逐渐趋于稳定。主、次剪切区温度的上升会导致材料热软化,从而降低切削过程所消耗的能量,使得水平切削力减小。

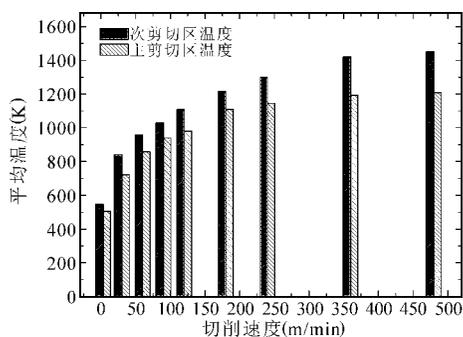


图7 主、次剪切区温度随切削速度的变化曲线

刀-屑摩擦耗能则主要取决于摩擦应力及刀-屑接触长度。根据 Zorev<sup>[12]</sup>的研究,切削过程中刀-屑接触摩擦的黏、滑分界点一般位于接触中心,与切削速度无关。由于黏着区摩擦应力等于材料剪切屈服应力,而滑动摩擦区的摩擦应力变化趋势受切削速度的影响也比较小,因此刀具与切屑间摩擦所消耗的能量主要取决于刀-屑接触长度。图8给出

了刀-屑单位接触长度(刀-屑接触长度与切削深度的比值)随切削速度的变化曲线。可以看出,刀-屑接触长度随切削速度的提高而减小,并最终趋于稳定。刀-屑接触长度的减小将导致刀-屑摩擦耗能降低,从而造成水平切削力的进一步减小。另外值得注意的是,数值模拟结果表明,切削速度越高,切屑卷曲越厉害,从而切屑能更快地脱离刀具,使得刀-屑接触长度缩短。这与低速切削实验结果是一致的(见图9)。

综上所述,切削速度提高引起主、次剪切区温度上升及刀-屑接触长度减小是导致水平切削力减小的主要原因。

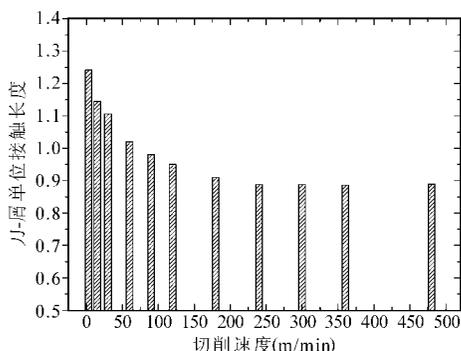
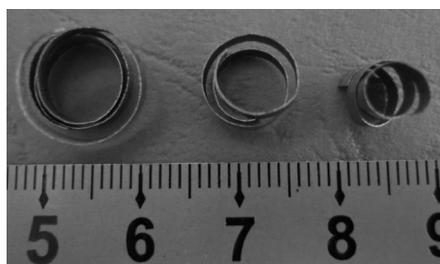


图8 刀-屑单位接触长度随切削速度的变化曲线



从左到右依次为:  $v = 3\text{m/min}$ ,  $v = 15\text{m/min}$ ,  $v = 60\text{m/min}$

图9 不同速度下的切屑卷曲形貌

## 6 结语

本文基于实验验证的有限元模拟技术,针对航天航空常用材料TiAl6V4,系统研究了高速切削过程中切削温度与切削力随切削速度的变化规律,研究结果表明:

(1) 怎样给切削温度以统一而准确的定义是研究 Salomon 曲线的前提。将切削温度定义为刀-屑接触区温度时,Salomon 假设就难以证实:切削温度总是随着切削速度的增加而上升;将切削温度定义为工件加工表面温度时,Salomon 曲线就得到了很好的验证:在切削速度较小时,工件加工表面温度随着

切削速度的增加而上升,而当切削速度达到一定临界值后,工件加工表面温度随着切削速度的进一步增加而减小。

(2) 水平切削力和垂直切削力都随切削速度的增大而减小,并最终趋于稳定。该趋势与 Salomon 假说一致。切削速度提高引起的主剪切及次剪切区温度上升以及刀-屑接触长度减小是水平切削力减小的主要原因。

### 参考文献

- [1] 乔阳,艾兴,赵军,等. 高温合金高速加工技术及刀具材料研究[J]. 工具技术, 2009, 43(6): 3- 6.
- [2] 艾兴. 高速切削加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [3] Salomon C J. Process for the machining of metals or similarly acting materials when being worked by cutting tools: Germany, 523594[P]. 1931- 04.
- [4] Longbottom J M, Lanham J D. A review of research related to Salomon's hypothesis on cutting speeds and temperatures[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(14): 1740- 1747.
- [5] 周泽华. 金属切削原理[M]. 上海: 上海科学技术出版社,

- 1984.
- [6] 何振威,全燕鸣,乐有树. 基于有限元模拟的高速切削中切削热的研究[J]. 工具技术, 2006, 40(3): 60- 63.
- [7] Hortig C, Svendsen B. Simulation of chip formation during high speed cutting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 186: 66- 76.
- [8] Zorev N N. Toll forces and tool- chip friction in orthogonal machining[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1964, 6: 422- 422.
- [9] Calamaz M, Coupard D, Girot F. A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti- 6Al- 4V[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48: 275- 288.
- [10] Shaw M C. Metal cutting principles[M]. UK: Oxford University Press, 2005.
- [11] Merchant M E. Mechanics of the metal cutting process I: orthogonal cutting and the type 2 chip [J]. Journal of Applied Physics, 1945, 16: 267- 275.
- [12] Zorev N N. Metal cutting mechanics[M]. Oxford: Pergamon press, 1965.

第一作者: 叶贵根, 博士研究生, 中国石油大学工程力学系, 100190 北京市

First Author: Ye Guigen, Doctoral Candidate, China University of Petroleum, Beijing 100190, China

## 新能源重点锁定四大产业 生物质能独领风骚

生物质能发电具有成本低等优势,将成为我国新能源产业发展的一大重点。记者日前获悉,战略性新兴产业发展“十二五”规划已进入征求意见阶段,出台脚步临近。新能源作为七大战略性新兴产业之一,未来发展重点锁定核电、风电、太阳能和生物质能四大产业。其中,太阳能和生物质能发电装机容量基本确定,即未来5年分别达到1000万千瓦和1300万千瓦。从规划目标来看,生物质能“风头”已经盖过光伏。

有关专家指出,与光伏相比,生物质发电更具成本优势,这是导致其风头正劲的重要原因。

中国科学院、中国工程院院士石元春推算,1300万千瓦发电装机容量意味着要增加500-700个生物质能发电厂,一年要建成100多家生物质能电厂。

“受日本核事故影响,核电发展的安全性更受重视,由此可能会影响其发展的速度。”国家发改委能源研究所高级顾问周凤起分析指出,生物质能发电成本低而太阳能发电成本高,是导致生物质能未来5年发展更快的主因之一。

国家发改委副主任、国家能源局局长刘铁男日前在我国首次农村能源工作会议上表示,要通过合理布局生物质发电项目、推广应用生物质成型燃料、稳步发展非粮生物液体燃料、积极推进生物质气化工程。

据透露,除了到2015年生物质发电装机达到1300万千瓦外,还要集中供气达到300万户、成型燃料年利用量达到2000万吨、生物燃料乙醇年利用量达到300万吨,生物柴油年利用量达到150万吨。专家预计,到2015年各类生物质利用量至少超过4000万吨标准煤。

“对于战略性新兴产业,各地都非常看重,也在提供各种支持。”一位业内人士向记者透露,不久前广东省发改委就下发通知,专门调查战略性新兴产业项目贷款需求情况。其目的就是采用贷款承诺、担保、贴息等办法,保障战略性新兴产业建设项目的资金需求。

记者了解到,为了全力支持新能源产业发展,相关部门已经确定了一些重大行动和重要支持政策。其中,目前国家发改委正组织编制秸秆综合利用实施方案,计划出台秸秆综合利用试点工作方案,并有意推进大型自动化秸秆收集机械研发与推广,以求为生物质能发展铺平道路。此外,有关部门还将推进燃气内燃发电机组等关键设备的研发,以及大型生物质气化与净化成套设备等产业化。

中国可再生能源学会常务理事李元普认为,除上述措施外,还要加强生物能源植物原料的育种与产业化。

正是看到生物质能发展的巨大潜能,近年来湖北、山东等地方政府,以及凯迪电力、中粮生化等上市公司,纷纷集中优势资源,加大对生物质能产业的投入。