

# 材料磨损研究的进展与思考

温诗铸

(清华大学 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 阐述了材料磨损理论和抗磨损技术研究的进展, 分析了磨损损伤特征和复杂性, 着重讨论了磨屑形成机制, 指出疲劳机制研究具有重要意义, 并就今后材料磨损研究提出了若干建议。

**关键词:** 磨损理论; 磨屑形成机制; 抗磨损技术; 进展

**中图分类号:** TH117.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-0595(2008)01-0001-05

摩擦学是研究摩擦表面或界面行为、损伤与控制的技术学科。材料摩擦学性能通常是指摩擦磨损性能。摩擦是摩擦副表面在相互滑动中发生能量转换, 并产生能量损耗的过程; 而磨损则是由摩擦副之间力学、物理、化学作用造成的表面损伤和材料剥落。摩擦与磨损密切相关, 但并不存在确定的量化关系。由于摩擦磨损现象广泛地存在于各类机械装备, 造成巨大的经济损失, 因此受到人们极大的关注。

摩擦学研究旨在揭示摩擦磨损形成机理及影响因素, 进而建立物理模型和数学描述, 以及寻求润滑、表面处理等技术, 以减少摩擦和控制磨损<sup>[1]</sup>。因此, 摩擦学研究对于国民经济发展具有重要意义。

在远古时代人们就意识到磨损的存在和危害, 例如卢克里蒂斯(公元前 95 ~ 55 年)曾经指出: “.....手指不断摩擦使戒指磨薄。滴水会穿石成孔。犁头即使是铁的, 在犁沟时也会逐渐磨小。我们看到, 道路的路石因受行人的践踏而被磨光。城门的青铜雕像右手因受过路旅客的抚摸而被磨薄.....但是我们见识浅薄, 希望今后有能力去了解在任一时期内什么部分被磨损掉。”由于磨损是造成机械装备失效的重要原因, 在摩擦学研究中, 人们普遍认识到磨损研究的重要性, 并开展了最广泛的研究。然而, 因磨损现象的复杂性, 迄今为止, 在摩擦学基础理论研究方面, 可以说针对磨损的研究又是最不完善的。

## 1 磨损损伤的特征

有关磨损问题的基础研究, 无论是实验考察还是理论建模和量化均存在许多困难, 这是由于磨损

损伤过程所具有的复杂特征造成的。作者认为, 磨损的主要特征有:

(1) 磨损过程中材料剥落过程是发生在摩擦表面间接触微区内的动态过程, 产生剧烈的力学作用, 并伴随物理化学变化, 因此难以直接观测磨屑形成过程。虽然在 20 世纪 60 年代, 诸如电子显微镜、能谱仪等一大批表面微观分析仪器相继商品化, 广泛用于表面微观形貌以及表面层结构和组成分析, 推动了磨损机制研究的深入发展<sup>[2]</sup>, 然而, 这些仪器只能应用于磨损前和磨损后的静态观察和对比, 无法实现磨损过程的在线检测。

(2) 材料的摩擦磨损性能与其他力学性能不同, 它不是材料的固有特性, 而是材料在实际摩擦学系统中表现出来的综合性能。换言之, 材料的摩擦磨损性能与其所处的条件, 包括接触形态、环境状况、运行工况等密切相关, 是材料在所处条件下特定的性能。因此, 材料摩擦磨损性能对所处条件具有强烈的依赖性<sup>[4]</sup>。

(3) 与材料其他机械损伤相类似, 磨损也主要源于力学作用下的材料强度劣化, 然而磨损是特殊的力学问题, 其特殊性表现为: 外部施加给材料的力学作用是变化的, 而且材料承受力学作用的体积和性能也是变化的<sup>[3]</sup>。因此, 磨损过程是时变性很强的随机过程, 该过程同时又与环境因素密切相关。

(4) 现实的磨损总是多种机制共存, 而且是交互作用的过程, 因此磨损所表现出的外部特征错综复杂。

根据当今的摩擦学原理, 按照表面作用、表面层

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50730007, 50575123)。

收稿日期: 2007-09-25; 修回日期: 2007-11-04 联系人温诗铸, e-mail: dpwysz@mails.tsinghua.edu.cn

作者简介: 温诗铸, 男, 1932 年生, 教授, 中国科学院院士, 目前主要从事润滑理论、摩擦磨损机理与控制、纳米摩擦学以及微机械学等研究。

变化和破坏形式等 3 个方面的情况通常可将磨损分为 4 种典型类型,即磨粒磨损、疲劳磨损、粘着磨损和腐蚀磨损.针对各类磨损可以将材料磨损损伤机制归纳为切削(犁沟)机制、粘着机制和疲劳机制等 3 种典型机制.

从 20 世纪 40 年代开始,人们根据特定的工况条件,分别针对各种磨损机制进行了大量的实验研究和分析,建立了相应的理论和磨损公式<sup>[5]</sup>.然而,正因为是在特定的实验条件下得出的结论,其针对性和局限性较强,不尽适用于其他的工况条件.同时,实际的磨损现象往往又是多种机制综合影响的结果,所以现有的磨损理论普适性较差,磨损基础理论研究落后于工程实践的要求.

## 2 磨损理论与磨屑形成机制研究

人类研究磨损的规律及其机制以便控制或利用磨损所作的不懈努力,可以追溯到 15 世纪达·芬奇(1452~1519 年)关于材料磨损的实验研究.据 1967 年在马德里发现的达·芬奇关于滑动轴承磨损研究的手稿记载,轴承磨损随载荷增加而加剧.为了减少磨损,他研制出了一种新型轴承材料,即含 30%铜和 70%锡的轴承合金<sup>[6]</sup>,这是最早设计的轴承合金材料.

1724 年,Desagulier 提出了固体摩擦过程存在粘着现象的观点.随后,他发现 2 个铅球在相互紧压时将发生牢固的粘着<sup>[6]</sup>.可以认为,这是人类首次认识摩擦磨损过程中的粘着现象.

经过长期的生产实践和科学研究的积累,人们不断深化对磨损本质的认识,提出了大量描述磨损的物理模型以及预测磨损的量化公式.以下是几种影响较大且具有代表性的磨损理论的要点.

(1) 和 (1960 年)磨粒磨损微切削理论<sup>[7]</sup>

磨粒磨损是磨粒对摩擦副表面产生犁沟作用和进行微切削的过程;磨粒的硬度和摩擦副表面硬度的相对值是影响磨损的基本因素;金属和各种成分未经热处理的钢材的耐磨性与其硬度成正比,其磨损量与磨粒的大小和形状等有关.

(2) Bowden 和 Tabor(1964 年)粘着理论<sup>[8]</sup>

摩擦副之间的实际接触面积只占表观接触面积的很小部分,因而接触峰点处于塑性状态;在摩擦过程中产生的瞬时高温作用下两表面形成粘着结点;滑动摩擦是粘着与滑动交替发生的跃动过程;摩擦磨损起源于峰点接触的粘着效应和犁沟效应.

(3) 等(1977 年)疲劳磨损理论<sup>[3]</sup>

由于存在粗糙峰和波纹度,表面接触是不连续的;摩擦过程中接触峰点受周期性载荷作用,从而产生疲劳破坏即磨损;疲劳磨损取决于接触峰点的应力状态;根据摩擦副的载荷、滑动速度、表面形貌和材料性质等,应用弹塑性力学模型可以建立磨损量计算公式.

(4) Fleisher(1973 年)能量磨损理论<sup>[9]</sup>

磨损是能量储存、转化和消散的过程;摩擦过程所做功的约 9%~16%以势能的形式储存在表层材料中;当多次摩擦使材料累积的能量密度达到临界值时,即形成磨屑而剥落,藉以耗散能量;各接触点积累的能量取决于接触点的体积和形状,而能量集聚的能力与材料组成和结构有关.

(5) Suh(1977 年)剥层磨损理论<sup>[10]</sup>

在摩擦副相互滑动时,软表面粗糙峰易于变形或断裂,逐渐形成光滑表面;而硬表面粗糙峰在相对光滑的软表面滑动;每次滑动使软表面各点经受一次循环载荷,在表层内产生剪切塑性变形及位错,并不断积累;表层内一定深度处位错积累,进而形成裂纹或空穴;裂纹沿平行表面方向扩展,达临界长度后以片状磨屑剥落;根据弹塑性力学可以建立磨损的计算公式.

以上这些理论均是根据一定的实验检测结果来建立物理模型,再经过相关理论推导出磨损计算的量化关系.然而,由于影响磨损的因素繁多,还存在许多尚未能了解的因素,因此,所建立的磨损公式不可避免地包含一些目前还难以确定的变量,在实际应用中受到很大的局限.可以认为,当今磨损理论研究还处在不够完备的阶段.

根据 Ludema<sup>[11]</sup>统计,在过去 40 年的文献中共发表了近 300 多个各种形式的磨损公式,用于描述与磨损有关的变量有 600 多个,最基本的也有 100 多个.这些公式都是研究人员根据不同的观点和不同的条件实验提出的.其中即便是被认为比较完备的公式在实际应用中也有很大的局限性.正如著名摩擦学家 Tabor 所指出的,人们通常采用模仿某种摩擦磨损现象来构建相适应的研究条件,然后通过实验得到结果.

综上所述,关于磨屑形成的主要机制可以归纳为 3 类,即疲劳、粘着和能量机制.作者认为,这 3 类机制不是单一存在而是相互依存的.例如,在疲劳机制中,裂纹的萌生、扩展和断裂都需要吸收材料的变形能,而变形能又是摩擦过程中由摩擦功转换而来

并储存于材料中的能量。

在粘着磨损研究中,早期提出的粘着形成机制认为,表面粗糙峰是在塑性接触下由于瞬时高温所产生的焊点,而对于非金属材料的粘着有人提出了所谓的“冷焊”现象。显然,这些认识是不尽符合实际的。业已发现,在粘着磨损过程中,摩擦功转换为材料粘着能而形成结点,结点在滑动中由于机械作用而分离破坏,即产生磨损;粘着结点的形成和分离都伴随着能量转换,其粘滑运动是粘着能与动能交替转换的过程。由此可见,能量转换与耗散是伴随磨损过程的现象,而不是材料损伤的内在原因。

由粘着磨损理论推导出的 Archard 公式被广泛用于计算粘着磨损量,该公式中含有磨损系数  $k_s$ 。Fein(1971年)和 Tabor(1972年)分别采用四球摩擦磨损试验机和销盘式摩擦磨损试验机对不同材料和润滑剂进行的实验研究都证明, $k_s$ 的数值远小于 1(介于  $10^{-2} \sim 10^{-10}$ )<sup>[11]</sup>。这说明粘着结点需要经过许多次(介于  $10^{-2} \sim 10^{-10}$ )反复粘着和分离才能形成磨屑。可见,粘着磨损的磨屑形成机制实质上是材料的疲劳损伤。

通过以上分析,我们对于粘着磨损似乎可以得出这样的认识:能量转换和耗散是伴随粘着过程的现象,粘着是造成磨损的条件即外因,本身并不直接导致损伤,而磨损损伤最根本的机制,即内因是材料疲劳。

20世纪 50年代提出了 2项重要的摩擦磨损理论,即英国剑桥大学物理化学系表面物理与化学研究室 Bowdon和 Tabor发展的粘着理论以及前苏联科学院机械研究所( )以 为代表所创建的疲劳理论。可以说,这些理论的提出奠定了磨损理论研究的基础,解释了一些客观现象,并对材料抗磨性能的研究起到了重要的指导作用。但与此同时,上述理论也存在局限性。随后,虽然不少学者分别对上述理论进行了大量的研究,但至今未能建立具有普适性的完备的磨损理论。

显然,对于复杂而多变的磨损过程,要从单一的损伤机制出发建立统一的物理模型和预测公式十分困难。磨损机制及其量化研究仍将是摩擦学工作者面临的主要挑战之一。为此,必须有针对性地深入考察典型磨损的发生及发展规律,在系统实验研究的基础上就特定工况条件下的磨损建立定量计算公式,再在实际应用中不断完善和扩展。

作者认为,通过深入分析磨损过程,区分磨损损伤的现象与本质,考察磨屑形成过程的外因和内因,

就有可能透过错综复杂的现象,探索发现种类繁多的磨损问题中的某些共性的本质。以磨屑形成为例,其内在原因主要是材料强度,包括静强度和疲劳强度的破损问题。对于磨粒磨损,如果磨粒嵌入软表面而发生强力切削或划痕,则属于静强度破损;如果硬磨粒划过软表面,正如剥层磨损理论所阐述的那样,则属于疲劳强度破损。对于粘着磨损,若摩擦副由相同金属组成,或粘着结点附近的材料塑性变形和硬化程度相同,则粘着结点强度较高,此时材料的剥落分离源于次表层剪切,属于静强度破坏,即胶合磨损。而通常的粘着磨损,如前所述,需要经过许多次的粘着和分离才能形成磨屑,属于疲劳损伤。对于微动磨损和冲蚀磨损,显然需要对表面施加多次反复的应力才能形成磨屑。腐蚀磨损的化学作用是弱化表面材料的性能,而剥落仍是机械作用,通常被称为腐蚀机械磨损。而接触疲劳磨损中磨屑的生成是典型的疲劳机制过程。综上所述,作者认为,除静强度破坏以外,相当数量的磨损中磨屑形成的共性特征是材料疲劳过程,因此,疲劳机制似乎可作为各类磨损机制研究的基础。

俄罗斯、白俄罗斯、乌克兰等国的学者针对磨损研究提出了“摩擦疲劳”(tribo-fatigue)一词,颇具新意,可以理解为由摩擦作用引起的材料疲劳。近年来,他们已发展了相应的理论<sup>[12]</sup>,开辟了磨损机制研究的新思路,值得我们借鉴。国内武汉材料保护研究所的高万振、李健等与他们开展了学术交流,并联合举办了多次国际学术会议。

应当指出,摩擦疲劳是发生在材料表面的接触疲劳,其应力状态复杂,裂纹萌生、扩展和断裂都局限于表面层,是一种特殊的疲劳形式。然而,就其损伤本质而言仍应遵守材料疲劳的物理规律。若如此,我们可以预期,经过长期研究有可能建立适用性更强的磨损物理模型和量化关系。与此同时,现代摩擦学研究已由宏观深入到微观,由纳米科技推动的纳米摩擦学研究得到了迅速发展。通过在原子、分子尺度上研究摩擦表面和界面行为、变化及损伤机理,建立宏观磨损性能与材料微观结构之间的关系,可望从另一方面为磨损理论的发展提供深层次的基础<sup>[13,14]</sup>。

### 3 抗磨损技术研究

摩擦学作为一门技术基础学科,在基本理论或原理研究方面取得的重大发展无疑对工程应用具有重要的推动作用。然而,理论上的突破需要经历长期

的积累,在开展磨损机制研究的同时,还必须为工程实际的需要发展抗磨损技术研究.其中,抗磨损材料和表面处理技术是摩擦学领域十分活跃的分支<sup>[2]</sup>.

近 30 年来,材料磨损研究从以金属材料为主体扩展到非金属材料包括陶瓷、聚合物及复合材料等.陶瓷作为新兴的耐磨材料具有优异的耐磨损、耐腐蚀性能及高温稳定性,在高效动力机械中有着广阔的应用前景.高分子聚合物材料具有较低的摩擦能耗和较高的化学稳定性,可望成为优良的减摩材料.通常单一均质材料不能满足多种性能要求,为此,近年来已开发出以金属和非金属为基体,含各种改性填料的复合材料.

表面处理技术是摩擦学研究中发展最迅速的领域之一,它利用各种物理、化学或机械方法赋予表面层材料特殊的成分、组织结构和性能,以适应综合性性能要求.近年来,多种处理技术组合以及表面层的组织和性能按规律变化的梯度材料研究获得了长足进展.

摩擦磨损是发生在材料表面的现象,显然与材料表面性质密切相关,包括其几何性质和物理性质.以往人们对材料表面几何性质即表面形貌与摩擦磨损的相关性进行了大量研究,而关于材料物理性质包括表面层的微硬度、内应力以及冷作硬化程度等对磨损性能影响的研究较为欠缺,今后应着重加强这方面的研究<sup>[15]</sup>.此外,开发新型润滑材料和技术,研究磨损失效监测和故障诊断技术以防止重大事故也是抗磨损技术研究的重要方向.当今磨损研究的大多数工作集中于抗磨损技术研究,国内外发表了大量的研究报告,本文不再重复.

#### 4 我国磨损研究的若干进展

我国摩擦学工作者针对典型的磨损状态开展的基础研究取得了若干进展<sup>[16]</sup>.其中,周仲荣等<sup>[17]</sup>对微动磨损机制进行了较系统的研究,考察了材料表面强化和润滑对微动损伤的防护作用.他们指出,在微动过程中接触表面分别处于滑移区、部分滑移区和混合区;其相应的损伤机制不同.滑移区主要发生磨损,部分滑移区发生轻微损伤,而混合区是裂纹萌生、扩展最快的区域.

接触疲劳磨损是导致滚动摩擦副失效的主要原因.在表面循环接触应力作用下,表层内产生塑性变形积累,导致疲劳裂纹萌生、扩展和断裂.但研究者就采用何种剪应力作为接触疲劳设计准则存在不同的观点.作者<sup>[18]</sup>在接触应力上叠加轴向应力以改变

应力场,通过实验和计算分析论证了在复合应力场作用下各种剪应力包括最大剪应力、正交剪应力、等效应力、表面剪应力等的变化及其对接触疲劳的影响;并指出表面剪应力在迄今的相关研究中通常被忽略,而事实上最大表面剪应力在优质钢材接触疲劳磨损中的作用不容忽视.

磨合磨损过程是通过不断改善表面形貌获得良好摩擦学性能的过程.与此相适应,磨合过程中表面形貌变化及其预测研究受到了重视.葛世荣等<sup>[19]</sup>应用分形理论对无润滑磨合动力学进行了实验研究和分析,考察了磨合过程中表面形貌的分形行为及其分形参数的变化规律,藉以提出磨合磨损分形预测模型.

胡元中等<sup>[20]</sup>对润滑磨合动力学进行了研究.磨合初期摩擦副处于混合润滑状态,粗糙峰点接触占主要部分.他们利用混合润滑理论计算的摩擦副接触表面压力分布和磨损分布.由于峰点压力高、磨损量大,因而在磨合过程中表面形貌得到改善,逐步扩大油膜润滑部分,进而通过磨损与润滑耦合最终实现全膜润滑.

为了揭示磨损发生及发展,人们力图实现磨损过程的原位观察.王伟强等<sup>[21]</sup>就此进行了探索,在特定工况下得到了具有一定借鉴意义的结果.

近年来,我国开发出了一批新型高效的喷涂技术及装备.例如,王汉功等<sup>[22]</sup>先后研制了超音速电弧喷涂、多功能超音速火焰喷涂及低温超音速火焰喷涂设备及技术,可以满足各种材料的喷涂要求.采用超音速喷涂技术制备的涂层与基体结合强度高、孔隙率低,涂层的耐磨性、耐腐蚀性和耐高温性能得到进一步提高.在电刷镀技术方面,徐滨士等<sup>[23,24]</sup>在镀液中添加特殊材料的纳米颗粒,依靠纳米颗粒的强化作用显著地提高了涂层的性能.

#### 5 结束语

爱因斯坦曾经说过,对客观事物只了解现象不是真正的了解,还必须了解其本质和变化以及产生变化的原因,并能够准确地描述它,这样才能够达到控制和利用的目的.从这个意义上来说,尽管长期以来人们针对司空见惯的磨损现象开展了大量的研究,而迄今我们对磨损的认识还远远不够,难以满足相关的工程应用的需要.

由于材料磨损行为对摩擦学系统的依赖性和时变性,以及影响因素的错综复杂,使得相关的理论分析和实验检测存在极大困难.在现代纳米科技推动

下迅速发展起来的微尺度研究模式,包括多种相关的理论和测试手段可望帮助人们从深层次上揭示磨损机制及其本质,从而建立普适性较强的宏观磨损准则。

毋庸讳言,作者深感磨损研究的重要性和迫切性,然而囿于经验和认识所限,拙作仅就个人关于磨损研究的部分粗浅认识和思考进行梳理、归纳,若能作为引玉之砖对同行们有所借鉴,则已足可欣慰。

### 参考文献:

- [1] 温诗铸. 摩擦学原理 [M]. 北京:清华大学出版社, 1990.
- [2] 温诗铸. 世纪回顾与展望——摩擦学研究的发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2000, 36(6): 1-6  
Wen S Z Centurial review and prospect—the development tendency of tribology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(6): 1-6
- [3] 克拉盖尔斯基 等著,汪一麟等译. 摩擦磨损计算原理 [M]. 北京:机械工业出版社, 1982.
- [4] 葛中民,侯虞铿,温诗铸. 耐磨损设计 [M]. 北京:机械工业出版社, 1991.
- [5] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理 (第二版) [M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [6] 契霍斯 H 著,刘仲华等译. 摩擦学——对摩擦、润滑与磨损科学技术的系统分析 [M]. 北京:机械工业出版社, 1984.
- [7] 赫罗绍夫,巴比契夫 著,胡绍衣,余沪生译. 金属的磨损 [M]. 北京:机械工业出版社, 1966.
- [8] Bowden F P, Tabor D. The friction and lubrication of solids[M]. Oxford at the Clarendon Press, 1964.
- [9] Fleisher G. Energische methode der bestimung der verschleißes[J]. Schmierungstechnik, 1973, 4: 9.
- [10] Nam P Suh. An overview of the delamination theory of wear[J]. Wear, 1977, 44: 1-16.
- [11] Ludema K C. Mechanism-based modeling of friction and wear [J]. Wear, 1996, 200: 1-7.
- [12] [M]. , 2003.
- [13] 温诗铸. 纳米摩擦学 [M]. 北京:清华大学出版社, 1998.
- [14] 温诗铸. 纳米摩擦学研究进展 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(10): 1-8  
Wen S Z Progress of research on nanotribology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(10): 1-8.
- [15] [M]. , 1956.
- [16] 温诗铸. 我国摩擦学研究的现状与发展 [J]. 机械工程学报, 2004, 40(11): 1-6  
Wen S Z Existing state and development of tribology research in China[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(11): 1-6.
- [17] 周仲荣,朱昊昊. 复合微动磨损 [M]. 上海:上海交通大学出版社, 2004.
- [18] 温诗铸. 对于接触疲劳各种强度准则的评价 [J]. 清华大学学报, 1982, 22(4): 9-18  
Wen S Z An appraisalment to the different strength criteria about contact fatigue[J]. Journal of Tsinghua University ( Science and Technology), 1982, 22(4): 9-18.
- [19] 葛世荣,朱华. 摩擦学的分形 [M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [20] Hu Yuanzhong, Li Na, Tonder K. A dynamic system model for lubricated sliding wear and running-in [J]. Journal of Tribology, Trans ASME, 1991, 113: 499-505.
- [21] 王伟强,温诗铸. 金属无润滑磨损过程的原位观察与研究 [J]. 固体润滑, 1991, 11(3): 145-150.  
Wang W Q, Wen S Z In-situ observation and study of the unlubricated wear process[J]. Tribology, 1991, 11(3): , 145-150.
- [22] 王汉功,查柏林. 超音速喷涂技术 [M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [23] 徐滨士. 纳米表面工程 [M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
- [24] 蒋斌,徐滨士,董世运,等.  $n\text{-ZrO}_2/\text{Ni}$ 复合电刷镀层的微动磨损行为 [J]. 摩擦学学报, 2005, 25(6): 515-519.  
Jiang B, Xu B S, Dong S Y, et al Fretting wear behavior of  $n\text{-ZrO}_2/\text{Ni}$  composite coating prepared by electro-brush plating[J]. Tribology, 2005, 25(6): 515-519.

## Research Progress on Wear of Materials

WEN Shi-zhu

(State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Research progress on wear of materials and antiwear techniques was comprehensively commented. The characterization of worn surface and complexity were analyzed. The formation mechanism of wear debris were discussed. The research on fatigue mechanism is of great significance. Some suggestions concerning future research on wear of materials were proposed.

**Key words:** wear theory, principle of abrasive wear debris formation, antiwear technology, progress

**Author:** WEN Shi-zhu, male, born in 1932, Professor, e-mail: dpiwsz@mail.tsinghua.edu.cn