**材料教材**“mechanical properties”**的概念和问题分析**

赵中平 周蔷(国家电投 上海发电设备成套设计研究院有限责任公司，上海，200240)

彭孫鸿（上海燃诺机电设备有限公司，上海，200235 ）

摘要 教学最基本的要求是传输正确的概念，理论与实际相结合。材料学科中重要的课程“mechanical properties”曾一致定名机械性能，改称力学性能后产生诸多矛盾和概念性的谬误。但教科书主观上将力学性能理念固有化，不能正视明显的逻辑混乱，无视国内的不同观点和国外定名机械性能的事实，同时存在与工程实践有所脱节的现象。该文综合了有关文献的论点，论述这课程定名机械性能为宜的理由、中文“机械”亦有力学的词义，指出有关教科书中的一些明显的问题，供有关师生探讨和指正。

关键词 mechanical properties，机械应力，机械应变，力学行为，标准

Concept and problem analysis of material textbook "mechanical properties"

Abstract: The most basic requirement of course teaching is to transfer correct concepts and combine theory with practice. The important course "mechanical properties" in material science has once been uniformly named jixiexingneng, and many contradictions and conceptual fallacies arose after the name was changed to lixuexingneng. However, the textbook subjectively internalizes the concept of lixuexingneng, fails to face up to the obvious logic confusion, ignores the fact of different domestic views and foreign naming mechanical properties, and is disjointed from engineering practice. This paper, by summarizing the arguments of relevant literature, discusses the reasons why the course is named as jixiexingneng and the Chinese "jixie" has also the meaning of about mechanics, and points out some obvious problems in relevant textbooks for teachers and students to discuss and correct.

Keywords: mechanical properties, mechanical stress, mechanical strain, mechanical behavior, standard

教材的定名必须符合课程的基本概念。材料科学与工程学科中mechanical properties（下称MP）是必读课程，我国在解放前后称为机械性能，以后出现过分歧。如同在1961年，西安和上海交大的教材为《金属的机械性能》，而北京钢铁学院为《金属及合金的力学性质》，但很快就基本统一定名“机械性能”，究其原因是就在这一年术语标准ASTM E6-61[1]正式颁布，根据其定义和注解，结束了首次争论。直至1978 年山东工学院和上海交大等 18 所院校编写的教材仍为《金属机械性能》。冶金部的部标YB15-1964就定名《钢的机械及工艺试验取样法》，《1987. ISO译文集》[2]等仍大量使用“机械性能”和“机械试验”。因此直至上世纪80年代“机械性能”是我国官方语言和国际共识。但1980年后冶金行业在国标GB/T 2975和GB/T10623中毫无理由地改称力学性能，从而产生了重大影响和感化作用，又因有“力学”的光环，致使许多学者逐步被同化，以致否定机械性能。随后材料教科书一致跟着改称力学性能，进一步深化了这个倾向。分析表明早年冶金行业的这种更改并无道理，只是行业偏好[3~6]，更没有论述机械性能有何不当。高校教材的更改同样未给出理由。由此再现“围城”现象：非力学专业的学者要舍弃机械性能，改称不属于力学的力学性能；而真正的力学行为都以“机械”定名，力学家大多不知或不熟识所谓的力学性能。如果这种更改没有太大问题，也可默认，但实际搞混了原本清晰的概念，产生诸多矛盾和错误就应重视。另外教科书对各性能解释不合逻辑，对MP的定义既不统一又含混，而工程中早已有明确陈述；又没有反映工程上材料性能符号的变更，对日本等将MP始终定名机械性能视而不见，更不理会国内仍一直称或必须称机械性能的大量现实。同时有关老师一旦有了成见，具有很强的约束力，对明显的矛盾习以为常，采取鸵鸟政策，并形成年长的老师以称力学性能为荣，虽无合乎逻辑的道理仍不肖于机械性能，年轻的老师不清楚什么是机械性能，更不敢提或提不出异议，生怕越轨和被称落伍，这不利于实事求是地科学探讨。本文对有关老师的教材多有异议，望鉴谅并指正。

1. 课程Mechanical properties（MP）的正名不宜称力学性能宜称机械性能的理由

1.学科分类 教科书都明确“力学性能”课程只适用于机械、材料和冶金学科，不属于力学专业。这自己的性能只属于别人，本身就是概念性矛盾。周知通常冶金行业生产材料供机械等行业使用（机械行业也生产重大的材料），而材料的MP就是构件的服役和制造性能，自然宜称机械性能。同样，材料mechanical test也是称机械试验比较恰当[3,7]。

2. 概念分析

[概念](http://www.so.com/s?q=%E6%A6%82%E5%BF%B5&ie=utf-8&src=internal_wenda_recommend_textn)反映客观对象的本质属性。每一个概念都有一定的外延和内涵．概念的外延就是适合这个概念的所有对象的[范围](http://www.so.com/s?q=%E8%8C%83%E5%9B%B4&ie=utf-8&src=internal_wenda_recommend_textn)，而概念的内涵就是这个概念所反映的对象的本质属性的总和。

性能包括性质和功能。在性质上，材料的本构关系即应力张量与应变张量的关系，可以在一定的初始条件和边界条件下求解，得出需求的未知量，这是力学的性质。而材料性能是材料在一定应力状态下的表征（下再详述），MP是综合性能，对象[范围](http://www.so.com/s?q=%E8%8C%83%E5%9B%B4&ie=utf-8&src=internal_wenda_recommend_textn)包括压扁、扩口、制耳和頂锻等等工艺性能[1]，而周知它们从不称为力学性能；又除强度（含断裂韧性）外的塑性和冲击韧性等与力学也没有直接关系，不是力学参数。因此所谓的力学性能代表不了MP，就像正方形不能代表整个四边形。反之力学性质另有更广的外延，包括做功、振动等特性；又固体力学计算求解的结构强度、耐久性和稳定性等等性能也不在MP之列，更何况还有热力学性质等等。按此力学性质与MP犹如动物与植物，虽然同属生物，具有一定的共性，但彼此具有不同的外延和内涵。

在功能上，力学从未用到除强度外的上述性能，而这些性能包括强度都用于机（构）件的设计、制造、检验和使用，完全符合MP的概念，理应宜称机械性能。

3. MP定名机械性能符合祖国语言文字的规律，并内涵有关力学的性能

事实上由Mechanical组成的词组，除力学中极少数名词如力学行为等外，即使典型的力学行为也需定名“机械\*\*”而不是“力学\*\*”，如力学中的运动定名机械运动，用力做的功称机械功，还有机械阻抗和机械振动等等。对于非力学专业更是如此，如用力学解释自然的观点称机械自然观，可使植物器官抵抗各种外力作用的组织称机械组织，还有机械摩擦、机械细化和机械硬化等等。再者，利用力学原理组成的各种装置称为机械（包括船舰、核电设备等广义的装置），不称力学装置，材料受外力作用时抵抗变形和破坏的能力称机械强度，那么由外力作用（必然产生应力应变）得到的性能称机械性能完全符合我国语言的定名规律。由此可知中文“机械”用作定语时与mechanical具有一一对应的词义[7]。

这里有一误区：将mechanical当作mechanics的衍生词，认为当然可译成力学的。实际正相反，mechanical在mechanics出现前早就存在了，不是后者的定语。 mechanics衍生于[希腊语](http://baike.sogou.com/lemma/ShowInnerLink.htm?lemmaId=53865" \t "_blank)μηχανη─机械，“机械”与力学关系密切，它历来就有力学的含义。的确现在mechanics较多地用于力学（如材料力学、力学原理，按此力学性能宜对应mechanics properties），但百年多来并没有改变上述的事实。当然mechanical properties（MP）的正名应是机械性能这是由学科属性、概念含义和语言规律等决定的。并应认识到机械性能就涵盖了与力学有关的性能，不能将“机械”含义狭义化。

4. 一些标准用语只能定名机械性能 国际电工标准IEC/TR 60575《Thermal-mechanical performance test and mechanical performance test on string insulator units 》及由此转换的国标GB/T 22708—2008定名《绝缘子串元件的热机和机械性能试验》此处不可能称为热力学性能（它对应thermodynamic property），必须使用“机械性能”。

5.国际共识。 如果英文有翻译问题，那么日本也将MP定名“機械的性質”，台湾地区也称“機械性質”，英日汉词典也如此，这都反映国际共识。

二、材料性能教科书存在的问题探讨

教科书改称力学性能后不可避免产生概念不清，逻辑混乱等的问题。

（一）MP的内涵

1. 上已述，在广义上 MP包括工艺性能。以弯曲性能试验为例，可用台虎钳并人工将试样弯曲，其试验结果只目测有无裂纹，并不定量化，不是力学参数，合格与否可由用户决定。它们不为力学所用，只是机件制造所需的性能。而教科书一般对此不加阐述，予以回避。

2. MP在狭义上也不宜统称力学性能。狭义上的材料性能主要是强度、塑性和韧性等五大指标，并强调性能的物理本质和必须参量化。下面分别分析。

①塑性 教科书说得很明白：“塑性指标不能直接用于机件的设计，与材料服役行为之间并无直接联系”，与力学并无直接关系，这实际已清楚说明塑性不能称力学性能，但因固有成见，为自圆其说将其定为“安全力学性能指标”[8~10]，这更牵强附会。所谓指标即是必须达到的要求，而虽然机件用材需要一定的塑性，以防预期之外的偶然过载等，但它既不是设计也不是使用指标。如某柴油机曲轴原用45号钢制造，要求伸长率大于16%，冲击功要求大于39J，但用球铁制造，伸长率只要求大于2%，冲击功要求更低得多，也能确保安全运行。因此作为指标，它们只是机件的制造质量指标，与“安全力学”无关。

②冲击韧性 教材说得很明白[8~11等]：“材料的冲击韧性ak没有物理意义，冲击值Ak的物理意义也不明确”，不能真实代表材料的韧脆情况，同样不能直接用于机件的设计，主要用来检验机件制造工艺和质量。因此正如[12]所述：“Ak或ak的物理意义不太明确，把它作为力学性能指标是不合适的”。文[10]还直接称其为“机械性能”。

③强度 包括拉、压和疲劳强度等，以及与之相关的断裂韧性都可作为力学参数和设计依据，在材料科学中进行基础理论分析研究时确可称力学性能。实际一些教科书中“力学性能”的定义就是强度的定义，并指出[8,13，16]：“材料的力学性能是关于材料强度的一门学科”，其实质很清楚：强度可称力学性能，而其他塑性和韧性等不在其列。

但另一方面即使强度性能也是称为机械性能更加合适。其一力学中的强度与材料的强度有着本质区别，固体力学中的强度与物体截面面积、净截面模量、截面塑性发展系数、力的分布和均匀性和约束条件等有关，用材强度为其一个参数。根据这些因素建立数学关系式进行应力应变分析；断裂力学还包括分析物体中的裂纹大小、方向、分布、相互影响和合并，确定断裂准则，研究裂纹扩展规律，这些才是真正的力学性质。而材料的强度（包括断裂韧性）并不涉及这诸多因素（包括裂纹），是在一定应力状态下的特性，“排除实验材料的尺寸、体积、质量的影响”[17]，相对比较单一和固定。其二材料强度的计算并不符合本构关系，如抗拉强度是用最大拉力除以原始截面积，并无对应关系，Rm（σb）=Pb/S0只是普通的数学公式。屈服强度也一样，人为规定的条件屈服强度可有RPO.O1、RP0.02、RP0.1、RP0.2、 RP0.5和RP1.0等，都是根据机械构件服役条件（允许的残留变形量）选择的实用指标。因此它们与真正的力学性能有别。其三，材料强度指标的确定不取决于力学，是由机件的服役条件、制造工艺和检验要求决定的，这在教科书中也说得很清楚：构件或机件的服役条件要求用材具有足够的强度。如含碳量0.2%的钢，其抗拉强度是多少？从力学的角度无法回答，必须明确针对什么具体构件及其用途，如按标准用于厚钢板，抗拉强度为390/510MPa；用于高压锅炉管为410/550 MPa；而制作螺栓可达500MPa或600 MPa以上。更何况这些指标还可随着机件的服役要求而变化。其四，教材[17]指出：通过工艺改变结构，而达到控制性能的目的。如18-8不锈钢通常要求R0,2（σ0.2 ）为196MPa，但如需要，可经40%冷轧后可提高至780MPa。这说明材料性能研究和测定虽然基于并离不开力学原理，但性能指标并不由力学确定。最后，即使强度可称力学性能，它也已经包含在机械性能之中了。

哈工大的教材很有代表性，虽然两个版本都名为力学性能，但都明确指出：强度与塑性较好配合才可获得较高的韧性，称之为材料的“综合机械性能”[15,16]。这可作为对MP在狭义上意义的结论。其实有些学者自知其中问题，但仍囿于力学这顶帽子。

（二）材料教科书的问题及与工程实际的差异

1.MP的定义 各教科书对MP尚没有一致规范的定义，大致认为是材料在载荷（外力）及环境的影响下的力学行为[7~10]。这种定义并不确切，首先行为的基本意思是举止行动，不等于性能。又许多外力作用下的力学行为如用力做功等也不称性能。在环境影响下的行为当然是必须研究的内容，但已不是单纯力学行为，如应力腐蚀甚至不需要外力；高温蠕变主要取决于内部原子扩散和组织变化，特别是受拉力时缩短的负蠕变现象更与力学规律背道而驰。而在1961年美国ASTME6就明确了MP的定义和注解，并成了国际标准，1989年国标GB/T10623已采用了该定义：“材料在力作用下显示的与弹性和非弹性反应相关或包含应力—应变关系的性能”。乍看该定义好像容易理解为“力学性能”，但在历年ASTME6中都有注解：Discussion-These properties often been referred to as “physical properties”, but the term “mechanical properties” is preferred，这注解就是强调避免上述误解，意思是：通常会将这些性能归属于物理性能，但还是称作机械性能为宜。在这注解中的物理当然指力学，不是声、光、电、热学等，后面的MP指机械性能十分明确，这也是我国早年的一致共识。这个定义比较确切，也明确了材料机械性能的内涵，不包括化学等性能，而环境因素是复加作用。

2.力学性能与物理性能 力学是物理学的分支，随着科技发展力学逐渐分离出来。而教材[14等]就依此认为力学性能也从物理性能中分离出来，大多教材认定它们是两种不同的性能。但这不符合常理，首先2018年新版《物理学名词》仍然包括力学，其次从小学到大学，力学都是物理的一部分，而且只有物理性能和化学性能，从无力学性能，何来分离之说。说材料的所谓力学性能也仅仅是我国大陆将机械性能改称而来的。物理性能通指没有化学键变化的性能，当然包括所谓的“力学性能”，而且完全符合本构关系的弹性模数和泊松比常归于物理性能。又教科书都既要强调它的物理意义，又要说与物理性能不同，自相矛盾。更何况哪有不属于力学的“力学性能”。

3.性能的符号 对于性能符号，教科书几十年来基本不变，但在工程实际中，国际上1998年的ISO 6892中已经更新，我国2002年的GB/T228也采用国际新符号，并成了工程中各行业的规范用符号，其主要符号对比示于下表。从符号也可看出，强度使用力学中应力符号σ偏于科学理论研究。无论如何，教科书对此不能不闻不问。

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 新用符号 | ReH | ReL | Rp | Rm | A | Z |
| 教材符号 | σsU | σsL | σP | σb | δ | φ |

4.无视定名机械性能的国家和行业标准 有关教材对MP除了[12]认为是力学性能又称机械性能外，都只称力学性能。但是在工程上各行业仍在大量应用机械性能，光国家标准至少有十个，如GB/T3098紧固件机械性能、 GB/T14208.2纺织…增强树脂棒机械性能的测定、GB/T 15972.30光纤…机械性能的测量方法 、还有GB/T 6675.2、22708、8834、2006、3098、11417、3780、2951和22708等，行业标准有FZ/T60021、JB/T6370和10696等。这些都有悖于力学性能的固有思维，理应正视不应“忽略”。

5.回避只能称机械性能和机械试验的内容 Thermalmechanical performance也是MP之一，已列入国标GB/T 22708《绝缘子串元件的热机和机械性能试验》，它不可能称热力学性能。这种试验有其特点，但在教科书中找不到。国家军工标准GJB 6213[《金属材料热机械疲劳试验方法](http://www.so.com/link?url=http%3A%2F%2Fwww.bzfxw.com%2Fsoft%2Fsort055%2FGJB%2F135118547.html&q=%E7%83%AD%E6%9C%BA%E6%A2%B0%E8%AF%95%E9%AA%8C&ts=1484361656&t=9654254e7771249d2f65579af8db095&src=haosou)》和GB/T10623中的Thermomechanical Fatigue Testing，是温度和负荷循环变化的机械试验，其性能也不可能称为“热力学疲劳性能”。该标准中mechanical strain定名机械应变不是力学应变。这些都无疑印证MP就是机械性能，教科书如果正视和承认这最直观的事实，就应质疑力学性能的正确性。

6.“材料力学性能”与“材料力学”学科概念相混 MP改称材料力学性能后必然会认为它归属于材料力学（就如正方形属于四边形），在百度和搜狐的“材料力学”词条内容中首项就是“力学性能”。高校材料力学教材[18,19等]也明确包括“材料在外力和温度作用下所表现出的力学性能”。而另一些观点正好相反，认为材料力学属于材料力学性能学科。如教材[13]阐述：“材料力学所研究的内容仅限于…弹性力学行为，不涉及或很少涉及微观机理、塑性变形和断裂行为，…可以说材料力学是材料力学行为（或性能）学科的分支”。实际上这两门学科除了[13]所述区别外，关键是所述的“材料”根本不是一回事。材料力学研究的“材料”指的是结构或装置的构件或机件，如三角桁架梁的横梁，将其简化为杆件，进行结构的应力应变分析，为设计出既安全又经济的构件提供理论依据和计算方法，而“材料力学性能”研究的材料是组成构件的物质，着重成分组合、制造工艺和组织对一定应力状态下材料性能的影响（另上已述两者研究的强度含义也有明显区别）。这两种学科具有完全不同的概念，两者在研究对象、目的、原理、方法和结果上都不同。定名机械性能有利于避免这种误解。

7.教材都明确力学性能课程不适用于力学专业，怎能统称力学性能。

8.教科书也无法解释台湾地区和日本过去和现在一贯定名“機械性質”。

教科书“忽视”这些问题，既不利于老师自己的正确认识，也误导了学生。

三、讨论

1. MP与力学学科的关系 有些学者认为随着科技进步，材料性能研究不但应用传统力学，还发展了弹塑性力学、断裂力学、微观力学，引入了量子力学，无论是电磁力还是强相互作用力所建立的应力-应变本构关系具有力学的本质，认为在材料科学研究中强度是力学性能。这的确有一定道理。但力学并不只用于材料学科，在七大基础学科中都具有重要的地位和作用，又是一门为工程服务的技术科学,可以说各行各业都离不开力学，但并不是各学科的规律和知识都属于力学了。如用弹弓将弹子打到人的额头，随着用力的加大，额头会发红、鼓泡，从小到大直至破裂，其中可分析力学原理，但不能说是人的力学性质，而是生理性质。在化学中，热力学决定反应能否进行和进行的方向及程度，动力学决定反应的快慢，但它不能称力学反应或性能；现代化学以量子力学为基础，但无人认为化学性能属于量子力学性能。同样基于传统和现代力学原理的材料性能MP也不归属于力学。其实教材都说得很清楚。

2.力学行为与“力学性能” 教科书大多把性能定义为行为。但一则，行为是各种各样外部表现，具有普遍性和随意性，不等于性能，性能具有专属性和标志性。如火车开得慢或快、装得多装得少都是行为，但其经济速度和最高速度、满载量等才是其性能。同样试样拉伸试验，不同热处理规范可得到许许多多数据，都只是拉伸行为的表现。文[17]认为:“材料的‘性能’可以有两层含义。第一层是……响应行为或表现。第二层是表征材料响应行为发生程度的参数，常称为性能指标，简称性能”，其本身就说明第一层的行为还不是性能，只有参量化和指标化才能称性能。而决定这个参数或指标的不是力学，是机件服役条件、检验和生产工艺。

再则，上已述无论是否力学专业中的力学行为的表征基本都定名“机械\*\*”，不是“力学\*\*”，文[7]对此有详述。更何况与材料MP有关的力学行为要素：应力、应变、作用力和强度等都冠以“机械”：试样在外力作用引起的应变称**机械**应变；外力引起的体内作用力称**机械**应力，试验时的作用力是**机械**力，上述的**机械**强度等。按此相同的含义，无论材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力或显示的与应力—应变有关的性能称为**机械**性能，不称力学性能，是一脉相承的定名体系，应不难接受！又“机械”就有力学的含义。

3.机械性能会不会理解成机器的性能 如果没有先决条件当然会的，但首先材料的性能就是机器(械)性能的一部分，同时这里有前提：局限于材料，所以不会混淆。又作为定语的机械大多数不指机器，如机械能、机械清洗、机械损伤、机械合金化等等，从未误解。

4.金属材料的机械性能是否适用于新型材料 有人认为机械性能是针对金属材料的，对于许多新型材料如陶瓷、高分子和复合材料等，它们有特殊的制造工艺，因此需要改称力学性能。这既不具说服力又不确实，这些新型材料早就存在了，以前也一向定名机械性能 [20,21]。事实上最早机械就是用各向异性的木头制造的，金属也是后来被应用的，而“[纳米纤维素复合薄膜动态热机械性能](https://max.book118.com/html/2017/0703/119871393.shtm" \t "_blank)以及聚酰胺的热机械性能（Thermal Mechanical Properties ）”[22]也只能称机械性能。又因任何材料的研究，最终目标都是应用[17]，使性能达到构件制作和服役要求，其术语的基本概念没有区别。同时根据科技名词定名原则对外来术语“定名应尊重原意”、“一定要追根求源”，材料MP定义的源头在ASTME6，针对金属材料，其他是传承。一些教材指出：“在讲授材料力学性能时以金属材料为基础，其他材料如陶瓷和高分子是以与金属作对比来讨论的”[11]，实际金属材料的现有技术要比非金属材料发展得更为完善，因此金属材料MP的定名是基础，新型材料相承衔接，都适用机械性能，同时再需强调不能将“机械”狭义化，它就包括有关力学的性能。

四、结论

1. 材料课程Mechanical Properties（MP）是综合性能，在学科归属、概念和语言转换以及国际共识等上都宜定名机械性能。

2.中文机械作定语时与Mechanical 一样具有有力作用和力学的含义，几乎所有力学行为都以“机械”冠名，以力学原理得到的材料综合性能其正名应为机械性能。即使在局部范围对强度等可又称力学性能， 但已包含在机械性能之中。

3.将MP课程改称力学性能的根据不足，存在概念性的混淆，必然产生诸多矛盾，必须引起重视。教科书主观上将力学性能理念固有化，不可避免地产生明显的逻辑混乱和问题。

4.教科书对MP的定义不够确切，性能符号等没有反映工程界的变化和实际，目前国内外大量标准以及文献仍一直使用或只能使用机械性能，教科书有意无意地忽视这些事实，容易引起教师和学生的误解，不利于科学探讨。

参考资料

[1] ASTM E28 委员会. ASTM E6—61 Standard Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing[S]. 费城:ASTM International，1961:1,6

[2] 冶金部情报标准研究总所. 国际标准译文集[S].北京 冶金部情报标准研究总所， 1987:1,7,8等

[3] 赵中平 周蔷 彭孫鸿 彭行金.定名机械性能的依据和改称力学性能的问题[J].中国标准化,2018（2）：118-122

[4] 赵中平 周蔷 王博 卜梦婕. Mechanical properties 中文名的演变过程及其定义[J].中国科技术语2015（1）:43-46

[5] 赵中平 周蔷. Mechanical properties的正名是机械性能[J]. 机械工业标准化和质量, 2017（7）:28-31

[6] 赵中平 卜梦婕 王博. 力学性能还是机械性能 [J]. 标准科学, 2013（12）:77-80

[7] 赵中平 周蔷. 杂议由‘机械’组成的科技术语的定名[J].中国科技术语， 2018（3）：54-56

[8] 时海芳 任鑫.材料力学性能[M]. 北京 北京大学出版社,2008:2,35

[9] 高建明. 材料力学性能[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2004:14

[10] 耿桂宏.材料物理与性能学[M]. 北京 北京大学出版社, 2010:99 ,109,124

[11] 石德珂 金志浩. 材料力学性能[M]. 西安：西安交通大学出版社： 1998:1，17

[12] 韩永生,工程材料性能和选用[M]. 北京 机械工业出版社, 2013:16,123 P.16

[13] 王吉会. 材料力学性能[M]. 天津 天津大学出版社[S],2006:6,12

[14] 杨王玥, 强文江，材料力学行为[M]. 北京 化学工业出版社,2009:1

[15] 刘瑞堂, 刘锦云.工程材料力学性能[M]. 哈尔滨 哈尔滨工业大学出版社,2001: 1，25

[16] 刘瑞堂, 刘锦云.金属材料力学性能[M]. 哈尔滨 哈尔滨工业大学出版社,2014: 1，28

[17] 张帆,郭益平,周伟敏.材料性能学第二版 上海 上海交通大学出版社，2014：1，3，4

[18] 范钦珊,殷雅俊. 材料力学[M]. 北京：清华大学出版社,2004： 9

[19] 郭战胜. 材料力学[M]. 上海 同济大学出版社,2015:2

[20] 单志刚. [用主因子分析研究岩石物理机械性质[J]. 地质与勘探,1989（6）1](http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotal-DZKT198906015.htm)

[21] 安徽理工大学. [煤岩的物理机械性质](https://max.book118.com/html/2017/0126/86941797.shtm) [中国煤矿安全生产网](https://www.baidu.com/link?url=bkTwEwLdIkgeDpvDvcWS9QPyPfcHvls8sDzvEOV_kg_duDbSk4yVje366zrd_qmJkTWuLI6aFlhcQxXgIoEj5a&wd=&eqid=b9c8cb270001253d000000035b2e581d),2011：5

[22] 王广静 ,徐长妍. [纳米纤维素复合薄膜动态热机械性能分析](https://max.book118.com/html/2017/0703/119871393.shtm)[J].林业科技开发,2015(1):1

作者简介：赵中平(1941—),男,江苏无锡人,教授级高工,研究方向为电站金属材料试验研究。

通信方式:zhaozhongping06@ aliyun.com。

通信地址： 国家电投 上海发电设备成套设计研究院 上海市闵行区剑川路1115号 邮编200240