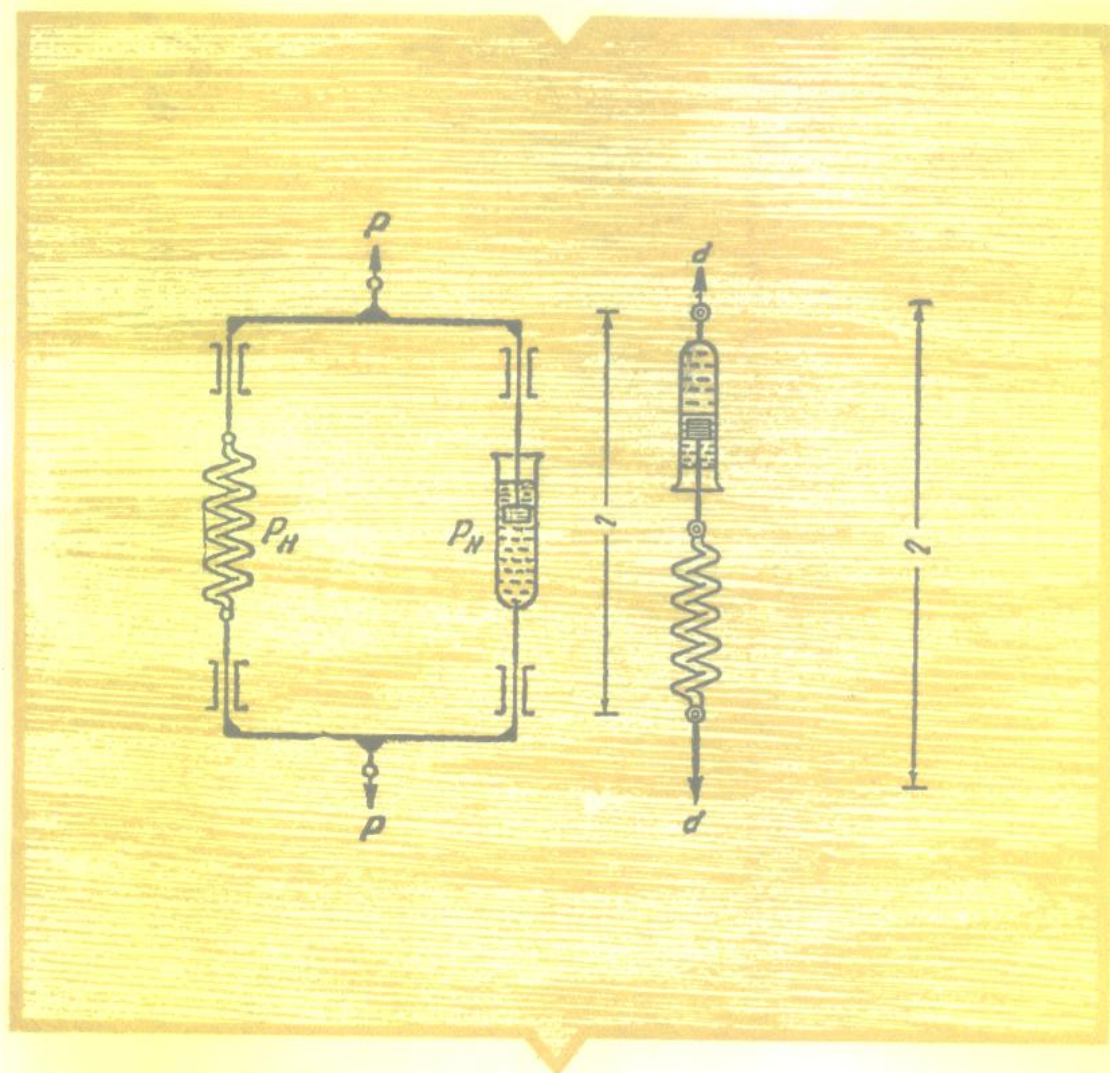


哈尔滨工业大学研究生教材

FOUNDRY RHEOLOGY



林柏年 编著

铸造流变学

哈尔滨工业大学出版社

(黑) 新登字第4号

内 容 提 要

本书共分8章,主要由两部分组成:(1)流变学基础理论。主要结合铸造材料流变性能的特点,叙述各种类型的流变性能、流变性能机械模型、流变性能数学方程式以及材料流变性能机械模型的推导举例。

(2)铸造材料和铸造过程的流变学问题。主要叙述型芯砂、涂料、合金、模料等材料流变性能的测试方法、不同情况下所表现的流变性能特点以及不同流变性能对铸造过程的影响。在此部分中还叙述了铸件热裂形成、熔模型壳烧结等过程中的一些流变学问题。

《铸造流变学》是铸造专业研究生教材,本书还可供铸造专业大学生作选修课教材,也可作铸造专业科技人员的参考书。

铸 造 流 变 学

王 柏 年 编 著

*

哈尔滨工业大学出版社出版
新华书店首都发行所发行
哈尔滨建筑工程学院附属印刷厂印刷

*

开本787×1092 1/16 印张9.25 字数214 000

1991年12月第1版 1991年12月第1次印刷

印数1—4000

ISBN 7-5603-0351-X /TG·25 定价:2.80元

前 言

直到目前为止,在铸件成形过程的理论研究中,对很多问题的阐述尚停留于30~40年代的水平。尤其是由于铸造科学向来不被人们重视,因而不少铸造前辈的基础理论的修养水平较低,所以至今在一些铸造工艺理论方面尚存在很多没有解决的问题。如在有关液体金属流动性的阐述中,只提到渣子等会降低金属液体流动性的现象,更进一步的解释便没有了;在利用盖因理论分析铸件热应力变形的过程中,提到了高温金属塑性不产生应力的假设,可是在考虑更高温度区中出现热裂纹的机理时,却提到了塑性应力的问题,理论系统出现了矛盾;如有的资料,用封闭液穴解释分散性缩孔成因的理论,但不能说明为什么具有分散性缩孔的铸件会在水压试验时渗漏,以及其它等等。这样的现象肯定会使铸造专业的教育工作者提出问题:在铸造人才的培养中,在哪一方面的基础理论中尚存在缺陷?存在什么样的缺陷?

“流变学”是近几十年来兴起的学科,最近一段时间,在铸造科学研究中逐渐引入了流变学理论,并取得了较好的效果。与此同时,在教学过程中发现,采用流变学的理论也可对前面提到过的铸件成形理论中的问题给以较好的解决。此外还考虑到铸造生产中大量存在的流动变形现象的研究需要应用流变学的理论,因此深感用流变学理论武装铸造工作者,尤其是铸造专业研究生的必要性。所以哈尔滨工业大学铸造教研室自1980年开始对个别研究生进行流变学基础知识的教育,得到了较好的反应。1982年起,正规地对研究生开出了“铸造过程流变学基础”的课程,1984年编印出《铸造过程流变学基础》的校内教材,并作为专业基础课为本校全专业的研究生进行讲授。这几年来,在此教材的使用过程中,一方面深感对铸造专业学生讲授流变学的知识在开拓学生基础知识领域,更深入地进行铸造研究可起很好的作用,另一方面也感到原教材所收编的资料不够丰富,其印数也太少,不能满足国内兄弟院校的需求,因此决定在原教材的基础上重编此书,扩充内容,由哈工大出版社正式出版。

本教材主要由两部分组成:流变学的基础理论和铸造生产中的流变学研究与应用。在基础理论的内容组织方面,特别注意到铸造专业学生的数学基础和铸造工作者学习流变学的目的,其特点着重于应用,并把一些纯力学、数学的理论研究内容予以删去。在第二部分内容的编写中,考虑到铸造研究在流变学方面所做的工作尚较少,并且不够系统,因此特别注意收集其它学科可借鉴的研究成果。收集到的内容有些可能不太成熟,但考虑到本教材的读者主要是研究生,对他们说,教学内容的启发性很为重要,通过本书内容的适当提示可以引起人们更深刻地思考,从而推动铸造研究工作的开展,这也正是研究生教学工作中应注意的一个方面。虽然本书是按研究生教材的要求编写的,但它仍可作为铸造专业大学生的选修课教材,适合在学完全部专业课以后讲授;也可作为广大铸造科学工作者和铸造技术人员的参考书。

本书是在繁忙的教学科研工作之余编写的,又是铸造教材编写中的新尝试,疏漏之

处在所难免，望读者多加指正。

参加本书编写工作的还有李邦盛、张成军、赵满华和吴玉清。

编 者

目 录

第一章 绪 论.....	(1)
§ 1-1 流变学的一些基本概念	(1)
§ 1-2 铸造过程中的一些流变学问题	(3)
第二章 材料的简单流变性能.....	(6)
§ 2-1 理想物体的流变性能	(6)
§ 2-2 单纯的材料流变性能	(6)
第三章 材料的复杂流变性能.....	(16)
§ 3-1 采用机械模型研究复杂流变性能的一些规则	(16)
§ 3-2 开尔芬体	(18)
§ 3-3 麦克斯韦体	(23)
§ 3-4 施韦道夫体	(28)
§ 3-5 宾汉体	(32)
§ 3-6 普朗特体	(38)
§ 3-7 不变切应力作用下各种物体的流变性能	(38)
§ 3-8 其它一些物体流变性能的机械模型和流变方程式	(40)
§ 3-9 面团流变性能机械模型的推导过程	(46)
§ 3-10 触变性与反触变性	(48)
第四章 型芯砂的流变性能.....	(51)
§ 4-1 型芯砂的结构特点及其在紧实过程中的变化	(51)
§ 4-2 型芯砂流变性能的测试	(53)
§ 4-3 不同紧实情况下型芯砂流变性能的特点	(57)
§ 4-4 型芯砂流变性能的机械模型	(64)
第五章 铸造涂料的流变性能.....	(69)
§ 5-1 涂料的分散系统特点对其流变性能的影响及涂料操作对其流变性能的要求	(69)
§ 5-2 铸造涂料流变性能的测试	(76)
§ 5-3 铸造涂料的流变性能及其影响因素	(88)
§ 5-4 铸造涂料悬浮性的测试	(96)
第六章 铸造合金的流变性能	(102)
§ 6-1 易熔伍德合金的流变性能	(102)
§ 6-2 Sn-15% Pb 合金的流变性能	(104)
§ 6-3 铝硅合金的流变性能	(108)
§ 6-4 其它铝合金的流变性能	(117)

第七章 流变学理论在铸件热裂研究中的应用	(122)
§ 7-1 热裂研究中的合金塑性理论.....	(122)
§ 7-2 卡西尔哲夫的热裂理论.....	(123)
§ 7-3 对卡西尔哲夫热裂理论的修正.....	(131)
第八章 其它铸造过程中的流变学问题	(134)
§ 8-1 熔模铸造用一些模料的流变性能.....	(134)
§ 8-2 多孔物体的流变学问题.....	(136)
参考文献	(141)

第一章 绪 论

流变学 (Rheology) 是物理学力学中的一门学科。英文流变学一词系从希腊字“ $\rho\epsilon\omega$ ”转移而得, “ $\rho\epsilon\omega$ ”的意思指流动, 但它被流变学使用时意义变得更为广泛了, 即不但指流动, 还包括变形的意思。因此流变学专门研究固体、液体、液固(液)混合物(如悬浮液、乳浊液、膏状物)、液气、固气混合物的流动和变形的规律, 并且特别强调时间的因素。

这门学科是由施韦道夫 (Schwedoff H.F.) 于1890年、宾汉 (Bingham E.C.) 和格林 (Green H.) 于1919年在前人工作的基础上先后建立起来的。在1928年, 宾汉建议成立美国流变学会, 在第二年这个学会正式成立, 因此很多流变学学者认为1929年是流变学正式开始的一年。而流变学真正发展则始于本世纪的40年代, 并逐渐地被引用到各个应用技术学科中去: 如建筑工程、建筑材料工程、水利工程、石油工业、塑料加工工业、机械制造工程等。近年来, 在医学领域内, 出现了血液流变学学科, 专门研究血液的流动、变形特性与人们疾病间的关系。在铸造学科中, 也存在着广泛的流变学课题, 因此在铸造研究中已开始用流变学的基础理论不断解决一系列的问题, 但除了个别的方面外, 铸造领域中尚有许多流变学的问题等待开发或深入研究。为此, 用流变学的理论和研究方法武装铸造工作者, 并将目前铸造科学中的流变学研究成果进行适当的总结, 移植其它学科流变学研究中可为铸造研究借鉴的成果, 借以推动铸造理论和技术的发展, 这已成为铸造教学过程中不可忽视的一个重要环节。因此建立本课程的意图就是要结合铸造生产和科研过程中需要应用流变学基本知识的情况, 向本课程的学习者介绍流变学的基础理论和重要的研究方法; 引述对铸造研究有用的其它学科在流变学研究方面的成果; 并在总结广大铸造工作者自身科研、实践工作收获的基础上, 叙述流变学在铸造中的应用情况和铸造材料的流动变形特性, 以及这些特性对铸造生产的影响。以便启发和引导铸造专业的从业者, 更好地把流变学的知识应用于自己的科研工作和生产实践中去。

§ 1-1 流变学的一些基本概念

有关物体的流动和变形的规律, 在工科大学的很多力学课程中 (如材料力学、弹性力学、塑性力学、流体力学等), 都已有所涉及。在这些课程中, 主要研究一定形状的物体在某种外力或内力的作用下, 并在一定的条件下所出现的应力、流动和变形的规律, 而对物体本身的流动变形特性则考虑得较为简单和粗糙, 并且还较少地对具体物体的流动变形特性进行研究; 有时为了简化对问题的讨论和求解, 还经常把物体视为单纯的粘性体、弹性体或塑性体, 甚至还经常把物体视为理想液体或绝对刚体。如理论力学

就把研究的对象视为绝对刚体；在铸造合金熔融状态流动性的研究中，已习惯于把液态金属视为牛顿液体；在利用盖因理论分析铸件冷却过程热应力和变形的形成原因时，又确定了一个临界温度，把温度高于此临界温度的物体视为单纯的塑性体，并且不会在其内部产生应力，而对低于临界温度的物体则视为单纯的弹性体。这种研究物体流动变形的的方法固然在解决很多问题方面很有效果，可是在实际工程材料中，大多数材料的流动变形经常是粘性、弹性和塑性的复杂组合。如固态的铸造合金在很大的温度范围内往往既具有弹性，又具有塑性，并且还具有粘性；大多数的铸造涂料不是单纯的牛顿体，而是既有粘性又有塑性的非牛顿流体。这样，在研究一些物体的流动变形问题时，上述那种把物体流动变形性能简单化的研究方法就不能适用了。因此流变学就要按照材料实际的流动变形性能，把粘性、弹性和塑性结合起来研究物体的流动变形性能。

流变学分为宏观流变学和微观流变学，在宏观流变学中，与一般力学中研究质点或质点系统的受力、运动情况不同，常把物体看作是由很多质点组成，而研究的内容是物体在受力时所出现的物体内各质点间的相对运动（此时物体表现出流动和变形）。具有不同流动变形性能的物体，它们中间质点之间的相对运动规律也是不一样的。

对流变学研究工作者来说，则是认为大多数物体都是由两相或多相所组成的分散体系（disperse system）。把分散体系分为溶胶（相当于液体）和凝胶（相当于固体）两种。在溶胶中，密实的相或分散介质的相是液体，而被分散的相可以是液体（在乳浊液中）也可以是固体（在悬浮液中）。在凝胶中，主要的组成物质是固相，但它们在整个体系中不是一个整体，而是被其它物质（相）以颗粒和小块的形式所分隔。如固相线温度附近的多晶金属在流变学中就可被视为凝胶。在其中，晶粒之间的各种原子排列次序的薄层被视为液体。

如果被分散相的最大质点比流变学所研究物体的最小元点（element）的尺寸还要小，则此物体被称为“准均匀体”（quasihomogeneous body）。即指流变学所研究的最小元点中包含有很多被分散相的质点，对每个质点而言，它们在构造、成分、性能等诸方面可能是不一样的，但是把这些质点混在一个所研究的最小元点之中，元点所表现的性能就是这些质点性能的综合，故可把研究的对象称为准均匀体。如果物体的最小元点里所含有的被分散相质点，具有一切可能方向的各相异性，则同前面一样，应把此物体视为“准各向同性体”（quasiisotropic body）。宏观流变学把自己的研究对象视为准均匀体和准各向同性体，并且假设它们是紧密的。这就是说，在流变学的研究中，不考虑物体内部的不均匀情况，如成分、结晶组织、致密度等的不均匀，认为物体是均质的；也不考虑物体内部的各向异性情况，如磁性、力学性能等的各向异性；并且还认为物体一般是不可压缩的。虽然实际上许多被认为是密实的物体常是可压缩的。这种研究方法称为“宏观流变学”（macro-rheology）。

还有“微观流变学”（micro-rheology）。它研究的是两相或多相材料，随着组成这些材料的各个相的流动变形性能而变化的流动变形“行为”，包含有两个方面的内容：

（1）由物体的流动变形特性分析研究物体的结构特点。如所谓“流变铸造”时应用的合金，在施切力较小时，呈现有固体的特性，而在压铸时，它却显示出液体流动的

特性, 对此种现象就可用微观流变学的研究方法分析合金的力学结构特点予以解释。

(2) 从组成相的已知流动变形性能出发, 说明和分析复合物体的流动变形特性。如上面提到的金属液中出现固相质点(如渣粒、晶粒), 使其流动性降低的现象, 可以用爱因斯坦(Einstein)在研究泥石流中的论点进行分析。即把金属液视为粘性液体, 而固相质点为固体, 如固相质点具有较好的变形特性, 则金属液在剪切力作用下而产生流动时, 固相质点在受到金属液的切应力时, 也应相应地变形。可是固相质点不是那么容易就出现变形, 因而它就起阻碍金属液变形的作用。所以, 含有固相质点金属液的流动变形便遇到了较大的阻力。这就表现为金属液粘性的增加, 流动性的降低。如果在固相质点的周围还吸附一些金属液的分子, 则“固相颗粒”的尺寸会更大, 金属液流动时变形所受阻碍更显著, 故流动时表现的粘性也就更大了。

但流变学研究微观的程度就到质点为止, 不更进一步地分析分子、原子组成的影响, 也不从晶粒的结构特点进行分析。

§ 1-2 铸造过程中的一些流变学问题

在铸造生产过程中, 很多工艺过程都与物体的流动变形有关, 因此有很多问题与流变学的研究内容有紧密的联系。如前面叙述的液体金属流动性受它所含固相质点的影响中所作的理论分析, 就是铸造流变学的研究内容。

此外, 造砂型时, 砂的紧实过程就是一个与砂粒在砂箱中的流动有紧密联系的过程。砂粒的表面性能(如粘土层的质量和砂粒的形状表面粗糙度); 砂粒的大小、其粒度组成; 加压的速度和压力的大小等, 都会对砂粒的流动变形特性发生影响。砂粒在流动时所遇到的摩擦阻力, 表现为砂粒流的粘性; 它们在受压紧实时也有弹性变形的问題; 同样也有塑性的行为。如吹砂紧实时, 只有当压力达到一定数值以后, 型砂才能流动的现象就是塑性的表现。型、芯砂的粘性、弹性和塑性的特点, 以及这些流动变形性能的组合情况都对砂型、砂芯的紧实成形过程和它们的最终质量具有影响。

制造砂型时的涂料和制造熔模型壳时用的涂料, 它们的流动变形性能也与铸型(砂型和型壳)的工作质量有密切的关系。因为用涂料涂刷砂型(芯)的表面或涂挂模组的表面就是涂料本身相对型、芯或模组的流动过程。砂型(芯)工作表面上涂料层的光滑程度、有无流痕或刷毛的痕迹、涂料渗透砂层的厚度、涂料层厚度的均匀性, 以及模组表面涂料层的厚度、有无涂料的结块、小孔和细槽的涂料充填情况、撒砂时砂粒陷入涂料层的深度、型壳上各涂料层间的相互结合牢度等, 都与涂料的流动变形性能有关。研究工作表明, 大多数铸造用涂料不但有粘性, 而且有塑性。因此, 如何掌握涂料流动变形的规律来改善涂料的工作性能, 并利用涂料的流动变形特性充分发挥操作工艺的作用, 以及了解涂料的各种组成对涂料流动变形性能的影响, 以获得工作性能较好的涂料和铸型, 已成为铸造工作者广泛感兴趣的课题。

制造熔模的过程就是模料流动充填压型的过程。因此模料本身的流动变形性能会对压力的传递、模料在压型型腔中的流动状态、熔模压制机的工作性能要求、压型内浇道的设计、熔模本身的质量等具有重要的影响。此外制造模料的工艺、模料的组成、压制

熔模时模料的状态与模料的流动变形性能都有一定的关系。所以为了能以最佳的工艺、最合理的压制装备,获得最高质量的熔模,就必须对熔模制造用模料的流动变形性能进行研究。

铸造用合金,在浇注进入铸型以及随后的凝固冷却时,都会出现多种多样的流动变形现象。且不言充型过程中,液体金属的流动性能对铸件最终质量的影响,在此列举一些金属充满铸型以后凝固冷却时流动变形的现象。

铸造合金在进入铸型以后,随着它本身温度的下降,由全液态变为液固态(固态质点较少,晶粒尚未连成骨架,为液态合金各别包围)、固液态(固态树枝晶连成骨架,在骨架之间有液态合金)、全固态的过程中,会出现补缩、偏析、异相质点的沉浮、应力、变形等现象。这些现象的进行都不能离开金属本身的流动和变形。在金属由全液态向全固态的转变过程中,一方面,它的流动变形性能发生剧烈的变化;另一方面,各种状态的合金流动变形性能往往又不是简单的绝对刚体、理想液体、粘性体、弹性体、或塑性体的流动变形性能单纯表现得了的。虽然在古典铸造理论中,往往粗略地把液态合金视作粘性液体,把高温的固态合金视为塑性体,低温的固态金属视为弹性体来解释铸件成形过程中所出现的一些现象,而这样的解释的确又能解决一些问题,但是,在需要深入探讨一些问题时,便会感到上述那种把金属单纯地看作粘性体、塑性体或弹性体的观点会显得无能为力。如在有关铸件内部分散性显微孔洞形成的原因叙述中,一些人们常习惯于采用孤立的被树枝晶封闭的液穴凝固收缩的理论。可是这种理论却不能进一步地说明,在对铸件进行气密性检验时,常会在铸件的显微孔洞较多处出现渗漏。难道分散孤立液穴形成的缩孔会是相互贯通的吗?又如按一般把液态金属视为粘性体论点,析出性气孔的分布应有一个向铸件厚壁处上部集中的趋势,可是在解剖的铸断的面上,密度上小下大的情况却很难说明是气泡上浮还是重力补缩所引起的。盖因理论在解释铸件变形和热应力现象方面有较好的效果,但是,它那把某一临界温度以上的固态金属视为单纯的塑性体,并认为在其中不能出现应力的观点,却与解释热裂纹产生原因时,认为金属中的收缩应力超过某一定值的论点发生了矛盾。因为出现热裂纹时的金属温度肯定比盖因所假说的弹、塑性转变临界温度高得多,既然在金属较低温度时,它本身的热胀冷缩的受阻不会出现应力,而在温度较高时却会出现应力,这是一般常理所无法解释的。上述的几种情况都是与对合金在不同状态下的流动变形性能缺乏细致的理解有关。

近十多年来,破碎枝晶半固态合金压力铸造(一般称为流变铸造)的研究工作在世界上一些国家中引起了不小的重视。压力铸造时,所采用的破碎枝晶半固态合金有如此的流动变形特点:即在切应力较小的情况下,它的流动变形性能接近于固体;而当对此合金加压时,使合金所受的切应力超过某一数值后,它又具有较好的流动性充填压型型腔。很明显,为了能较好地对此种新工艺进行研究,不对这种合金的流动变形性能进行详尽的研究,是不可能的。而在铸造专业大学生的课程中,却没有这方面基础知识的讲授内容。

因此,为了更进一步地深入研究铸造工艺过程中和铸件成形过程中的众多流动变形的现象,必须掌握流变学的基础知识,以及这些知识在铸造研究和实践中的应用情况。

必须为铸造工作者在自己的工作中开拓思路，按照铸造材料本身所具有的流动变形规律去揭示一些铸造现象的本质，进一步改善和利用铸造材料的流动变形特性，推动铸造科学技术的不断发展。

第二章 材料的简单流变性能*

为了进行各种材料流变性能的研究,首先应该了解材料的简单流变性能,以及具有这种简单流变性能物体的流动变形特点。在本章中将叙述理想物体的流变性能和材料的单纯流变性能这两个问题。

§ 2-1 理想物体的流变性能

从流变学的角度看,有两种理想物体,即理想液体和绝对刚体。在自然界和工程中实际并无此种材料,可是在解释一些自然现象和在某些条件下解决工程问题时,应用这些理想物体的概念可以简化和有效地对问题进行分析。

一、理想液体的流变性能

理想液体又称巴斯噶液体,是巴斯噶(Pascal B.)在1663年提出来的。他所指的理想液体是一种无粘性的液体,故它在流动时,内部不产生任何摩擦力,没有切应力,它也不能承受拉力。液体质点的位移主要依靠压力的驱使,液体质点所能传递的力也只能是压力。此种液体还被假设为完全不可被压缩的,因此液体中的压力各向均等。所以理想液体的流变性能特点为绝对的流动性(即质点之间相互移动时,不产生切应力,不消耗能量)和完全不可被压缩性。即切应力 $\tau = 0$ 和体积应变 $\varepsilon_v = 0$ 。

二、绝对刚体的流变性能

绝对刚体又称欧几里德体(Euclid body),这种物体根本不能变形,即变形量 $\Delta S = 0$ 或应变 $\gamma = 0$ 。在该物体上加上载荷以后,它的变形仍为零,当载荷增大至应力 τ 达到某一临界的数值时,物体就立即断裂,不发生体积和其它形状方面的变化。绝对刚体的变形量与应力之间的关系可如图2-1所示。其流变性能特点的数字表达式为 $\gamma = 0$, $\varepsilon_v = 0$ 。

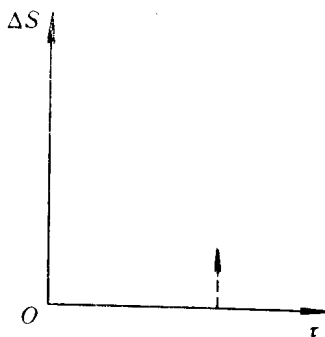


图 2-1 绝对刚体的变形与应力间的关系

§ 2-2 单纯的材料流变性能

本节中主要叙述在自然界和工程中可能遇到的一些材料理想化了的流变性能。认为

* 流变性能即流动变形性能。

这些材料的流变性能较单纯：纯弹性、纯粘性或是纯塑性。一些物体的复杂流变性能可以用这些性能的不同组合形式来表示。

一、虎克弹性体的流变性能

弹性体是指物体具有这样的流变特性，即向这一物体施加一定的载荷，在其中引起一定的应力，物体能在加载的同时出现和载荷相应的变形量；而当载荷撤去以后，变形可消失。此种可逆变形称为弹性变形。物体恢复自己原有形状的能力称为弹性，最普通的弹性体为虎克体（Hooke body）。这种物体的流变性能是虎克（Hooke R.）在1678年归纳出来的。虎克体的流变性能特点为它在受力以后，物体内部的切向应力 τ 是物体切向应变 γ 的函数，它们相互之间具有线性关系，即

$$\tau = G\gamma \quad (2-1)$$

式中 G ——剪切模数，又称第二类弹性模数。其量纲是应力，即Pa。

若虎克体的受力情况如图2-2所示，在受切力 P_r 之前，它的原来形状如实线所示，物体在垂直于 P_r 方向上的厚度为 Δr （即剪切面之间的距离）， P_r 的作用面积为 F ，物体在 P_r 作用下的切向变形量（即剪切位移量）为 ΔS ，则式（2-1）中的

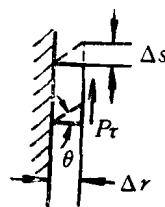


图 2-2

$$\tau = \frac{P_r}{F} \quad (2-2)$$

$$\gamma = \frac{\Delta S}{\Delta r} = \tan \theta \quad (2-3)$$

如果式（2-1）中的 $G = \infty$ ，则虎克体的流变性能便变为欧几里德体的流变性能，所以可把欧几里德体视为虎克体的一种特殊情况。

如果虎克体只是承受简单的拉伸应力 σ ，则式（2-1）便具有一般人们所熟悉的形式，即

$$\sigma = E\epsilon \quad (2-4)$$

式中 ϵ ——拉伸应变；

E ——虎克模数，又称弹性模数或杨氏（Young）模数。

这种形式的虎克定律是在1807年提出来的。

弹性模数 E 与第二类弹性模数 G 之间的关系式为

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad (2-5)$$

式中 K ——体积弹性模数。

K 的物理意义，即当一切材料（不管固体或液体）在四周压力 P 的作用之下，其流变性能在很大程度上与虎克弹性体的流变性能相似，此时物体的流变性能可用下式表

示, 即

$$-P = K \varepsilon_v \quad (2-6)$$

式中 负号——说明物体受压,

ε_v ——物体受压后的体积应变。

读者由式 (2-6) 便可自己理解体积弹性模数 K 的物理意义了。

对不可压缩的物体而言, 如同理想液体和绝对刚体一样, $K = \infty$, 故式 (2-5) 便可作如下的演算:

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \approx \frac{9KG}{3K} = 3G \quad (2-7)$$

公式 $\tau = G\gamma$ 、 $\sigma = E\varepsilon$ 和 $-P = K\varepsilon_v$ 就是虎克弹性体在不同受力情况下的流变性能的数学表现形式*, 即物体中的应力与弹性应变成线性正比关系。凡物体受力后, 其变形规律符合上述三个式子所示的关系时, 此种物体就是虎克弹性体, 可统称为虎克体。

一个弹性体的变形如能立刻反应与相应的应力相当, 此种弹性体则称为理想弹性体; 如弹性变形只能延迟地反应相应的应力值, 则具有此种弹性体的物体为非理想弹性体, 如粘弹性体。

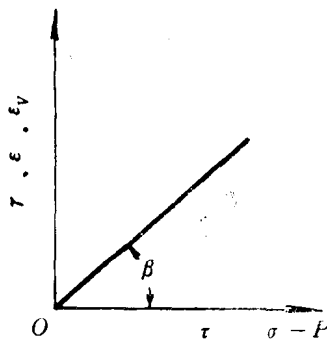


图 2-3 虎克体的流变性能

虎克体的流变性能也可用图2-3的形式表示, 图中 $\text{ctg} \beta$ 即为 G 、 E 或 K 。

在流变学中, 为研究方便起见, 常用机械模型表示物体的流变性能。虎克体流变性能的机械模型是弹簧, 如图2-4所示。图(a)表示作用在弹簧上的拉力为 P_H , 它模拟应力 τ 、 σ 或 $-P$; 弹簧的刚度为 E^* , 它模拟 G 、 E 或 K ; 弹簧的变形量 Δl 模拟应变 γ 、 ε 或 ε_v 。机械模型弹簧的变形与应力之间的关系式为

$$P_H = E^* \Delta l \quad (2-8)$$

在今后的研究中, 为做图方便起见, 虎克体机械模型弹簧的符号如图2-4(b)所示。

虎克体机械模型弹簧的变形特性还可图2-5所示的 $P_H - \Delta l - t$ 坐标予以表示。当时间 $t = 0$ 时, 进行瞬间加载, 载荷 P_H 立即升至 P_{H1} 值, 此时虎克体的变形量也相应瞬时地由零增至 Δl_1 , 故在 $P_H - O - \Delta l$ 坐标面上, 可得直线 Oa , 其斜率由弹簧的 E^* 值所决定。而后随着时间 t 的延续, 使 P_{H1} 值不变, 故 Δl_1 的数值也保持不变, 则得直线 ab 。在 $t = t_1$ 时, 把载荷 P_{H1} 瞬时地全部卸去, 则弹簧的变形量相应随着立刻消失, 在坐标 $P_H - t_1 - \Delta l$ 的平面上得直线 bt_1 。再随着时间的延长, 没有残余变形。由此流变特性线可见, 虎克体的变形大小只与载荷的大小有关, 如图2-5中直线 Oa 和 bt_1 所表示的那样, 但

* 这种反映物体宏观性质的数学方程式又称为本构方程式。

变形大小与时间无关, 如图2-5中直线 ab 与 t 轴永远平行。

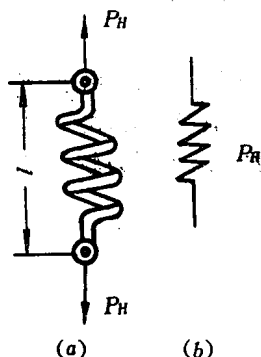


图 2-4 虎克体的机械模型(a)及其符号(b)

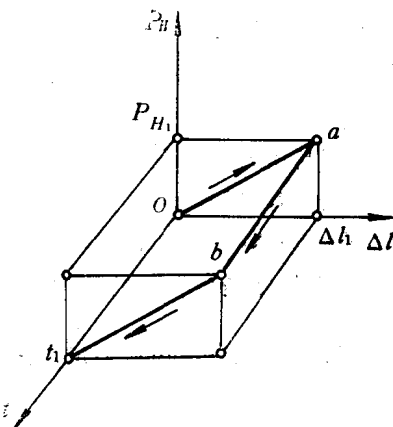


图 2-5 虎克体在受载和卸载时的流变特性

二、牛顿粘性体的流变性能

牛顿粘性体的流变性能是牛顿 (Newton I.) 在1723年通过牛顿定律提出来的。

牛顿提出: 当液体做层流直线流动时, 液体中的切应力 τ 与液层之间在流动法线方向上的速度梯度 dv/dr 成正比。 v 为液体流动的线速度, r 为与 v 垂直方向上的液层厚度, 因此可得牛顿公式

$$\tau = \eta \frac{dv}{dr} \quad (2-9)$$

式中 η —— 液体的动力粘度系数, 在国际单位制中, 其量纲为应力乘以时间, 即“Pa·s”。

由于历史条件的关系, 在不少的有关文献中还常用 cgs, 单位制来表示动力粘度系数的量纲, 即 $P = \text{dyn} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$ 或 $\text{cP} = P\%$ 。1P = 0.1Pa·s。 η 表示液体内部质点之间发生相对运动时, 质点间发生切应力或内摩擦的特性, 即为液体的粘性。

液体流动时, 其中应力与流动速度间的关系如符合式 (2-9) 的规律。此液体称为牛顿液体或牛顿体。

η 值的大小与液体本身的温度有很大的关系。一些理论认为牛顿体的粘度与其自由体积(自由体积的定义, 通常指液体的实际体积与分子紧密堆砌到使液体无法运动时的体积之差) 有关, 即自由体积越大, 液体分子间的空间也越大, 液体流动时质点之间的摩擦力就越小, 液体所表现的粘度也越小。对牛顿体而言, 粘度与温度间的关系可用安屈列特 (Andrade) 方程表示, 即

$$\eta = K e^{E_n / RT} \quad (2-10)$$

式中 K —— 给定切应力下, 表示液体分子量特征及其分子量的常数;

E_n —— 流动活化能 ($2.09 \times 10^7 \sim 2.09 \times 10^8 \text{ J/kmol}$);

R ——气体常数;

T ——绝对温度。

如某种液体的 $E_a = 8.34 \times 10^7 \text{ J/kmol}$, 当 T 由 300K 提高到 310K 时, 其粘度系数大致可降低 66.3% 。

η 的数值与压力的关系由物体的性质而定。如一般牛顿体的体积是完全不可压缩的, 或虽可压缩, 但其数值可小到忽略不计时, 则 η 的数值与压力无关。因此时压力的改变不能使牛顿体内质点间距离发生变化。有些工程物体, 当压力较大时, 如果体积会有所缩小, 则粘度是会有所增加的。

还可利用运动粘度系数 ν 来表示液体的粘度 $\nu = \frac{\eta}{\rho}$,

式中 ρ ——液体的密度。

ν 的国际单位制量纲为 m^2/s 。在 cgs 单位制中, 其量纲为 cm^2/s , 又称 st , 此单位的百分之一称为 cst 。 $10^4 \text{ st} = 1 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

为了更进一步地分析牛顿方程式 (2-9) 的物理意义, 了解牛顿体流动时内部质点的相对位移情况, 今观察层流牛顿体中一小立方体液体的平面运动。如图 2-6 所示, 当时间 $t = t_0$ 时, 切取一小立方体的液体, 它在所视平面上的投影为 $\square abcd$, 并且 $ab = bc = cd = da \angle r$, a 、 b 、 c 、 d 四个质点在所视平面内运动。根据牛顿定律, a 、 b 、 c 、 d 这四个质点的运动速度是不一样的。如 a 质点的水平运动速度分量和垂直运动速度分量各为 u 和 v , 则相应地 b 质点的水平运动速度分量和垂直运动速度

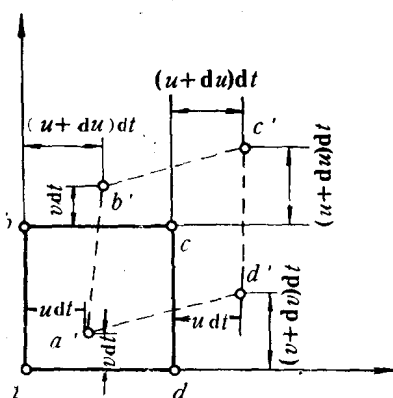


图 2-6

分量为 $u + du$ 和 v , d 质点的水平运动速度分量和垂直运动速度分量为 u 和 $v + dv$, c 质点的水平运动速度分量和垂直运动速度分量为 $u + du$ 和 $v + dv$ 。经过时间 dt 以后, a 质点移至 a' , 其水平位移为 $u dt$, 垂直位移为 $v dt$; b 质点移至 b' , 其水平位移为 $(u + du) dt$, 垂直位移为 $v dt$; d 质点移至 d' , 其水平位移为 $u dt$, 垂直位移为 $(v + dv) dt$; c 质点移至 c' , 其水平位移为 $(u + du) dt$, 垂直位移为 $(v + dv) dt$ 。原来的 $\square abcd$ 液体, 经过时间 dt 之后, 在流动的过程中变形为 $\square a'b'cd'$ 。液体内部质点间的相互位置发生了变动, 即液体发生了变形。随着流动时间的延长, 这种变形的程度会越来越剧烈。当使液体流动的应力撤消以后, 这一变形不能再复原, 即出现了残余变形, 这就是牛顿体流动时内部质点间位置发生变化的情况。

今观察图 2-6 中的 a 和 b 两质点。在 $t = t_0$ 时, 它们处于垂直线上。经 dt 时间以后, b 质点的水平位移比 a 质点多 $(u + du) dt - u dt = du dt$, 则单位时间内这两点间在水平方向上的变形量为 $du dt / dt$, 即为 du 。如把牛顿式 (2-9) 中的速度梯度 dv/dr 写成 du/dr , 则可将速度梯度的形式看作变形速度的梯度。

此外, 如取 $du/dt = dS$, dS 为 b 质点经时间 dt 后相对于质点 a 在水平方向上的绝对变形量, 如同式(2-3), 可得

$$\frac{dS}{dr} = d\gamma \quad (2-11)$$

$d\gamma$ 为 ab 线的切向应变, 所以式(2-9)可改写如下:

$$\tau = \eta \frac{du}{dr} = \eta \frac{dudt}{dt dr} = \eta \frac{dS}{dt dr} = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (2-12)$$

即

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2-13)$$

式中 $\dot{\gamma}$ 的量纲为 s^{-1} 。

因此牛顿定律的另一表现形式为式(2-13), 这一形式的牛顿定律是本课程中表现牛顿体流变性能的基本数学式。 $d\gamma/dt$ (即 $\dot{\gamma}$) 称为切变速率。 $\dot{\gamma}$ 如较大, 则此液体流动时的切向应变速度较大。式(2-13)的物理意义系指粘性液体在作层流流动时, 切变速率与切应力成正比。所以在流变学中 η 又可称为切向粘度系数, 或剪切粘性。由式(2-13)中还可见到切应力的大小是紧密地与由它所引起的流体切变速率相联系的, 而不象固体那样, 当不进行切向变形时, 也可以有切应力, 这是粘性流动与其它类变形的不同点之一。当牛顿体处于静止状态时, 其切应力必然等于零, 这也就是说, 粘性液体与固体不同, 静摩擦力是不存在的。

对巴斯噶液体而言, 即式(2-13)中的 $\eta = 0$, 因此可把巴斯噶液体视为粘性液体的一个特例。

如果 η 的数值很大, 则可以认为此物体抗变形时的内摩擦力很大, 此种物体的形态就接近于固体了。固态的物体, 在变形的过程中本身发热, 就是由这种物体内质点相对运动时的内摩擦引起来的。

对粘度非常大的材料(如沥青)而言, 其粘性可根据棱形杆子的抗拉试验来测定。特劳通(Troufon)曾在1906年做了一个相似的实验, 即将粘性很大的“液体”做成杆状, 并使承受拉力, 可得如下的关系式

$$\sigma = \lambda \dot{\epsilon} \quad (2-14)$$

式中 $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$, 为拉伸应变的速率。

λ ——杨氏(Young)相似粘性模数, 又称为拉伸时的粘度系数或特劳通系数。

对不可压缩的牛顿体而言, 与虎克体相似

$$\lambda = 3\eta \quad (2-15)$$

式(2-13) $\tau = \eta \dot{\gamma}$ 和式(2-14) $\sigma = \lambda \dot{\epsilon}$ 都表示具有牛顿体流变性能的物体在不同受力情况下, 其中的应力与粘性流动速度之间的正比关系。因此凡物体的流变规律能符合此两式子之一的, 都称为牛顿体(Newton body)。