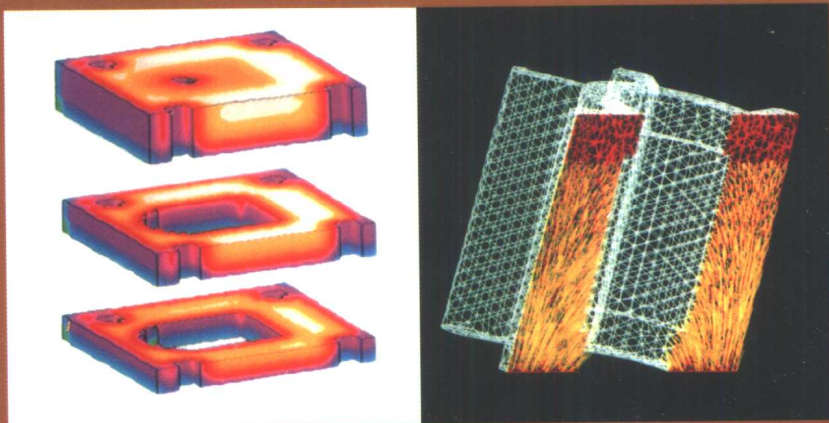


材料科学与工程丛书

金属热态成形传输原理

林柏年 主 编

魏尊杰 副主编



哈尔滨工业大学出版社

金属热态成形传输原理

林柏年 主 编
魏尊杰 副主编

哈尔滨工业大学出版社
哈 尔 滨

内容简介

本教材是为近年来教育改革中新建的材料成形与控制工程(材料加工工程)专业的教学计划的实施而编写的,系统叙述了金属热态成形过程中经常遇到的动量、热量和质量传输的基本原理和结合实际的应用实例。

全书共4篇16章,即动量传输篇、热量传输篇、质量传输篇以及传输现象的相似理论和数值模拟篇。每章均有习题以帮助学习者加深对本书内容的理解和应用。

本书是材料成形与控制工程专业的教材,也可作为冶金专业教材,还可供从事铸造、锻压、焊接、热处理技术人员在继续教育和工作中参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属热态成形传输原理/林柏年/主编

—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2000.8

ISBN 7-5603-1543-7

I.金... II.林... III.金属-传输-理论 IV.TG113.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 30589 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006
传 真 0451—6414749
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787×1092 1/16 印张 23.25 字数 537 千字
版 次 2000 年 8 月第 1 版 2000 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 7-5603-1543-7/TG·55
印 数 1~3 000
定 价 25.00 元

前 言

近年来,为使我国的高等教育适应国民经济发展的需要,与国际接轨,对大学(本科)的专业设置进行了调整,撤销了原有的热处理、铸造、锻压和焊接专业,新建了材料成形和控制工程专业,在该专业的教学计划中列入了传输原理的课程,本教材就是为满足材料成形和控制工程教学计划的实施而编写的。

本教材的编写特点为:

(1) 本教材内容组织无论在基础原理,还是在结合实际叙述原理的应用方面,都特别注意与金属热态成形过程中可能遇到的现象特点相结合。

(2) 与同类教材比较,除了分篇叙述三种传输现象(动量传输、热量传输和质量传输)的知识外,还增设了第四篇“传输现象的相似理论和数值模拟”,其目的是促使学员对这三种传输现象的原理有一总括、提炼性质的理解。因为这三种传输现象的基础理论有很多相似之处。与此同时也介绍了传输现象的近代模拟研究的方法和原理。

(3) 虽然动量传输只在流体流动(具有速度)时才能出现,但作为特例,即当流体流速为零时,动量不在流体中传输时,流体内的很多力学现象也是在材料成形工程中常会遇到的。同时,这些现象的规律也是理解动量传输原理的基础,所以在动量传输篇中引入了流体静力学的内容。

(4) 在传输现象的研究中采用了较多的数理解析手段,考虑到学员学习本教材主要是为了解决材料成形工程中实际有关问题,故在内容编写中力求简化数学运算过程的叙述,而数学运算过程的运用主要是为了帮助学员对原理推导过程的理解,培养学员在解决具体工程实际问题时运用数学工具的能力。

本教材的绪论、第一篇、第三篇和附录由林柏年编写;第二篇、第四篇由魏尊杰编写,林柏年作了补充和修改。

参加编写工作的还有金云学、徐国庆、韩波、林霄镛、曾松岩和陈瑞萍。

本教材是在综合前人所编同类教材成果的基础上,结合新专业的特点,考虑到同类课程教学过程中的使用情况,根据编者对搜集到材料的理解编写而成的,内容失误或不当之处在所难免,欢迎指正。

编 者

2000年4月

目 录

绪论	(1)
----	-----

第一篇 动量传输

第一章 流体及其流动	(4)
1.1 流体的一些特性	(4)
1.2 流体的流动	(13)
习题	(17)
第二章 流体静力学	(18)
2.1 欧拉(Euler)方程式	(18)
2.2 不同情况下静止流体的等压面和静压力	(20)
2.3 压力的计量和测量	(25)
2.4 静止液体总压力	(29)
2.5 静止液体中物体的上浮力	(34)
习题	(35)
第三章 流体的层流流动	(37)
3.1 几个有关研究流体流动的基本概念	(37)
3.2 动量通量 动量率	(38)
3.3 动量平衡方程及其应用	(40)
3.4 流体质量平衡方程——连续性方程	(48)
3.5 纳维埃-斯托克斯方程——广义的不可压缩粘性流体动量平衡方程	(50)
3.6 流体流动时的欧拉方程——理想流体动量平衡方程	(53)
3.7 离心铸型(两同轴旋转圆筒)中的层流流动	(53)
3.8 两平行平板间的层流流动	(56)
3.9 流体绕圆球的运动	(59)
3.10 流体在多孔介质中的层流流动	(65)
3.11 平板边界层流中的流动	(66)
习题	(71)
第四章 流体的紊流流动	(75)
4.1 紊流流动特征	(75)
4.2 管道内的紊流流动	(79)
4.3 平板表面紊流边界层近似计算	(84)
4.4 气体在散料中的流动	(88)
习题	(95)

第五章 流体流动的能量守恒	(97)
5.1 能量守恒方程——伯努利方程	(97)
5.2 伯努利方程在流体流动参数测量器具上的应用	(99)
5.3 伯努利方程在管道流体运动中的应用	(102)
5.4 伯努利方程在铸造用底注浇包工作状况计算中的应用	(110)
5.5 伯努利方程在铸型浇注系统研究中的应用	(112)
习题	(114)
第六章 流体输送设备	(117)
6.1 叶片式泵与风机	(118)
6.2 容积式流体输送设备	(123)
6.3 真空泵	(127)
习题	(131)

第二篇 热量传输

第七章 热量传输基本概念	(132)
7.1 热量传输基本方式	(132)
7.2 温度场、等温面和温度梯度	(134)
7.3 热流、热通量、传热系数和热阻	(136)
习题	(136)
第八章 固体中的热传导	(138)
8.1 傅立叶热传导定律及导热系数	(138)
8.2 导热微分方程	(145)
8.3 一维稳定导热	(146)
8.4 二维稳定导热的分析解法	(155)
8.5 物体在被加热(冷却)时的非稳定导热	(158)
8.6 非稳定导热的分析解法	(160)
8.7 金属凝固过程传热	(170)
习题	(181)
第九章 对流换热	(185)
9.1 对流换热基本概念	(185)
9.2 对流换热的数学表达式	(189)
9.3 流体流过平板时层流对流换热	(192)
9.4 圆管内层流对流换热	(200)
9.5 紊流对流换热	(204)
9.6 自然对流换热	(211)
9.7 淬火时的换热系数	(214)
习题	(216)
第十章 辐射换热	(218)

10.1	辐射换热的基本概念	(218)
10.2	黑体辐射	(219)
10.3	辐射的基本定律	(220)
10.4	实际物体的辐射	(224)
10.5	黑体间的辐射换热	(226)
10.6	灰体间的辐射换热	(230)
10.7	辐射换热的网络求解法	(234)
10.8	气体辐射	(238)
10.9	气体与固体表面间的辐射换热	(240)
10.10	火焰炉中的辐射换热	(241)
	习题	(245)

第三篇 质量传输

第十一章	质量传输的一些基本概念与扩散系数	(247)
11.1	质量传输方式、浓度、物质流	(247)
11.2	菲克(Fick)第一定律	(251)
11.3	菲克第二定律	(252)
11.4	固体中的扩散和扩散系数	(253)
11.5	流体和多孔介质中的扩散和扩散系数	(260)
	习题	(268)
第十二章	扩散传质	(269)
12.1	稳定扩散	(269)
12.2	不稳定扩散	(276)
	习题	(285)
第十三章	对流传质	(286)
13.1	传质系数和传质系数模型	(286)
13.2	对流传质微分方程	(289)
13.3	气体与下降液膜间的传质	(291)
13.4	浓度边界层的传质	(293)
13.5	一些对流传质的实验公式	(297)
13.6	金属凝固过程中的传质	(300)
	习题	(304)
第十四章	相间传质	(306)
14.1	双重阻力传质理论(双膜理论)	(306)
14.2	气-固相间综合传质	(308)
14.3	有元素蒸发时的综合传质	(312)
14.4	金属液中通气泡除气精炼时的传质	(314)
	习题	(318)

第四篇 传输现象的相似理论和数值模拟

第十五章 传输现象的相似理论	(319)
15.1 相似现象的基础	(319)
15.2 物理现象方程的相似转换和相似准数的推导	(322)
15.3 模拟实验	(325)
15.4 铸件凝固过程的水力模拟实验和电模拟实验	(328)
习题	(334)
第十六章 传输现象的数值模拟	(335)
16.1 空间区域的离散化方法	(335)
16.2 动量传输过程离散方程的建立	(336)
16.3 金属液充型过程流场数值模拟	(338)
16.4 非稳定传热离散方程的建立	(345)
16.5 铸件凝固过程温度场数值模拟	(353)
16.6 质量传输过程数值模拟	(357)
习题	(358)
附录	(359)
附录 1 饱和水的热物理性质	(359)
附录 2 干空气的热物理性质	(360)
附录 3 大气压力下烟气的热物理性质	(361)
附录 4 误差函数表	(361)
参考文献	(362)

绪 论

为把金属制成一定形状,并具备一定功能的零件或构件,用以装配成机器、工具或各种装备,需要有一个金属加工成形的过程,主要有两种类型的成形过程,即冷态成形和热态成形。

所谓金属的冷态成形,是指金属在成形过程中主要处于常温状态,有时金属的温度可能稍高,但这只是成形过程中出现的附带现象,这种稍高温度不是使金属成形的必要手段,如冲压、拔丝、金属切削等。

金属的热态成形是指金属在成形过程中,有一段时间处于较高温度状态,用高温的手段,使金属成形。

金属的高温成形的工艺主要有四种:

(1) 把金属加热熔化成液态或固液态(金属液中夹有金属的晶粒),注入具有一定形状内腔的模型中,金属在模型内降温、凝固,获得常温下的一定形状。这种制取金属件的工艺方法称为铸造;

(2) 把金属加热至塑性变形抗力小,但仍为固体的状态,用锻打、加压等措施,使其获得一定的形状。这种工艺方法称为锻压;

(3) 在不同金属件的连接处,用熔化的金属,或采用在金属连接部位加热熔化、加压的措施,使金属件被连接成所要求的整体形状。这种工艺方法称为焊接;

(4) 将金属件全部或局部加热至一定温度,使发生一定的物理、化学过程,改变金属件全部或某一部位的性能;或将金属件用不同的加热和冷却过程,改变金属件内部的组织结构,以获得一定力学性能或其它物理性能的金属件。这种工艺方法称为热处理。

金属在上述的热态成形时,常伴随有金属液的流动(如铸造浇注时金属液对铸型型腔空间的充填)、气体的流动(如砂型中气体的逸出,金属加热炉、熔化炉中炉气的运动等)、金属件内部和它与周围介质间热量交换和物质转移现象(如热处理中金属件加热过程中的热交换和渗炭、渗氮、均匀化过程中元素的再分布)。这些就是本教材要讲授的“动量”、“热量”和“质量”传输现象。由于动量、热量和质量的不同传输情况会对金属热态成形的过程和最后得到的金属件质量产生很大的影响,只有了解和掌握这些现象的运行规律,人们才能较自由地调节和控制金属的热态成形过程,以保证最大效益地获得高质量的热态成形金属件。

动量、热量和质量的传输现象还广泛地存在于金属热态成形时所使用的各种工程装备和仪器之中,如不少设备中的液压、气动装置中流体的流动,在压力机、造型机、焊接机械、热处理设备上随处可见;电子显微镜、真空熔炼炉、真空热处理和真空焊接设备等真空设施上的气体流动,这些设备运作时可能出现的热交换和物质移动现象,都是设备、仪器使用者应该注意的问题。

金属热态成形研究测试中还常要应用传输现象的一些原理,如铸造造型用原砂中含

泥量测定时斯托克斯原理的应用,流体粘度测定中牛顿公式的应用等。

本教材内容的组织就是在考虑金属热态成形技术工作者业务特点的前提下,向材料成形和控制工程专业的大学生传授动量传输、热量传输和质量传输的基础原理和实践应用的知识,使他们掌握分析和解决有关问题的能力。之所以出现动量、热量与质量的传输,主要是由于自然界的一切物质都有一种向平衡(均匀)状态转变的趋势,而在实际工程技术中,动量、热量和质量在空间中的分布往往是不平衡的。

在“传输原理”这门课程出现之前,动量传输、热量传输和质量传输都有相应的独立设置的学科,即流体力学,传热学和传质学,而且这三门学科在许多专业的大学课程中单独地进行讲授。把这三门学科的知识合并成一门课程“传输原理”进行讲授,主要是因为这三种传输现象的规律有很多相似之处,所采用的研究和求解的方法也往往是通用的,而且三种传输现象在金属热态成形技术产业中都存在,有时甚至同时出现在一个过程中。虽然在本教材的叙述中,仍把这三种传输现象按各自的体系分成三篇进行讲授,但作为一门课程,三篇的内容可相互呼应,可为学员起到把这三种传输现象的知识相互融汇,促进理解、运用的作用。最后本教材的第四篇“传输现象的相似理论和数值模拟”,更把这三种现象的基本原理有机地组合在一起,综合地叙述,在帮助学员掌握知识精髓方面可起积极的作用。所以学员在学习本课程时,一定要把这三种传输现象的基础知识有机地联系起来,藉此深化理解,帮助记忆。

这样的课程内容组织也为减少授课时间,降低学员学习的负担创造了较好条件。

第一篇 动量传输

本篇研究的是流体中的动量传输问题。动量传输之所以在流动的物体中出现,主要因为流动中的物体内部的不同部位的质点或集团的流动速度往往是不一样的,相应地在流动物体中的动量分布也是不均匀的,具有不同动量的流动物体的质点或集团之间便会进行动量交换,即流动速度较大的流体质点或集团所具有的较大动量便会向其周围流动速度较小流体质点或集团转移,相应地流动速度较大的流体质点或集团的流动便受到了阻碍,降低了流动速度,丧失了自己所具有的动量。本篇就是要研究各种条件下,流动物体中的动量分布情况(也即流动物体的流动速度的分布情况)、动量的传输规律、流动物体的流速随空间和时间的变化规律。

金属热态成形过程中常会遇到流体的动量传输问题,如在铸造时,当把金属液浇入铸型中,金属液在通过浇注系统充填型腔时的流动;流动的金属液与铸型壁之间的相互力学作用;型腔中金属液内的渣、气泡的浮动;金属在型腔中凝固时出现的晶粒间通道中金属液对缩孔的补缩流动;金属熔炼炉和加热炉中炉气的流动;砂型吹砂充型紧实时和浇注过程中砂型中气体的流动;铸件水力清砂、喷涂料和金属件表面喷砂清理时高压水、受压涂料和气砂混合物通过喷嘴的流动;金属热态成形用工程装备中液压、气动传动系统中工作液和压缩空气的流动……等。

离心铸造时往旋转的铸型内腔浇注金属液,金属液能很快地获得与铸型同样的旋转速度紧贴型壁与铸型一起转动,靠的就是铸型壁向金属液和金属液内部的动量传输。

具有不同动量的流体(即流动速度不一样的流体),还会对在金属热态成形时同时出现的热量和质量传输产生影响,如金属件的冷却或加热的速度就受周围介质(如炉气)流动速度大小的影响;静置的浇注后的铸型外表面的散热速度就比旋转铸型外表面上的散热速度小得多;往熔化的金属液中补加固态合金材料时,对金属液的搅拌可促使合金材料快速熔化,并加快合金材料在金属液中的均匀分布。所以学习动量传输知识是为学习不同流动情况下热量传输和质量传输知识做必要的准备。

学习动量传输,必需先了解流体的特性、流体的流动状态、流体不流动时的一些力学特点。

第一章 流体及其流动

1.1 流体的一些特性

流体顾名思义地可被理解为很易流动的物体,即它是一种质点间联系很小,质点在空间的相互位置很易改变(即变形或流动)的物体,主要指液体和气体。在工程中也可把带有固相颗粒、液相颗粒的气体,含有固相颗粒、液相颗粒、微小气泡的液体(如悬浮液、乳浊液等)视为流体。

与固体相比,流体不能传递拉力,但可承受压力,传递压力和切力,并在压力和切力作用之下出现流动。这种流动一直可持续下去,直至撤去压力或切力为止。流体流动时,当相邻质点之间由于流速不同而出现相对位移时,它们之间就出现内摩擦力,而静置的流体内部是没有内摩擦力的,不像固体,当它们不移动时,其内部或相互间仍可有摩擦力。

1.1.1 流体的连续介质模型

在动量传输的研究中,不研究流体中个别分子的微观运动和分子之间的相互作用,如分子热运动、分子间的引力等,虽然分子间的相互作用在流体中是存在的。动量传输研究的是由大量分子组成的宏观体积流体(流体质点)的运动,把研究对象视为占有空间由无限多个流体微团(流体质点)稠密无间隙地组成的连续介质。流体内的物理量如密度、速度、压力、粘度等也是连续分布的,是空间的连续函数,这样就可利用连续函数的解析方法来研究流体的动量传输了。

第二篇热量传输和第三篇质量传输研究中的流体也具有上述的连续介质模型。

1.1.2 流体的压缩性和热胀性

流体的压缩性系指当它四周受压时,其体积变小的特性。流体的热胀性系指它在其本身温度提高时,体积增大的特性。液体和气体在这两种性质方面表现的差别很大,故需分别讨论。

一、液体的压缩性和热胀性

温度不变时,液体的压缩性可用每增加单位压力值,液体相对减少的体积值——体积压缩系数 k 来表示,即

$$k = - \frac{dV/V}{dp} \quad (\text{Pa}^{-1}) \quad (1-1)$$

式中 V ——液体原有体积(m^3);

dV ——缩小的体积(m^3);

dp ——液体受压的增加值(Pa)。

式右边的负号表示液体受压增加,体积缩小,即 dp 值为正值时, dV 值为负值,则 k 值可永为正值。

表 1-1 列出了水在 0℃ 时不同压力下的 k 值。

表 1-1 0℃ 水在不同压力下的 k 值

压力值(MPa)	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0
k 值 $\cdot 10^2 (\text{Pa}^{-1})$	5.39	5.37	5.32	5.24	5.15

由表 1-1 可知, 0℃ 水在 0.5 MPa 压力情况下每增加 0.1 MPa 的压力, 其体积的减小只有万分之零点五稍强, 因而在工程上可认为水是不可被压缩的。与水类似, 其他液体也可被认为不可被压缩的。但是在一些特殊情况, 如液体所占的体积特别大, 而压力的变化又很突然时(此时会出现水击现象)就必须考虑液体的压缩性; 深海中不同层次的海水密度是会因所受压力的不同而变化的。

液体的热胀性可用温度升高 1℃ 时液体体积的增大率——温度膨胀系数 β 来表示。

$$\beta = \frac{dV/V}{dT} \quad (^\circ\text{C}^{-1}) \quad (1-2)$$

式中 dT ——温度的升高量(℃)。

试验表明: 在 0.1 MPa 的周围压力下, 温度较低(10℃ ~ 20℃)时, 温度每增加 1℃, 水的体积增大仅为万分之一点五; 甚至在温度较高(90℃ ~ 100℃)时, 水的 β 值也只有万分之七。其它液体的 β 值也很小, 故在工程中可不考虑液体的热胀性。

二、气体的压缩性和热胀性

气体的体积是随压力和温度的变化而明显地改变的, 这三个物理量之间的关系可用理想气体状态方程式表示

$$\left. \begin{aligned} pV &= RT \\ p/\rho &= RT \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中 V ——比体积(m^3/kg), $V = \frac{1}{\rho}$;

ρ ——气体密度(kg/m^3);

p ——绝对压力(Pa);

T ——热力学温度(K);

R ——气体常数, 对空气言, $R = 287 (\text{N} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$ 。

由式(1-3)可推论, 当温度保持不变(等温)时, $T = \text{const}$, 得波义耳(Boyle)定律的数学表示式

$$\frac{p}{\rho} = \text{const} \quad (1-4)$$

若压力保持不变(等压), 由式(1-3)可得盖吕萨克(Gaylussac)定律的数学表示式

$$\left. \begin{aligned} T\rho &= \text{const} \\ \rho &= \rho_0 - \frac{T_0}{T_0 + t} = \frac{\rho_0}{1 + \beta t} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中 ρ_0, T_0 ——标准状态(1 atm^①、0℃)时气体的密度和温度, $T_0 = 273$ K;

t ——温度, (℃);

β ——气体膨胀系数, $\beta = \frac{1}{273} \text{℃}^{-1}$ 。

气体膨胀或收缩时需要吸热或放热, 若无与外界的热量变换(绝热), 则压力与密度关系为

$$\frac{p}{\rho^k} = \text{const} \quad (1-6)$$

式中 k ——绝热指数, $k = c_p/c_v$;

c_p, c_v ——定容比热、定压比热。

由上面 6 个数学式可见气体具有明显的压缩性和热胀性, 如有些工作时震动较大的设备, 就根据波义耳定律采用向密闭空间压进或放出空气的方式, 形成气垫缓冲机构(图 1-1)。在一些工程中由于气体使用时的运动情况不同, 常可在压缩性和热胀性的考虑方面作简化处理, 如有些气动设备中进、排气的过程进行很快, 此时就可把此过程作绝热过程处理; 当气体在固态物体(如管道)中流动时, 或固体在静止气体内运动时, 只要它们之间的相对速度小于音速, 气体的密度变化是很小的, 此时便可忽略气体的压缩性, 把 ρ 视为常数值。在一些用气流通过管道输送松散颗粒物体(如砂、锯末、灰尘)

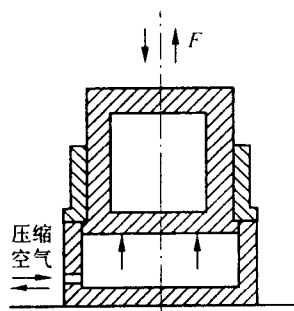


图 1-1 气垫缓冲

时, 就可将此过程视为等压过程, 把气体的密度视为常数值进行计算。压缩空气气源的贮气罐在工作时, 其中气体常被压缩(压入气体时)或膨胀(往外放送气体时), 因而气体温度可能会有波动, 但因波动范围较小, 则可把此过程视作等温过程。

例 一气动设备工作时使容积 $V = 5 \text{ m}^3$ 的气源贮气罐内空气绝对压力由 $p_1 = 0.6 \text{ MPa}$ 降为 $p_2 = 0.55 \text{ MPa}$, 问消耗了多少 m^3 标准状态的空气量。

解 把此过程视为等温过程, 贮气罐内原有空气质量 m_1 为

$$m_1 = \rho_1 V$$

由式(1-4)可得

$$\rho_1 = \rho_0 \frac{p_1}{p_0}$$

同样, 设备工作后贮气罐内空气质量 m_2 为

① 流体压力的度量方法有三种:

(1) 应力单位法, 其单位为 Pa;

(2) 液柱高度法, 其单位为米水柱 (mH_2O) 和毫米汞柱 (mmHg), $1 \text{ mH}_2\text{O} = 9.8 \times 10^3 \text{ Pa}$, $1 \text{ mmHg} = 133.3 \text{ Pa}$;

(3) 大气压法, 其单位为 atm。1 标准大气压 (atm) = $760 \text{ mmHg} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} \approx 0.1 \text{ MPa}$ 。

本教材叙述中将根据不同情况下的工程习惯, 对流体压力分别采用上述三种单位。

$$m_2 = \rho_2 V, \quad \text{而} \quad \rho_2 = \rho_0 \frac{p_2}{p_0}$$

故消耗了的空气标准状态体积为

$$Q = \frac{m_1 - m_2}{\rho_0} = \frac{\rho_0 V \left(\frac{p_1 - p_2}{p_0} \right)}{\rho_0} = \frac{5(0.6 - 0.55)}{0.1} = 2.5 \text{ m}^3$$

在上述计算中, ρ_0 、 ρ_1 、 ρ_2 为标准状态、压力为 0.6 MPa、0.55 MPa 时的密度, 近似地取 $p_0 = 0.1 \text{ MPa}$ 。

1.1.3 流体的粘性

流体的粘性概念可由牛顿(Newton)粘性定律引出。1686 年牛顿指出: 当流体的流层之间出现相对位移时, 不同流动速度的流层之间会产生切向粘性力(摩擦力)。如果在两块平行的无限大平板之间有流体, 而两板间的距离很小, 下板静止不动, 上板在 x 方向上作 v_x 速度的移动(图 1-2a), 由粘性力所引起的上、下两板间流体的质点只产生 x 方向

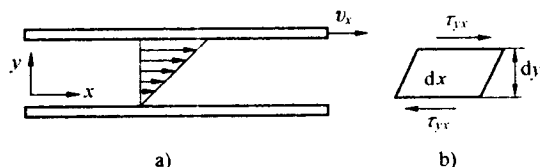


图 1-2 平板间流体速度分布与切应力

a) 流体速度分布 b) 流体微元体上的切应力

上的有序运动, 流体各平行层的运动速度在 y 方向上的分布如图上箭头所示, 在 y 方向上出现了速度梯度 $\frac{dv_x}{dy}$, 则在流层两面上出现的切向粘性力(切应力) τ_{yx} 由下式表示

$$\tau_{yx} = \pm \eta \frac{dv_x}{dy} \quad (1-7)$$

切应力 τ_{yx} 中有双脚标, 第一个脚标 y 表示切应力的法线方向, 第二个脚标 x 表示切应力的方向, 而式子右边正负号的选择由保证计算得到的 τ_{yx} 值为正值所决定, 式中 η 为一比例常数, 它代表流层间出现相对流速时的内摩擦特性, 称为流体的动力粘度系数, 其单位为 $\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s} = \text{Pa} \cdot \text{s}$ ①。

将 η 除以流体的密度 ρ , 则得流体的运动粘度系数 ν

$$\nu = \eta / \rho \quad (1-8)$$

ν 的单位为 m^2/s ② 在动量传输研究中常使用此系数, 它是动量传输的一种量度, 具

① 在过去出版的采用 CGS 单位制的文献中, η 的单位为 $\frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \cdot \text{s}$, 称为泊(P), $1\text{P} = 10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 又可写成 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$

② 在过去出版的采用 CGS 单位制的文献中, ν 的单位为 cm^2/s , 称为斯托克斯(st), $1\text{st} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

有与热量传输研究中的热扩散系数 α 、质量传输研究中质量扩散系数 D 相同的单位,故可把 ν 视为动量传输研究中的粘性动量传输系数。

流体中之所以出现粘性,主要是由分子间内聚力(引力)和流体分子的垂直流动方向热运动(出现动量交换)所引起。在液体中以前者为主,在气体中则以后者为主,所以液体的粘度是随温度升高而减小,因为温度升高时分子间距离增大,分子间引力减少;而气体的粘度则随温度升高而增大,因此时分子的热运动增强。图 1-3 示出了水、机油和空气的运动粘度系数与温度的关系。

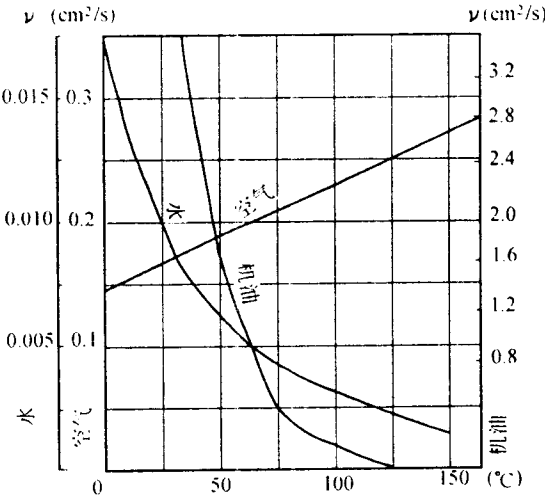


图 1-3 水、机油和空气的运动粘度系数与温度的关系

表 1-2 示出了一些金属液在不同温度时的粘度系数。

表 1-2 一些金属液在不同温度时的动力粘度系数

金属液	锡				铝		铜	纯铁	灰铁(含 C 4.0%)	可锻铸铁(含 C 3.1%)	钢(含 C 0.3%)				
温度(℃)	300	400	500	600	700	800	1100	1550	1650	1250	1340	1405	1535	1555	1610
$\eta \cdot 10^{-6}$ (Pa·s)	1677	1383	1177	1049	2903	1403	3300	6865	5884	2100	2650	1900	2800	2600	2300

气体的动力粘度系数 η 与热力学温度 T 的关系可由苏士兰(Sutherland)式表示

$$\eta = \eta_0 \frac{273 + S}{T + S} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} \text{ (Pa} \cdot \text{s)} \quad (1-9)$$

式中 η_0 ——气体在℃时的动力粘度系数(Pa·s);

S ——依气体种类而定的苏士兰常数(K)。

表 1-3 列出了几种气体的 η_0 和 S 值。

表 1-3 几种气体的 η_0 和 S 值

气体	空气	氧	氮	氢	一氧化碳	二氧化碳	二氧化硫
$\eta_0 \cdot 10^{-6}$ (Pa·s)	17.09	19.20	16.68	8.40	16.97	13.73	11.67
S (K)	111	125	104	71	100	254	306

理论分析和实验结果均表明,下述安屈列特(Andrade)方程可说明液体动力粘度与热力学温度 T 的关系

$$\eta = K e^{E_{\eta}/RT} (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (1-10)$$

式中 K ——表示液体分子量及其特征的常数($\text{Pa} \cdot \text{s}$);

E_{η} ——流动活化能, $E_{\eta} = 2.09 \times (10^7 \sim 10^8) \text{ J}/(\text{kmol})$;

R ——气体常数($\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)。

泊肃叶(Poiseuille)的有关水的粘度与温度关系的经验公式为

$$\eta = \eta_0 (1 + 0.337t + 0.000221t^2)^{-1} \quad (1-11)$$

式中 t ——水的温度($^{\circ}\text{C}$),其余符号意义同前。

金属热态成形时常易遇到的合金液和熔渣的粘度除了与温度有很大关系外,还与这些物体在温度变化时的液体结构和化学特性的变化有相当的联系,如共晶成分的合金液的粘度在同系合金液中为最小;结晶间隔温度越宽,这种合金液的粘度就越大;如亚共晶铁液中碳硅含量的增大会使其成分越接近共晶成分,故铁液的粘度可变小;对过共晶铁液而言,其情况则相反。大多数熔渣由 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 组成,酸性渣含 SiO_2 较多,增加 SiO_2 会使渣液粘度增大,如增加 CaO 则渣液的粘度可降低,但是当渣中 $\frac{[\text{CaO}]\%}{[\text{SiO}_2]\%}$ 超过 1 时,渣液呈碱性, CaO 含量的增多则会使熔渣粘度增大。

图 1-4 示出了 Fe-C 合金液的随含碳量和温度变化的等粘度线。

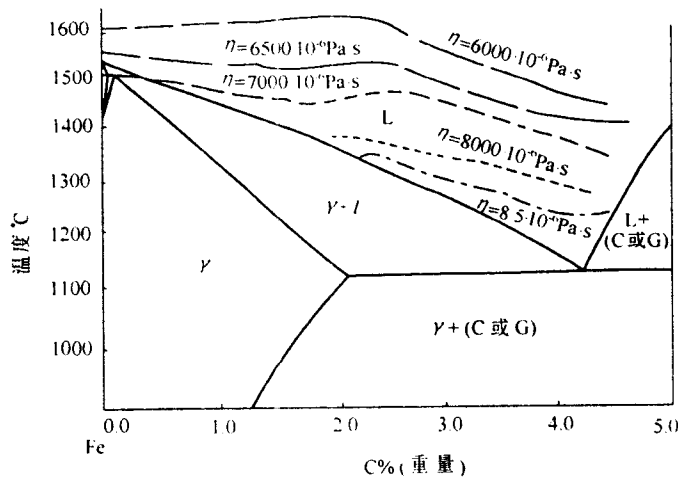


图 1-4 Fe-C 合金液的等粘度线

一般说来,压力对气体分子的热运动和液体分子的内聚力影响不大,故当压力变化小于 5 MPa 时,对液体的粘度变化可以忽略不计,如压力变化太大,则对液体言,可考虑采用下式来计算粘度的变化

$$\eta_p = \eta_0 e^{ap} \quad (1-12)$$

式中 η_p 和 η_0 ——压力为 p 和 0.1 MPa 时液体的动力粘度系数($\text{Pa} \cdot \text{s}$);

a ——由具体液体决定的指数,对油类 $a = (2 \sim 3) \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N}$ 。

压力变化对气体的动力粘度系数的影响(在压力变化小于 20 MPa 时),也可忽略不