

105

RESEARCHES
ON
THERMAL
SCIENCES

王补宣论文集

清华大学出版社

内 容 提 要

本论文集是我国著名工程热物理学家、热工学教育家、学部委员王补宣教授数十年科研成果的精华,共收入自 50 年代初以来在国内外发表的论文 86 篇,主要包括:(1) 导热与热物性;(2) 对流传热;(3) 多孔介质传热传质;(4) 相变传热;(5) 生物医学传热;(6) 热力学与热经济分析;(7) 能源合理利用与规划;(8) 热工测试技术与方法等几个方面的内容,涉及面广,既展现了王补宣教授的主要科研活动与成就,又在一定程度上反映了热工及传热传质学科的发展进程和科研工作的某些主要动态与方向。该书是我国热工与传热传质学方面高水平的力作,也是了解目前和未来科研发展的窗口,可供高校工程热物理、热动力等专业师生,从事热工与传热传质学研究的科研人员,以及热动力、热力工程、热工设备等方面的工程技术人员参考。

(京)新登字 158 号

王 补 宣 论 文 集 Researches on Thermal Sciences

《王补宣论文集》编辑委员会

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

人民文学印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本: 787×1092 1/16 印张: 47.75 字数: 1131 千字

1993 年 6 月第 1 版 1993 年 6 月第 1 次印刷

印数: 001—550

ISBN 7-302-01234-2/TK·19

定价: 95.00 元

ZF68/15

王补宣论文集编辑委员会

倪维斗(主任)

叶大均 任泽霈 罗棣庵 朱明善

一代宗师 治学楷模

(代序言)

王补宣教授从教五十年,在清华大学工作与生活已经四十六年。先生执着地追求,几十年如一日地辛勤工作,在清华大学创建了一流的工程热物理学科人才培养与科研基地;先生更以严谨治学、勇于探索,谦诚待人、诲人不倦的品德,孕育了一个优良的学术环境,并在此培养了一代又一代优秀的工程科学家,活跃在祖国神州大地和世界学术园地。

还在先生年青时代,就在前辈学长、敬爱的刘仙洲教授指导下,建成了我国第一个热工学实验室。先生又以新颖科学的内容、生动思辨的技巧,热情关心的教学态度高质量地讲授了热力学与传热学这两门课。有幸聆听过该课的学生至今难忘先生的讲坛风采。先生并以热情严格的作风培育了几代教师,使清华大学热物理基础的几门课一直保持优秀的教学水平。五十年代中,根据科学发展潮流和教育事业需要,创建了国内第一个本科工程热物理专业,直接培养从事能源动力行业中的应用基础研究人员。1980年当选中国科学院学部委员,先生又以过人睿智率先在清华大学创建起国内工程热物理学科的硕士生和博士生培养点,并一直领导着这个全国公认的重点博士点至今。1984年,又经先生努力运营,建立了清华大学热能工程及热物理研究所,亲任所长至今。几十年的努力,在清华大学已建成了国际一流的工程热物理科学研究和高级人才培养基地。

补宣先生几十年如一日,勤奋治学,追求科学真理,在工程热物理基础方面广博精深,在传热学界公认为我国泰斗。十一届三中全会以后,先生更以甲子之龄,焕发出科学青春,带领年青学子朝科学高峰挺进,十余年来在膜沸腾传热理论、多孔介质热湿迁移、传热增强理论与工程、低品位能源应用等诸方面做出重大贡献,获得国际国内极高学术声誉。先生还积极开拓交叉学科领域,倡导并身体力行地对材料科学与生命科学中的热物理问题发起冲击,并取得重要成果。几十年来不仅自己在科学探索中奋勇搏击,还尽力组织队伍集团攻关,在校内、高教界、自然基金会和各有关学会都可以看到先生的身影和卓有成效的功绩。学术成果诚然可贵,更重要的是先生的严谨治学、勇于进取的精神熏陶着各代弟子,先生的学术风范激励着人们奋勇向前。他那谦诚待人、诲人不倦的精神可谓青年学子的学习楷模。先生的朴实衣装,淡泊生活也为海内外学者盛为赞誉。

改革开放春风吹遍神州大地,先生敏锐地觉察到中国的传热研究应该早日纳入国际潮流,中国的学者应该参与国际交流。先生不遗余力地一次又一次率团参加国际传热大会,广泛介绍我国的学术成就,并将年青学者推向国际论坛。为了中华民族的尊严,先生更以坚韧的毅力,机智的方式,广交朋友,争取了解,从而使我国获得了学术界的平等地位。先生的这一切功勋是国内传热界有口皆碑的。为了使更多的学者特别是年青学者有机会接触世界一流专家,也使得世界学术界更了解我国的现况与发展前景,先生大力倡导与亲自组织了北京国际传热学会议,至今已成功地召开了三届,几百位一流学者与专家访问了清华大学,为进一步的全方位国际交流打下坚实基础。

值此先生七十华诞之际,作为学生、后辈与同事,以十分崇敬的心情景仰先生的科学功绩,愿以编辑这本文集作为一份薄礼献给先生,也以此献给崇仰先生事业与人品的广大工程热物理学者,能源动力工程界与教育界同仁。这本文集从已搜集到的先生所公开发表的学术论文中选编了大约 40%,涉及到热力学、传热传质学,热物性学、热湿环境控制、热工测量技术,能源利用和优化规划等方面,力图较全面地反映先生几十年来的科研教学活动及对热科学与工程领域的突出贡献及当今先生在科学上所研究的问题。

清华大学	副 校 长	倪维斗教授
	热能工程系主任	叶大钧教授

作者简介

王补宣教授系我国著名的工程热物理学家和热工教学家、中国科学院学部委员,至今仍活跃在国际学术界。

王补宣教授,1922年2月出生于江苏无锡。1943年毕业于西南联大机械系,开始了他的从教生涯。曾留美,1949年获普度大学机械工程科学硕士学位。1950年1月应聘到北京大学机械系任教,出版了他的成名作《工程热力学》。1952年院系调整后一直在清华大学工作。1957年在我国创办本科《工程热物理》专业,并自1959年起招收三年制研究生,1981年首批批准招收博士生,现为清华大学热能工程与热物理研究所所长,同时担任国家教委高校工科热工课程指导委员会主任委员。



王补宣教授参加第一次(1956)至第三次(1978)国家科技长远规划的制定工作,并自1978至1985年担任国家科委工程热物理学科组副组长。1981年起担任国务院学位委员会工科评议员。1985至1989年出任国家自然科学基金委学科评议员。

王补宣教授在科学的春天和改革开放声中,不仅参与组建并长期领导工程热物理学会、太阳能学会等全国性的学术组织,担任学术期刊的主编或编委,还努力面向世界,为繁荣我国学坛和在国际学术界争取应有地位而作出了卓越的贡献。1981年创建国际太阳能学会(ISES)中国分会。1983年被选担任《国际传热传质学报》(IJHMT)中国主编。1984年应聘为《国际热物理学报》(IJTP)的编委。先后在北京主持召开了三届国际传热会议、两届亚洲热物性大会和一届太阳能与风能利用国际会议。由于他的组织才能和学术成就,世界能源学会授予他1985年“人类利用能”大奖,日本热物性研究会于1989年授予“杰出贡献奖”。

王补宣教授坚持理论与实践相结合。1954年就承接国产保温材料热性能测试分析的研究,在实践中不断改善设备结构和测试方法与技术,直至形成国产导热仪产品。六十年代,领导热工学教研室参加四川化工厂氨合成塔的技术改造,创造了单塔日产量翻番的优异成绩。1970年,应邀对移植双筒熔渣粉煤气化炉攻关会战进行了咨询,纠正了原订气化效率的过高指标。七十年代,承接青藏铁路常年冻土段在日光曝晒下路基抗融化的对策研究,研制成多项热物性动态快速测试仪和高灵敏现场用的热流计。在基础研究方面,创造了液体沿固体表面流动膜沸腾理论,连同液滴蒸发机理的研究获1989年国家自然科学奖;多孔介质热湿迁移的研究获国家教委1992年科技进步一等奖。

王补宣教授从事工程基础教学与应用基础研究五十年,培养了许多工程热物理与热工方面的专门人才。他著述甚丰,学风淳朴。独具匠心地编著注译了一批高校教材,其中供研究生学习用的专著《工程传热传质学》获1987年国家优秀教材奖。公开发表出版有200多篇学术论文。本文集所辑录的,将反映他深湛的学术造诣和严谨的治学方法,同时提供了相关的进展或动态。

目 录

一代宗师 治学楷模(代序言)	Ⅲ
作者简介	V
论文	1
I. 关于制定科学远景计划的建议	1
• 对热工科学研究的一些意见	1
II. 导热(Heat Conduction)	4
• 关于管道热绝缘经济厚度的确定	4
• 含湿建筑材料的导热系数	12
• 分析长期不稳定传热问题的特征值法	19
III. 进口段单相对流(Convective Heat Transfer in Entrance Region)	23
• 圆管进口段层流边界层发展区的放热规律	23
• 圆管进口段湍流边界层发展区的流动阻力	48
• 圆管进口段层流—湍流边界层发展区的流动阻力	61
IV. 工业传热(Industrial Heat Transfer)	67
• 热流计快速标定装置的传热分析	67
• 金属表面受强激光照射出现熔池的研究	75
• 轮胎硫化过程无探针微机控制模型	81
• 双侧强化传热高效冷凝传热管的实验研究	86
V. 流动沸腾与液滴蒸发(Flow Boiling & Evaporation of Liquid Drops)	91
• 固体表面上流动膜沸腾与液滴蒸发机理研究的新进展	91
• 液体高速流动膜沸腾传热	94
• 流体沿水平表面受迫对流时的层流饱和膜沸腾	103
• 过冷液体高速流动膜沸腾的传热极限及热力学非平衡性	112
• 流体高速流经水平板槽时的湍流膜沸腾传热	116
• 过冷液体流经水平板槽时过渡沸腾的实验研究	122
• 高聚物添加剂对管内水在较高流速下核沸腾传热的影响	126
• 实时光栅剪切干涉用于研究液滴的蒸发对流	131
VI. 流动凝结(Flow Condensation)	137
• VI •	

• 小管径竖管外侧的凝结换热	137
• 利用插入线圈强化管内分层流域凝结换热的研究	146
• 双组分非共沸混合蒸气凝结的湍流换热模型	151
VII. 气液和气固两相流传热 (Gas-Liquid & Gas-Solid Convective Heat Transfer) ...	161
• 含雾空气流过等温干平板的层流传热	161
• 含雾空气流过等温干平板的湍流传热	167
• 发热固体大颗粒间绕流的传热实验研究	173
VIII. 多孔介质传热传质 (Heat Transfer in Porous Media)	179
• 多孔介质的传热传质	179
• 含湿毛细多孔体介质的传热与传质和热湿迁移特性测定方法的探讨	187
• 多孔物料床的池沸腾换热特性及其改善方法	190
• 水平圆环形湿饱和多孔柱体中的自然对流	195
• 矩形空间填充多孔介质中内热源引起的自然对流	201
• 含内热源多孔介质中的混合对流	207
• 水流经垂直多孔介质同心套管的传热实验研究	213
IX. 生物医学传热 (Heat Transfer in Biology and Medicine)	219
• 组织间激光血卟啉治疗肿瘤时瞬态温度场的理论和动物实验研究	219
X. 热物性与测试技术 (Thermophysical Properties & Measuring Techniques)	226
• 同时测定热绝缘材料 α 和 λ 的常功率平面热源法	226
• 常功率平面热源法加热器热容量的影响	234
• 关于测试热绝缘材料热物性的热脉冲法可信性的探讨	242
• 用热探针法现场测试松散介质热物性的原理性误差	251
• 利用热探针在现场同时测定松散介质 α 和 λ 的“加热-冷却法”	260
• 热线法同时测定含湿多孔介质导热系数和导温系数的实验技术	267
• 图象处理技术用于发光火焰温度分布测量的研究	274
XI. 能源利用 (Energy Planning)	278
• 低位余热动力回收方案的拟定方法	278
• 太阳能利用中储热研究的新进展	288
• 利用自然冷源的贮果用地下洞库热工性能分析研究	294
• 热经济学的现状与发展	300
• 能量系统的动态交互式决策支持系统	310

I . Forced Convective Heat Transfer	315
• On the convective heat transfer for turbulent flow of single-phase fluid through concentric annuli	315
• Research on hydrodynamics and heat transfer for fluid flow around heating spheres in tandem	327
II . Free Convection	345
• Effect of variable thermophysical properties on laminar free convection of gas	345
• Effect of variable thermophysical properties on laminar free convection of polyatomic gas	358
• A method for researching natural convection heat transfer from a non-isothermal vertical plate by infrared thermovision	367
• Natural convection heat and transfer on a vertical plate for water flow containing metal corrosion particles	375
III . Boiling Heat Transfer	388
• Film boiling heat transfer for liquid flowing with high velocity	388
• Analysis of the saturated laminar-flow film boiling on horizontal plate surface	401
• Film boiling in laminar boundary-layer flow along a horizontal plate surface	409
• A semi-empirical theory for forced-flow turbulent film boiling of subcooled liquid along a horizontal plate	418
• An advance on the theory of forced turbulent-flow film boiling for subcooled liquid flowing along a horizontal flat plate	429
• An advance study of forced turbulent-flow film boiling for subcooled liquid with high velocity in a circular tube	436
• Turbulent film boiling heat transfer for liquid flowing with high velocity through a horizontal flat duct	447
• Experimental and measuring techniques for the study on flow film boiling with micro-computer control	458
• Transition and film boiling heat transfer characteristics for forced flow of subcooled fluid through a horizontal flat duct	464
• Film and transition boiling characteristics of subcooled liquid flowing through a horizontal flat duct	473
• Hysteresis characteristics of nucleate pool boiling heat transfer	486

IV. Evaporation of Liquid Drops	495
• Thermal instability of evaporating drops on a flat plate and its effect on evaporation rate	495
V. Porous Media	508
• The heat and moisture transport properties of wet porous media	508
• Natural convection in liquid saturated porous media between concentric inclined cylinders	521
• Natural convection in vertical porous enclosure with internal heat generation	531
• Steady-State Natural convection around a horizontal cylinder in a fluid-saturated porous media	541
• The capillary hysteresis and its properties for unsaturated wet porous media	554
• Capillary induced rewetting in a flat porous cover plate	567
VI. Biomedical Heat Transfer	581
• The measurement of thermophysical properties of bio-tissue in vivo	581
VII. Industrial Heat Transfer	588
• Dynamic characteristics of surface-installed heat flux meter	588
• A research on rapid heating and melting in laser irradiated metal plate	598
• A study on metal melting in laser heating	606
VIII. Thermophysical Properties	615
• Methods for measuring heat and moisture transport properties in wet porous media	615
• A method for measuring simultaneously heat and mass transport properties of moist porous media	629
• A method for evaluation of heat and mass transport properties of moist porous media	639
• Water absorption and measurement of the mass diffusivities in porous media	647
IX. Measuring Techniques	658
• Measuring techniques for determining the thermal diffusivity of low-conductivity materials with a conventional twin-plate device	658

• Measurement of luminous-flame temperature distribution using image processing method	667
• Electric capacitive sensors for measuring moisture content in wet porous media	675
X. Energy Planning	681
• On the Development of Solar Energy Utilization in China	681
• R&D activities for utilization of solar energy in China	691
• Utilization of the potential energy due to natural temperature differences	700
• A new criterion for revealing the weak link of an energy system	708
• A general methodology for thermoeconomic synthesis of energy systems	715
• Thermoeconomic synthesis of plant utilit energy systems	728
王补宣著述目录.....	742
List of Scientific PaPers and Edited Books in English	747

I. 关于制定科学远景计划的建议

对热工科学研究的一些意见*

苏联所建成的、全世界第一座原子能发电站的运行成功,正愈来愈显著地促使人类在利用自然能源方面出现新的高潮。经过科学家们勘探和研究的结果,已经初步确定现有铀矿和钍矿所能供应的原子动力将超过一般燃料(煤、油和天然煤气)资源所能生产的动力总和10—20倍。所以,人们对原子动力的意义和它的经济价值现在有了新的估价。例如,美国“供暖、管道和调气”杂志1955年2月号曾载有这样的报导:最现代化的巨型烧煤电厂的建造费用为平均每千瓦163美元,而商用规模的原子能发电站有希望从原先估计的每千瓦250美元降低到每千瓦150美元;烧煤电厂要看煤的种类和价格、电厂规模和现代化的程度如何,它的发电费用约为每度电0.5—0.8分美金,而原子能发电站有可能降低到每度电0.5分美金,英国预期在1956年建成的一座原子能发电站的发电费用将为每度电0.75分美金,准备在以后添建新的原子能发电站时再进一步降低这一指标。

由于燃料储存量是有限的,人们有理由相信:在今后几十年内,势必大量发展原子能来满足全球范围内不断增长的动力需要。例如在英国,如果仅仅发展一般火力发电,而不发展原子动力,到1975年就会全年缺煤2,000万吨。

在发展原子能的同时,我们还要设法直接利用太阳辐射能,它是我们所知道的可以取用不尽的自然能源。在苏联,一年中平均有210个晴天的中亚细亚各加盟共和国,人们已经在使用太阳能的热水器、沸水器、锅炉和暖室,预计到1956年将使用多至5万个太阳能装置,全年可以节省大约20万吨的煤。当代科学家约里奥·居里曾经指出:只要我们能够藉适当设备利用落到埃及地面上太阳能的即使是十分之一,就可以获得目前所有国家所能生产的全部能量。对于太阳能发电装置的研究,在苏联也已有了初步的成果。这种形势也引起各国科学界的重视。

人类的物质生活水平和每人平均所享受的能量有密切关系,因此,人们一直在努力寻求各种新的能源,并设法加以利用。我们知道,射到地面的太阳能除了一部分演变为燃料热能、地壳热能和水利位能以外,还有一小部分是以风及波浪的形式变成动能。由于月亮和太阳的吸引所产生的潮汐、以及海洋的热量也可以造成极大的能源,这个能源尽管目前还很难利用,亦同样引起苏联和某些国家科学家的兴趣。在苏联,除了正在接连兴建巨型

* 本文作者王补宣,原载《科学通报》,1955年12月号,“关于制定科学工作远景计划的意见”栏,52—53页。

水力发电站和扩大风力利用以外,为了利用地球内部深处放射性物质发生原子分裂等原因所产生的地下热能,也已经开始进行试建地下热能发电站的研究。

我国正在进行空前规模的建设事业,我们必须尽快地迎头赶上世界最先进的科学水平。因此,从发展的观点出发,我完全同意上期《科学通报》所登载的吴仲华同志的建议,也认为现在就应该有步骤地开始大力进行原子动力、太阳能的直接利用和燃气轮的科学研究,否则,十几年以后,我国仍然会处在相对落后的状态。

但是,原子能、太阳能以及其他新的能源的利用,也还不能完全替代现有火力发电和水力发电,只是表明自然界还有更多潜力可以发掘出来加以利用。1954年在英国出版的一本书“未来的动力”,曾对今后整整一个世纪(1950—2050)里世界动力方面使用各种不同能量的相对比重作了这样的粗略估计(转引自苏联《热能学》杂志1955年10月号):水力,15%;火力,25%;原子能60%。最近人民日报所登载的张治中先生的“访苏观感”里摘录有苏联克拉琴柯博士的预料,认为:“将来人类需要的动力很大,现有动力只占人类需要总量的35%,其余65%要靠原子能和其他方面。”各种能源的利用应该因地制宜,可以各自找到它最适宜的场合。原子能和太阳能的利用,会使现有热力机械从旧的基础上得到新的发展,而不是根本消灭它。应该指出,原子能发电,今天还只是刚开始,尽管它发展很快,它的比重只能逐年升高,在今后一段时期内,现有火力发电仍将占有优势地位;而且就目前来说,用原子能和太阳能来推动热力机械,除了能源不同于一般燃料以外,也还没有改变热力机械的基本工作循环。正因为这样,各国学术界对现有热能利用方式的进一步改善依旧给予相应的重视。

燃气轮是一种新兴的热力机械,对于各种不同场合分别表现出某些独特的性能,因而在动力界引起了极大的兴趣。苏联电站部部长巴夫林柯在《热能学》杂志1955年1月号上所撰述的“1955年动力工程界的任务”中就明确指出:“热能动力的发展远景必须对建造固定式的能够经济运行、特别是燃烧固体燃料的大功率燃气轮的问题给予密切重视。”燃气轮无可置疑地将会得到迅速的发展,但在目前,在上述燃烧固体燃料的燃气轮尚未见诸实用以前,蒸汽动力仍将占有最举足轻重的地位。所以,如何进一步提高现代汽轮机发电厂的经济性、节省燃料(这些燃料可以用来制造许多合成物质,在改善人类物质生活上有很大意义)、降低发电成本和提高劳动生产率,仍然是动力工程方面现实的主要任务之一。在这方面,发展的主要趋向是:(1)提高蒸汽初参数,(2)提高设备容量,(3)使操作自动化。根据所能搜集到的资料,已在建造中的个别设备所采用的蒸汽初参数有高达350大气压和620℃者,而汽轮发电机的单机容量则大到将近30万千瓦。为了适应这种新的形势,在上面所曾引述过的巴夫林柯部长同一篇文章中曾对科学工作者具体地提出:要求把现有蒸汽图表引伸到500大气压和1,000℃,要求进一步提高高温合金的质量。

考虑到我国目前的基本情况是:煤矿储存比较丰富,制造技术和制造材料都比较落后,而国家建设对动力的增长则有异常迫切的需要。因此,我认为除了加强燃气轮的研究以外,在热动力方面还可以进行类似这样一些科学研究工作:(1)合理选择最适宜的蒸汽参数和设备容量,制定适合我国国情的设计标准;(2)在兼顾热经济性和安全运行的原则下简化发电厂的热力设备;(3)寻求统一的设计规范,以便于分工制造和大量生产;(4)考虑蒸汽动力和燃气动力的合并使用,例如扩建旧有蒸汽发电厂,而扩建容量在

几千以至上万千瓦者,可以采用一台或几台简单开口式燃气轮来节约扩建投资、缩短扩建期限、而仍然得到较高的经济性。自然,热能动力的发展在相当程度上是和材料的供应分不开的,因此,为了适应燃气轮和高参数以及超高参数蒸汽动力设备的发展,必须尽速对高温材料进行有效的研究,以便设法自给而不需仰赖国外来供应。

交通运输方面,把燃气轮用作铁道机车的动力机械有很多优点,特别在我国,由于高级柴油还有其他急需,发展烧煤的燃气轮机车来代替蒸汽机车就具有更加重大的经济意义。而在公路运输方面,需要相应地展开节约用油和进一步采用代用品的研究,这就牵涉到轻便发动机的设计、运行和操作各方面的探讨。同时,在推动农业机械化的过程中,也迫切需要试制小容量的农村用热力发动机;这些发动机需要构造简单、操作方便、运行可靠、而且能够就地取用各种固体燃料,这种适合我国目前需要的小马力的发动机,很难直接从国外找到基本上可以仿制的蓝本。

最后,我认为:要想根本提高我国的科学水平,还应该加强基础科学的研究。对于各种热力设备来说,首先要求对工作物质的热力学性质和传热性能有充分的了解,才能谈到设备的创作和改进。原子能和太阳能的利用在很大程度上是和如何控制热量的传递有关。在现代科学技术领域内,经常要遇到各种各样的热工问题,除了在广泛的各种工业企业中要应用到不同种类的热设备、包括各种热力机械和换热设备以外,有关热现象的理论性的研究也成为推动冶炼、铸造、热处理和焊接等加工理论进一步发展的主要因素之一。在苏联,近年来一直在大力展开这些热加工理论的传热实验研究。此外,各种工程材料的热工性质,尤其是高温材料的耐热和绝缘能力、以及建筑材料的传热能力都直接影响技术设计;在这方面,我国产品的种类已在逐渐增多,但由于缺乏标准的鉴定,设计者有时仍不得不根据国外材料的数据、用不合理的安全系数来保障设计的可靠性。因此,我们也必须开展这方面的研究。

II. 导热(Heat Conduction)

关于管道热绝缘经济厚度的确定*

提 要

本文对确定管道热绝缘经济厚度的两种计算制——“年工作费用制”与“资金偿还年限制”试作了本质上的比较,探讨了前文所提供的速算图解法^[1,2]对资金偿还年限制推广使用的可能性,提出了在具体计算中所将遇到的某些问题,供制订我国设计规范时研究参考。

一、前 言

设计管道热绝缘的计算任务之一,是要合理选择热绝缘层的厚度。除非管道直径太小,低于所谓“临界绝缘直径”^[1,2],增加热绝缘层的厚度,通常总可以使热损失进一步降低,但热绝缘的初置费用也将跟着增加。所以,确定热绝缘厚度,需要对不同厚度进行试算,然后比较哪一种厚度在经济上最有利,使管道中所输送的流体能够在终点处维持所需要的最低工作温度,或者为了劳动保护而能使绝缘后的外表面温度不超过 50℃。这些技术安全的要求,就确定了热绝缘所必须具备的最小厚度 δ_m ; 只有计算所得到的经济厚度 δ_e 超过了 δ_m 时,才应该选用 δ_e 作为热绝缘的实际厚度。如果同时有好几种热绝缘材料可供选择,还应该对每一种热绝缘材料分别进行计算,确定其中经济性最高的某种材料最合宜的绝缘厚度。这类计算,通常都很繁复。因此,利用速算图来协助求解,有着很大的实用价值。在这方面,作者曾经提供过所谓“年工作费用制”的架空管道和有沟或无沟敷设时地下埋管热绝缘经济厚度的速算图解法^[1,2]。

最近,文献[3]突出地推荐了所谓“资金偿还年限制”,发现由此所计算的经济厚度要比年工作费用制的小。本文主要将针对这两种计算制进行本质的比较,并探讨原先所提供的速算图解法^[1,2]对资金偿还年限制推广使用的可能性。

二、关于“年工作费用制”

如果管道全年热损失为 Q [百万大卡/米·年],热损失的价值为 b [元/百万大卡],管

* 本文作者王补宣,原载《机械工程学报》,第 11 卷,第 4 期,64—70 页,1963 年。

道热绝缘结构的初置费用为 S [元/米], 年扣除率、亦即每年所摊还的初置费用份额为 p , 则如图 1 所示, δ_{ec} 就代表年工作费用最小的热绝缘经济厚度。或 $\delta = \delta_{ec}$ 时,

$$\frac{d}{d\delta}(b \cdot Q + p \cdot S) = 0$$

亦即

$$b \cdot \frac{dQ}{d\delta} + p \cdot \frac{dS}{d\delta} = 0 \quad (1)$$

这里, 热绝缘结构的年管理维修费用, 可以折合成初置费用的百分率, 并入 p 一同考虑。

关于 p 的值, 文献[4]根据苏联国内外实践经验, 认为可以取 10~25%, 并且按照文献[5]具体推荐了 $p=12\%$ [1/年]; 其中包括:

管道热绝缘结构的年折旧率 6%;

管道热绝缘结构的年管理费 3%;

管道热绝缘结构的年修理费 3%。

显然, 取年折旧率为 6%, 就相应于不计算投资的复利时取折旧年限为 17 [年]。文献[6]则

推荐取 $p=15\%$ 。文献[7]推荐热绝缘

的维修管理费可取初置费用 S 的

30%, 如果以 τ_0 代表热绝缘结构的折

旧年限, 可以取 $p = \frac{1.3}{\tau_0}$; 亦即 $\tau_0 = 10$

[年]时, $p=13\%$ 。前文^[1,2]在当时国

内还缺乏足够的经验资料可供分析

的情况下, 推荐了 $p=12-15\%$, 但在所

提供的速算图中将 p 选作参变量, 可

以取作 10—30%。

由图 2 可知, 所取 p 值越大, 将使

计算所得到的 δ_{ec} 值减小, 而且减小的

程度还和热损失费用、亦即燃料价格

的相对贵贱有关, 将随着比值 $b \cdot Q/S$ 的增高而有所减弱。

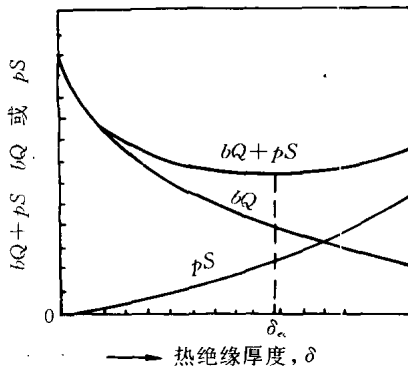


图 1 年工作费用制的经济厚度 δ_{ec}

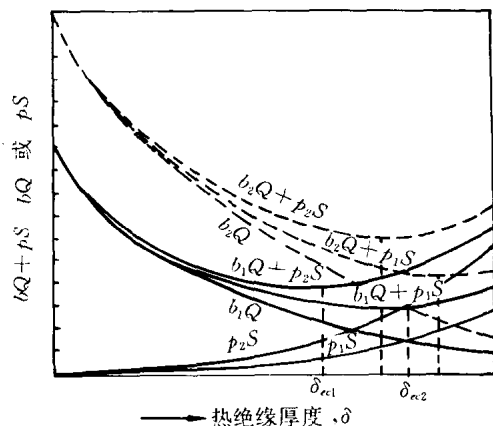


图 2 p 值对经济厚度 δ_{ec} 的影响

的相对贵贱有关, 将随着比值 $b \cdot Q/S$ 的增高而有所减弱。

三、关于“资金偿还年限限制”

如果有两种方案, 其中第 1 种方案的 Q 较小、而 S 又较大时, 为了比较它们之间的经济性, 可以引进所谓“资金偿还期”^[3,4]

$$\tau = \frac{S_1 - S_2}{(b \cdot Q_1 + p \cdot S_1) - (b \cdot Q_2 + p \cdot S_2)} \quad (2)$$

也就是多增加的投资由于年工作费用的节约所将偿还的年限。这个所被容许的最大偿还

年限 τ' 将取决于总的国民经济发展速度所要求的资金周转速率。无论如何, τ' 总不应该超过热绝缘结构的折旧年限 τ_0 , 因为达到折旧年限以后, 就必须重新投资、更换热绝缘。如果 $\tau > \tau'$, 表示第 I 种方案不如第 II 种方案经济; 如果 $\tau = \tau'$, 则两种方案将同等有效。

对于同一种热绝缘材料, 如果由于增加热绝缘厚度 $d\delta$ 引起了热绝缘结构初置费用的附加 dS 和热损失费用的减少 $b \cdot dQ$, 则这部分附加投资的资金偿还期应为:

$$\tau = \frac{dS}{-(b \cdot dQ + p \cdot dS)} \quad (3)$$

除非 $\tau < \tau'$, 这种厚度的增加在经济上并不有利。根据这个原则, 就可以确定热力管道热绝缘的又一种经济厚度 δ''_{ec} 。

改写式(3), 将不难求得文献[3,4]所介绍的下列形式:

$$\tau = \frac{dS/d\delta}{-(b \cdot dQ + p \cdot dS)/d\delta} \quad (4)$$

或根据资金偿还年限的经济原则, 要求

$$-\frac{dS}{d\delta} \left/ \left(b \cdot \frac{dQ}{d\delta} + p \cdot \frac{dS}{d\delta} \right) \right. \leq \tau'$$

亦即 $\delta = \delta'_{ec}$ 时,

$$-\frac{dS}{d\delta} = \tau' \cdot \left(b \cdot \frac{dQ}{d\delta} + p \cdot \frac{dS}{d\delta} \right)$$

或

$$b \cdot \frac{dQ}{d\delta} + \left(p + \frac{1}{\tau'} \right) \cdot \frac{dS}{d\delta} = 0 \quad (5)$$

四、关于两种计算制的对比讨论

对比式(5)和式(1), 将不难发现两式可以统一写成下列形式:

$$b \cdot \frac{dQ}{d\delta} + P \cdot \frac{dS}{d\delta} = 0 \quad (6)$$

其中, 对于年工作费用制, $P = p$; 对于资金偿还年限制, $P = p + \frac{1}{\tau'}$ 。除非 $\tau' \rightarrow \infty$, 两种计算制将给出不同的经济厚度, 而且以微分式(3)或(5)所表示的资金偿还年限制相当于取较高 p 值时的年工作费用制, 因此将永远提供较薄的经济厚度。

乍看起来, 年工作费用制似乎就是取 $\tau' = \infty$ 时的资金偿还年限制。可是在年工作费用制的计算中, 实际上已经通过年扣除率 p 考虑了折旧年限。进一步的分析发现, 两种计算制所提供的经济厚度是两个不同的概念。年工作费用制只从管道热绝缘本身的经济性作出判断, 确认多投的资金可以在折旧年限以内完全由热损失费用的节约得到充分的补偿; 至于这部分资金如果投在其他建设项目上能否得到更快的回收, 却并未加以考虑。而资金偿还年限制, 由于引进了根据国民经济计划发展速度所确定的资金周转期 τ' , 能够更深刻地考虑到社会主义建设的全局经济观点, 使国家投资发挥最合理的效用。

其实, 同样是资金偿还年限制, 如果根据式(2), 取裸管作为基准方案, 即取 $S_1 = 0$ 和 $Q_1 = Q'$ (代表裸管热损失) 时, 还可以由敷设热绝缘的总投资的偿还年限得到又一种经济厚度 δ''_{ec} 。参看图 3, 已知 $b \cdot Q = f_1(\delta)$ 和 $p \cdot S = f_2(\delta)$ 时, 不仅能够图解得到年工作费用