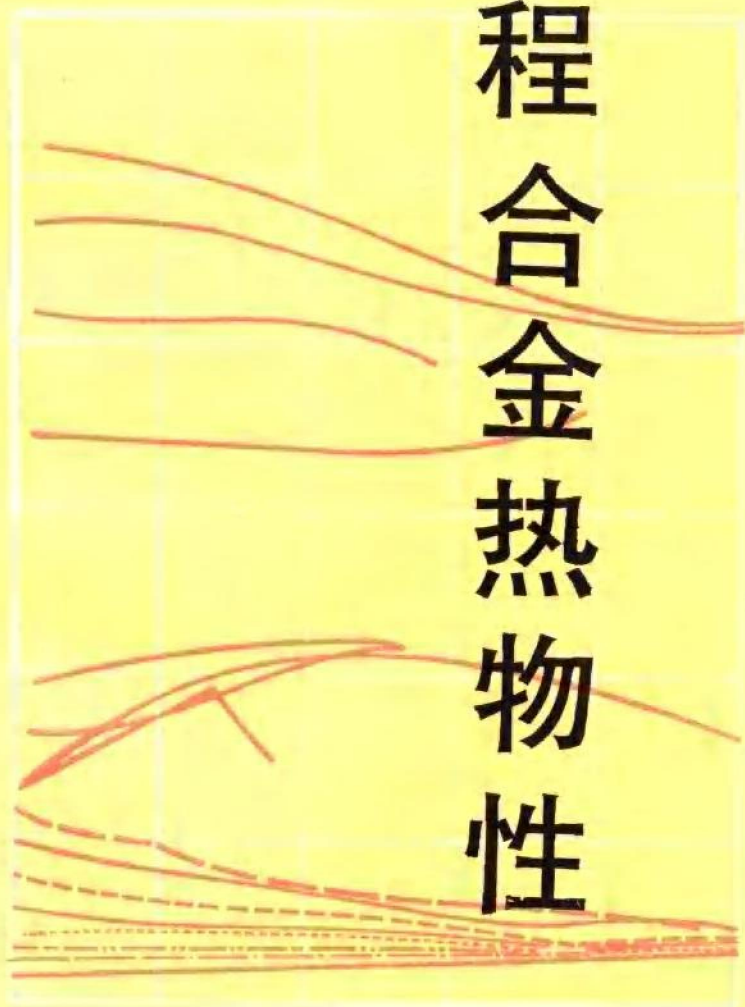


谭 真 郭广文 编著

工程合金热物性



THERMOPHYSICAL PROPERTIES
OF ENGINEERING ALLOYS

冶金工业出版社

32067603

TK121
02

工程合金热物性

THERMOPHYSICAL PROPERTIES
OF ENGINEERING ALLOYS

谭 真 郭广文 编著

442.12



北京
冶金工业出版社

1994



C0305684

(京)新登字 036 号

图书在版编目(CIP)数据

工程合金热物性/谭真,郭广文编著。-北京:冶金工业出版社,1994.12

ISBN 7-5024-1513-0/TG187

I. 工… II. ①谭… ②郭… III. 合金-热物理性质-工程热物理学 IV. ①TG132.3②TK121

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 02533 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

外文印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1994 年 9 月第 1 版,1994 年 9 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32;7.625 印张;195 千字;228 页;1-950 册

12.00 元

序 言

无论在发展农业、工业、国防和科学技术方面,还是在人民生活方面,材料都是不可缺少的物质基础。材料的各种性能则是材料在应用中实现其价值的重要依据,是材料科学的重要内容。工程合金是金属材料一大门类的主要构成部分。

热过程是物质世界普遍存在的一种物理过程,热环境则占据了宏观物质世界的整个空间,这就决定了材料的热物理性能——简称热物性——成为材料性能的一个重要方面。工程合金热物性数据,不仅是衡量工程合金能否适应具体热过程工作需要的数量依据,而且是对特定的热过程进行基础研究、分析计算和工程设计的关键参数。随着工业和科学技术发展水平的日益提高,人们对材料热物性数据的需要和重视程度必将日益加强。

材料的热物性数据,迄今为止绝大部分仍是由对材料进行测试工作提供的。这种测试工作,既属于基础科学的范畴,又能为基础科学和应用科学乃至高新技术之间架设起一座桥梁。因而这种测试工作对于科学技术的发展和应用是必不可少的。

本书作者谭真和郭广文二位同志,在鞍钢钢铁研究所长期致力于工程合金热物性的测试与研究工作,《工程合金热物性》一书是他们多年辛勤劳动的结晶。该书比较系统地提供了工程合金热物性数据,但又不是数据的简单罗列和汇集,而是对数据进行了相当程度的综合、分析、判断和归纳,并注意对工程合金热物性的影响因素和变化规律,对热物性跟材料微观结构、化学组分、工艺因素的关系,以及对热物性机制、微观粒子的运动规律等进行了一定深度的研究,同时又通过生产实际中若干具体材料和工件阐明了工程合金热物性的一些应用。这种类型的书目前尚不多见,或许是一种有意义的探索和尝试。希望本书能对我国工程合金众多的研

究者和应用者,特别是冶金、机械、化工、建材和计量部门的工程技术人员、大专院校有关专业的教学人员有所裨益,为我国的现代化建设作出一份贡献。

鞍山钢铁公司副总工程师
鞍钢钢铁研究所 所长 傅作宝

1993年10月1日

前 言

农业、工业、国防等的各类工程中使用的各种金属及其合金材料,被称为工程合金。人们使用材料,实际上是使用材料的性能,材料是性能的载体。材料的性能是多方面的,其中与热物理过程相联系的性能称为热物性,包括比热容、导热系数、热扩散率、热膨胀系数、热辐射率、粘度、密度、熔点等。

本书作者多年从事金属材料热物理性能测试和研究,在其工作实践中感到作为一名工程技术人员,不论是搞材料设计的,还是搞设备和工艺研究的,常常需要了解热物性的基础知识和某些材料热物性的实际数据。当他们查阅这方面资料的时候,则往往苦于国内资料太少,而国外资料又难于对上牌号。在已经测量过的工程合金牌号中,不时有重复委托测量的情形发生,也有对测量方法和测量结果的可信性及可靠性,对热物性数据的应用等提出问题的情形发生。进而言之,作为一名工程技术人员,如果能够对工程合金热物性跟合金成分、组织、温度以及其它物理性能之间的关系,对其变化的一般规律,有了更深刻的认识,那么对于他们更加主动和自觉地开发材料和应用材料,将是一件很有意义的事情。以上就是作者萌生撰写此书想法的由来。

本书首先介绍工程合金热物性的基本概念、基础理论和本书有关热物性参量的测量方法,接着以工程合金热物性测量的标准物质——工业纯铁为例,着重说明本书测量数据的可信性和可靠性程度,在误差分析和数据评价方面花了较多笔墨。这是从实际出发的一种做法,带有普及应用的性质。本书的重点在于介绍各种工程合金热物性数据,这些数据变化的一般规律和这些数据的应用举例。

本书主要是为从事金属材料设计、制造、应用等方面研究的技术人员编写的,也可供从事金属物理性能专业和热物理专业的教师和学生参考。对于那些已经了解热物性基本内容的读者来说,可以先不看前面两章,待发生了疑问再去前面查阅有关部分也是可行的。

工程合金的牌号很多,新品种新牌号正在不断涌现。本书的150多个牌号只是其中的一小部分,但确实是最基本的部分。作者期望在今后的岁月里,随着这方面测试工作的进一步开展,倘能有机会再作补充和提高。

本书中铜和铜合金热物性由郭广文执笔,其余均为谭真执笔。限于作者学识水平,本书不当之处在所难免,恳请有关专家、同行和读者不吝指教。

作 者

1993年10月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 工程合金	(1)
1.2 热物性	(1)
1.3 热物性基础概念	(2)
1.3.1 密度 ρ	(2)
1.3.2 比热容 c_p	(2)
1.3.3 导热系数 λ	(3)
1.3.4 热扩散率 α	(3)
1.4 工程合金热物性基础理论	(5)
1.4.1 工程合金的热容理论	(9)
1.4.2 工程合金的导热理论	(12)
1.5 热物性测量方法	(14)
1.5.1 流体静力学法测量室温密度	(14)
1.5.2 激光脉冲法测量热扩散率	(16)
1.5.3 比较法测量比热容	(18)
1.5.4 非稳态法测量导热系数	(20)
2 工业纯铁热物性	(21)
2.1 各种纯铁	(21)
2.2 工业纯铁的室温密度测量	(22)
2.2.1 测量装置	(22)
2.2.2 测量要领	(23)
2.2.3 测量结果	(23)
2.2.4 误差分析及数据评价	(23)
2.3 工业纯铁的热扩散率测量	(26)
2.3.1 测量装置——激光脉冲热导仪	(26)
2.3.2 测量要领	(26)
2.3.3 测量结果	(28)
2.3.4 误差分析和数据处理	(28)
2.3.5 数据评价	(39)

2.4	工业纯铁的比热容测量	(40)
2.4.1	测量结果和数据处理	(40)
2.4.2	误差分析与数据评价	(42)
2.5	工业纯铁的导热系数计算	(43)
2.5.1	误差分析	(44)
2.5.2	密度变化的处理	(46)
2.5.3	居里点导热系数的处理	(46)
3	碳素钢热物性	(47)
3.1	碳素结构钢 Q215	(47)
3.2	优质碳素结构钢 08A1、10	(48)
3.3	优质碳素结构钢 20、20Mn 和 20g	(49)
3.4	优质碳素结构钢 35、45	(52)
3.5	优质碳素结构钢 55	(53)
3.6	优质碳素结构钢 60、65Mn	(54)
3.7	优质碳素结构钢 70	(55)
3.8	优质碳素结构钢 80	(55)
3.8.1	化学成分、热处理工艺和金相组织	(55)
3.8.2	工艺条件和组织状态对热物性的影响	(56)
3.9	碳素工具钢 T8、T12	(63)
3.9.1	碳素工具钢的化学成分	(63)
3.9.2	碳素工具钢的热物性数据	(64)
3.9.3	试样密度变化对导热系数的影响	(65)
3.10	碳钢热物性小结	(66)
3.11	碳钢热物性应用举例	(67)
4	低合金结构钢热物性	(71)
4.1	06Ti、06TiXt、06PTi	(71)
4.2	10Ti、15Ti、10SiPTi	(73)
4.3	16Mn	(75)
4.4	09MnTi、09MnTiNb、12MnTiNb	(75)
4.5	15MnV	(77)
4.6	14MnMoV、14MnMoVN	(78)

4. 7	15MoVAI	(79)
4. 8	18MnMoNb	(80)
4. 9	09CuP、09CuPVXt	(80)
4. 10	09MnCuPTi	(81)
4. 11	10MnNiNbTi	(82)
4. 12	10CrNiCuP	(83)
4. 13	12SiMoVNb	(83)
4. 14	15Mo	(84)
4. 15	15MnCrVCu	(85)
4. 16	15MnCrNiMoV	(85)
4. 17	低合金结构钢热物性小结	(86)
4. 18	低合金结构钢热物性应用举例	(86)
5	合金结构钢热物性	(89)
5. 1	30Cr、40Cr	(89)
5. 2	30CrMo、42CrMo	(90)
5. 3	15CrMn	(91)
5. 4	27SiMn、55SiMn	(91)
5. 5	12CrNi3	(92)
5. 6	12CrMoV	(94)
5. 7	20CrMnTi	(94)
5. 8	30CrMnSi	(95)
5. 9	12MnNiCr、12MnNiCrMoV	(96)
5. 10	40CrMnMo	(97)
5. 11	40CrNiMoA	(97)
5. 12	15MnNiMoV	(98)
5. 13	12MnNiCrMoCuV	(99)
5. 14	15MnNiCrMoCuVB	(99)
5. 15	12MnCrMoCuVB	(100)
5. 16	15MnCrMoVNbB	(101)
5. 17	18Cr2Ni4W	(102)

5.18	25Cr2MoVA	(102)
5.19	31Si2CrMoB	(103)
5.20	70Si2MnV、74SiMnV	(104)
5.21	30MnCrMoXt	(105)
5.22	43 SiMnCrNiMoVXt	(105)
5.23	合金结构钢热物性应用举例	(106)
6	高温合金热物性	(110)
6.1	GH3030	(110)
6.2	GH3039	(111)
6.3	9M698	(112)
6.4	GH220	(112)
6.5	GH99	(113)
6.6	GH901	(114)
6.7	高温合金热物性小结	(115)
6.8	热物性在温度测量中的应用	(116)
7	合金工具钢热物性	(118)
7.1	4SiMnMoV	(118)
7.2	4Cr3Mo2V	(119)
7.3	120CrNiMo、150CrNiMo	(120)
7.4	140MnCrNiMo、170MnCrNiMo	(121)
7.5	150CrNiMnMo	(122)
7.6	150MnCrNiW	(123)
7.7	170CrNi	(123)
7.8	W18Cr4V	(124)
7.9	W14Cr4Mo4V2	(125)
8	不锈钢耐热钢热物性	(127)
8.1	1Cr18Ni9Ti	(127)
8.2	00Cr17Ni14Mo2	(128)
8.3	4Cr14Ni14W2Mo	(129)
8.4	0Cr13Ni4Mo、0Cr13Ni6Mo	(129)

8.5	3Cr13	(130)
8.6	4Cr10Si2Mo	(132)
8.7	1Cr11Ni2W2MoV	(133)
8.8	1Cr17Ni2	(134)
8.9	Cr26Ni18Mo	(134)
9	铸铁热物性	(137)
9.1	灰口铸铁	(137)
9.1.1	高炉铁水灰铸铁 HT60-1	(138)
9.1.2	高炉铁水灰铸铁 HT100	(138)
9.1.3	孕育灰口铸铁 HT100-2	(141)
9.1.4	冲天炉铁水灰铸铁 HT100	(142)
9.1.5	灰铸铁 HT150	(144)
9.1.6	灰铸铁 HT250	(146)
9.1.7	灰铸铁 HT300	(147)
9.2	球墨铸铁	(147)
9.2.1	球铁 QT40-17	(147)
9.2.2	球铁 QT42-10	(148)
9.2.3	球铁 QT400-18	(149)
9.2.4	球铁 QT50-5	(150)
9.2.5	球铁 QT60-2	(150)
9.2.6	球铁 QT70-2	(151)
9.3	蠕墨铸铁	(152)
9.4	可锻铸铁	(154)
9.5	白口铸铁	(155)
9.6	合金铸铁	(156)
9.6.1	耐磨磷铬铸铁 MTP0.5Cr	(156)
9.6.2	钒钛高硅铸铁 MTSi4CrVTi	(157)
9.6.3	耐磨镍球铁 MQTNi4Mo	(158)
9.6.4	耐磨镍铬球铁 MQTNi4Cr2Mo	(158)
9.6.5	耐磨铬镍钼球铁 MQTCr2NiMo	(159)
9.6.6	耐热中硅球铁 RQTSi4Mo	(160)
9.6.7	锰-铜系奥氏体铸铁 QTMn10Cu2	(160)

9.6.8	奥氏体型灰铸铁 HTNi18Cr2	(161)
9.7	铸铁热物性小结	(161)
9.7.1	铸铁的热扩散率	(162)
9.7.2	铸铁的比热容	(163)
9.7.3	铸铁的导热系数	(163)
9.8	影响铸铁导热性能的各种因素	(163)
9.9	铸铁导热系数的最大值	(167)
9.10	铸铁热物性对钢锭模使用寿命的影响	(169)
10	铜及铜合金热物性	(172)
10.1	紫铜	(172)
10.1.1	电解铜 T1、T2、T3、T4	(173)
10.1.2	无氧铜 TU1、TU2	(175)
10.1.3	脱氧铜 TUCa、TUP	(176)
10.1.4	杂质对紫铜热物性的影响	(177)
10.1.5	温度对紫铜热物性的影响	(181)
10.2	黄铜	(181)
10.2.1	普通黄铜 H62、H85、H85A	(182)
10.2.2	特殊黄铜铸造硅黄铜 ZHSi80-3	(184)
10.2.3	合金元素对黄铜热物性的影响	(186)
10.3	青铜	(194)
10.3.1	锡青铜	(194)
10.3.2	铝青铜 ZQA110-3-1.5	(197)
10.3.3	铅青铜 QPb5-3-1	(198)
10.3.4	铬青铜 ZQCr0.5-0.15	(199)
10.3.5	其他青铜	(200)
10.3.6	合金元素对青铜热物性的影响	(202)
10.4	白铜	(206)
10.4.1	普通白铜 B1、B5、B10、B30	(206)
10.4.2	镍对普通白铜热物性的影响	(209)
10.5	铜及铜合金热物性应用举例	(209)
11	铝合金、锌铝合金、镍合金热物性	(217)
11.1	铸造铝合金(生铝)	(217)
11.1.1	ZAlSi7Mg(ZL101)	(217)

11.1.2	ZAlSi9Mg(ZL104)	(218)
11.1.3	ZAlSi5Cu1Mg(ZL105)	(218)
11.1.4	ZAlCu5Mg(ZL201)	(219)
11.1.5	ZAlMg10(ZL301)	(219)
11.2	变形铝合金	(220)
11.2.1	七号锻铝 LD7	(220)
11.2.2	八号锻铝 LD8	(221)
11.2.3	十一号硬铝 LY11	(221)
11.3	铸造锌铝合金 ZZnAl26-2	(222)
11.4	铸造镍合金 NCrWFe35-12-5	(223)
参考文献		(227)

1 绪 论

1.1 工程合金

工程是将自然科学的原理应用到工农业生产部门中去而形成的各学科之总称。合金是由两种或更多种化学元素——其中至少有一种是金属——所组成的具有金属特性的物质。各类工程中使用的各种金属及其合金材料,总称为工程合金,它是现代工农业经济的重要组成部分。铁和钢是最重要的工程合金,使用量占整个工程合金的 80% 以上。钢已形成最为庞大的一类常用工程合金,不仅有大量的碳素钢,品种繁多的大量低合金钢、高合金钢,如不锈钢、工具钢等各种专用钢,而且还有各种铸铁。此外,还有铜、铜合金、铝合金、钛合金、镍合金、钴合金等等。

1.2 热物性

材料的性能是材料对外部作用的反应能力,由于自然界或工作环境施之于材料的外部作用是多种多样的,故其材料的性能也是多方面的,如力学性能,物理性能,化学性能等。物理性能中又包括电学性能,磁学性能,光学性能,声学性能和热学性能等。这些性能之间又是互相联系的。

热过程是物质世界普遍存在的一种物理过程,与这种过程相联系施之于材料的外部作用,必然引起材料的某种反应,或者某种物理特征的改变,这就是材料的热物理性能,简称为热物性。从这个意义上说,热物性包括密度 ρ , 热扩散率或导温系数 a , 比热容 c_p , 导热系数 λ , 热膨胀系数 α ; 另外还有熔点, 粘度, 热发射率, 热吸收率, 热反射率等项热物性。

材料的热物性,当然离不开具体的热物性数据,因为它不仅是衡量材料能否适应具体热过程工作需要的数量依据,而且是对特

定热过程进行基础研究、分析计算和工程设计的关键参数。热物性是认识、了解和评价材料的最基本的性能之一。数据诚然重要,但是数据从哪里来,怎样分析它,怎样应用它,要解决这些问题,则是属于热物性学的研究范畴。

1.3 热物性基础概念

1.3.1 密度 ρ

密度是材料每单位体积的质量,即该材料所含物质的质量与其体积之比。其单位为 $\text{Mg}/\text{m}^3, \text{kg}/\text{m}^3, \text{g}/\text{cm}^3$, 量纲式是 ML^{-3} , 定义式为

$$\rho = m/V \quad (1-1)$$

密度是材料致密程度的度量。从严格的物理意义来说,比重和密度不是相同的概念。比重是材料每单位体积的重量,而重量是由于地球引力而使物体所受到的一种力,它是一个依赖于所处位置——在地球上的纬度和相对于海平面的高度——而变化的量。在国际单位制中已经不用比重这一术语了,认为它定义不统一,含义不确切。

1.3.2 比热容 c_p

比热容属于材料的热力学性能。常识告诉人们,物体吸收热量后温度就会改变。热量是在热传递过程中物体内能变化的量度,而温度则是物体所含大量分子平均动能的量度。任何物体温度每升高一度所要吸收的热量,或者物体温度每降低一度所放出的热量,就是该物体的热容。比热容就是单位质量物体温度每升高一度或降低一度所需要吸收或能够放出的热量。比热容的单位是 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 其量纲式是 $\text{M}^2\text{S}^{-2}\text{K}^{-1}$ 。国际单位制规定该物理量的名称为比热容,废除比热的称谓。比热容有定压比热容和定容比热容之分,这是由物体所经历的热力学过程不同所决定的。但对金属材料而言,一般不存在气态物质那样的等容变化的热力学过程,故只研究其定压比热容 c_p 。本书以后所涉及的比热容,均指 c_p 而言。

比热容还有平均比热容和真比热容之分。由上述定义很容易

理解,单位质量物质体系吸收热量 Q ,该体系温度就要发生变化 $(T_2 - T_1)$,则有

$$\bar{c} = Q/[m(T_2 - T_1)] \quad (1-2)$$

$\bar{c}$ 称为该物体在 $T_1 \sim T_2$ 温度范围内的平均比热容。当这一温度间隔无限减小时,式 1-2 的极限值即被定义为 T 温度下物体的真比热容。

$$C = dQ/(m \cdot dT) \quad (1-3)$$

本书所涉及到的比热容都是定压真比热容 c_p 。

1.3.3 导热系数 λ

导热系数也叫热导率,属于材料的输运性能,它是由研究导热现象的傅里叶定律引入的物理量。傅里叶定律阐明热流与温度梯度之间存在着正比关系。单位时间内通过与热流垂直的单位面积的热量称为热流密度,用 q 表示,它是矢量。一维导热情况下,傅里叶定律的数学表达式为

$$q = -\lambda \text{grad}T \quad (1-4)$$

式中比例系数 λ 即为材料的导热系数,其单位是 $W/(m \cdot K)$,量纲式是 $MkgS^{-3}K^{-1}$,它是表征材料导热能力的一个物理量,在工程上和科研上都是一个十分重要的物理量。式 1-4 中的负号表示热流密度总是和温度梯度的方向相反,换言之,热流密度矢量的方向总是指向温度降低的方向。由式 1-4 得

$$\lambda = -q/\text{grad}T = -Q/(A\tau\Delta T/\Delta L) \quad (1-5)$$

从而得导热系数的定义为单位时间 τ 内在单位温度梯度 $\Delta T/\Delta L$ 条件下通过单位横截面积 A 的热量 Q 。

1.3.4 热扩散率 α

热扩散率是表征非稳态导热过程中温度变化快慢的物理量。非稳态导热过程就是指温度分布随时间而变化的过程,这一过程中的传热量也随时间变化,温度变化的快慢就是该导热过程进行的快慢,因此可以说,热扩散率就是非稳态导热过程的速度。

热扩散率最初是由建立导热微分方程时作为系数引入的。热扩散率是由汤姆森即开尔文命名的,而 J.C. 麦克斯韦尔则称之为