

《电力焊工培训实用教材》编委会 编

DIANLI HANGONG PEIXUN SHIYONG JIAOCAI

电力焊工培训 实用教材



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

《电力焊工培训实用教材》编委会 编

DIANLI HANGONG PEIXUN SHIYONG JIAOCAI

电力焊工培训 实用教材



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本教材分为 15 章, 内容包括金属材料、熔化焊接的基本概念、焊接材料、焊接设备、焊前准备、焊接工艺、焊接应力与变形、焊接接头的焊后热处理、焊接缺陷及焊接检验、焊接安全技术、铝母线焊接、钛材管板密封焊接、铸铁的焊接、二氧化碳气体保护焊、埋弧自动焊。

本教材除作为焊工培训和自学用的资料外, 对焊接技术人员、焊接管理人员、焊接质量检查人员、焊接检验人员和焊接热处理人员学习和工作也有一定的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力焊工培训实用教材/《电力焊工培训实用教材》编委会编. —北京: 中国电力出版社, 2016. 8

ISBN 978-7-5123-9024-9

I. ①电… II. ①电… III. ①电力工程-焊接工艺-技术培训-教材 IV. ①TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 045096 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 8 月第一版 2016 年 8 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 29 印张 506 千字

印数 0001—1500 册 定价 80.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

《电力焊工培训实用教材》编委会

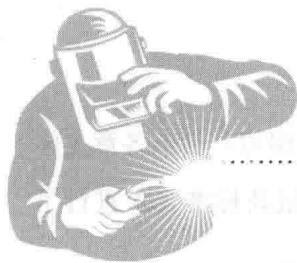
主 任：张佩良

副主任：张信林

委 员：齐绪伯 严 正 胡 庆 尚承伟 陈 群

费伟宏 刘振清 谢海福 孟庆若 肖德铭

冯建辉 高洁安



前 言

近十几年来,为了提高火力发电机组热效率、降低煤耗和满足日益严格的环保要求,我国新建的火力发电厂普遍选择大容量、高参数的超临界、超超临界参数机组,广泛地应用了多合金、高含量的新型耐热钢材,传统的焊接工艺面临着新的挑战。国内多家先行单位针对新型耐热钢的特点,在焊接工艺试验和工艺评定方面做了大量的工作,积累了丰富的经验,制定了许多与其相应的新标准,并在工程实践中应用,取得了一定的效果。

为使电力行业相关人士及时了解和掌握新型耐热钢材的基本特性、焊接工艺特点和焊接技术管理规定,国电焊接信息网自2002年至2013年12年间适时地、有主题地组织了九次焊接工艺研讨活动,以先行单位在新型耐热钢焊接工艺总结出的资料为基础,提出了多项具有很高实用价值的推荐工艺,及时地进行推广,达到了开阔视野、深化认识、沟通信息、交流经验的目的,为实现资源共享,将实践成果尽快地应用在实际工作中,做了大量的工作,得到了业内人士的普遍赞誉。

本教材以尽量多地吸收上述诸多有价值的经验为基本思路,以中国电机工程学会电站焊接专业委员会组织编写的《焊工培训实用教材》部分的内容为基础,以适应当前电力焊接技术进步和质量要求为目的修订编写,并根据中国电力出版社意见定名为《电力焊工培训实用教材》。为保证本教材编写质量,由张佩良、张信林两位高级工程师组织,邀请了近十几年来在电力焊接专业领域有一定理论基础和丰富实践经验、具有一定专业特长的天津电力建设公司肖德铭、孟庆若、冯建辉、高洁安等专家,参加本教材的起草工作。

第一章及附录由肖德铭编写,第二章、第三章、第九章、第十五章由孟庆

若编写，第五章、第六章由冯建辉编写，第八章由高洁安编写，其余各章主体内容引用原《焊工培训实用教材》，部分内容在统稿时按最新标准要求进行了修订。全书由孟庆若、肖德铭统稿，张佩良、张信林审定。

本教材除作为焊工培训和自学用的资料外，对焊接技术人员、焊接管理人员、焊接质量检查人员、焊接检验人员和焊接热处理人员学习和工作也有一定的参考价值。

近十几年来，火力发电机组用钢变化很大，在焊接技术和工艺方面有许多创新，参与编写人员在资料收集上存在一定的局限性，不妥之处在所难免，敬请同行们予以指正。

本书编委会

2016年1月



目 录

前言

第一章 金属材料	1
第一节 金属材料的分类和性能	1
第二节 金属的晶体结构和结晶	9
第三节 铁碳合金	15
第四节 碳钢	20
第五节 合金钢	23
复习题	31
第二章 熔化焊接的基本概念	32
第一节 概述	32
第二节 焊接电弧的概念及其形成	33
第三节 熔化焊接的特点	36
第四节 熔化焊接过程的机理	38
第五节 手工电弧焊的基本原理	43
第六节 手工钨极氩弧焊的基本原理	50
复习题	52
第三章 焊接材料	53
第一节 概述	53
第二节 焊条的组成及规格	54
第三节 焊芯和药皮的组成物及功能	57
第四节 焊条的工艺性能	64
第五节 焊条的分类、型号（牌号）及其编制方法	67
第六节 焊条的选用、检验及保管	71
第七节 手工钨极氩弧焊焊接材料	74

复习题	77
第四章 焊接设备	79
第一节 弧焊电源	79
第二节 弧焊变压器	85
第三节 弧焊整流器（整流式弧焊机）	89
第四节 弧焊电源的使用及维护	94
复习题	97
第五章 焊前准备	98
第一节 概述	98
第二节 焊接接头的形式和坡口	99
第三节 焊缝代号	106
第四节 焊前基础工作	117
复习题	124
第六章 焊接工艺	125
第一节 一般要求	125
第二节 管子对口的点固焊	126
第三节 碳素钢管的焊接	128
第四节 珠光体耐热钢的焊接	140
第五节 马氏体耐热钢的焊接	146
第六节 奥氏体不锈钢的焊接	155
第七节 异种钢焊接	165
复习题	187
第七章 焊接应力与变形	189
第一节 概述	189
第二节 焊接应力与变形的产生	192
第三节 焊接应力的危害与降低措施	198
第四节 焊接变形的预防和矫正	200
复习题	205
第八章 焊接接头的焊后热处理	206
第一节 概述	206

第二节	电厂管道焊接热处理及工艺	207
第三节	温度测量与控制	219
第四节	焊后热处理的质量管理及控制	227
	复习题	232
第九章	焊接缺陷及焊接检验	234
第一节	外观缺陷	234
第二节	内部缺陷	237
第三节	焊接检验	243
	复习题	259
第十章	焊接安全技术	260
第一节	焊接用电防护安全技术	260
第二节	电焊弧光防护安全技术	266
第三节	金属烟尘和有害气体防护安全技术	270
	复习题	275
第十一章	铝母线焊接	276
第一节	概述	276
第二节	铝母线的手工钨极氩弧焊	280
第三节	铝母线的半自动熔化极氩弧焊	292
第四节	铝母线焊接实例	298
	复习题	302
第十二章	钛材管板密封焊接	303
第一节	概述	303
第二节	钛材焊接性分析	305
第三节	焊接设备	310
第四节	钛材焊接工艺	313
第五节	钛材焊接在电力系统中的应用	315
	复习题	323
第十三章	铸铁的焊接	324
第一节	概述	324
第二节	铸铁的焊接性分析	327

第三节	铸铁焊补常用的焊接材料	329
第四节	铸铁的电弧冷焊	331
第五节	铸铁的电弧热焊及半热焊	335
第六节	铸铁的气焊工艺	337
第七节	球墨铸铁的焊接	338
第八节	铸铁缺陷焊补实例	339
复习题		344
第十四章	二氧化碳气体保护焊	345
第一节	概述	345
第二节	二氧化碳气体保护焊熔滴过渡	351
第三节	二氧化碳气体保护焊焊接设备	354
第四节	焊接规范及焊接工艺	360
第五节	焊接缺陷的产生原因与防止措施	381
复习题		382
第十五章	埋弧自动焊	384
第一节	概述	384
第二节	埋弧焊的冶金特点	386
第三节	埋弧焊焊丝与焊剂	388
第四节	埋弧焊机	395
第五节	埋弧焊工艺	403
第六节	火力发电厂管道埋弧焊工艺简述	410
复习题		412
附录 A	铁碳合金状态图	413
附录 B	电厂常用钢材的化学成分、力学性能及参考数据	414
附录 C	常用焊条熔敷金属的化学成分和常温力学性能	434
附录 D	常用焊丝的化学成分	440
附录 E	焊前预热温度	442
附录 F	不锈钢焊缝金属在舍费勒组织图中的参考位置	443

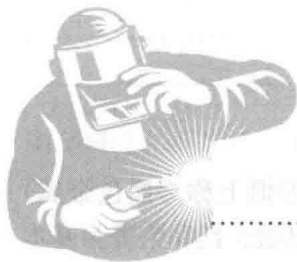
附录 G 共板钢的等温转变图 443

附录 H 焊接异种钢的焊条（焊丝）及焊后热处理温度速查表 444

附录 I 各种钢材施焊的预热及层间温度 447

附录 J 常用钢的焊后热处理温度与恒温时间 448

编后语 449



第一章

金属材料

由金属元素或以金属元素为主，构成具有一般金属特性的材料，称为金属材料。电厂中的设备和部件大至锅炉钢架、汽包、汽轮机转子、汽缸、发电机转子、静子和遍布全厂的各种管道，小至螺钉、垫圈，都由各种金属材料组成，且大多通过焊接方式连成整体。电厂使用的金属材料种类繁多，涉及多种规格、多种牌号的钢铁、有色金属及其合金；使用范围从常温的普通钢材到高温的耐热钢。

各种金属材料的成分不同、性能各异，通过加工特别是热处理后，性能也有很大变化。金属材料的性能主要是指使用性能和工艺性能。使用性能是指金属材料在正常使用条件下应具备的性能，包括力学性能和化学性能；工艺性能是指金属材料对各种冷、热加工过程的适应能力，包括铸造、锻造、焊接、热处理和切削加工等性能。

正确了解各种金属材料的性能和特点，合理选用焊接材料、焊接方法和焊接工艺，对从事焊接的人员至关重要。

第一节 金属材料的分类和性能

世界上已发现的 100 多种化学元素中，金属元素约占 $4/5$ 。金属元素在室温下除汞为液体外，其余都是固体，具有光泽、不透明、良好的延展性、良好的导电性和导热性、固定的熔点等基本特性。

金属的组织 and 性能与温度、加热及冷却速度、加工形变及结晶过程等条件的变化有着密切的关系。因此，掌握一定的金属材料知识，对于理解和研究焊接接头的组织和性能有着重要的基础作用。

一、金属材料的分类

按成分种类分类，金属可分为纯金属和合金。纯金属就是具有金属特性的单质，如铜、铝等。合金则是由两种或两种以上的金属元素或金属元素与非金属元素所组成的新物质，如钢是铁和碳组成的合金，黄铜是纯铜（紫铜）和锌

组成的合金等。

按基本元素分类，人们习惯将金属分为钢铁材料（习惯上称为黑色金属）和非铁材料（习惯上称为有色金属）两大类。钢铁材料以铁、锰和铬等为基本元素，主要指钢和铁。除钢铁材料外，其余所有的金属元素，如铜、铝、锌和有放射性的镭、铀及其合金等均为有色金属。

按密度分类，金属可以分为轻金属和重金属。轻金属是指密度在 $4.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 以下的有色金属，包括铝（Al）、镁（Mg）、钛（Ti）、钠（Na）、钾（K）、钙（Ca）、锶（Sr）、钡（Ba）；特点是密度小，化学活性大，与氧、硫、碳和卤素的化合物都相当稳定。重金属是指密度为 $4.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 以上的有色金属，如铜（Cu）、镍（Ni）、铅（Pb）、锌（Zn）、锡（Sn）等。在经济建设和工程施工中，每种金属根据其特性都有特殊的应用范围和用途。

二、金属材料的物理性能

1. 密度

单位体积的质量称为密度，用符号“ ρ ”表示，单位是 g/cm^3 ，其计算公式为

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

式中 ρ ——密度， g/cm^3 ；

m ——物体质量，g；

V ——体积， cm^3 。

2. 熔点

金属由固态转变为液态时的温度称为熔点。工业上把熔点低于 700°C 的金属或合金称为易熔金属。

各种金属的熔点差异很大，如纯铁的熔点为 1535°C ，各类钢材的熔点一般为 $1300 \sim 1400^\circ\text{C}$ ，钛的熔点为 1668°C ，镍的熔点为 1452°C ，紫铜的熔点为 1083°C ，纯铝的熔点为 658°C ，镁的熔点为 650°C 。当金属形成氧化物后，其熔点变化也各不相同，如氧化铁的熔点为 1565°C ，氧化钛的熔点为 1850°C ，氧化铝的熔点为 2050°C ，氧化镁的熔点为 2852°C 。由以上数据可见各类金属之间的熔点差异很大，而且当金属和氧气作用时，形成氧化物后的熔点变化也各异，这对其焊接过程中焊接电源、电极极性、焊接热输入、焊接接头的气体保护等选择带来重要而直接的影响。

熔点高低对金属和合金的熔炼、轧制、焊接有直接影响，对金属部件的性能影响也很大，如在高温下工作或承压承重的部件都含有高熔点的钨（W）、



钼 (Mo)、钒 (V)、铬 (Cr) 等元素, 通过固溶强化提高其高性能。

3. 导电性

能传导电流的性能叫导电性, 以导电系数或电导率 (ρ) 表示, 单位为 $\text{m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$ 。各种金属导电性能各不相同, 银的导电性最好, 电导率为 0.66; 铜、铝电导率分别为 0.59 和 0.37; 铁的电导率为 0.1。

4. 导热性

导热系数是指在稳定传热条件下, 1m 厚的材料, 两侧表面的温差为 1K (或 $^{\circ}\text{C}$), 在 1s 内, 通过 1m^2 面积传递的热量, 用 λ 表示, 单位为瓦/(米·度)、 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 中 K 可用 $^{\circ}\text{C}$ 代替]。

不同金属, 导热性也不同, 一般来说, 导电性好的材料, 导热性也好。银的导热系数为 429, 铜、铝、铁的导热系数分别为 401、237、80。

导热系数高的物质有优良的导热性能。在热流密度和厚度相同时, 物质高温侧壁面与低温侧壁面间的温度差随导热系数增大而减小。锅炉炉管在未结水垢时, 由于钢的导热系数高, 钢管的内外壁温差不大, 钢管内壁温度又与管中水温接近, 因此, 管壁温差 (内外壁温度平均值) 不会很高。但当炉管内壁结水垢时, 由于水垢的导热系数很小, 水垢内外侧温差随水垢厚度增大而迅速增大, 从而迅速把管壁金属温度抬高, 当水垢厚度达到相当大 (一般为 1~3mm) 后, 会使炉管管壁温度超过允许值, 造成炉管过热损坏。

5. 热膨胀性

金属随温度变化, 体积发生膨胀或收缩的性能称为热膨胀性, 以线膨胀系数 (α) 表示, 单位为 $1/^{\circ}\text{C}$, 含义是温度改变 1°C , 试件长度的增减与试件在 0°C 时长度的比值。

线膨胀系数随金属材料种类和温度不同而变化, 如在 100°C 时, 碳钢、1Cr18Ni9Ti、镍铬合金、紫铜的线膨胀系数为 12.2、16.6、11.1、17.2; 当在 300°C 时, 碳钢、1Cr18Ni9Ti、紫铜的线膨胀系数为 13.5、17.2、17.9。

由于各种材料的线膨胀系数不同, 在焊接过程中, 焊接接头区域将产生不同的膨胀变形和应力状况, 这种因素在异种钢接头的焊接过程中备受关注。

6. 导磁性

能传导磁的性质叫导磁性, 以磁导率 (μ) 表示, 单位为 $\text{T}/(\text{A} \cdot \text{m})$ 。

$$\mu = B/H \quad (1-2)$$

式中 B ——磁感应强度, T;

H ——磁场强度, $\text{A} \cdot \text{m}$ 。

磁导率大于 1 的物体称为顺磁材料, 磁导率远远大于 1 的称为铁磁材料,

磁导率小于1的物体称为逆磁材料。铁磁材料易被磁场吸引和磁化，逆磁材料非但不会被吸引和磁化，反而会削弱磁场。铁、钴、镍等属于铁磁性材料，其他大多数金属为弱磁性或逆磁性材料。

铁磁物质被磁化后具有很强的磁性，但随着温度的升高，金属点阵热运动的加剧会影响磁畴磁矩的有序排列，当温度达到足以破坏磁畴磁矩的整齐排列时，磁畴被瓦解，平均磁矩变为零，铁磁物质的磁性消失变为顺磁物质，与磁畴相联系的一系列铁磁性质（如高磁导率、磁滞回线、磁致伸缩等）全部消失，相应的铁磁物质的磁导率转化为顺磁物质的磁导率。与铁磁性消失时对应的温度即为居里点温度。

不同铁磁性物质的居里点温度不同，对于超超临界（USC）压力机组主蒸汽管道大量采用的 P92 材料，因为其居里点温度在 740°C 左右，所以在焊后热处理过程中使用感应加热方式时，要考虑加热器的功率足够大，或有其他如电阻加热的辅助方式，帮助热处理区域的平均温度达到 760°C 的要求。

三、金属材料的化学性能

金属与其他物质引起化学反应的特性称为金属的化学性能，金属材料的化学性能一般包括抗氧化性和抗腐蚀性等。

抗氧化性是指金属材料在高温时抵抗氧化性气氛腐蚀作用的能力。火力发电厂热力设备的高温部件，如锅炉的过热器、水冷壁管，汽轮机的汽缸、叶片等，长期在高温下工作，容易产生氧化腐蚀。许多金属都能与空气中的氧进行化合而形成氧化物，在金属表面形成一层氧化膜。如果金属表面形成的氧化物层比较疏松，这时，外界氧气便可以继续与金属作用，使金属材料受到破坏，这种现象就叫做金属的氧化。如果金属表面形成的氧化物层比较致密，而且牢固地覆盖在金属表面上，于是就形成了一层保护层，使氧气不能再与金属接触，阻止了金属的继续氧化，金属就得到了保护，这样的金属抗氧化性能高。不同的金属元素在同一种介质中，能引起不同程度的化学反应。如铁与氧的结合力较强，形成疏松而不稳定的氧化物，耐蚀性较差；不锈钢由于添加了铬、镍等化学性能较稳定的元素，抗腐蚀性就好。

金属材料抵抗各种介质（大气、酸、碱、盐）侵蚀的能力称为抗腐蚀性。火力发电厂中的一些热力部件，长期接触高温烟气、汽水或一些腐蚀介质，使金属表面不断受到各种侵蚀，有时还会侵入金属内部，给安全运行带来不利影响，严重时甚至造成破裂损坏事故。火力发电厂锅炉管子受到的腐蚀主要是硫腐蚀和氢腐蚀，燃油锅炉还会受到钒腐蚀。水电厂水轮机涡轮受到的主要是水



气腐蚀。因此,金属材料的抗腐蚀性是一个很重要的材料性能。

金属的化学性能决定了不同金属与金属、金属与非金属之间形成的化合物的性能,有些合金的耐腐蚀性能高、有些抗蚀性好、有的在高温下组织性能有良好的稳定性。

四、金属材料的工艺性能

金属部件通过多种工艺手段加工完成,如铸、锻、焊、热处理及切削等。金属材料对各种工艺手段所表现出来的适应性称为工艺性能,主要有可铸造性、可锻造性、可淬透性、切削加工性和焊接性。对于从事焊接的人员来说,应特别注重研究金属的焊接性。

焊接性是指金属材料在采用一定的焊接工艺包括焊接方法、焊接材料、焊接规范及焊接结构形式等条件下,获得优良焊接接头的难易程度。焊接性能包括两方面的内容:

(1) 接合性能。指金属材料在一定焊接工艺条件下,形成焊接缺陷的敏感性。决定接合性能的因素有工件材料的物理性能,如熔点、导热率和膨胀率,工件和焊接材料在焊接时的化学性能和冶金作用等。当某种材料在焊接过程中经历物理、化学和冶金作用而形成没有焊接缺陷的焊接接头时,这种材料就被认为具有良好的接合性能。

(2) 使用性能。某金属材料在一定的焊接工艺条件下其焊接接头对使用要求的适应性,也就是焊接接头承受载荷的能力,如承受静载荷、冲击载荷和疲劳载荷等,以及焊接接头的抗低温性能、高温性能和抗氧化、抗腐蚀性能等。

当某种金属能用普通又简便的焊接工艺获得优质接头时,则认为这种金属具有良好的焊接性能。钢材焊接性能的好坏主要取决于它的化学组成。而其中影响最大的是碳元素,也就是说金属含碳量的多少决定了它的可焊性。钢中的其他合金元素大部分也不利于焊接,但其影响程度一般都比碳小得多。钢中含碳量增加,淬硬倾向就增大,塑性则下降,容易产生焊接裂纹。通常,把金属材料在焊接时产生裂纹的敏感性及焊接接头区力学性能的变化作为评价材料可焊性的主要指标。

焊接产品或构件在生产前,必须首先评定所用材料的焊接性,以判断所选用的结构材料、焊接材料和焊接方法等是否适当。评定材料焊接性的方法很多,每种方法只能说明焊接性的某一方面,因此需要进行一系列试验后才能全面确定焊接性。试验方法可分为模拟型和实验型。模拟型模拟焊接加热和冷却特点或负荷情况;实验型则按实际施焊条件进行试验。试验内容主要是检测母

材和焊缝金属的化学成分、金相组织、力学性能、有无焊接缺陷,测定焊接接头的低温性能、高温性能、抗腐蚀性能和抗裂纹能力等。一般来说,低碳钢、普通低合金钢的焊接性较好,高碳钢、铸铁、有色金属焊接性相对较差。

五、金属材料的力学性能

金属材料在外界机械力作用下抵抗变形或破坏的能力称为金属的力学性能,以前称机械性能。

衡量金属材料力学性能的指标有强度、硬度、塑性、弹性(刚性)、韧性、抗疲劳性及蠕变性等。焊接接头主要考核强度、塑性、冲击韧性、硬度四个指标。

1. 强度

金属材料在外力作用下,抵抗永久变形和破坏的能力称为金属的强度。按外力作用的性质不同,分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗扭强度等。材料的抗拉强度用极限应力值表示,如抗拉强度(R_m)、屈服强度(R_p)、下屈服强度(R_{eL})等,单位是 MPa。强度指标是工程设计选用材料的主要依据。

2. 塑性

金属材料受力时,应力超过屈服点后,材料产生永久变形而不发生断裂破坏的能力称为塑性。塑性指标可通过拉伸实验测得,常用延伸率 δ 和断面收缩率 ψ 作为塑性指标。 δ 和 ψ 值越大,金属材料的塑性越好。 $\delta > 5\%$ 的材料称为塑性材料,如低碳钢; $\delta < 5\%$ 的材料称为脆性材料,如灰口铸铁。塑性好的材料可顺利进行某些成型工艺,如锻压、冷冲和冷拔等。更重要的是良好的塑性可使零件在使用中,一旦发生超载时,能因塑性变形而避免突然断裂。

3. 冲击韧性

金属材料抵抗冲击负荷的能力叫冲击韧性。一般由冲击韧性值(a_k)和冲击功(A_k)表示,单位分别为 J/cm^2 和 J(焦耳)。冲击韧性或冲击功试验简称冲击试验,因试验温度不同而分为常温、低温和高温冲击试验三种。通常,同一测试温度下,冲击值越大,材料的韧性越好。冲击值高的材料称为韧性材料,冲击值低的材料称为脆性材料。

冲击功取决于材料及其状态,同时与试样的形状、尺寸有很大关系。冲击值的大小对材料的内部结构缺陷、显微组织的变化很敏感,如夹杂物、偏析、气泡、内部裂纹、钢的回火脆性、晶粒粗化等都会使数据值明显降低;同种材料的试样,缺口越深、越尖锐,缺口处应力集中程度越大,越容易变形和断裂,冲击功越小,材料表现出来的脆性越高。因此不同类型和尺寸的试样,其