

CHANGYONG JINSHU CAILIAO

HANJIE JISHU SHOUC

常用金属材料 焊接技术手册

张应立 周玉华◎主编



金盾出版社

常用金属材料焊接 技术手册

主编 张应立 周玉华

金盾出版社

内 容 提 要

本书详细介绍了常用金属材料的分类、牌号、性能、焊接特点、焊接参数和焊接工艺。主要内容包括:金属材料焊接基本知识,碳钢焊接技术,低合金钢焊接技术,不锈钢焊接技术,铸铁焊接技术,非铁金属材料焊接技术,异种金属材料焊接技术,金属基复合材料焊接技术,金属材料焊接应力、变形、缺陷及其控制等。

本书内容具有实用性,既可供焊接工程技术人员和施工工长阅读参考,也可作为技术工人指导操作的工具书,还可供技工学校、中高等职业技术学院、大专院校相关专业师生和科研人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

常用金属材料焊接技术手册/张应立,周玉华主编. —北京:
金盾出版社,2015.1

ISBN 978-7-5082-9474-2

I. ①常… II. ①张…②周… III. ①金属材料—焊接—技术手册 IV. TG457.1-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 122841 号

金盾出版社出版、总发行

北京太平路 5 号(地铁万寿路站往南)

邮政编码:100036 电话:68214039 83219215

传真:68276683 网址:www.jdcbs.cn

封面印刷:北京精美彩色印刷有限公司

正文印刷:北京万友印刷有限公司

装订:北京万友印刷有限公司

各地新华书店经销

开本:850×1168 1/32 印张:26.75 字数:768 千字

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

印数:1~3 000 册 定价:95.00 元

(凡购买金盾出版社的图书,如有缺页、
倒页、脱页者,本社发行部负责调换)

前 言

随着我国经济的持续发展和科学技术的不断进步,焊接技术被广泛应用于机械工程、交通运输、水利电力、航空航天、国防工程、农业机械等各行各业。焊接生产早已不限于使用传统的焊接材料,而是越来越多地采用了不常见的钢铁材料和非铁金属材料,以及金属基复合材料。因此,工程技术人员、施工工长合理制订工艺程序,焊工熟练掌握各种金属材料的焊接技术至关重要。唯有如此,才能帮助企业获得更好的经济效益。

为适应形势发展和焊接生产的实际需要,我们收集了大量实际生产中精选出来的宝贵资料,在各级领导和专家的指导帮助下编撰了此书。希望帮助广大读者通过学习,快速掌握先进、合理的金属材料焊接操作技术,并针对生产实际中遇到的疑难问题,对照找出解决办法,以提高焊接技术水平和产品质量。

本书由张应立、周玉华主编,参加编写的还有张峥、吴兴惠、周玉良、周玥、刘军、耿敏、周琳、程世明、杨再书、张莉、吴兴莉、李家祥、梁润琴、邓尔登、王丹、王正常、谢美、贾晓娟、陈洁、张军国、黄德轩、王登霞、连杰、车宣雨、陈明德、张举素、张应才、唐松惠、王正荣、张梅、张举容、杨雪梅、李祥云、候勇、程力、钱璐、薛安梅、徐婷、黄月圆、李守银、王海、陆彩娟、方汪键、郭会文等,全书由高级工程师张梅主审。在编写过程中曾得到铁道部贵州路桥有限公司领导、专家和审定者的大力支持与帮助。在此书出版之际,特向关心和支持本书编写的各位领导、专家、审定者和参考文献的编著者表示衷心感谢。

由于作者水平有限,加之时间仓促,且经验不足,书中不当之处在所难免,恳请专家和广大读者批评指正。

作 者

目 录

1 金属材料焊接基本知识	1
1.1 金属材料的分类、性能与选用	1
1.1.1 金属材料的分类	1
1.1.2 金属材料的基本性能	2
1.1.3 金属材料的选用原则	10
1.1.4 金属材料的用途和特性	11
1.2 金属材料的焊接性与焊接特点	19
1.2.1 金属材料的焊接性	19
1.2.2 金属材料的焊接特点	23
1.2.3 金属材料焊接方法的选择	28
1.3 金属材料焊接工艺基本知识	31
1.3.1 焊接接头形式及选用	31
1.3.2 焊接位置及选择	57
1.3.3 焊接接头坡口形式和尺寸选择	58
1.3.4 焊缝与焊接符号及图样上的表示方法	101
1.3.5 焊接参数的选择	119
1.3.6 工件的清理	143
1.3.7 工件的热处理	146
2 碳钢焊接技术	150
2.1 碳钢基本知识	150
2.1.1 碳素结构钢	150
2.1.2 优质碳素结构钢	151
2.2 低碳钢的焊接	152
2.2.1 低碳钢的焊接特点	152
2.2.2 低碳钢的焊接工艺	153
2.2.3 低碳钢的焊接实例	200
2.3 中碳钢的焊接	212
2.3.1 中碳钢的焊接特点	212

2.3.2	中碳钢的焊接工艺	213
2.3.3	中碳钢的焊接实例	218
2.4	高碳钢的焊接	222
2.4.1	高碳钢的焊接特点	222
2.4.2	高碳钢焊条电弧焊的焊接工艺	222
2.4.3	典型高碳钢的焊接	223
3	低合金钢焊接技术	225
3.1	低合金钢基本知识	225
3.1.1	低合金钢的分类	225
3.1.2	低合金钢的牌号表示	225
3.1.3	低合金钢的焊接性及影响因素	226
3.2	低合金高强度钢的焊接	226
3.2.1	低合金高强度钢的焊接特点	226
3.2.2	低合金高强度钢的焊接工艺	227
3.2.3	典型低合金高强度钢的焊接	239
3.2.4	低合金高强度钢的焊接实例	241
3.3	低碳调质钢的焊接	246
3.3.1	低碳调质钢的种类	246
3.3.2	低碳调质钢的焊接特点	246
3.3.3	低碳调质钢的焊接工艺	248
3.3.4	低碳调质钢的焊接实例	257
3.4	中碳调质钢的焊接	259
3.4.1	中碳调质钢的焊接特点	259
3.4.2	中碳调质钢的焊接工艺	259
3.4.3	中碳调质钢的焊接实例	265
3.5	低合金耐蚀钢的焊接	267
3.5.1	低合金耐蚀钢的焊接特点	267
3.5.2	低合金耐蚀钢的焊接工艺	268
3.5.3	典型低合金耐蚀钢的焊接	270
3.5.4	低合金耐蚀钢的焊接实例	271
3.6	低温用钢的焊接	272

3.6.1	低温用钢的焊接特点	272
3.6.2	低温用钢的焊接工艺	273
3.6.3	低温用钢的焊接实例	277
3.7	低合金镀层钢的焊接	280
3.7.1	镀锌钢的焊接	280
3.7.2	渗铝钢的焊接	285
3.8	耐热钢的焊接	288
3.8.1	珠光体型耐热钢的焊接	288
3.8.2	奥氏体型耐热钢的焊接	295
3.8.3	马氏体型耐热钢的焊接	300
3.8.4	铁素体型耐热钢的焊接	301
3.8.5	耐热钢的焊接实例	302
4	不锈钢焊接技术	311
4.1	不锈钢基本知识	311
4.1.1	不锈钢的分类	311
4.1.2	不锈钢的牌号表示	311
4.2	奥氏体不锈钢的焊接	312
4.2.1	奥氏体不锈钢的焊接特点	312
4.2.2	奥氏体不锈钢的焊接工艺	315
4.3	马氏体不锈钢的焊接	355
4.3.1	马氏体不锈钢的焊接特点	355
4.3.2	马氏体不锈钢的焊接工艺	356
4.4	铁素体不锈钢的焊接	359
4.4.1	铁素体不锈钢的焊接特点	359
4.4.2	铁素体不锈钢的焊接工艺	359
4.5	铁素体-奥氏体双相不锈钢的焊接	362
4.5.1	铁素体-奥氏体双相不锈钢的焊接特点	362
4.5.2	铁素体-奥氏体双相不锈钢的焊接工艺	363
4.6	典型不锈钢的焊接	367
4.6.1	奥氏体不锈钢的焊接	367
4.6.2	马氏体不锈钢高温风机叶轮修复	373

4.6.3	SAF2205 双相不锈钢管道的焊接	373
5	铸铁焊接技术	374
5.1	铸铁的基本知识	374
5.1.1	铸铁的分类和牌号表示	374
5.1.2	铸铁的焊接特点	376
5.1.3	铸铁的焊补方法	376
5.2	铸铁的焊接工艺	380
5.2.1	铸铁的焊接材料	380
5.2.2	铸铁焊接的操作要点	382
5.2.3	铸铁的焊接参数	387
5.3	铸铁的焊补	388
5.3.1	铸铁的焊补方法及焊接材料选择	388
5.3.2	铸铁的焊补实例	390
6	非铁金属材料焊接技术	401
6.1	铝及铝合金的焊接	401
6.1.1	铝及铝合金的基本知识	401
6.1.2	铝及铝合金的焊接工艺	405
6.1.3	典型铝及铝合金的焊接	434
6.2	铜及铜合金的焊接	446
6.2.1	铜及铜合金的基本知识	446
6.2.2	铜及铜合金的焊接工艺	450
6.2.3	典型铜及铜合金的焊接	465
6.3	钛及钛合金的焊接	479
6.3.1	钛及钛合金的基本知识	479
6.3.2	钛及钛合金的焊接工艺	483
6.3.3	典型钛及钛合金的焊接	494
6.4	镁合金的焊接	506
6.4.1	镁合金的基本知识	506
6.4.2	镁合金的焊接工艺	506
6.4.3	典型镁合金的焊接	517
6.5	镍及镍合金的焊接	522

6.5.1 镍及镍合金的基本知识	522
6.5.2 镍及镍合金的焊接工艺	524
6.5.3 典型镍及镍合金的焊接	534
6.6 铝及铝合金的焊接	536
6.6.1 铝及铝合金的基本知识	536
6.6.2 典型铝材料的焊接	544
6.7 锆及锆合金的焊接	551
6.7.1 锆及锆合金的基本知识	551
6.7.2 锆及锆合金的焊接工艺	551
6.8 锌及锌合金的焊接	556
6.8.1 锌及锌合金的基本知识	556
6.8.2 锌及锌合金的焊接工艺	557
6.9 钨、钼、铌、钽及其合金的焊接	561
6.9.1 钨、钼、铌、钽及其合金的基本知识	561
6.9.2 钨、钼、铌、钽及其合金的焊接工艺	562
7 异种金属材料焊接技术	576
7.1 异种金属材料焊接的基本知识	576
7.1.1 异种金属材料的焊接性	576
7.1.2 异种金属材料的焊接方法	579
7.1.3 异种金属材料的接头连接形式	584
7.1.4 异种金属材料的分类和组合	586
7.1.5 异种金属材料的焊接工艺	588
7.1.6 异种金属焊接的缺陷及防止措施	588
7.2 异种钢铁材料的焊接	591
7.2.1 异种钢铁材料的基本知识	591
7.2.2 异种钢铁材料的焊接工艺	593
7.2.3 典型异种钢铁材料的焊接	635
7.3 钢与铸铁的焊接	658
7.3.1 钢与铸铁的焊接特点	658
7.3.2 碳钢与铸铁的焊接工艺	659
7.3.3 不锈钢与铸铁材料的焊接	662

7.4 钢与非铁金属材料的焊接	662
7.4.1 碳钢与铜及铜合金材料的焊接	662
7.4.2 不锈钢与铜及铜合金材料的焊接	671
7.4.3 钢与钛及钛合金材料的焊接	676
7.4.4 钢与铝及铝合金材料的焊接	678
7.4.5 钢与镍及镍合金材料的焊接	681
7.4.6 不锈钢与铝材料的焊接	682
7.4.7 钢与非铁金属材料的焊接	683
7.5 异种非铁金属材料的焊接	690
7.5.1 铜与铝及铝合金材料的焊接	690
7.5.2 铜与钛及钛合金材料的焊接	697
7.5.3 铝与钛及钛合金材料的焊接	698
7.5.4 钛与钽材料的焊接	700
7.5.5 典型异种非铁金属材料的焊接	700
8 金属基复合材料焊接技术	703
8.1 金属基复合材料的基本知识	703
8.1.1 金属基复合材料的特点	703
8.1.2 金属基复合材料的分类及性能	704
8.2 层压复合材料的焊接	705
8.2.1 不锈钢复合钢板的焊接	705
8.2.2 钛复合钢板的焊接	711
8.2.3 铜-碳钢复合板的焊接	713
8.2.4 B30-Q235 复合板的焊接	716
8.3 连续纤维增强金属基复合材料的焊接	717
8.3.1 焊接特点及接头设计	717
8.3.2 焊接工艺	719
8.4 非连续增强金属基复合材料的焊接	727
8.4.1 焊接特点	727
8.4.2 焊接工艺	729
8.5 典型金属基复合材料的焊接	735
8.5.1 不同焊接方法的比较	735

8.5.2 金属基复合材料的焊接实例	736
9 金属材料焊接应力、变形、缺陷及其控制	747
9.1 焊接应力、变形及其控制	747
9.1.1 焊接应力与变形的基本知识	747
9.1.2 焊接应力及其控制	749
9.1.3 焊接变形及其控制	760
9.1.4 控制焊接应力与变形的工程实例	782
9.2 焊接缺陷及其返修	786
9.2.1 焊接缺陷的基本知识	786
9.2.2 焊接缺陷的分类标准	799
9.2.3 焊接缺陷产生原因与预防措施	824
9.2.4 常见焊接缺陷与排除方法	831
主要参考文献	844

1 金属材料焊接基本知识

1.1 金属材料的分类、性能与选用

1.1.1 金属材料的分类

金属材料的分类如图 1-1 所示。

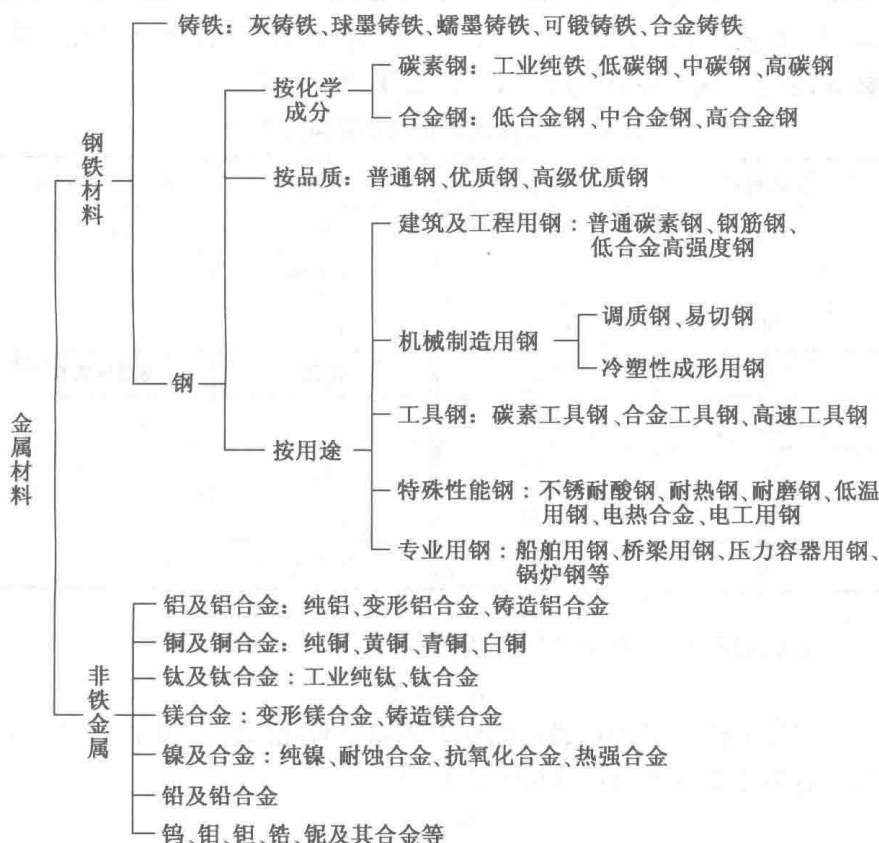


图 1-1 金属材料的分类

1.1.2 金属材料的基本性能

金属材料的性能包括使用性能和工艺性能两个方面。使用性能主要有物理性能、化学性能和力学性能；工艺性能是指金属材料在制造机械零件过程中适应各种加工工艺的性能，如焊接性能、切削加工性能、热处理性能等。

1. 金属材料的物理性能

金属材料的物理性能是金属材料固有的属性，包括密度、熔点、热膨胀性、导电性和磁性等。

(1)密度 单位体积所包含的金属材料的质量，称为该金属材料的密度。密度用代号 ρ 表示，其单位为 g/cm^3 。常用金属材料的密度 (20°C) 见表 1-1。通常将密度 $<5\text{g}/\text{cm}^3$ 的金属称为轻金属，如铝、镁、钛等；密度 $>5\text{g}/\text{cm}^3$ 的称为重金属，如铁、铜、锌等。

表 1-1 常用金属材料的密度 (20°C)

金属材料	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	金属材料	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$
镁	1.74	铅	11.34
铝	2.7	灰铸铁	6.8~7.4
钛	4.508	碳钢	7.8~7.9
锌	7.13	黄铜	8.5~8.6
锡	7.3	青铜	7.5~8.9
铁	7.87	铝合金	2.50~2.84
铜	8.96	镁合金	1.75~2.84
银	10.49	钛合金	4.5

金属材料的质量、体积密度的关系如下：

$$\rho = m/V$$

零件的体积 V 可由设计图样中估算出来，由表 1-1 中查出密度 ρ ，即可计算出该零件用料的总质量 m ，即：

$$m = \rho V$$

(2)熔点 金属或合金从固态向液态转变时的温度称为金属的熔

点。纯金属有固定的熔点,常用金属材料的熔点见表 1-2。

表 1-2 常用金属材料的熔点

金属材料	熔点/℃	金属材料	熔点/℃
钨	3 380	银	960.8
钼	2 630	铝	660.1
钒	1 900	铅	327
钛	1 677	锡	231.91
铁	1 538	铸铁	1 148~1 279
铜	1 083	碳素钢	1 450~1 500
金	1 063	铝合金	447~575

熔点高的金属称为难熔金属,如钨、钼、钒等熔点在 1 900℃ 以上;熔点低的金属称为易熔金属,如锡、铅等熔点在 330℃ 以下。钢和铸铁都是铁碳合金,由于含碳量不同,熔点也各不相同。

熔点相近的两种金属的焊接性能较好;熔点相差大的金属很难用常规的熔焊法焊接。

(3)热膨胀性 金属材料随着温度升高而膨胀的特性称为热膨胀性。金属材料的热膨胀性用它的线胀系数 α 表示。温度升高 1℃ 时,材料所增加的长度与原来长度的比值称为金属材料的线胀系数 α 。

$$\alpha = (L_2 - L_1) / L_1 t$$

式中, L_1 为膨胀前长度(m); L_2 为膨胀后长度(m); t 为升高的温度(℃); α 为线胀系数(1/℃)。

常用金属材料的线胀系数值见表 1-3。

表 1-3 常用金属材料的线胀系数值(0℃ ~100℃)

金属材料	线胀系数 α /℃ ⁻¹	金属材料	线胀系数 α /℃ ⁻¹
铝	23.6×10^{-6}	钛	8.2×10^{-6}
铅	29.3×10^{-6}	碳钢	$(10.6 \sim 13) \times 10^{-6}$
锡	23.0×10^{-6}	黄铜	$(17.8 \sim 20.9) \times 10^{-6}$
铜	17.0×10^{-6}	青铜	$(17.6 \sim 18.2) \times 10^{-6}$
铁	11.76×10^{-6}	铸铁	$(8.7 \sim 11.6) \times 10^{-6}$

异种金属焊接时,必须采取措施消除它们的膨胀差异。否则,将使工件严重变形,甚至损坏。

(4)导热性 金属材料传导热量的能力称为导热性。金属材料导热性用热导率 λ 表示。金属内部相距为1m的两点,温度差恰为1K时所传递的热量称为该金属的热导率 λ 。热导率的单位为W/(m·K)。热导率越大,导热性越好。常见金属材料的热导率见表1-4。由表1-4中可知,银的热导率最大,铜、铝次之。

表 1-4 常见金属材料的热导率

金属材料	热导率 λ /[W/(m·K)]	金属材料	热导率 λ /W/(m·K)
银	419	铁	75
铜	393	灰铸铁	63
铝	222	碳素钢	67(100℃)

对于热导率小的金属,在进行焊接、铸造、锻造及热处理时,加热和冷却的速度应慢,以免造成金属内外部温差过大而产生温度应力导致工件变形或开裂。

(5)导电性 金属材料传导电流的能力称为导电性。金属材料是良导体,其导电能力用电阻率 ρ 表示。一个长度单位且横断面恰是一个单位面积的导体所具有的电阻称为该金属材料的电阻率 ρ 。常用金属材料的电阻率见表1-5。

表 1-5 常用金属材料的电阻率 (Ω·mm²/m)

材料名称	ρ 值(20℃)	材料名称	ρ 值(20℃)
银	0.0165	钨	0.0548
铜	0.0175	铁	0.0978
铝	0.0283	铅	0.222

一般情况下,电阻率小的金属其导电性能良好。工业上常用导电性好的铜、铝或它们的合金作为导电结构材料;导电性差的镍铬合金,以及铁铬铝合金则作为电热元件材料或制作电阻丝等。

(6)磁性 金属材料在磁场中被磁化的性能称为金属材料的磁性。根据被磁化的程度不同,金属材料可分为铁磁性材料(如铁、钴等)、顺

磁性材料(如锰、铬等)和抗磁性材料(如铜、锌等)。

铁磁性材料用于制作变压器、电动机、测量仪表等;抗磁性材料用于制造要求避免磁场干扰的零件和结构。

2. 金属材料的化学性能

金属材料的化学性能有很多。在制造业中使用的金属材料,主要关注其耐腐蚀性和抗氧化性两个方面。

(1)耐腐蚀性 金属材料在常温下抵抗氧、水及其他介质腐蚀破坏作用的能力称为耐腐蚀性。铁生红锈、铜生绿锈、铝生白点都是金属的腐蚀现象。

(2)抗氧化性 金属材料在加热时抵抗氧化作用的能力称为金属抗氧化性。

金属材料在高温条件下容易与氧结合,生成氧化皮,造成金属的损耗,甚至使工件报废。焊接时的高温,会使空气中的氧和氮大量侵入到熔化金属中,与金属中的碳、硅、锰生成氧化物或氮化物并留在焊缝中,造成夹渣、气孔等缺陷,大大降低焊缝的质量。所以在焊接时要采取各种保护措施,防止焊缝金属被氧化。对于长时间在高温下工作的零件,应选用抗氧化性能好的材料来制造。

3. 金属材料的力学性能

金属材料的力学性能是指金属在受到外力时所表现出来的特性。金属材料的力学性能主要有强度(σ_s 、 σ_b)、塑性(δ 、 ψ)、硬度(HB、HR、HV)、冲击韧度(α_K)等。

对于一般焊接结构,尤其是较重要的焊接结构,总是要求焊缝和热影响区某些性能指标达到一定的数值。常用的力学性能试验方法有拉伸试验、冷弯试验、硬度试验和冲击试验等。

(1)强度 金属材料抵抗永久变形和断裂的能力称为强度。在机械制造业中,强度指标有屈服强度 σ_s 和抗拉强度 σ_b 两个。

①屈服强度 σ_s 。屈服强度(又称为屈服点)是指金属材料抵抗永久变形(塑性变形)的能力。它表示材料将要发生永久变形时内部所能承受的正应力。即:

$$\sigma_s = F_s / A \quad (1-1)$$

式中, F_s 为材料发生永久变形时受到的拉力(N); A 为试件的横断面

面积(mm^2); σ_s 为屈服强度(MPa)。

低碳钢的牌号有时就用其屈服强度表示,如 Q235 钢的屈服强度为 235MPa。

有些材料如铜和铝,在拉伸曲线中无明显的屈服点,则在试样拉伸时,以试样塑性变形的应变量为 0.2% 时的应力作为其屈服点,称为屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 。

工程上对一般焊接件或机器零件,在工作时都不允许有塑性变形,因此,屈服强度 σ_s 或屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 常作为强度设计的依据。

②抗拉强度 σ_b 是指金属材料抵抗断裂的能力。它表示材料在拉伸时内部所承受的最大正应力。即:

$$\sigma_b = F_b / A \quad (1-2)$$

式中, F_b 为材料拉断时受到的最大拉力(N); A 为材料试件原有的横断面面积(mm^2); σ_b 为抗拉强度(MPa)。

各种金属材料的抗拉强度 σ_b 是材料供应商按照国家标准规定的试验方法测定的出厂参数,可从有关手册中查到。由于机械零件一般只允许在弹性范围内工作,故其强度指标多以 σ_s 为准;对于无明显弹性范围的材料,如灰铸铁,在拉断前基本上没有塑性变形,因此,没有屈服强度,在零件强度设计时,则以 σ_b 作为强度指标。

构件的许用应力表示材料正常使用时所允许的安全应力,一般用一个大于 1 的安全系数 n 除材料的强度指标(σ_s 或 σ_b)得到,即:

$$[\sigma] = \begin{cases} \sigma_s / n & (\text{塑性材料}) \\ \sigma_b / n & (\text{脆性材料}) \end{cases}$$

构件承载强度条件为:

$$\sigma \leq [\sigma]$$

例如,厚度为 2mm 的低碳钢板对接焊,板宽为 60mm,若焊接接头的许用应力 $[\sigma] = 155 \text{MPa} = 155 \text{N/mm}^2$,则焊缝所能承受的最大拉力 F 可以由下式计算:

$$\sigma = \frac{F}{A} \leq [\sigma]$$

$$F \leq A[\sigma] = 2 \text{mm} \times 60 \text{mm} \times 155 \text{N/mm}^2 = 18\,600 \text{N} = 18.6 \text{kN}$$

即此焊缝所能承受的最大拉力为 18.6kN。