

概 述

学习要点：钢结构的特点和应用；分项系数设计表达式中各项符号的含义。

1.1 钢结构的特点和应用

1.1.1 钢结构的特点

钢结构是用钢板、热轧型钢组成的承重结构,和其他材料的结构相比,有如下特点。

(1) 材料的强度高,塑性和韧性好。强度高,构件的截面积小、厚度薄(对受压等构件要进行稳定性计算,是钢结构设计中重要的内容);塑性好,结构在一般条件下不会因超载而突然断裂;韧性好,结构具有吸收多余能量的能力,抗震性能好。

(2) 材质均匀,接近各向同性,和力学计算的假定较符合,因而其计算结果和实际情况较符合,计算可靠。

(3) 制造简便,施工质量好,工期短。大量构件可在专业化的金属结构厂制作,精度高;可在工地或地面拼装,便于改建、加固和拆迁。

(4) 密封性好。适用于制造高压容器、管道等。

(5) 质量轻。这是由于钢材的强密比比混凝土大得多,相同结构承受力情况下,相比其他结构(如混凝土结构)具有更轻的质量。这对吊装运输是有利的,对抗震也有利。但对可变荷载的变动敏感,对荷载超额的不利影响大。

(6) 钢材的耐腐蚀性差。在使用期间需定期保养。近年来出现的高性能涂料和耐候钢具有较好的抗腐性能,已逐渐得到推广和应用。

(7) 耐热但不耐火。钢材长期经受 100°C 辐射热,其强度变化不大,具有一定的耐热性。但钢材不耐火,在 600°C 时已不能承重,所以必须有防火措施。

1.1.2 钢结构的应用

1. 跨度大、高度高、荷载重的结构

(1) 大跨结构。结构跨度越大,自重在全荷载中所占的比重就越高,所以钢结构自重轻、强度高的优点在大跨结构中得到了广泛应用。

(2) 重型厂房结构。这种厂房里吊车的起重重量大,作业繁重,并且荷载往往是动荷载,其承重结构应采用钢结构。

(3) 高层建筑物的骨架,也是钢结构的应用范围。

(4) 高耸结构。如电视塔,其高度很高,受风载及地震作用很大,也是钢结构的应用范围。

2. 密封性要求高的结构

如高压容器、储油罐、高压输水管等。

3. 需经常装拆和移动的结构

如塔式起重机、采油井架等。

4. 轻钢结构

因其具有轻便和施工快速的特点,轻钢结构也得到了广泛应用。

钢结构因其具有诸多优越性,将会得到更加广泛的应用。

1.2 钢结构的组成

1.2.1 钢结构所受荷载

大部分钢结构都是由一系列一维杆件组成的平面结构或空间结构,其所承受的荷载有竖向、横向、纵向三种。竖向荷载一般包括结构的自重、屋面荷载、吊车轮压等;横向荷载一般包括横向风载、吊车横向水平制动力等;纵向荷载一般包括山墙纵向风载、吊车纵向水平制动力等。

1.2.2 钢结构的组成

钢结构应用范围非常广泛。不同工程结构,为了更好地发挥钢材的性能,有效地承受外力,所采用的结构形式也不相同,所以钢结构的结构形式较多。如用于单层工业厂房的结构形式是由一系列平面承重结构用支撑构件连接成空间结构;大跨结构众多,常用的有平板网架、网壳、悬索结构、索膜结构等;多高层结构为适用不同高度常用的有刚架结构,刚架和抗剪桁架、剪力墙组成的结构,框筒、筒中筒、束筒等筒体结构等。桥梁和塔桅结构形式众多。

钢结构作为主要以杆件体系组成的三维空间结构,主要由三种基本受力构件组成:第一种是轴心受力构件;第二种是受弯构件;第三种是拉弯或压弯构件。本书将对这三种基本构件作较详细的介绍。

1.3 钢结构的设计方法

和其他结构一样,钢结构的设计采用以概率论为基础的极限状态设计法,并采用分项系数设计表达式进行计算。

钢结构是在钢筋混凝土结构课程结束以后开课。因为可靠度理论是一门专门的学科,本章对一次二阶矩近似概率设计法的理论不作介绍了。本节仅就这种方法的几层含义作简要说明。

1.3.1 承重结构的两种极限状态

1. 承载能力极限状态

承载能力极限状态是指构件和连接的强度破坏、疲劳破坏和因过度变形而不适于继续承载,结构和构件丧失稳定,结构转变为机动体系和结构倾覆。这包含两种情况:其一是指某一截面或连接部位的某点的应力超过材料强度、构件整体丧失稳定或在特定条件下出现低应力状态的脆性断裂;其二是指结构或构件虽未出现破坏但产生了不适于继续承载的变形。承载能力极限状态绝大多数是不可逆的,一旦发生即导致结构失效。

2. 正常使用极限状态

正常使用极限状态是指影响结构、构件和非结构构件正常使用或外观的变形,影响正常使用的振动,影响正常使用或耐久性的局部损坏(包括混凝土裂缝)。正常使用极限状态中的变形、振动的限制通常是在弹性范围内,是可逆的。

思考题:

承载能力极限状态和正常使用极限状态对变形的限制有什么不同?

1.3.2 结构可靠度设计

按照概率极限状态设计法,结构的可靠度的定义是:结构在规定的时间内、规定的条件下,完成预定功能的概率。预定功能是指结构的安全性、适用性、耐久性,或统称为可靠性。完成预定功能,就是对规定的某种功能来说结构不失效。

结构的可靠度通常受荷载、材料性能、几何参数等具有随机性的因素的影响。可靠的结构设计是指失效概率小到可以接受的程度。

思考题:

1. 什么是可靠度?
2. 什么是可靠的结构设计?

1.3.3 分项系数设计表达式

1. 承载能力极限状态表达式

$$\gamma_0 (\gamma_G S_{Gk} + \gamma_{Q1} S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} \gamma_{Qi} S_{Qik}) \leq R \quad (1-1)$$

式中, $R = \frac{R_k}{\gamma_R}$ 为结构抗力的设计值, 其中 R_k 是抗力的标准值, 取自其概率分布的 0.05 下分位点, 有 95% 的保证度; γ_R 是抗力分项系数。 S_{Gk} , S_{Qik} 是恒荷载和可变荷载效应的标准值, 取自其概率分布 0.05 上分位点, 有 95% 的保证度, $i=1$ 是最大的可变荷载效应。 γ_G , γ_{Qi} 分

别是恒荷载分项系数、可变荷载分项系数。 γ_0 为结构重要性系数,分为三级:对安全等级为一级或设计使用年限为 100 年以上的结构构件,不应小于 1.1;对安全等级为二级或设计使用年限为 50 年的结构构件,不应小于 1.0;对安全等级为三级或设计使用年限为 25 年的结构构件,不应小于 0.95。一般工业与民用建筑钢结构的安全等级应取二级,其他特殊建筑钢结构的安全等级应根据具体情况另行确定。 ψ_{ci} 为第 i 个可变荷载的组合系数,其值 ≤ 1 。

对于一般排架、框架结构,可采用简化规则,当只有一个可变荷载时,式(1-1)变为

$$\gamma_0(\gamma_G S_{Gk} + \gamma_{Q1} S_{Q1k}) \leq R \quad (1-1a)$$

当有多个可变荷载时,式(1-1)变为

$$\gamma_0 \left(\gamma_G S_{Gk} + 0.9 \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} S_{Qi,k} \right) \leq R \quad (1-1b)$$

2. 分项系数 γ 的取值

《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)规定的目标可靠指标 β 值,是通过原有标准作反演算,找出隐含在现有工程结构中的可靠指标 β 值。它从整体上继承了原有的可靠度水准。

一般钢结构(安全等级为二级)采用 $\beta=3.2$,相应的失效概率是 $P_f=6.87 \times 10^{-4}$ 。目标可靠指标 β 值和相应失效概率如表 1-1 所示。

表 1-1 目标可靠指标 β 值和相应失效概率

破坏类型	安全等级		
	一级	二级	三级
延性破坏	$3.7/1.08 \times 10^{-4}$	$3.2/6.87 \times 10^{-4}$	$2.7/3.47 \times 10^{-3}$
脆性破坏	$4.2/1.34 \times 10^{-5}$	$3.7/1.08 \times 10^{-4}$	$3.2/6.87 \times 10^{-4}$

分项系数 γ 的取值和可靠指标 β 值有关,为计算简便,恒荷载和可变荷载的分项系数都取定值。一般情况下,恒荷载的分项系数 $\gamma_G=1.2$,可变荷载的分项系数 $\gamma_Q=1.4$;在 S_{Gk} 和 S_{Qk} 异号的情况下, $\gamma_G=1.0$, $\gamma_Q=1.4$ 。确定构件 γ_R 值的原则是与目标可靠指标 β 值的偏离最小。对 Q235 钢构件, $\gamma_R=1.087$;对 Q345,Q390,Q420 钢构件, $\gamma_R=1.111$ 。

3. 正常使用极限状态表达式

当验算变形是否超过规定限值时,不考虑荷载的分项系数,即用荷载的标准值计算。荷载效应的组合有短期组合(标准组合)和长期组合(准永久组合)两种。钢结构或构件只按短期组合,其表达式为

$$w = w_{Gk} + w_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{Qi} w_{Qi,k} \leq [w] \quad (1-2)$$

式中, w 为结构或构件的变形值; w_{Gk} 为恒荷载标准值在结构或构件中产生的变形值; w_{Q1k} 为最大可变荷载标准值在结构或构件中产生的变形值; $w_{Qi,k}$ 为第 i 个可变荷载标准值在结构或构件中产生的变形值; ψ_{Qi} 为第 i 个可变荷载组合值系数,当有风荷载参与组合时取 0.6,无风荷载时取 1.0,对于一般框架、排架,当有两个或两个以上荷载参与组合且有风荷载时取 0.85,其他情况取 1.0; $[w]$ 为规范规定的结构或构件的容许变形值。

当只有一个可变荷载时,

$$w = w_{Gk} + w_{Q_1k} \leq [w] \quad (1-2a)$$

思考题:

承载能力极限状态和正常使用极限状态在计算时有什么区别?

1.4 钢结构的发展

钢结构的发展体现在以下几个方面。

1. 采用新的高性能钢材

高性能钢材的重要特性是强度高,并具有优良的塑性和韧性。例如,1988年发布的《钢结构设计规范》中,强度最高的钢材是15MnV,相当于Q390,2002年新修订的规范增加了Q420级钢。从发展趋势看,还会有强度更高的结构用钢出现。

2. 掌握结构的真实极限状态

对结构承载能力的认识越清楚,钢材的利用就越合理,计算手段的改进将为此提供有利条件。

3. 开发新的结构形式

推广高强度钢索的应用,如大跨度的索膜结构和张拉整体结构,两种不同性能的材料取长补短协同工作的钢和混凝土组合结构,索和拱配合使用的杂交结构等。

4. 提高钢结构的制造技术和工艺水平

钢结构的制造也无例外地向机电一体化发展,制造安装质量也要跟上。

习题

1.1 结构的承载能力极限状态包括哪些计算内容? 正常使用极限状态包括哪些计算内容?

1.2 可靠度指标和失效概率有什么关系?

1.3 钢结构主要由哪几种基本受力构件组成?

1.4 钢结构的特点有哪些?

1.5 分项系数设计表达式中各项符号的含义是什么?

1.6 结构抗力的标准值,取自概率分布哪一个分位点作为其代表值? 其保证度是多少?

第2章

钢结构的材料

学习要点：衡量材料力学性能好坏的指标；使钢材变脆的因素；型钢符号的含义；选择钢材应考虑的因素。

2.1 钢结构用材的要求

1. 两种破坏现象

塑性破坏(延性破坏)的特征是当应力超过屈服强度 f_y 后材料有明显塑性变形,当应力继续增大,断面出现颈缩,有持续的变形时间。

脆性破坏(非延性破坏)的特征是破坏前无征兆(变形很小),断口平直,破坏突然发生。

钢结构需用强度高且塑性性能好的材料制作,应当注意的是原来塑性表现极好的钢材也会因工作条件的改变而出现脆性破坏现象。

2. 钢结构对钢材的基本要求

(1) 较高的强度。即要求钢材的屈服强度 f_y 较高,这样可减少截面尺寸,减轻自重,节约钢材;要求抗拉强度 f_u 较高,可以增加安全储备。

(2) 足够的变形能力。即要求塑性好,可调整局部应力峰值,提高构件的延性和抗震能力,还可降低脆性破坏的危险;韧性好,在动荷载作用下吸收较多的能量,降低脆性破坏的危险。

(3) 良好的加工性。包含良好的冷、热加工和可焊性,不会因加工给强度、塑性、韧性带来有害影响。

钢结构规范推荐采用普通碳素钢 Q235、低合金钢 Q345、Q390 及 Q420,规范中未推荐的钢慎用。

2.2 钢材的力学性能

2.2.1 单向拉伸时的性能

钢材在常温、静载条件下一次单向均匀拉伸在拉力试验机上进行,由试验读数绘制出如图 2-1(a)所示的应力-应变(σ - ϵ)曲线。曲线中的直线段 Oa 的终点 a 以下的应力 σ 和应变

ϵ 成比例,符合胡克定律, a 点的应力记为 f_p ,称为比例极限。 a 点以上附近还有一点称为弹性极限,试验时不易求得,总之 a 点以上曲线开始偏离直线。到达 b 点时,荷载不增加,变形持续增大,发生塑性流动。到达 c 点,曲线接近一水平直线。 b 点的应力记为 f_y ,称为屈服强度。过了屈服点 b 后, σ - ϵ 曲线发生抖动,抖动区的最高点称为上屈服点,最低点称为下屈服点,上屈服点不太稳定,下屈服点比较稳定,能反映材料的性能,通常下屈服点的应力记为屈服强度 f_y (图 2-1(b))。 c 点以后,随着应力 σ 增加,应变 ϵ 继续增大,但其斜率逐渐减小,到达 d 点时,试件发生颈缩现象,如图 2-2(b)所示, σ - ϵ 曲线开始下降,到 e 点试件被拉断。 d 点的应力记为 f_u ,称为抗拉强度。

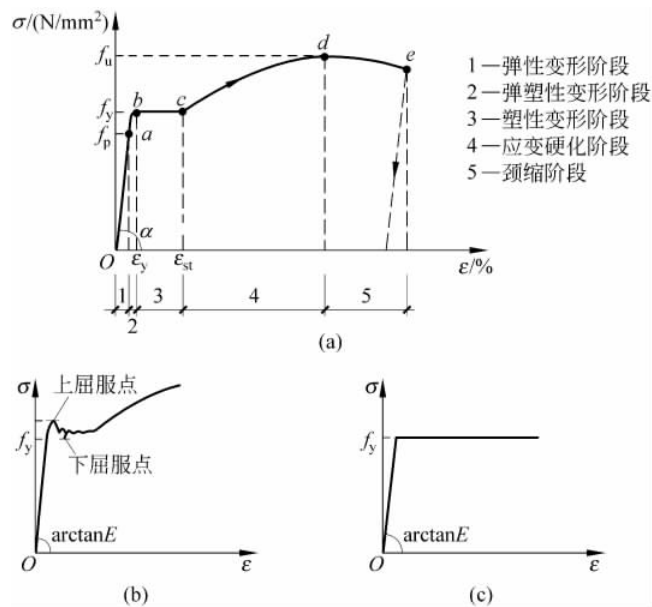


图 2-1 钢材拉伸试验所得 σ - ϵ 曲线(未按比例画出)

(a) 钢材 σ - ϵ 曲线; (b) 屈服点附近 σ - ϵ 曲线放大图; (c) 理想弹塑性体的 σ - ϵ 曲线

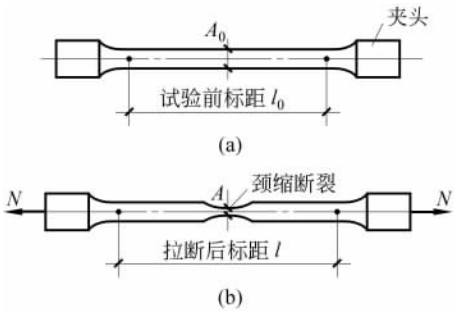


图 2-2 拉伸试验试件及拉断时的颈缩现象

(a) 拉伸试验试件; (b) 拉断时的颈缩现象

一次单向拉伸试验较易进行,且便于规定标准的试验方法来确定钢材的性能指标,由一次单向均匀拉伸的应力-应变规律示出的力学性能指标如下:

(1) 屈服强度 f_y 。 f_y 的应变($\epsilon=0.15\%$)和比例极限 f_p 的应变($\epsilon=0.1\%$)很接近,在

弹性计算时常以纤维应力达到 f_y 作为弹性设计的强度标准值,或材料抗力的标准值。屈服点后的流幅 $\epsilon=0.15\%\sim 2.5\%$,表明材料已失去承担更大荷载的能力;这也是理想弹塑性模型(图 2-1(c))的试验基础。

(2) 抗拉强度 f_u 。出现屈服平台之后,材料应变硬化曲线的最高点的应力为 f_u ,之后出现颈缩断裂。以 f_u 作为强度储备,规范规定钢材的强屈比 $f_u/f_y\geq 1.2$ 。

(3) 弹性模量 E 。 E 是弹性阶段应力-应变之比,即直线 Oa 的倾角的正切值, $E=\tan\alpha$ 。计算时不论钢种,都取 $E=2.06\times 10^5\text{ N/mm}^2$ 。

(4) 伸长率 δ

$$\delta = \frac{l-l_0}{l_0} \times 100\% \quad (2-1)$$

它是表征材料塑性性能的一个指标,是断裂前试件的永久变形和原标定长度的百分比。取圆形试件直径 d 的 5 倍或 10 倍为标定长度,相应的伸长率记为 δ_5, δ_{10} 。其值越大,构件破坏前出现的变形越大,越易发现和采取适当的补救措施。

(5) 理想弹塑性模型(图 2-1(c))在屈服强度 f_y 之前材料为弹性,其弹性模量为 E, f_y 之后为塑性,其弹性模量 $E=0$ 。后面的计算都以此模型为依据。

2.2.2 冷弯性能

冷弯试验是将厚度为 a 的试件放在图 2-3(a)所示的支座上,在压力机上进行。根据试件厚度,按规定的弯心直径 d 将试件弯曲 180° (图 2-3(b)),表面及侧面无裂纹或分层为合格。它表征钢材产生塑性变形时,对发生裂缝的抵抗能力,也是衡量材料塑性变形能力的指标,也是冶金质量优劣的综合指标。特别是焊接构件焊后变形需要进行调直和调平等,都要求材料有较好的冷弯性能。

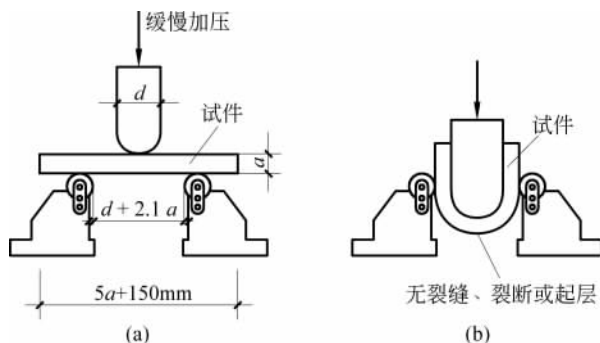


图 2-3 钢材的冷弯试验

(a) 弯曲前; (b) 弯曲后

2.2.3 冲击韧性

冲击韧性是钢材受冲击在塑性变形和断裂时吸收机械能量的量度,是强度和塑性的综合指标。吸收能量较多才断裂的钢材是韧性好的钢材。用冲击韧性来衡量钢材抗脆断的性

能,脆断总发生在有缺口高峰应力的地方。因此,冲击韧性也叫做缺口韧性。图 2-4 所示为带缺口的钢材标准试件在冲击试验机上进行冲击韧性试验。

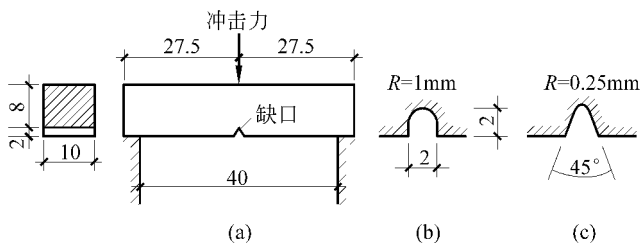


图 2-4 冲击韧性试验

(a) 冲击韧性试验; (b) 梅氏试件 U 形缺口; (c) 夏比试件 V 形缺口

梅氏试件跨中带 U 形缺口,断口处单位面积的功即为冲击韧性值,用 a_k 表示,单位 J/cm^2 。

夏比试件跨中带 V 形缺口,缺口高峰应力处常呈三向受拉应力状态,更能反映实际结构的缺陷。夏比缺口韧性用 A_{kv} 或 C_v 表示,单位是 J ($1J=1N \cdot m$)。

应注意,钢材的冲击韧性随温度变化,低温时冲击韧性与高温时相比明显下降。对于受动荷载作用的结构,应提出常温 ($20^\circ C \pm 5^\circ C$) 冲击韧性、 $0^\circ C$ 冲击韧性和负温 ($-20^\circ C$ 或 $-40^\circ C$) 冲击韧性。

2.3 影响钢材性能的因素

2.3.1 化学成分的影响

1. 碳(C)

碳素钢主要是铁碳的合金,其含碳量小于 2%。按含碳量划分为低碳钢(其含碳量小于 0.25%)、中碳钢(其含碳量大于 0.25%,小于 0.6%)和高碳钢(其含碳量大于 0.6%)。含碳量越高其可焊性越差,含碳量在 0.12%~0.20% 范围内,可焊性最好。

2. 锰(Mn)

锰能显著提高钢材的强度且不过多降低塑性和冲击韧性,但锰会使钢材的可焊性下降。

3. 硅(Si)

硅是强脱氧剂,能提高钢的强度而不显著影响塑性、韧性、冷弯性、可焊性,但过量会恶化钢的可焊性、抗锈蚀性。

4. 钒(V)、铌(Nb)、钛(Ti)

钒、铌、钛能使钢材晶粒细化,在提高强度的同时可保持良好的塑性、韧性。

5. 铝(Al)、铬(Cr)、镍(Ni)

铝是强脱氧剂,能减少钢中有害氧化物,且能细化晶粒提高钢材的塑性和冲击韧性。低合金钢的 C、D 及 E 级都规定含铝量不低于 0.015%,以保证低温冲击韧性。

6. 硫(S)、磷(P)、氧(O)、氮(N)

硫、磷、氧、氮都是有害杂质,会引起钢材的冷脆、热脆裂纹,应严格控制其含量。

钢结构用钢化学成分见表 2-1。

表 2-1 钢材的化学成分

牌号	质量等级	各种元素的质量分数/%										
		C	Mn	Si	P	S	V	Nb	Ti	Al	Cr	Ni
Q235	A	0.14~0.22	0.30~0.65	≤0.30	≤0.045	≤0.050						
	B	0.12~0.20	0.30~0.70	≤0.30	≤0.045	≤0.045	—	—	—	—	—	—
	C	≤0.18	0.35~0.80	≤0.30	≤0.040	≤0.040						
	D	≤0.17	0.35~0.80	≤0.30	≤0.035	≤0.035						
Q345	A	≤0.20	1.00~1.60	≤0.55	≤0.045	≤0.045	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	—		
	B	≤0.20	1.00~1.60	≤0.55	≤0.040	≤0.040	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	—		
	C	≤0.20	1.00~1.60	≤0.55	≤0.035	≤0.035	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	≥0.015	—	—
	D	≤0.18	1.00~1.60	≤0.55	≤0.030	≤0.030	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	≥0.015		
	E	≤0.18	1.00~1.60	≤0.55	≤0.025	≤0.025	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	≥0.015		
Q390	A	≤0.20	1.00~1.60	≤0.55	≤0.045	≤0.045	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	—	≤0.30	≤0.70
	B	≤0.20	1.00~1.60	≤0.55	≤0.040	≤0.040	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	—	≤0.30	≤0.70
	C	≤0.20	1.00~1.60	≤0.55	≤0.035	≤0.035	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	≥0.015	≤0.30	≤0.70
	D	≤0.20	1.00~1.60	≤0.55	≤0.030	≤0.030	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	≥0.015	≤0.30	≤0.70
	E	≤0.20	1.00~1.60	≤0.55	≤0.025	≤0.025	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	≥0.015	≤0.30	≤0.70
Q420	A	≤0.20	1.00~1.70	≤0.55	≤0.045	≤0.045	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	—	≤0.40	≤0.70
	B	≤0.20	1.00~1.70	≤0.55	≤0.040	≤0.040	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	—	≤0.40	≤0.70
	C	≤0.20	1.00~1.70	≤0.55	≤0.035	≤0.035	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	≥0.015	≤0.40	≤0.70
	D	≤0.20	1.00~1.70	≤0.55	≤0.030	≤0.030	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	≥0.015	≤0.40	≤0.70
	E	≤0.20	1.00~1.70	≤0.55	≤0.025	≤0.025	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	≥0.015	≤0.40	≤0.70

2.3.2 成材过程的影响

1. 冶炼

冶炼的过程形成钢的化学成分及其含量,钢的金相组织结构及其缺陷,从而确定了不同的钢种、钢号和相应的力学性能。

2. 浇铸

浇铸铸锭的过程中,因脱氧不同而形成镇静钢、半镇静钢和沸腾钢。

3. 轧制

钢材的轧制使金属晶粒细化,使气泡、裂纹等焊合。因薄板辊轧次数多,所以其力学性能比厚板好,如表 2-2 所示,其屈服强度的高低都由板厚决定。沿辊轧方向的力学性能比垂直于辊轧方向的力学性能好,所以要尽量避免拉力垂直于板面,以防层间撕裂。

4. 热处理

热处理使钢材取得高强度的同时能保持良好的塑性、韧性。