

高等学校规划教材

建井工程结构

(修订二版)

陶柏祥 李和群 胡学文 马善泉 编著

煤炭工业出版社

高等学校规划教材

建井工程结构

(修订二版)

陶柏祥 李和群 胡学文 马善泉 编著

煤炭工业出版社

(京) 新登字042号

内 容 提 要

本书分两篇共十八章。第一篇建井钢结构, 主要内容为钢结构基本构件的计算理论, 以及天轮平台、凿井井架、吊盘、立井液压滑升模板等的设计原理和计算方法; 第二篇建井钢筋混凝土结构, 主要内容为钢筋混凝土基本构件的计算理论, 以及立井整体式井壁、复合井壁等的设计原理和计算方法。

本书按1988年、1989年颁布的新规范编写, 在阐述基本理论和计算方法的同时, 还介绍了结构的设计程序和构造要求, 并吸取近年来建井科技的新成果。本书具有紧密联系建井专业实际的特色, 每个建井结构专题均有设计计算示例, 可供课程设计和毕业设计参考学习。

本书用作煤炭高等院校矿井建设专业通用教材, 也可供矿井工程设计和施工技术人员参考。

高等学校规划教材
建 井 工 程 结 构
(修 订 二 版)

陶柏祥 李和群 胡学文 马善泉 编著

责任编辑: 吴 秀 文

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本787×1092mm¹/16 印张31 插页1

字数742千字 印数1—465

1993年4月第1版 1993年4月第1次印刷

ISBN 7-5020-0748-2/TD·691

书号 3515 A0204 定价 14.20元

前 言

《建井工程结构》是煤炭高等院校矿井建设专业的主要专业课程之一。我们曾根据专业培养目标和教学大纲的要求，编写了《建井工程结构》一书，作为试用教材于1979年由煤炭工业出版社出版。经过数年的教学使用，我们对原书进行了修订，1986年出版了《建井工程结构》（修订本），作为煤炭高等院校教学用书。近年来，新的结构设计规范已陆续由国家有关部委批准正式颁布施行。新规范是以概率理论为基础的极限状态设计法，引入了可靠度概念，改变了老规范的容许应力法或安全系数法中安全度上的定值法，变动较大。有鉴于此，我们按照新规范对原教材进行改编，继续保持原书理论联系实际、紧密结合矿建专业等特色，对于矿山凿井结构和井壁结构如何采用新规范提出了建议，重新计算了各专题示例，补充了井架、液压滑模等计算示例，并吸取了近年来建井科技试验研究新成果，如凿井井架的电算方法、复合井壁的极限状态设计等。同时基础理论的内容也有所加强。这样，本版内容的理论性与实用性比修订版都有较大的提高和充实。

本书按110学时编写。书中建井结构专题部分各院校可以根据具体情况选择讲授，其中计算示例也可以结合课程设计和毕业设计指导学生自学。

参加本书初版编写的有陶柏祥、李和群、胡学文、张经甫。参加修订第一版的有陶柏祥、李和群、胡学文。

本次修订第二版编写的有：淮南矿业学院陶柏祥（第一篇第一～七章）；胡学文和陶柏祥（第一篇第八、九章）；山东矿业学院李和群（第二篇第十～十六章）；马善泉（第二篇第十七、十八章）。

由于水平所限，书中缺点和错误在所难免，请读者批评指正。

作 者

1992年4月

目 录

第一篇 建井钢结构

第一章 钢结构概论	1
第一节 钢结构的特点	1
第二节 钢结构的应用	1
第三节 钢结构的设计方法	2
第二章 钢结构的材料	6
第一节 建筑钢材的基本力学性能	6
第二节 钢结构对钢材性能的要求	8
第三节 影响钢材力学性能的主要因素	10
第四节 钢材的种类、规格和选用	12
第三章 钢结构的连接	17
第一节 钢结构连接的种类和特点	17
第二节 焊缝连接	17
第三节 普通螺栓连接	39
第四节 高强度螺栓连接	51
习 题	58
第四章 钢梁	60
第一节 钢梁的类型和截面形式	60
第二节 梁的强度、刚度和整体稳定	60
第三节 型钢梁的设计	70
第四节 组合梁的设计	74
第五节 梁的拼接和梁系的连接	90
习 题	92
第五章 钢拉杆、压杆和柱	93
第一节 构件种类和截面形式	93
第二节 轴心受拉构件	93
第三节 实腹式轴心受压构件	95
第四节 格构式轴心受压构件	105
第五节 拉弯构件	114
第六节 实腹式压弯构件	118
第七节 格构式压弯构件	126
第八节 柱脚	129
习 题	135
第六章 天轮平台	137
第一节 天轮平台的型式和构造	137
第二节 天轮平台的荷载	140

第三节	天轮梁的计算	143
第四节	天轮平台主梁的计算	146
第五节	天轮平台计算示例	148
第七章	凿井井架	176
第一节	凿井井架的型式和构造	176
第二节	常用凿井井架及其主要尺寸	181
第三节	凿井井架的荷载及荷载组合	185
第四节	井架主体架的计算	187
第五节	井架基础计算	190
第六节	井架倾覆稳定性验算	192
第七节	凿井井架的电算方法	193
第八节	凿井井架计算示例	195
第八章	凿井吊盘	207
第一节	吊盘的构造要求	207
第二节	吊盘荷载分析	212
第三节	吊盘结构设计	213
第四节	吊盘悬吊装置计算	219
第五节	吊盘计算示例	222
第九章	立井液压滑升模板	240
第一节	滑模荷载的确定	241
第二节	液压千斤顶和爬杆的计算	242
第三节	模板和围圈的计算	243
第四节	滑模盘的计算	246
第五节	提升架和吊杆的计算	248
第六节	立井液压滑升模板计算示例	250
第二篇 建井钢筋混凝土结构		
第十章	钢筋混凝土结构的概念及所用的材料	269
第一节	钢筋混凝土的概念	269
第二节	钢筋	270
第三节	混凝土	276
第十一章	钢筋混凝土结构的基本计算原则	286
第一节	结构的功能及其极限状态	286
第二节	结构可靠度的概率分析	287
第三节	概率极限状态设计方法的实用表达式	289
第十二章	受弯构件正截面的强度计算	293
第一节	钢筋混凝土受弯构件正截面试验分析结果	293
第二节	钢筋混凝土受弯构件正截面的破坏形式	295
第三节	矩形截面单面配筋梁	299
第四节	矩形截面双面配筋梁	304
第五节	T形截面单面配筋梁	308
第六节	单向板的构造与计算	313

第七节	双向板的计算	315
习 题		320
第十三章	受弯构件斜截面的强度计算	322
第一节	概述	322
第二节	梁沿斜截面破坏的主要形态	323
第三节	梁斜截面抗剪强度计算	325
第四节	构造要求	329
习 题		338
第十四章	受弯构件的变形及裂缝计算	340
第一节	概述	340
第二节	受弯构件的变形 (挠度) 计算	340
第三节	受弯构件的裂缝宽度验算	346
第四节	受弯构件抗裂度验算	348
习 题		352
第十五章	钢筋混凝土受压 (拉) 构件	353
第一节	轴心受压构件	353
第二节	偏心受压构件	356
第三节	轴心受拉构件	372
第四节	偏心受拉构件	373
习 题		374
第十六章	受扭构件	376
第一节	概述	376
第二节	受扭构件的强度计算	377
第三节	受扭构件的构造要求	383
习 题		385
第十七章	整体式立井井壁	386
第一节	概述	386
第二节	井壁在侧压力作用下的内力计算	389
第三节	井壁厚度选择及稳定性验算	392
第四节	混凝土井壁强度验算	395
第五节	钢筋混凝土井壁环向配筋计算	397
第六节	钢筋混凝土井壁竖向钢筋计算	402
第七节	井筒壁座计算	410
第八节	冻结凿井钢筋混凝土井壁计算示例	413
习 题		433
第十八章	复合井壁	434
第一节	概述	434
第二节	有塑料板夹层的钢筋混凝土组合井壁	437
第三节	砌块外壁强度计算	438
第四节	滑动井壁	440
第五节	钢板混凝土复合井壁的试验研究成果简介	452
第六节	复合井壁计算示例	455

附 录	464
附录 I 型钢表	464
附录 II 轴心受压构件的稳定系数	471
附录 III 钢筋的计算截面面积及理论重量	475
附录 IV 材料的标准强度和设计强度	477
附录 V 混凝土塑性系数	479
附录 VI 双向板计算图表	481
附录 VII 按“m”法计算弹性基础用表	484
参考文献	488

第一篇 建井钢结构

第一章 钢结构概论

钢结构是用钢板、型钢和圆钢等热轧钢材或冷弯薄壁型钢，通过焊接、铆接或螺栓连接等方式制造而成的结构，它是工程结构的主要类型之一，在矿山建井工程中应用非常广泛。

第一节 钢结构的特点

钢结构与其他材料的结构相比较，具有以下特点：

1. 钢材强度高，结构重量轻

钢材的容重虽较大，但其强度却很高，在相同条件和相同荷载下，钢结构构件截面较小，自重较轻。因此，钢结构可以承受更大的荷载，跨越更大的跨度。

2. 钢材质地均匀，接近各向同性体

钢材内部组织均匀，是一种理想的弹塑性材料，按照一般工程力学方法计算，钢结构的受力情况比较接近于结构的实际工作情况，所以它的计算结果较为可靠。

3. 钢材的塑性和韧性好

钢材的塑性好，在一般情况下，钢结构不会发生突然断裂破坏，而是在事先有较大变形预兆；钢材韧性好，使钢结构对动力荷载有较强的适应性。

4. 钢结构工业化生产程度高，具有良好的装配性

钢结构由各种型材组成，可以采用工厂制造、工地安装的施工方法，故工业化程度高，质量易保证，施工周期短，且便于拆卸、加固和改建。

5. 钢结构密闭性好

钢材组织紧密，不渗漏，焊接的钢结构可以达到完全密封，因此可用于建造要求气密性和水密性好的高压容器等密闭结构。

6. 钢材具有一定的耐热性，但防火性差

温度在 100°C 以内，钢材的性质变化不大，温度达到 300°C 以后，钢材强度明显下降，达到 $550\sim 600^{\circ}\text{C}$ 时，钢材强度几乎完全丧失，当钢材表面经常受 150°C 辐射热时，在构件表面需加隔热防护层。

7. 钢材易锈蚀

钢材在湿度大或有侵蚀性介质的环境中容易锈蚀，所以钢结构需采取防护措施，如除锈、刷涂料等，维护费用较高。

第二节 钢结构的应用

钢材是经济建设中的重要材料，价格也比较高，所以钢结构的应用除了需要根据钢结构的特点作出合理选择外，还应该结合我国国情针对具体情况进行综合考虑。目前我国钢

结构的应用范围大致如下:

1. 重型厂房结构

这类结构的特点是跨度较大, 吊车吨位较大, 厂房较高。

2. 大跨度结构

结构跨度越大, 减轻结构自重越具有明显的经济效果。

3. 受动荷载结构

直接承受动力荷载作用的结构, 以及抗震性能要求高的结构, 宜采用钢结构。

4. 高耸结构和高层建筑

该类结构的特点是除自重外, 主要承受风荷载, 而钢结构自重轻, 构件截面小, 对减少风荷载有利。

5. 可拆卸的移动结构

钢结构特别适用于需装拆的结构, 不但装拆方便, 运输重量也轻。例如矿山凿井结构物, 主要包括凿井井架、天轮平台、凿井施工用盘、砌壁模板等, 以及装配式移动房屋, 通常都采用钢结构。

6. 轻型钢结构

荷载特别小的小跨结构和高度不大的轻型支架, 要求结构轻巧, 适宜采用轻钢结构。

7. 其他构筑物

其他构筑物, 如起重架、起重桅杆、栈桥、容器和管道等, 一般均采用钢结构。

第三节 钢结构的设计方法

钢结构设计必须保证在充分满足功能要求的基础上, 做到技术先进、经济合理、安全可靠和确保质量。

工程结构的功能要求包括安全性、适用性和耐久性, 三者统称为结构的可靠性。用来度量可靠性的指标称为可靠度, 度量安全性的指标称为安全度, 可靠度比安全度的含义更广泛, 但安全度是可靠度最重要的内容, 它直接关系到人身安全和经济效益等问题。

钢结构的设计方法通常均由国家主管部门颁布设计规范加以规定。1988年我国新修订的《钢结构设计规范》GBJ 17—88 (以下简称《规范》), 采用以概率理论为基础的极限状态设计法, 它是当前国际上结构设计最先进的方法。这种方法以结构失效概率 P_f 来定义结构可靠度, 并以与其相对应的可靠指标 β 来度量结构的可靠度, 这能较好地反映结构可靠度的实质, 使设计概念更为科学和明确。

结构的极限状态系指结构或结构的一部分超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一功能要求, 此特定状态称为该功能的极限状态。各种承重结构均应按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计。前者主要考虑有关结构安全性的功能, 后者主要考虑有关结构适用性和耐久性的功能。

承载能力极限状态为结构或构件达到最大承载能力或不适于继续承载的变形的极限状态。

正常使用极限状态为结构或构件达到正常使用的某项规定限值的极限状态, 在钢结构构件中包括变形和振动等。

结构的极限状态通常可用荷载效应 S 和结构抗力 R 之间的关系来描述。荷载效应

是指荷载、地震、温度变化等引起的结构内力（轴向力、弯矩、剪力等）或变形（挠度、转角等）等；而结构抗力则是指结构承受这些荷载效应（即内力或变形等）的能力（即结构的承载能力或刚度等）。比较 S 和 R ，显然， $R > S$ 表示结构处于可靠状态； $R < S$ 表示结构处于失效状态；而 $R = S$ 则表示结构处于极限状态（图1-1）。因此，结构的极限状态可用下列极限状态方程来表达：

$$Z = R - S = 0 \quad (1-1)$$

可见， Z 是反映或判别结构完成功能状态的函数，因而称为结构的功能函数。

影响荷载效应 S 和结构抗力 R 的各种因素，例如各种荷载、材料性能、几何参数、计算公式精确性等，都将影响结构的功能函数 Z 。这些影响因素或基本变量都具有随机性。当仅采用荷载效应和结构抗力两个综合的基本变量时，结构按极限状态设计应符合下列要求：

$$Z = g(S, R) = R - S \geq 0 \quad (1-2)$$

按概率理论，结构或构件的失效概率 P_f ，可采用下列公式表示：

$$P_f = P\{Z < 0\} = P\{R - S < 0\} \quad (1-3)$$

根据概率法的观点，结构设计总是存在一定的风险，不能保证绝对安全。但是，如果在规定的时间内和规定的条件下存在风险很小，就可以认为这一结构设计是合理的。结构的概率设计法的实质就是要使结构的失效概率小到人们所能接受的程度。

但是，如何选择一个结构最优的失效概率 P_f （或与其相对应的可靠指标 β ），以达到结构可靠与经济的最佳平衡，这是一个难题。目前，一般都是采用“校准法”，即通过对原有规范隐含的可靠指标进行反演，再经综合分析，优化确定一个所谓目标可靠指标 β 。对钢结构各种基本构件校准的结果， β 在3.0~3.3之间，符合《建筑结构设计统一标准》（GBJ—68—84）中对安全等级为二级的延性破坏的结构构件 $\beta = 3.2 \pm 0.25$ 的规定。因此新《规范》对结构构件采用 $\beta = 3.2$ 作为目标可靠指标，相应的失效概率为 6.87×10^{-4} 。

由于直接采用结构的失效概率或可靠指标进行设计非常麻烦，并且目前还有一些统计参数不够完善，同时考虑到广大设计人员的习惯和应用上的简便，因此《规范》按照规定的失效概率或目标可靠指标，采用优化的方法等效地转化为以基本变量标准值和分项系数形式表达的实用设计表达式，供设计应用。应该强调指出，分项系数并非定值的安全系数，而是概率法的等效计算系数，可靠度的唯一量度指标是可靠指标或失效概率，而不是这些系数的大小。这与长期以来按经验确定安全系数的“定值法”相比较，可算是结构设计方法上的突破和飞跃。

（1）承载力极限状态设计表达式

对于承载力极限状态，应使结构构件按各种荷载设计值（荷载标准值 $\times$ 分项系数）算得的结构内力总和 S 不超过按材料强度设计值（强度标准值 $\div$ 分项系数）算得的结构抗力 R 。设计时应考虑荷载效应的基本组合，必要时尚应考虑荷载效应的偶然组合。当按荷载效应基本组合进行设计时，设计表达式为：

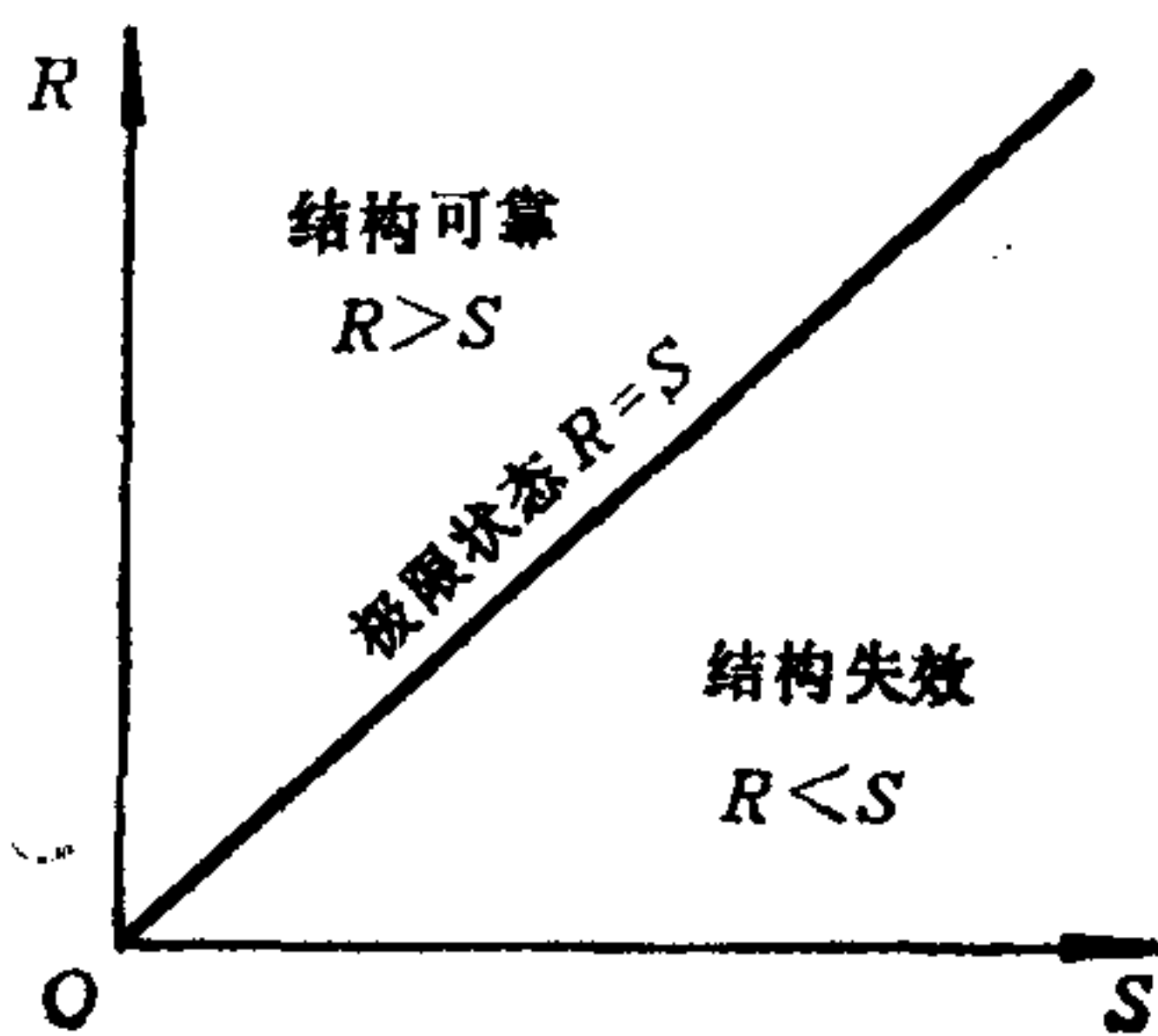


图 1-1 结构所处的状态

$$\gamma_0 \left(\gamma_G S_{GK} + \gamma_{Q1} S_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} \gamma_{Qi} S_{QiK} \right) \leq R_K / \gamma_R \quad (1-4)$$

式中 γ_0 ——结构重要性系数，对安全等级为一、二、三级的结构构件可分别取1.1、1.0、0.9；

γ_G ——永久荷载分项系数，一般情况下可取1.2；

γ_{Q1}, γ_{Qi} ——第一个和第 i 个可变荷载的分项系数，一般情况下可取1.4（第一个可变荷载指 $S_Q = \gamma_Q S_{Qk}$ 值最大者）；

S_{GK} ——永久荷载标准值引起的内力；

S_{Q1K}, S_{QiK} ——第一个和第 i 个可变荷载标准值引起的内力；

ψ_{ci} ——第 i 个可变荷载的组合值系数，当有风荷载参与组合时取0.6；当没有风荷载参与组合时取1.0；

R_K ——按截面几何参数和材料强度标准值计算的结构构件抗力；

γ_R ——抗力分项系数，对3号钢和16Mn钢取1.087；对15MnV钢取1.111。

对于一般排架、框架结构，可采用下列简化的设计表达式：

$$\gamma_0 \left(\gamma_G S_{GK} + \psi \sum_{i=1}^n \gamma_{QiK} \right) \leq R_K / \gamma_R \quad (1-5)$$

式中 ψ ——简化设计表达式中采用的荷载组合系数，当参与组合的可变荷载有两种或两种以上并有风荷载时，取0.85；其它情况取1.0。

钢结构设计中习惯于用应力计算，将式（1-4）左、右两侧各除以构件或连接的几何参数 a_K （如截面面积或截面抵抗矩等），由于 $\gamma_G S_{GK} / a_K = \sigma_{Gd}$ ，即永久荷载设计值在结构构件截面或连接中产生的应力； $\gamma_{Q1} S_{Q1K} / a_K = \sigma_{Q1d}$ 和 $\gamma_{QiK} S_{QiK} / a_K = \sigma_{Qi,d}$ ，即第一个和第 i 个可变荷载设计值在结构构件或连接中产生的应力； $R_K / a_K \gamma_R = f_K / \gamma_R = f$ 称为材料的强度设计值，则式（1-4）可改写为

$$\gamma_0 \left(\sigma_{Gd} + \sigma_{Q1d} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} \sigma_{Qi,d} \right) \leq f \quad (1-6)$$

同样，式（1-5）可改写为

$$\gamma_0 \left(\sigma_{Gd} + \psi \sum_{i=1}^n \sigma_{Qi,d} \right) \leq f \quad (1-7)$$

材料的强度设计值 f 等于强度标准值 f_K 除以抗力分项系数 γ_R 。为了便于设计，规范中直接给出钢材和各种连接中各种应力状态的 f 值（ f 是钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值，对其它强度设计值另加相应下标）。

钢材的强度设计值，应根据钢材厚度或直径（对3号钢按表1-1分组）按表1-2采用，连接的强度设计值按第三章的表3-1、表3-8采用。

（2）正常使用极限状态设计表达式

对于正常使用极限状态，应使结构构件在荷载标准值（不乘分项系数；对动力荷载也不乘动力系数）及其组合值作用下产生的变形不超过容许值。钢结构设计只考虑荷载的短期效应组合，设计表达式为

表 1-1 3号钢钢材分组尺寸

mm

组 别	圆钢、方钢和扁钢的直径或厚度	角钢、工字钢和槽钢的厚度	钢板的厚度
第 1 组	≤40	≤15	≤20
第 2 组	>40~100	>15~20	>20~40
第 3 组		>20	>40~50

注：工字钢和槽钢的厚度系指腹板的厚度。

表 1-2 钢材的强度设计值

N/mm²

钢 材			抗拉、抗压和抗弯	抗 剪	端面承压（刨平顶紧）
钢 号	组 别	厚度或直径，mm	f	f_v	f_{ce}
3 号钢	第 1 组	—	215	125	320
	第 2 组	—	200	115	320
	第 3 组	—	190	110	320
16Mn钢	—	≤16	315	185	445
16Mnq钢	—	17~25	300	175	425
	—	26~36	290	170	410
15MnV钢	—	≤16	350	205	450
15MnVq钢	—	17~25	335	195	435
	—	26~36	320	185	415

注：3号镇静钢钢材的抗拉、抗压、抗弯和抗剪强度设计值，可按表中的数值增加5%。

$$v = v_{GK} + v_{Q_{1K}} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} v_{Q_{iK}} \leq [v]$$

(1-8)

- 式中
- v —— 结构或构件中产生的变形值；

v_{GK} —— 永久荷载标准值在结构或构件中产生的变形值；

$v_{Q_{1K}}$ —— 第一个可变荷载标准值在结构或构件中产生的变形值（该值大于其它第 i 个可变荷载标准值产生的变形值）；

$v_{Q_{iK}}$ —— 第 i 个可变荷载标准值在结构或构件中产生的变形值；

$[v]$ —— 结构或构件的容许变形值，根据规范和使用要求确定。

第二章 钢结构的材料

第一节 建筑钢材的基本力学性能

钢材的力学性能主要用弹性、塑性、强度和韧性等性能指标来度量，这些指标主要靠试验来测定，它们是钢结构设计的重要依据。

一、钢材在单轴应力作用下的工作性能

结构的受力情况和使用条件是多种多样的，不可能对每种情况的力学性能指标都进行试验和测定。但是单向拉伸试验则是钢材最重要的试验，其结果也是最主要的钢材性能指标，可作为其它受力情况下力学指标的依据或基础。

钢材单向均匀受拉时的工作性能，是以静力拉伸试验的荷载-变形（或应力-应变）曲线来表示。图2-1为低碳钢的应力-应变曲线，从图中可以看出，钢材的工作性能可分为四个阶段：

（1）弹性阶段 OE 荷载增加，变形也增加，当荷载卸掉后，变形也恢复，没有残留变形，且弹性变形很小。 OA 段应力应变为直线关系，符合虎克定律。 A 点的应力称为比例极限 σ_p ，相应的荷载称为比例极限荷载； E 点的应力称为弹性极限 σ_e ，相应的荷载称为弹性极限荷载； OA 段具有完全弹性性质，弹性模量 $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ ， AE 段仍具有弹性性质，但为非线性。

（2）屈服阶段 ECF 荷载与变形不成正比，变形增加很快，甚至荷载不增加而变形仍继续发展，好像钢材屈服了，卸荷后变形也不能全部恢复，而留有残余变形——塑性变形；屈服时曲线上出现锯齿形上下波动，取波动部分的最低点（下限）的应力 σ_s 称为屈服点（或流限），用符号 f_y 表示。从 E 点开始到曲线再度上升的起点 F 为止，其变形范围较大，相应的应变幅度称为流幅。流限和流幅是钢材的两个重要力学性能指标。

（3）强化阶段 FB 钢材又恢复了抵抗外荷载的能力，但弹性没有完全恢复，塑性特征仍很明显，曲线略有上升而到达最高点 B ， B 点的应力 σ_b 称为抗拉强度（或极限强度），用符号 f_u 表示，相应的荷载称为极限荷载，它是试件所能承受的最大荷载。

（4）颈缩阶段 BD 在试件质量较差处的截面出现局部横向收缩，塑性变形迅速增大，这种现象称为颈缩现象。到达 D 点时试件断裂。颈缩区的伸长及横向收缩是反映钢材塑性性能的重要标志。

图2-1所示曲线是3号钢在常温下静力拉伸试验的结果，从图上可见各阶段的应力和应变大致为：比例极限 $\sigma_p \geq 200\text{N/mm}^2$ ， $\varepsilon_p \approx 0.1\%$ ；弹性极限 σ_e 与 σ_p 非常接近；屈服点 $f_y \geq 240\text{N/mm}^2$ ， $\varepsilon_s \approx 0.15\%$ ；流幅 $\varepsilon \approx 0.15\% \sim 2.5\%$ ；抗拉强度 $f_u = 380 \sim 470\text{N/mm}^2$ ；伸长率 $\delta_{10} \approx 21\%$ ；弹性模量 $E \approx 206 \times 10^3\text{N/mm}^2$ 。

从钢材单向均匀受拉试验研究，可以得出下面几点钢材的工作特性，作为钢结构设计基础：

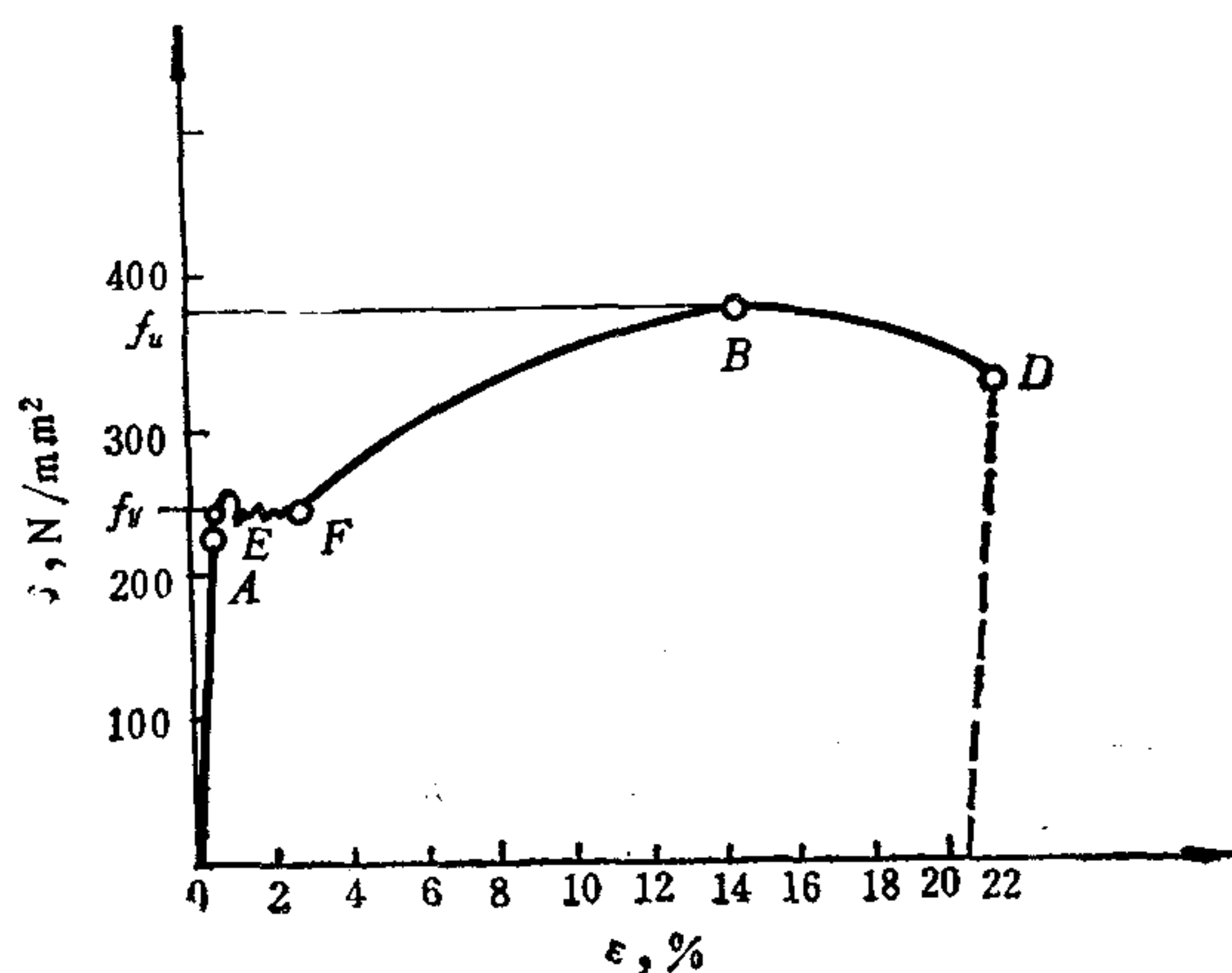


图 2-1 低碳钢单向均匀拉伸的应力-应变曲线

(1) 由于比例极限、弹性极限和屈服点很接近，且在屈服点前应变很小，而达到屈服点后，结构将产生较大的在使用上不容许的残余变形。因此，在钢结构设计中取屈服点 f_y 作为钢材可以达到的最大应力。

(2) 钢材在屈服点前接近理想弹性体，屈服点后的流幅现象接近理想塑性体，而且流幅范围已足够作为结构或构件的塑性变形发展。因此可认为钢材是一种理想的弹塑性材料（图2-2），这就为钢结构的计算理论提供了基础。

(3) 常用钢材的塑性变形很大，约为弹性变形的200倍，这说明结构在破坏前已出现很大的变形，相当大的变形使结构或构件早已丧失使用性能或已采取加固措施，因此钢结构有可能避免发生塑性破坏。

必须指出，上述建筑钢材的工作性能，如果采用别的钢种或受其他条件影响，它的工作性能将会完全不同。例如高碳钢，它的强度很高，但塑性和韧性很差，破坏前无显著塑性变形，属于脆性破坏，所以不宜用作建筑结构。又如，即使采用低碳钢，但在低温条件下工作，也会出现脆性断裂等，这是需要特别注意的。

二、钢材在复杂应力下的工作性能

在实际结构中，许多构件往往是在多轴（双向或三向）的复杂应力状态下工作，如图2-3所示，此时钢材的屈服条件不能以某一轴向应力达到其屈服点来判别，而是应按能量强度理论计算的折算应力与钢材在单轴应力下的屈服点相比较来判别，即

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2-1)$$

当 $\sigma_{\text{red}} < f_y$ 时，处于弹性状态；当 $\sigma_{\text{red}} \geq f_y$ 时，处于塑性状态。

当为平面应力状态时（例如有一向应力很小或为零），则式（2-1）成为

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (2-2)$$

在梁中，一般只有正应力 σ 和剪应力 τ ，则上式成为

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (2-3)$$

当受纯剪时， $\sigma = 0$ ，则

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{3\tau^2} = \sqrt{3}\tau = f_y$$

由此得

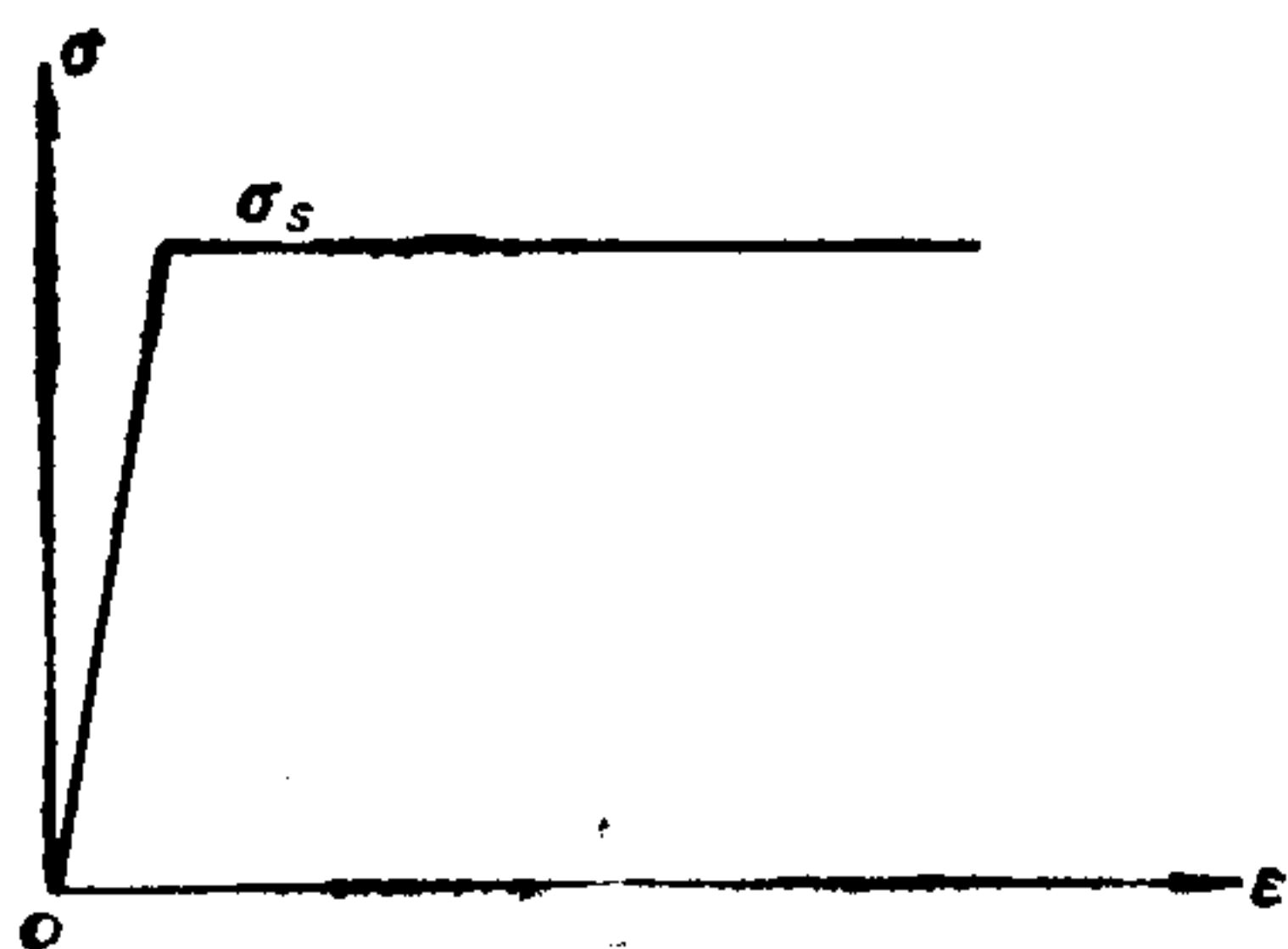


图 2-2 理想弹塑性材料的应力-应变曲线

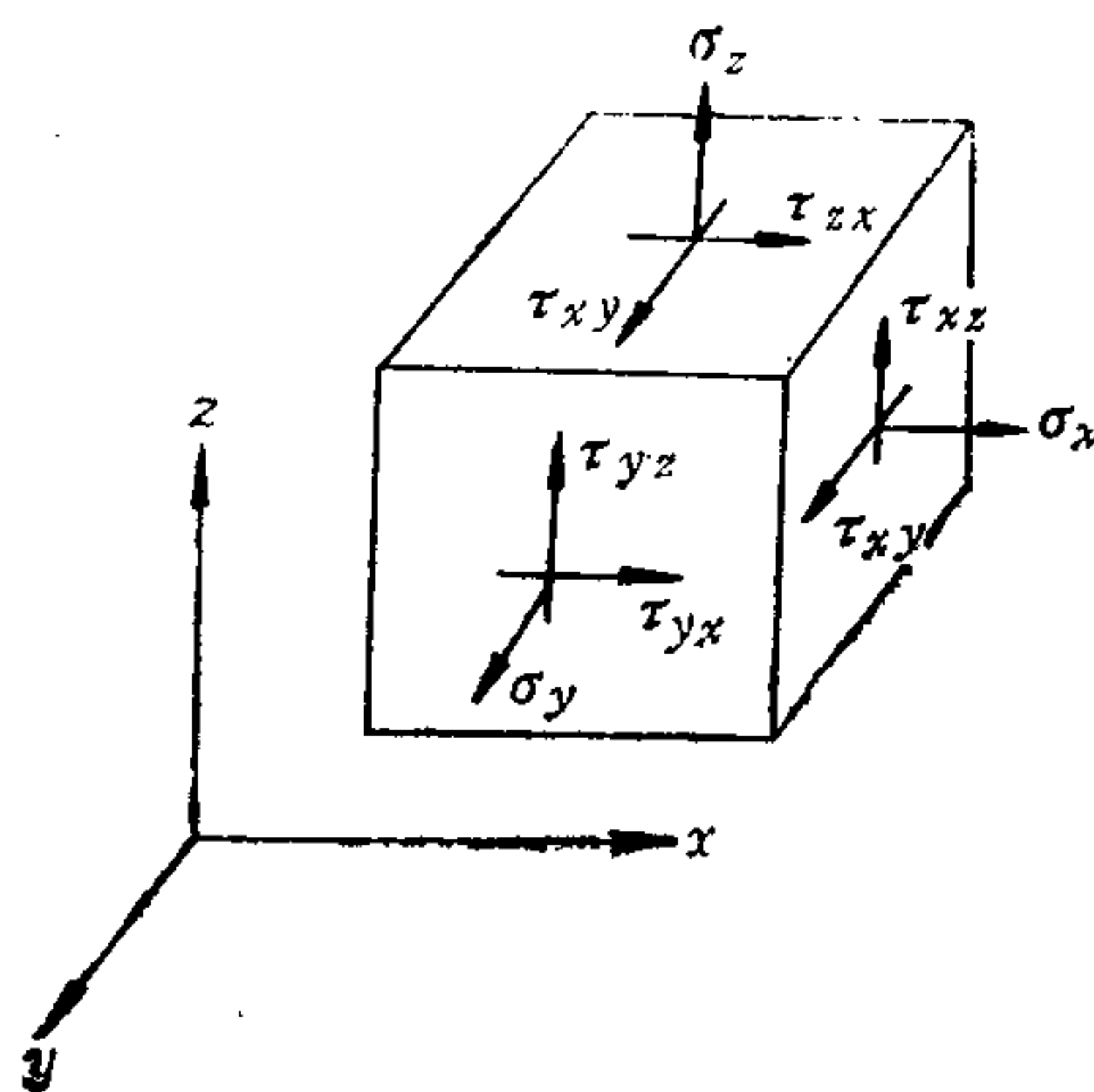


图 2-3 复杂应力状态

$$\tau = \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 0.58f_y \quad (2-4)$$

即剪应力达到屈服点的0.58倍时，钢材进入塑性状态，因此钢结构设计规范规定钢材的抗剪强度设计值 $f_v = 0.58f$ （见表1-2）。

当双向或三向应力皆为拉应力时，破坏时没有明显的塑性变形产生，材料处于脆性状态。但若有一向为异号应力，且同时应力相差又较大时，材料却较容易进入塑性状态，产生塑性破坏特征。

三、钢材的动力工作性能

在连续反复的动力荷载作用下，钢材的内部应力虽低于抗拉强度，甚至低于屈服点，但钢材也会发生破坏，这种现象称为钢材疲劳。钢材疲劳破坏的性质属于突然发生的脆性断裂。

钢材发生疲劳破坏的原因是钢材中恒存在着一些局部缺陷（如杂质、微裂纹、孔洞、槽口等），在反复荷载作用下，这些缺陷处的截面上的应力分布不均匀，产生应力集中现象。在应力集中处形成双向或三向同号应力场，在应力高峰处出现裂缝，并逐渐发展，随着裂缝的不断开展，截面相应削弱，应力集中现象更加严重，又促使裂缝开展，从而导致钢材的最终破坏。

荷载变化不大或不频繁的钢结构，一般不会发生疲劳破坏，计算时不必考虑疲劳的影响。长期承受连续反复荷载的结构及其连接，例如承受重级工作制吊车的吊车梁或承受振动设备的支架等，设计中就要考虑钢材的疲劳问题。

第二节 钢结构对钢材性能的要求

钢结构对材料性能的要求包括各个方面，要依据实际需要全面衡量，钢结构对钢材要求的指标主要有以下几个方面：

一、强度

钢材的强度有屈服点 f_y 和抗拉强度 f_u 。屈服点 f_y 是设计时钢材可以采用的最大应力， f_y 值高，可减小构件截面，减轻结构自重，节约钢材，降低造价。抗拉强度 f_u 是钢材破坏前所能承受的最大应力，此时钢材已产生了很大的塑性变形而失去使用性能，但它可作为钢材的强度储备， f_u 值高，可增加结构的安全保障。

二、塑性

塑性是指钢材应力超过屈服点后，能产生显著的残余变形而不立即断裂的性质。衡量塑性好坏的主要指标是伸长率。

伸长率 δ 等于试件（图2-4）拉断后原标距间的残余变形与原标距的比值，以百分数表示，它是必须保证的重要指标。 δ 值按下式计算：

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \tag{2-5}$$

式中 δ ——伸长率，当 $l_0/d_0 = 10$ 时，以 δ_{10} 表示；当 $l_0/d_0 = 5$ 时，以 δ_5 表示；
 l_0 ——试件原标距长度；
 l_1 ——试件拉断后标距间的长度；
 d_0 ——试件直径。

三、韧性

韧性是指钢材在塑性变形和断裂过程中吸收能量的能力，是强度和塑性的综合反映。韧性指标可通过冲击试验获得，它是判断钢材在冲击荷载作用下是否可能产生脆性破坏的重要指标。

在冲击试验中，一般采用截面为 $10 \times 10\text{mm}$ ，长度为 55mm ，中间开有小槽的长方形试件，将其放在摆锤式冲击试验机上击断（图2-5），从刻度盘上读出冲击功 A_K 值除以试件缺口处截面面积 A ，即为冲击韧性值 α_K ：

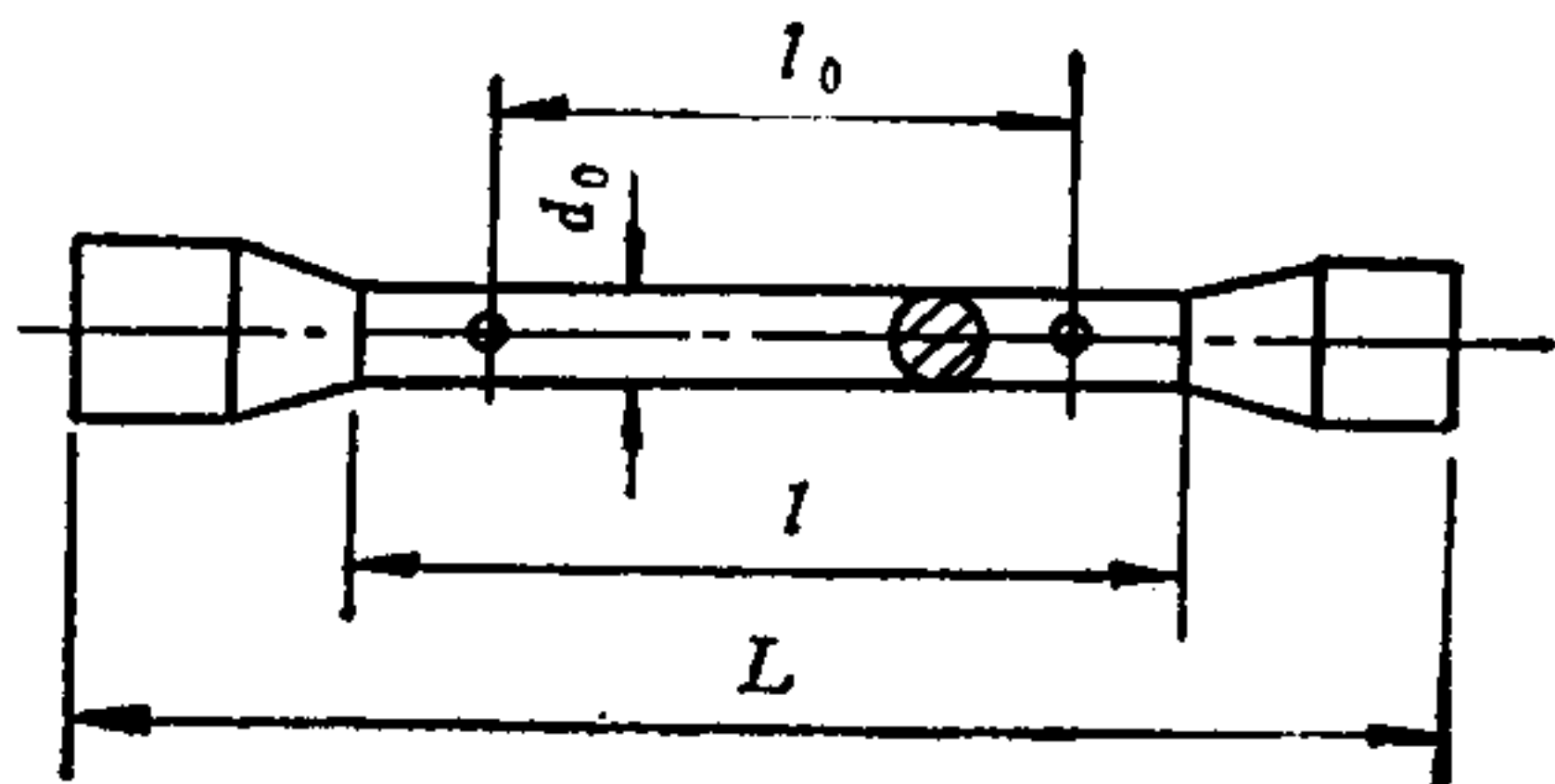


图 2-4 静力拉伸试验的试件

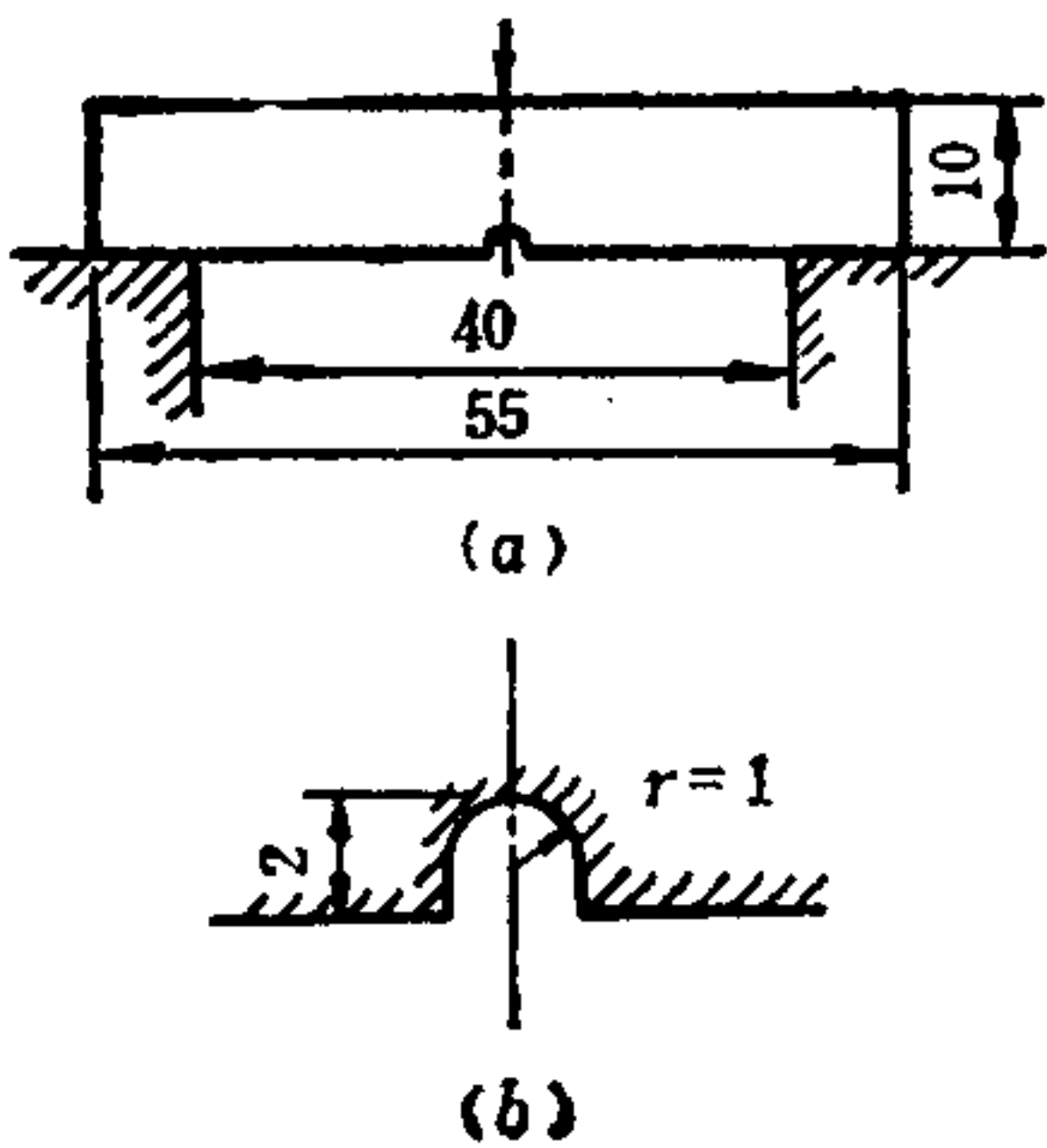


图 2-5 冲击韧性试验

$$\alpha_K = \frac{A_K}{A}, \text{ N}\cdot\text{m}/\text{cm}^2 \tag{2-6}$$

冲击韧性值与试件缺口形状有关，我国规定采用梅氏U形缺口试件。温度对钢材韧性有强烈影响，低温使钢材脆性破坏的可能性大大增加，所以在低温下的钢结构要提出严格的韧性指标要求。

四、冷弯性能

冷弯性能是指钢材在冷加工中产生塑性变形时，对产生裂缝的抵抗能力。它是钢材承受弯曲程度的指标，由冷弯试验确定。试验方法是在试验机上通过冷弯冲头加压，将试件弯成 180° （图2-6），然后检查试件表面，以不出现裂纹和分层为合格。这一指标也可用以鉴定钢材的内部缺陷、塑性性能和可焊性。