
应 力

集 中



〔日〕西田正孝 著

机械工业出版社

应 力 集 中

〔日〕西田正孝 著

李安定 郭廷玮 张诚文 译
陈文英 叶克明 吕振起

梁振和 校



机 械 工 业 出 版 社

本书是介绍应力集中现象及其与设计关系的专著。全书分为基础理论和应力集中表两大部分。在基础部分，系统全面地阐明了应力集中的起因，应力集中因素与基体的关系，应力集中系数和基准应力的选择，二维和三维应力集力，应力集中的扩散，多重应力集中，断裂系数，应力集中的各种求法以及安全系数的合理确定等重要内容。应力集中表计有160项，分别对各种不同的应力集中情况给出了实用的计算公式，图表和数据。

全书内容十分丰富，实用性强，是广大工程技术人员在强度设计方面必不可少的工具书，同时可供从事强度研究的科技人员和高等院校有关专业的教师、研究生及高年级学生参考。

应力集中

增补版

西田正孝 著

森北出版株式会社

1976年7月

应力集中

〔日〕西田正孝 著

安宅 郭廷玮等 译

机械工业出版社 (北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本787×1092 1/16·印张38 1/2·插页2·字数938千字

1986年12月北京第一版·1986年12月北京第一次印刷

印数 00,001-3,250·定价11.10元

统一书号: 15033·5775

序 言

结构的应力集中，最近几年已经成为人们议论颇多的话题。飞行器的机械部件等，本来就具有很高的强度，但往往发生破坏。因此，试图加大部件尺寸来提高强度。然而加大尺寸，重量和惯性力则随之增大，这是件左右为难的事。所以，人们在研究所谓设计的合理化问题，亦即，从强度上对各种不同的因素详细地加以探讨。应力集中，作为强度的一个重要因素，它产生于何处，如何产生以及怎样才能缓和应力集中之类的问题，都应加以研究并采取相应的措施。

以往的结构设计中，凡事都留有余量，由于这样处理问题并不难，因此就没有认真对待影响结构强度的多种因素。例如，若以减去螺纹牙高的牙底直径的截面积作为有效截面积，由有效截面积和材料的抗拉强度就可以简单地求出螺栓的抗拉强度；对于铆钉，若取铆钉的抗剪强度与连接铆钉孔的板的最小截面积的抗拉强度相等，则如同确定铆钉的直径和位置一样，在许多情况下，均将最小截面积或有效截面积作为对象，并且认为这样处理是可靠的。难怪无论对于应力分布状态，或者对于材料强度和载荷的变化，都是根据包括所有这些因素在内的安全系数这样一个含混的数字处理的。或许当时未曾想到，没有凹口而有凸缘存在，也是产生应力集中的重要原因。

而现在，对于难于处理的设计，无论如何再也不能按照这种观点来进行。这是因为，载荷由静载变为动载，特别是变为循环载荷，即便像软钢那样的韧性材料，也和脆性材料一样，大都会发生疲劳破坏，而应力集中对于这种疲劳破坏起着重要作用。众所周知，现在即便使用安全系数，在许多情况下，也不像以前那样把余量取得很大，而是较小，甚至于小得有些危险。

若将应力集中和疲劳破坏两者联系起来加以考虑，很清楚，不能由于安全系数取得足够大，也即有效截面积大，就掉以轻心。因为即便有效截面积大，应力集中点一旦产生微小裂纹，它也将随着循环载荷的作用而扩大。即使开始时是局部应力集中，最后也会导致完全破坏的结局。

由此可见，不能说因为是笨重的、经心设计的结构，所以强度就大。我们正面临着这样的时代：若不对每一个细节都进行周密的研究，并充分掌握应力状态或者强度状态，作为技术人员就不可能放心。

然而，作者决不认为，完全掌握应力状态是轻而易举的。众所周知，复杂形状的应力计算是何等困难和烦琐，况且载荷也许还有实际上无法预测的不规律性。

重要的是，要继续保持高度的热情去积极地改进设计并使之更加合理，而不是依靠不周密的陈旧数据，凭借简单的安全系数值。可以认为，改用应力集中系数（以前笼统地包括在安全系数中）并在设计中考虑这种系数，对于设计的合理化，具有极其重要的作用。

基于上述观点，本书的目的在于，根据各方面发表的弹性力学、弹性试验、应力测定等许多文献，搜集并整理其对设计有参考价值的部分，为设计人员提供方便。

作者长年从事光弹性学的研究工作，且通过光弹性的研究，对应力集中问题产生了浓厚的兴趣。因此，本书中不仅对国内外理论弹性学家得到的应力集中数据进行了比较，还介绍

IV

了作者本人通过光弹性实验得到的数据。特别是，为了得到编写本书所需的数据，作者还专门进行了许多有关的光弹性实验。

早在战前，作者就已经痛切感到这种书籍的必要性，而且一直在搜集有关资料，但由于忙于他事，每每被迫中断，以至未能完成此项工作。事隔十多年，终于即将问世。然而，书中难免有不妥之处，恳望读者继续努力，以使本书的内容更加完善。

作者 1967年7月



增 补 版 序

本书自1967年第一版问世以来，已时过七年。在此期间，国内外学术刊物上历年发表的有关应力集中的新文献，其数量相当可观。从强度设计的观点来看，这些文献是可以及早利用的宝贵资料。在这个意义上，我以为，利用一切机会来增补和充实本书第二篇的“应力集中系数表”，使之更加完善，是十分必要的。

“应力集中系数表”，前年出版第二版时增补了5项，这次又增补了10项，总计已达160项。例如，§153有关“承受内压的圆筒的准球形端”的资料，我确信是强度设计方面迄今未曾用过的有用资料。

本人为了进一步完善本书的内容，今后将继续努力不懈。

作者 1973年7月

译 序

应力集中现象,普遍发生在机械制造、航空、造船、建筑以及其他许多国防和民用部门,由于它与结构的强度设计密切相关,一直受到工程技术人员的关注。特别是近年来,随着我国各种制造业的迅速发展和广泛追求结构设计合理化,充分考虑应力集中的影响,并运用到设计中去,更为显得迫切需要。

《应力集中》是一本介绍应力集中及其与设计关系的专著。全书共分两大部分:第一篇计有14章,系统全面地阐明了有关应力集中的基础知识,包括应力集中的起因,应力集中因素与基体的关系,应力集中系数和基准应力的选择,二维和三维应力集中,应力集中的扩散,多重应力集中,断裂系数,集中应力的各种求法以及安全系数的合理确定等重要内容;第二篇是应力集中系数表,计有160项,分别对各种不同的应力集中情况给出了实用的计算公式、图表和数据。像如此完善的论述应力集中的专著,迄今国内尚未见到。我们根据最新的增补版译成中文,热诚地向读者推荐此书,以为四化尽微薄之力。

西田正孝教授,长期从事光弹性学研究,特别是为写成此书,对许多应力集中问题还专门进行了系统的光弹性实验研究。本书不但反映了作者本人的研究成果,同时也是作者数十年间苦心搜集世界上许多有关专家学者的研究成果的结晶。全书非但内容十分丰富,且文理通顺,基础性、系统性和实用性强,对于工程技术人员不失为一本强度设计方面的宝贵参考书,它亦完全可供有关研究人员和高等院校有关专业教师、研究生和高年级学生参考之用。

本书为几位同志合译:李安定译第一篇第一章~第十一章,第二篇§80~§128;郭廷玮译第一篇第十二章~第十四章,第二篇§129~§150;张诚文译第二篇§1~§22;陈文英译第二篇§23~§55;叶克明译第二篇§56~§79;吕振起译第二篇§151~§160。

本书承付梦邈高级工程师仔细审阅并提出许多宝贵的修改意见,此外黄炎副教授也审阅了本书的初稿,特此表示衷心的感谢。

由于水平所限,难免有疏漏不当之处,谨请读者批评指正。

译者 1983年6月30日于北京

目 录

第一篇 应力集中概论

第一章 应力集中及其与设计的关系	3
第二章 应力集中的起因	5
第三章 应力集中因素和基体的关系—— 浅凹口和深凹口	10
§1 应力集中对结构基体的影响	10
§2 浅凹口和深凹口	12
第四章 应力集中系数和基准应力	14
第五章 二维应力集中和三维应力 集中	17
§1 二维应力分布和三维应力分布	17
§2 板厚对应力集中的影响	18
§3 泊松比 ν 对三维应力集中的影响	20
§4 轴对称形与其截面形的关系	21
第六章 应力集中的扩散	25
§1 Saint-Venant应力扩散原理	25
§2 集中应力扩散的实例	26
§3 二维应力集中和三维应力集中在 扩散速度上的差别	26
§4 应力集中的扩散和相互干涉	28
第七章 多重应力集中	30
§1 概述	30
§2 一个应力集中因素的尺寸较小	31
§3 二维多重应力集中	32
§4 三维多重应力集中	33
§5 多重应力集中系数的近似算法	34
§6 多重应力集中时的断裂系数 (有效应力集中系数)	35
§7 等效椭圆	37
第八章 凹口角的影响	40
§1 考察	40
§2 作者对凹口角度系数的研究	41
§3 作者对圆角角度系数的研究	44
第九章 组合系数	47
§1 材料的弹性断裂和破坏	47
§2 组合系数 α'	48
第十章 断裂系数——金属结构强度	50
§1 应力集中系数 α 和金属结构 的破坏	50
§2 断裂系数 β	51
§3 静载荷时 α 和 β 的关系	52
§4 循环载荷和冲击的 α 和 β 的关系	55
1 概述	55
2 变动应力形式产生的影响	57
3 尺寸的影响	61
4 表面状态的影响	63
§5 疲劳的断裂条件——裂纹的产生、 发展和 β	65
§6 应力梯度	72
§7 由 α 求 α' 求 β 的近似公式	75
1 安全系数和 β	75
2 由 α 求 β 的近似公式	75
§8 求应力斜率的光弹性法	79
§9 力偶应力对断裂系数的影响	83
第十一章 微小曲率半径情况的 α 和 β	87
§1 微小曲率半径与 α 和 β	87
§2 微小曲率半径时角度系数的应用	91
第十二章 降低应力集中的方法	93
§1 概述	93
§2 降低应力集中的方法	94
1 关于应力集中因素形状的考虑	94
2 关于应力集中因素位置的考虑	105
3 关于应力集中因素方向的考虑	109
4 利用附加因素降低应力集中	111
5 削去法	116
6 填充法	119
§3 降低断裂系数的方法	119
1 概述	119
2 表面滚压法	120
3 圆孔滚压法、圆锥加压法、立体 挤压法及冲压切口法	123
4 预应力法	126
5 喷丸硬化法、锤击硬化法和 滚轧法	128
6 热态残余应力生成法	131
7 有害残余应力的消除	133
8 表面层硬化	135

第十三章 诺埃伯 (Nenber) 法 139

- § 1 概述 139
- § 2 深凹口、浅凹口 以及任意深度
的凹口 139
- § 3 带有环形凹口的圆棒 142
- § 4 空心圆棒带有环形凹槽的情况 146
- § 5 纵向凹槽引起的应力集中 148
- § 6 锐凹口的处理 149
- § 7 底部为圆弧形的V形凹口的处理 151
- § 8 应力-应变关系为非线性的情况 153
- § 9 列线图及其使用 155

第十四章 安全系数 164

- § 1 概述 164

- 1 以前的安全系数 164
- 2 新安全系数应怎样选定 165
- § 2 安全系数的计算方法 168
 - 1 韧性 (延性) 材料承受静载荷时 163
 - 2 脆性材料承受静载荷时 172
 - 3 韧性材料承受纯循环载荷时 173
 - 4 脆性材料承受纯循环载荷时 173
 - 5 韧性材料承受静载荷与循环
载荷的叠加载荷时 174
 - 6 脆性材料承受静载荷与循环
载荷的叠加载荷时 174
 - 7 有限循环次数的循环应力的情况 175

第二篇 应力集中系数表

- § 1 有一个圆孔的无限板承受均匀拉力
(压力) 的情况 179
- § 2 有一个圆孔的无限板在正交两
方向上承受拉力 (压力) 的情
况, 即有向心拉力 (压力) 作
用于圆孔的情况 182
- § 3 有一个圆孔的无限板承受剪切
应力的情况, 即在相互正交的
两方向上分别承受绝对值相等的
拉应力和压应力的情况 183
- § 4 双向应力比任意的无限板有一
个圆孔的情况 186
- § 5 承受拉力 (压力) 的半无限
板在直线边附近有一个圆孔
的情况 195
- § 6 有一个圆孔的半无限板, 在圆孔
边缘施加均匀压力的情况 197
- § 7 有一个圆孔的半无限板在直线边
施加均匀压力的情况 199
- § 8 有一个圆孔的无限板在平面上承受
弯矩的情况 200
- § 9 中心有一个圆孔的有限宽板承受
拉力 (压力) 的情况 204
- § 10 中心有一个圆孔的有限宽板在平
面上承受弯矩的情况 208
- § 11 有一个偏心圆孔的带板承受拉
力的情况 213
- § 12 有一个偏心圆孔的带板在平面上
承受弯矩的情况 216
- § 13 承受均匀内、外压力的圆筒
或圆板 219
- § 14 有偏心圆孔的板或圆筒承受内
压的情况 220
- § 15 有一个圆孔的半无限板, 由于圆
孔中嵌入销钉而在圆孔边方向承
受载荷的情况 222
- § 16 半无限板边缘排列的许多圆孔通过
销钉 (铆钉) 加载的情况 226
- § 17 有一个圆孔的无限薄板与板面垂直
弯曲的情况 230
- § 18 有一个圆孔的无限薄板由四周向圆
孔中心均匀弯曲的情况 235
- § 19 有一个圆孔的无限薄板承受扭矩
的情况 236
- § 20 有一个圆孔的无限板弯曲
(考虑板厚) 的情况 238
- § 21 中心有一个圆孔的带板弯曲 (考虑
板厚) 的情况 239
- § 22 有一个偏心圆孔的带板的弯曲 241
- § 23 直径方向有圆孔的圆棒承受拉力
(压力) 的情况 246
- § 24 半径方向有圆孔的圆棒承受弯矩
的情况 248
- § 25 直径方向有圆孔的圆棒的扭转 250
- § 26 有一个圆形填充物的无限板承受
拉力 (压力) 的情况 (I) 252
- § 27 有一个圆形填充物的无限板承受
弯矩的情况 (I) 255
- § 28 有圆形填充物的无限板承受剪力
的情况 (I) 258
- § 29 有一个圆形填充物的无限平板承受
拉力 (压力) 的情况 (I) 261

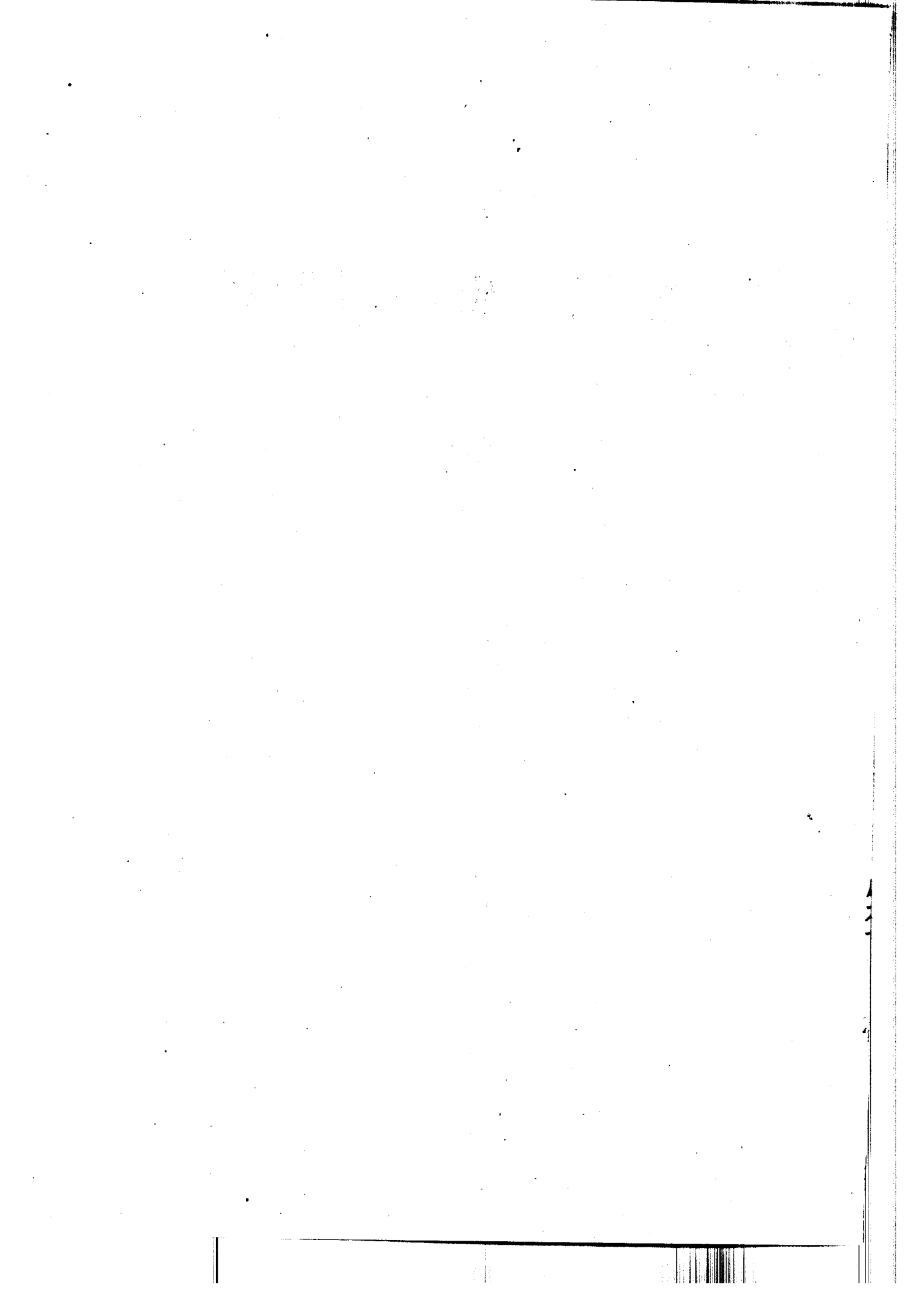
- § 30 有一个圆形填充物的无限板承受弯矩的情况 (I) 264
- § 31 有圆形填充物的无限板承受剪力的情况 (I) 266
- § 32 有一个椭圆孔的无限板承受拉力 (压力) 的情况 269
- § 33 有一个椭圆孔的无限板在任意方向上承受拉力 (压力) 的情况 272
- § 34 有椭圆孔的半无限板承受拉力 (压力) 的情况 275
- § 35 中央有一个椭圆孔的有限宽板承受拉力 (压力) 的情况 277
- § 36 中央有一个椭圆孔的有限宽板承受平面弯矩的情况 280
- § 37 有椭圆孔的无限板承受与板面垂直的弯矩的情况 281
- § 38 有椭圆孔的无限薄板承受扭矩的情况 283
- § 39 有椭圆孔的无限薄板承受垂直剪力的情况 285
- § 40 有椭圆孔的无限板的弯曲或扭转 (考虑板厚的情况) 286
- § 41 有用直线槽连结起来的两个圆孔的无限板承受拉力的情况 287
- § 42 横向有两端倒圆的槽孔的带板的拉伸 (压缩) 289
- § 43 横向有两端倒圆的槽孔的带板的平面弯曲 292
- § 44 纵向有两端倒圆的槽孔的带板的拉伸 (压缩) 295
- § 45 纵向有两端倒圆的槽孔的带板的平面弯曲 299
- § 46 有角部倒圆的正四边形孔的无限板在孔的对角线方向承受拉力 (压力) 的情况 302
- § 47 有角部倒圆的正四边形孔的无限板在孔边方向承受拉力 (压力) 的情况 304
- § 48 有角部倒圆的正四边形孔的无限板承受剪力的情况 306
- § 49 有角部倒圆的矩形孔的板的拉伸 (压缩) 307
- § 50 有角部倒圆的矩形孔的无限板的弯曲 310
- § 51 有角部倒圆的矩形孔的无限板的剪切 311
- § 52 有角部倒圆的正方形孔的带板的拉伸 (压缩) —— 孔边与拉伸方向平行的情况 312
- § 53 有角部倒圆的正方形孔的带板的拉伸 (压缩) —— 对角线与拉伸方向平行的情况 314
- § 54 有角部倒圆的正方形孔的带板的平面弯曲 —— 对角线与直线边平行的情况 315
- § 55 有角部倒圆的矩形孔的带板的拉伸 (压缩) 317
- § 56 有角部倒圆的矩形孔的带板的平面弯曲 322
- § 57 有角部倒圆的正八边形孔的无限板承受拉力 (压力) 的情况 326
- § 58 有角部倒圆的正八边形孔的无限板承受弯矩的情况 328
- § 59 有角部倒圆的正八边形孔的无限板承受剪力的情况 329
- § 60 有两个圆孔的无限板在垂直于中心线的方向承受拉力 (压力) 的情况 330
- § 61 有两个圆孔的带板在中心线方向承受拉力 (压力) 的情况 333
- § 62 有两个圆孔的无限板在对中心线倾斜的方向承受拉力 (压力) 的情况 335
- § 63 有两个圆孔的无限板承受剪力的情况 336
- § 64 有两个圆孔的无限板承受平面弯矩的情况 337
- § 65 有两个圆孔的无限板承受双向均布拉力的情况 339
- § 66 有两个圆孔的带板承受拉力 —— 两圆孔的中心线与拉伸方向垂直的情况 340
- § 67 有两个圆孔的带板承受拉力 —— 两圆孔的中心线与拉伸方向一致的情况 344
- § 68 在有一个圆孔的板上为降低应力集中而附加两个小圆孔的情况 345
- § 69 圆孔有加强环的无限板或带板 346
- § 70 有圆孔列的无限板在与圆孔列垂直的方向承受拉力 (压力) 的情况 352
- § 71 有圆孔列的无限板在圆孔排列方向承受拉力的情况 354

- § 72 有圆孔列的无限板承受双向拉力
(压力)的情况.....356
- § 73 有圆孔群的带板的拉伸
(压缩).....356
- § 74 多个圆孔成正方形排列的无限板
承受单向或双向力的情况.....359
- § 75 多个圆孔成斜正方形排列的无限
板承受单向或双向力的情况.....365
- § 76 多个圆孔成正三角形排列的无限板
承受单向或双向力的
情况 (I).....371
- § 77 多个圆孔成正三角形排列的
无限板承受单向或双向力
的情况 (I).....378
- § 78 有一个球状空洞的无限体承受
均布拉力 (压力)的情况.....387
- § 79 有一个球状空洞的无限体承受
弯矩的情况.....389
- § 80 有一个球状空洞的无限体承受
剪力的情况.....390
- § 81 有一个球状空洞的无限体承受
扭矩的情况.....392
- § 82 有一个球状空洞的半无限体承受
拉力 (压力)的情况.....393
- § 83 表面上有球状凹洞的半无限体承受
拉力 (压力)的情况.....395
- § 84 有一个旋转椭圆柱体形空洞的无限体
承受拉力 (压力)的情况.....398
- § 85 有一个旋转椭圆柱体形空洞的无限
体承受弯矩的情况.....401
- § 86 有一个旋转椭圆柱体形空洞的无限
体承受剪力的情况.....403
- § 87 有一个旋转椭圆柱体形空洞的无限
体承受扭矩的情况.....404
- § 88 在厚度中央有一个球形空洞的板
承受拉力 (压力)的情况.....406
- § 89 中心有一个球形空洞的板承受
弯矩的情况.....408
- § 90 两侧有双曲线形深凹口的板的
拉伸 (压缩).....410
- § 91 两侧有双曲线形深凹口的板的
平面弯曲.....411
- § 92 两侧有双曲线形深凹口的板的
平面剪切.....412
- § 93 两侧有凹口的带板的拉伸 (压缩).....414
- § 94 两侧有凹口的带板
承受弯矩的情况.....416
- § 95 一侧有双曲线形深凹口的板的
拉伸 (压缩).....423
- § 96 一侧有双曲线形深凹口的板的
平面弯曲.....424
- § 97 一侧有双曲线形深凹口的板
的剪切.....425
- § 98 一侧有凹口的带板承受拉力
(压力)的情况.....426
- § 99 一侧有V形凹口的带板承受弯矩
的情况.....427
- § 100 两侧有凹口的带板在与板面垂直
的方向上承受弯矩的情况.....430
- § 101 有半圆形凹口的半无限薄板承受
垂直于板面的弯矩的情况.....434
- § 102 有一个半圆形凹口的半无限板
承受拉力 (压力)的情况.....435
- § 103 有一个U形凹口的半无限板承受
拉力的情况.....437
- § 104 有长方形凹口的半无限板承受
拉力 (压力)的情况.....439
- § 105 有凹口群的半无限板的应力集
中松弛.....442
- § 106 有U形多重凹口的板的弯曲.....442
- § 107 两侧对称地排列有两个半圆形凹
口的带板的拉伸 (压缩).....446
- § 108 有多重凹口的半无限板的拉伸
(压缩).....448
- § 109 有双曲线形环状深凹口的转轴承受
拉力 (压力)的情况.....450
- § 110 有双曲线形环状深凹口的转轴
承受弯矩的情况.....451
- § 111 有双曲线形环状深凹口的转轴
承受扭矩的情况.....453
- § 112 有双曲线形环状深凹口的转轴
承受剪力的情况.....454
- § 113 有半圆形环状凹口的圆棒承受
拉力 (压力)的情况.....456
- § 114 有U形环状凹口的圆棒承受拉力
(压力)的情况.....458
- § 115 有环状凹口的圆棒承受弯矩的
情况.....460
- § 116 有一个环状凹口的圆棒承受扭矩
的情况.....462
- § 117 有半圆形或U形环状凹口的圆棒
承受剪力的情况.....465
- § 118. 有多个半圆形环状凹口的圆棒的

扭转.....	466	轴向垂直的拉力(压力)的 情况.....	543
§ 119 两侧有圆角的带板的拉伸.....	468	§ 143 有旋转椭球体形凹窝或空洞的 半无限体的拉伸(压缩).....	544
§ 120 两侧有圆角的带板的平面 弯曲.....	471	§ 144 圣诞树型接合.....	546
§ 121 有椭圆形圆角的带板的拉伸和 平面弯曲.....	473	§ 145 承受内压的椭圆形截面管.....	548
§ 122 有圆角的圆棒的拉伸(压缩).....	475	§ 146 两侧有半圆形凹槽的曲梁承受 均匀弯矩的情况.....	551
§ 123 有圆角的圆棒承受弯矩的情况.....	476	§ 147 带有由三个圆弧组成的对称孔 的无限板或带板承受拉力(压力) 的情况.....	554
§ 124 有圆角的圆棒承受扭矩的情况.....	478	§ 148 有交叉圆孔的物体承受拉力 (压力)的情况.....	556
§ 125 有凸肩的带板和有凸缘的圆棒的 应力集中.....	480	§ 149 外边为正方形, 内边为圆形的 板或筒承受内压的情况.....	558
§ 126 两侧有凸肩的带板的平面弯曲.....	482	§ 150 承受内压的厚壁同心或偏心圆筒 筒底的曲率部分的应力集中.....	560
§ 127 各种截面形状的平直棒承受扭矩 的情况.....	484	§ 151 有分支的圆筒承受内压的情况.....	563
§ 128 有键槽的轴承受扭矩的情况.....	488	§ 152 斜接圆筒承受内压的情况.....	573
§ 129 螺纹.....	493	§ 153 承受内压的准球形圆筒底部的 应力集中.....	575
§ 130 燕尾型接合.....	502	§ 154 轮齿(补充).....	580
§ 131 承受拉力的T型接合.....	504	§ 155 承受集中载荷的矩形悬臂板的 弯曲力矩.....	589
§ 132 Y型(燕尾型)接合.....	509	§ 156 中央有一个圆孔的弯曲梁承受 弯矩的情况.....	594
§ 133 承受集中载荷的突出部.....	511	§ 157 有一个椭圆孔的无限板在任意方 向承受拉力(压力)的情况 (补充).....	597
§ 134 轮齿.....	515	§ 158 有斜圆孔的板的拉伸(压缩).....	598
§ 135 十字头.....	518	§ 159 有平面切下部分的圆轴承受弯矩 的情况.....	599
§ 136 有一列椭圆孔的无限板的拉伸 (压缩).....	523	§ 160 有平面切下部分的圆轴承受扭矩 的情况.....	601
§ 137 有角部倒圆的菱形孔的无限板的 拉伸(压缩).....	525		
§ 138 有球形空洞或一系列球形空洞的无 限体或圆柱的拉伸(压缩), 有 旋转椭球体形空洞的无限体的 拉伸.....	526		
§ 139 有加强筋的L型构架承受弯矩 的情况.....	529		
§ 140 有加强筋的T型构架.....	537		
§ 141 花键轴的扭转.....	541		
§ 142 有两个球形空洞的无限体承受与			

第一篇 应力集中概论





第一章 应力集中及其与设计的关系

不言而喻，人们都希望结构设计合理，从而得到重量轻，而强度可靠的理想结构。若将作为结构直接目的的机构及其制造方法有关的问题除外，结构强度则取决于载荷状态以及结构的形状、尺寸和材料的强度。因此，如载荷和材料的种类已经给定或限定，最后，则只有形状和尺寸作为工程设计人员面临的重要问题而遗留下来。

一般地说，真正理想地确定结构的形状和尺寸，当然是极其困难的。我们必须推测一切可能的载荷条件，了解材料的疲劳、冲击和静载寿命，有时还不能作为弹性体处理而要作为弹-塑性体求出应力分布状态。

不过，从以往的设计惯例来看，倒是相当简便的。即把载荷条件、材料的寿命和应力分布，特别是应力集中等全部包括在所谓安全系数这个缺乏依据的数字中，结果，结构尺寸往往过大，反过来，由于疲劳和冲击等有时还会引起断裂。

作者在这里并不是说，安全系数在所有情况下都不可靠，倒是历来认为，尽一切可能弄清安全系数中所包括的许多不明因素，进而使安全系数值接近于1，至少使结构趋近于理想设计，这对于工程设计人员来说，是非常必要的。

近年来，很多人对材料的疲劳断裂所作的不懈的研究，对金属材料的重复载荷强度问题方面提供了极其丰富而有益的资料，同时对应力分布状态也进行了大量的弹性力学计算和光弹性试验，以及利用应变计，特别是电阻丝应变计的测试研究并公布了研究结果。因此，必须强调，工程设计人员在设计过程中，充分考虑和有效利用这些现成的丰富资料，对于改进设计是十分重要的。

特别是，圆孔、凹口、圆角等是遍及整个结构的应力集中因素，这些因素和材料的疲劳现象结合起来，造成断裂、破坏的机会很多，因此我们认为，考虑它们的影响并运用到设计中去，对于改进设计是极其有效的。这就是说，把当前有关应力集中的因素从许多因素综合起来的现用安全系数中分离出去，可能的话，再明确应力集中点附近的应力梯度以及将与之对应的材料的弹-塑性或者疲劳断裂的发生和进行连系起来的综合应力集中强度，就会使结构设计得到显著的改善。

本来，应力分布状态和取决于金属材料学条件的持久性，应当有机地联系起来，但实际上，在这一点难以做到的情况下，现实的方法是，首先弄清弹性应力集中状态，即最大集中应力及其梯度，掌握材料与之相应的强度特性，这种作法大体上是可靠的。如果这样做也有困难，则估算应力集中敏感度，研究结构尺寸和容许载荷等法也简便易行。

总之，我们认为，除了结构的整个应力分布状态之外，充分掌握由于各种应力集中因素局部引起的最大应力，并对此采取相应的措施，就可以使设计得到预想不到的改善。为此，我们必须作出不懈的努力，以最大限度地利用许多人已经取得的数据。有时，需要设计人员本身满腔热情地通过弹性计算，模型试验或实物测量等来研究应力集中系数，解决存在的各种问题。

如果已经弄清包括应力集中系数、应力梯度和应力集中敏感度等在内的强度方面的全部因素，此时得到的安全系数则才算表示对于结构断裂的安全程度。从而，代之通常含义的安

全系数，确定了含义确切的安全系数，即“实际安全度”。

当然，要掌握结构的“实际安全度”，进而改善设计并使之合理化，不仅是应力集中问题，除此之外还有一些应当解决的重要问题。为此今后应朝着什么方向努力？关于这个问题，我们可以归纳成下列四个方面：

1. 应力分布状态，特别是应力集中

(a) 在结构制造之前，通过进行弹性计算，应用应力集中数据，进行光弹性试验等，设计本身就可得到改善。为此目的，近几年大都倾向于利用光弹性法。

(b) 在结构或试制品制成之后，利用电阻线应变计等进行应力实测来检验结构强度。

2. 材料的可靠性

(a) 利用各种无损检验方法，检验所用材料的形状缺陷和估算缺陷对强度的影响，检测铸件的气孔，板的裂纹和熔渣等，评价其对强度的影响。

(b) 实际测量使用材料中的残余应力并估算它对强度的影响。可以认为，残余应力对于强度的影响之大，实际上完全出乎人们的预想。除热处理、塑性加工等引起的残余应力之外，还必须特别注意焊接部位的残余应力。

3. 载荷状态

如果利用电阻丝应变计对载荷的实际状况，特别是载荷随着时间变化的情况进行实测，那么就能防止随着位置和时间而变化的载荷峰值，对安全度提供有力的数据。

4. 材料的持久性

对于包括疲劳寿命，弹-塑性应力分布在内的持久性，充分利用现有的理论和数据，将它与应力集中系数联系起来。并且，在可能的范围内导入塑性设计理论。

以上只列举了一些要点，在脚注的文献[⊖]中介绍了我自己的观点，请参阅。

⊖ 西田正孝：構造物の強度と安全係数，日本機械学会論文集，25巻，159号（昭34-11）1045～1047。

第二章 应力集中的起因

一般认为,要对应力集中因素的存在引起应力集中现象的原因作出简单明确的回答,是相当困难的。但是根据许多应力集中现象的共同条件,我们认为,把“结构形状的弯曲或不连续等,形状失去均匀性”作为应力集中的起因也未尝不可。

对于无限大的平板或立体来说,只要不存在载荷状态集中和形状缓变或急变等部位,就不会产生明显的应力集中和应力峰值。然而,一旦出现破坏这种均匀性的凹口、空洞或材质不均等情况,就再也无法保持应力状态的均匀性,引起应力干扰。这一点,对于等厚和等宽的平板或等直径和等截面的棒也是同样的,由于带有凹口、孔、圆角、空洞等等,在它们的附近就出现上述应力干扰,产生应力峰值。可见,由于各种应力集中因素的存在引起应力状态的搅乱,从而使应力失去均匀性的根本原因,在于物体自由边界上的各应力分量必须满足一定的条件,即所谓的边界条件。

现在,若取垂直于物体和空间的分界面 S 的方向为 z 轴,根据自由表面 S 上应力的平衡条件,则 z 方向上的应力分量 σ_z 、 τ_{yz} 以及 τ_{xz} 应等于零,这一点在弹性力学中是众所周知的(图2-1)。又如图2-2所示,当 xy 平面上的应力状态是二维应力状态时,在边界 x 轴上仅存在有 σ_x ,而与 σ_x 垂直的应力分量 σ_y 和 σ_{xy} 必须为零。

因此,我们若考虑这样一种情况,即:如图2-3所示,受均布拉力拉伸的等宽度板,中部形成一凹口。根据上述边界条件,部分主应力线要保原来的位置(虚线)是不可能的,而且在凹口空间的周围没有回旋的余地,结果主应力线局部密集,也即引起应力集中。由此可看出,此时的最大应力出现在凹口圆角的曲率部分,要比凹口底部的中心还大,其值取决于曲率半径。

作为这个问题的另一种说明,若考虑水的流动现象,对于产生应力集中现象的原理就会理解更深。就是说,若将图2-3的主应力线置换成流体的流线,则可以看出,在什么样的条件下会出现应力集中或者应力状态的搅乱。这里,严格地说,流体力学的流线和弹性力学的主应力线并不相似,但定性地看,两者具有相似的趋向,特别在干扰较为平缓时,往往两者可以对比。

不过,从理论上我们知道,平直棒,即长度方向上形状相同的棒,以及长度方向直径不同的棒(前者的横截面 $\ominus$ 如图2-4,后者的纵截面 $\ominus$ 如图2-5)扭转时,分别具有与流体力学完全相似的性质,水流不仅给出应力集

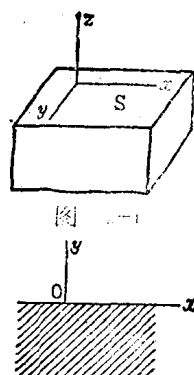


图 2-1



图 2-2

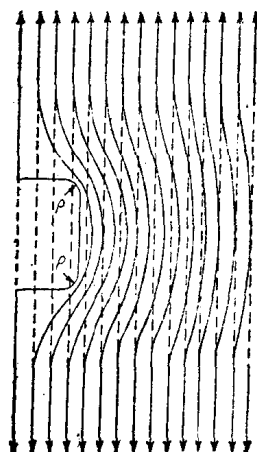


图 2-3

$\ominus$ 西田正孝: 应力测定法, 常盤書房, 昭和18年, 180~182.

J.P.Den Hartog, On the Hydrodynamic Analogy of Torsion, J. App. Mech. TASME, vol. 57(1935) p. A-46.

$\ominus$ A.Föppl, Vorlesungen über technische Mechanik, I.d.V, S.183.

A.Wyzomirski, Stromlinien und Spannungslinien, Ein Versuch, Probleme der Elastizitätslehre mit Hilfe hydraulischer Analogien experimentell zu lösen, Dissertation Dresden, Borna-Leipzig 1914.