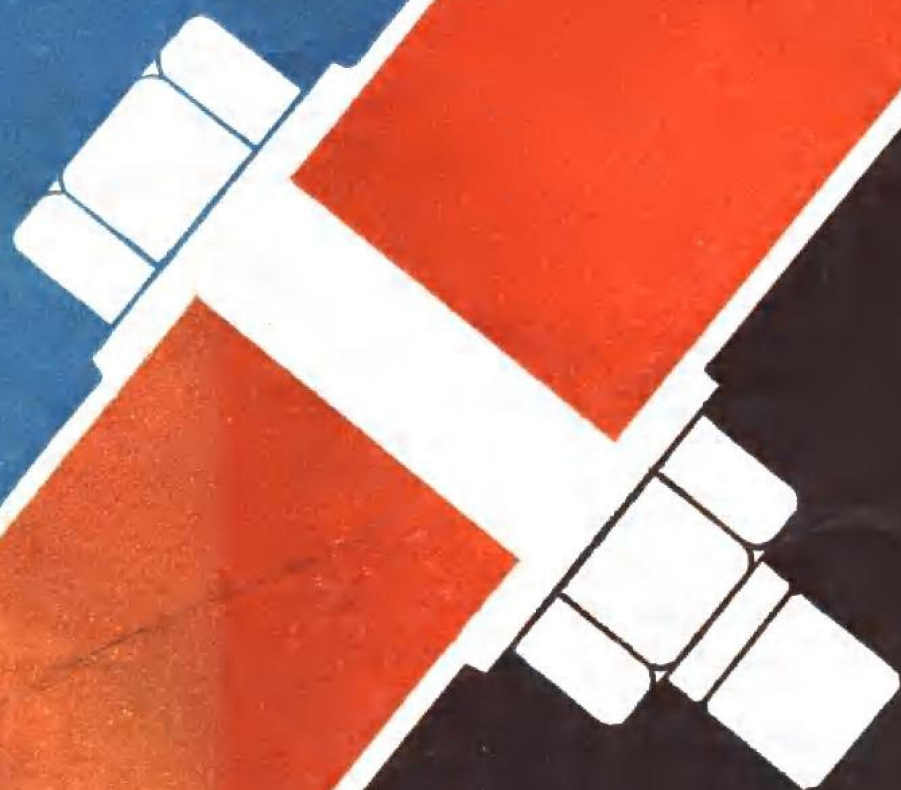


# 高强度螺栓接合

王元春 陈鸿德 史永吉 沈家骅 译



AOQIANGDU LUOSHUAN JIEHE

中国铁道出版社

### 内 容 简 介

本书是一部系统论述高强度螺栓的读物,对高强度螺栓的标准、制造方法、施工方法、摩擦面处理以及试验和检查方法等都作了比较详细的论述。对近年来所出现的高强度螺栓的延迟断裂以及疲劳等问题都作了论证。对高强度螺栓受拉连接和承压连接也作了系统的研究介绍。

读者对象:钢结构设计、科研、制造和施工方面的工程技术人员。

### 高强度螺栓接合

日本钢构造协会接合小委员会编

王玉春 陈鸿德 史永吉 沈家骅 译

中国铁道出版社出版

责任编辑 王能远 封面设计 赵敬宇

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092 $\frac{1}{4}$  印张: 20.75 字数: 488千

1984年9月第1版 1984年9月第1次印刷

印数: 0001—5,000册 定价: 2.60元

## 译者说明

在我国自1962年正式使用高强度螺栓以来，至今已有很大发展，目前铁路、公路、建筑、化工、冶金各部门都相继使用，已基本上取代了铆钉。以铁路桥梁为例，工厂用焊接、工地用高强度螺栓连接的栓焊钢桥，截至1981年已制造8万多吨，用高强度螺栓约400万套。高强度螺栓也已制订了国标，并有专门工厂生产。但在使用过程中也出现了不少问题，如高强度螺栓制造的合格率较低，因而成本较高，扭矩系数离散性较大，接触面的摩擦系数常常不能达到设计要求，往往因此而延误工期等，都急待研究解决。

日本钢结构协会连接分会于1972年成立了高强度螺栓连接资料集成班，专门搜集各国有关高强度螺栓连接的研究成果，共收集到日本论文440篇，其他国家论文580篇，经过分类编写成《钢构造接合资料集成》一书（技报堂出版株式会社1977年版）。此书对上述问题都有较系统的论述，除对摩擦型高强度螺栓作了较详细的介绍外，对很有发展前途的承压和受拉高强度螺栓连接也作了介绍。此外，此书较田岛二郎所著《高强度螺栓摩擦连接概论》也有较大发展，因为田岛的书仅限于1960年至1966年使用高强度螺栓初期的资料，而以后在使用方法、适用范围方面都有了扩大，在制造、设计和施工各方面也都有了显著发展。

原书分第Ⅰ篇铆钉、第Ⅱ篇高强度螺栓。第Ⅱ篇共有13章和7个附录，我们摘译了第Ⅱ篇中的大部分成为本书出版，供从事钢结构设计、科研、制造和施工的同志们参考。

本书第1、2、3章和第4章第3、4节以及附录由王玉春同志译，第4章第1、2节以及第5、6、9章由陈鸿德同志译，第7、8章由史永吉、沈家骅两同志译。全书经王玉春同志汇编、校阅。

由于我们水平有限，错误和不妥之处，欢迎读者给予批评指正。

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第1章 序 言                | 1  |
| 1.1 概 论                | 1  |
| 1.1.1 摩擦连接             | 1  |
| 1.1.2 承压连接             | 1  |
| 1.1.3 受拉连接             | 2  |
| 1.1.4 设计、施工上的问题        | 2  |
| 1.2 发展过程               | 4  |
| 第2章 螺栓、螺母和垫圈           | 7  |
| 2.1 材料、材质              | 7  |
| 2.1.1 日 本              | 7  |
| 2.1.2 美国、英国            | 8  |
| 2.2 制 造                | 10 |
| 2.2.1 螺 栓              | 10 |
| 2.2.2 螺 母              | 12 |
| 2.2.3 垫 圈              | 13 |
| 2.2.4 润滑处理             | 13 |
| 2.3 形状尺寸               | 14 |
| 2.3.1 螺 栓              | 16 |
| 2.3.2 螺 母              | 17 |
| 2.3.3 垫 圈              | 20 |
| 2.3.4 螺 纹              | 21 |
| 2.3.5 美国结构用高强度螺栓的形状和尺寸 | 25 |
| 2.4 机械性能               | 27 |
| 2.4.1 有关螺栓、螺母、垫圈强度的标准  | 27 |
| 2.4.2 成套螺栓的机械性能        | 30 |
| 2.5 延迟断裂               | 50 |
| 2.5.1 概 述              | 50 |
| 2.5.2 影响延迟断裂的因素        | 52 |
| 2.5.3 试验方法             | 55 |
| 第3章 螺栓的拧紧              | 59 |
| 3.1 施加螺栓预拉力            | 59 |
| 3.1.1 螺栓设计拉力           | 59 |
| 3.1.2 预拉力的变化           | 60 |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 3.2 被拧紧处的性能         | 65  |
| 3.2.1 板的弹簧系数        | 65  |
| 3.2.2 杆件内压力的分布      | 70  |
| 3.3 控制扭矩法           | 74  |
| 3.3.1 拧紧扭矩和螺栓轴力     | 74  |
| 3.3.2 扭矩系数值         | 76  |
| 3.3.3 施工的要领         | 82  |
| 3.4 转角法             | 84  |
| 3.4.1 螺母转角和螺栓轴力     | 84  |
| 3.4.2 施工要领          | 89  |
| 3.5 其他的拧紧方法         | 93  |
| 3.6 拧紧机具            | 94  |
| 第4章 承受静载的摩擦连接       | 95  |
| 4.1 基本特性            | 95  |
| 4.1.1 承载的原理         | 95  |
| 4.1.2 摩擦连接的特征和问题    | 95  |
| 4.2 滑动承载力           | 96  |
| 4.2.1 接头母材接触面的状态    | 96  |
| 4.2.2 接头母材的强度       | 106 |
| 4.2.3 螺栓轴力的变动       | 107 |
| 4.2.4 接头的形式和形状      | 109 |
| 4.2.5 温 度           | 116 |
| 4.3 滑动后的特性          | 117 |
| 4.3.1 接头的应力分布       | 118 |
| 4.3.2 连接板的屈服及破坏     | 118 |
| 4.3.3 安全系数          | 119 |
| 4.4 设计和施工           | 120 |
| 4.4.1 容许应力          | 120 |
| 4.4.2 设计连接要考虑的主要问题  | 122 |
| 4.4.3 拧螺栓以外的其他作业    | 125 |
| 第5章 承受静荷载的承压连接      | 127 |
| 5.1 基本特性            | 127 |
| 5.1.1 承载力原理         | 127 |
| 5.1.2 问题和措施         | 129 |
| 5.2 钢板的承压强度         | 129 |
| 5.2.1 断裂形状和最大承载力    | 130 |
| 5.2.2 塑性变形性能        | 133 |
| 5.3 螺栓的剪切强度         | 142 |
| 5.3.1 影响螺栓剪切强度的主要因素 | 144 |
| 5.3.2 同时受拉力和剪力的螺栓强度 | 148 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 5.3.3 设计指南 .....                | 149 |
| 5.4 高强度螺栓承压连接 .....             | 151 |
| 5.4.1 理论分析 .....                | 152 |
| 5.4.2 有关连接处动态的因素 .....          | 158 |
| 5.4.3 设计指南 .....                | 167 |
| 5.5 打入式高强度螺栓连接 .....            | 169 |
| 第6章 承受静荷载的受拉连接 .....            | 170 |
| 6.1 基本事项 .....                  | 170 |
| 6.2 用对开T形钢连接 .....              | 174 |
| 6.3 端板连接、钢管法兰连接和其他连接 .....      | 174 |
| 6.3.1 端板连接 .....                | 174 |
| 6.3.2 钢管法兰盘接头 .....             | 195 |
| 6.3.3 长夹紧形式的连接 .....            | 200 |
| 6.4 受拉与受剪的连接 .....              | 201 |
| 6.5 设计与施工 .....                 | 205 |
| 6.5.1 设计要点 .....                | 205 |
| 6.5.2 施工要点 .....                | 207 |
| 第7章 承受循环荷载的接头 .....             | 208 |
| 7.1 疲劳概论 .....                  | 208 |
| 7.1.1 基本性能 .....                | 208 |
| 7.1.2 由疲劳而引起钢结构的破坏事故 .....      | 212 |
| 7.2 承剪型接头的状态 .....              | 215 |
| 7.2.1 高强度螺栓接头和铆接接头疲劳强度的比较 ..... | 216 |
| 7.2.2 影响疲劳强度的各种因素 .....         | 224 |
| 7.2.3 高强度螺栓接头的疲劳强度 .....        | 243 |
| 7.2.4 在循环荷载作用下接触面的状况 .....      | 245 |
| 7.3 受拉接头的特性 .....               | 250 |
| 7.4 高强度螺栓接头的疲劳设计 .....          | 255 |
| 第8章 并用连接 .....                  | 256 |
| 8.1 概 论 .....                   | 256 |
| 8.1.1 并用连接 .....                | 256 |
| 8.1.2 混用连接 .....                | 258 |
| 8.2 高强度螺栓与焊接的并用连接 .....         | 259 |
| 8.2.1 高强度螺栓与角焊 .....            | 259 |
| 8.3 高强度螺栓与铆钉的并用连接 .....         | 265 |
| 8.4 并用连接的疲劳 .....               | 269 |
| 8.4.1 高强度螺栓与焊接并用连接的疲劳 .....     | 269 |
| 8.4.2 高强度螺栓与铆钉并用连接的疲劳 .....     | 269 |
| 8.5 并用连接的设计及施工 .....            | 270 |
| 8.6 混用连接 .....                  | 272 |

|                                              |     |
|----------------------------------------------|-----|
| 8.6.1 收缩变形、残余应力、约束裂纹、高强度螺栓的滑动 .....          | 272 |
| 8.6.2 焊接热量给予高强度螺栓的影响 .....                   | 274 |
| 8.6.3 混用连接的设计及施工 .....                       | 274 |
| 第9章 试验和检查 .....                              | 275 |
| 9.1 成套螺栓 .....                               | 275 |
| 9.1.1 机械性能 .....                             | 275 |
| 9.1.2 形状、尺寸、螺纹精度及外观 .....                    | 277 |
| 9.1.3 成套螺栓的扭矩系数 .....                        | 277 |
| 9.1.4 其他试验 .....                             | 279 |
| 9.1.5 批量的组成 .....                            | 282 |
| 9.1.6 $\bar{x}-R$ 管理图 .....                  | 283 |
| 9.2 连接部分 .....                               | 285 |
| 9.2.1 接触面的密贴 .....                           | 285 |
| 9.2.2 滑动系数 .....                             | 285 |
| 9.3 预拉力 .....                                | 288 |
| 9.3.1 扭矩控制法 .....                            | 288 |
| 9.3.2 螺母转角法 .....                            | 290 |
| 附 录 .....                                    | 291 |
| 附录1 关于结构用ASTMA325及A490螺栓的标准(1976年2月4日) ..... | 291 |
| 附录2 德国钢结构委员会标准010适用于钢结构的高强度螺栓(1974年1月) ..... | 304 |
| 附录3 日本公路桥规范及解释(1973年)(摘录) .....              | 314 |
| 附录4 日本铁路桥设计规范(1974年)(摘录) .....               | 318 |
| 附录5 日本国有铁道标准(JRS0500-1E-13AR5F)(1975年) ..... | 322 |

# 第1章 序 言

## 1.1 概 论

高强度螺栓连接是目前土木建筑钢结构应用最广泛的一种连接方法，它的特点是对高强度螺栓给以强大的预拉力，使杆件之间产生压力，由此而传递外力。所以高强度螺栓连接传力不像普通螺栓和铆钉连接那样有应力集中，而且应力传递也比较均匀，同时刚性好，承载力大，另外，在反复荷载作用下疲劳强度也高。

高强度螺栓大致区分为：传递垂直于螺栓轴方向剪力的摩擦连接和承压连接，和传递沿螺栓轴方向拉力的受拉连接。各种连接传递力的方向不同，但是都利用拧紧高强度螺栓所得到的杆件之间的压力，这一点是一样的。也有将高强度螺栓按普通螺栓使用方法使用者，只利用它的高强度，但在日本高强度螺栓连接的范畴，不包括此种连接方法。

### 1.1.1 摩 擦 连 接

摩擦连接乃是拧紧高强度螺栓使被连接件之间产生压力，靠连接件之间的摩擦力来传力的连接方法，如图-1.1 (a) 所示，借分布于螺栓周围杆件之间的压力来传力，它和同图 (b) 所示靠局部承压传递应力的铆钉连接不同，应力集中小，且分布也比较均匀。另外杆件之间并不发生滑动，所以可知其刚性是非常高的，同时疲劳强度也很高。高强度螺栓连接最先使用的是摩擦连接，以后派生出拉力连接和承压连接，所以实际使用以摩擦连接最多，研究成果也最多，因此，目前一般所讲高强度螺栓连接，就意味着是指摩擦连接。

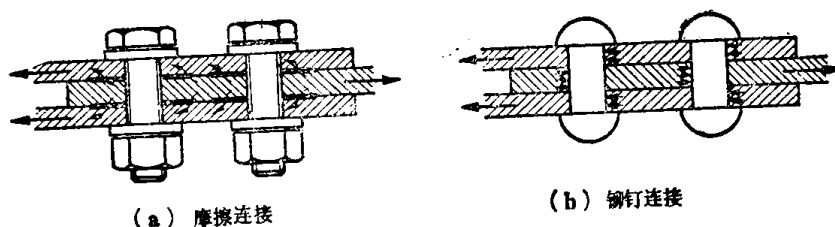


图-1.1 摩擦连接·铆钉连接

### 1.1.2 承 压 连 接

承压连接是依靠拧紧高强度螺栓在杆件之间所产生的摩擦力，和犹如铆钉及普通螺栓一样，由高强度螺栓的承剪力或承压力同时来抵抗外力的一种连接方法。因此也叫剪切型连接。

接,其使用条件与摩擦连接差不多。由于普通的承压连接,主荷载\*由摩擦承载力承受,附加荷载\*除摩擦承载力外还同时由螺栓剪力或承压力来承受,所以它和摩擦连接相比,其承载能力要大得多。但是由于这种情况接头产生了滑动和承压力,导致连接处产生相当滑动量的变形,因此会产生各种问题,所以承压连接螺栓孔的空隙要尽量减小,以减少滑动所产生连接处的错动。在日本,承压连接用的螺栓为打入式螺栓,螺栓轴部较粗,为了能较容易地穿入孔内使轴部带有刻槽,而螺栓轴部和孔的直径几乎相等。摩擦连接、承压连接及铆钉的剪切连接所受荷载与变形的性能如图-1.2所示。

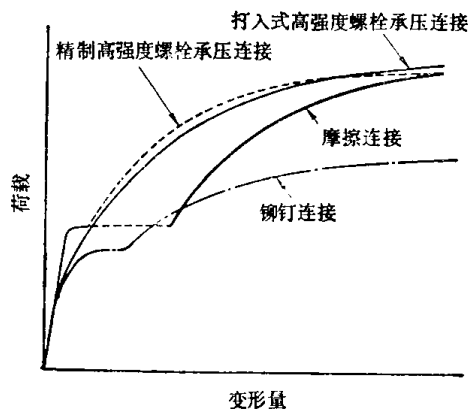


图-1.2

### 1.1.3 受拉连接

受拉连接就是高强度螺栓沿螺栓轴方向传力的连接。在利用杆件之间的压力以传递应力这一点上和其他连接类型的高强度螺栓是一样的,但构造则不一样,详细情况将在第六章叙述。简言之,由于外力主要靠抵消杆间压力的形式来传递,传力的有关部分仅限于螺栓孔的周围,故连接处的刚性好,此外,由于外力所产生的螺栓杆力变化较小,所以疲劳强度也高。由于这种接头的特点,只能是在板层之间存在压力的情况下进行加载,如外力过大时,板层之间就要离开,外力必须全部由螺栓负担,接头处刚性就要降低,便将失去受拉连接的特点,因而加载的范围应是以板层之间不出现拉应力为限,这就是说,螺栓的预拉力要高,一般在土木建筑结构上所使用的受拉连接如图1.3所示的梁的接头、柱子和梁的连接等,一般由于弯矩引起拉力的情况多于纯拉力的情况,也有如图中1.3(e)所示的钢管法兰盘接头,这是螺栓纯受拉的情况。

### 1.1.4 设计、施工上的问题

如上所述,高强度螺栓连接是一种非常优越的连接方法,但在实际结构物上使用时,在设计上及施工上都还有很多需要研究的地方,因此使用高强度螺栓的人员,需要正确掌握有关此种连接方法的知识。高强度螺栓已使用15年之久,在此期间,国内外积累了很多研究成果,大部分问题都已解决,其详细情况将在以下各章叙述,这里就主要问题简述如下:

高强度螺栓连接要使用高强度的螺栓并精确的施加高的预拉力,此预拉力要能长期保持。因此有关螺栓的材质、形状、尺寸、机械性能和制造方法等就需要研究,现在世界各国使用的高强度螺栓有8T(抗拉强度 $80\text{kgf/mm}^2$ )~11T( $110\text{kgf/mm}^2$ )级的,形状多用ISO统一规格。使用过高强度的钢材,在高应力的情况下经过一定时间有突然破坏的情况,这种

\* 结构物的自重、活荷载等为经常作用在结构物上的荷载,在建筑工程称为长期荷载,在土木工程称为主荷载。至于台风、地震产生的水平荷载,多雪地区以外的地区的雪荷载等,是非经常作用在结构物上的荷载,在建筑工程称为短期荷载,土木工程称为附加荷载或特殊荷载。由于对这些荷载设计时所采用的安全系数和允许应力不同,所以对这些荷载进行概括的处理。本书将前者称为主荷载,后者称为附加荷载,当有关结构物有独特的荷载条件和设计条件时,也可以称其相应的荷载名称。

现象叫作延迟断裂。这与钢材的强度、材质、作用应力、所处环境等有关，但是现在使用的11T级及以下的螺栓对于延迟断裂可以说没有什么问题。

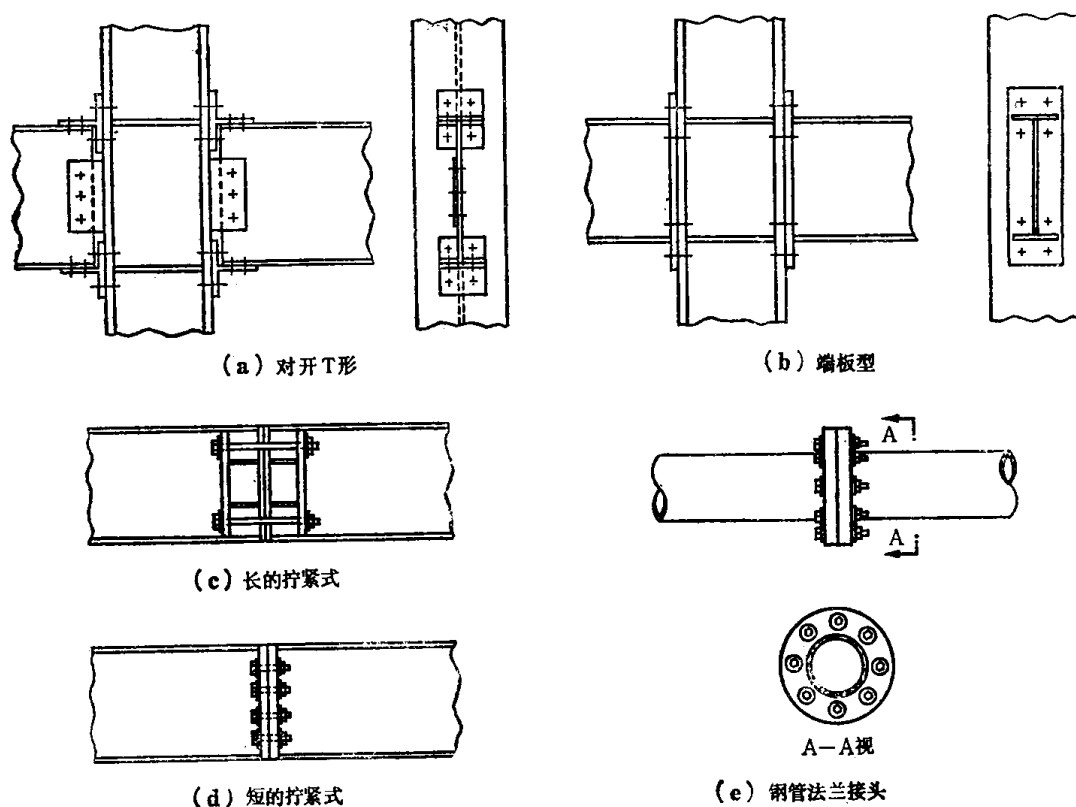


图-1.3 拉力连接示例

拧紧高强度螺栓的方法有很多种，现在最常用的有扭矩法和转动螺母法。前者是用拧紧螺母的扭矩来控制螺栓预拉力的方法，后者是用螺栓轴和螺母的相对转角来控制螺栓预拉力的方法。除此以外，也有用直接张拉螺栓的方法和利用加热膨胀拧紧螺栓的方法。无论采用哪种方法，必须研究拧紧的次序，另外，若一个接头有很多螺栓时，则由于拧紧方法和拧紧顺序会对已拧好的螺栓的预拉力产生影响，而且拧完的螺栓由于力长期的作用，也有预拉力下降的问题，这种现象叫作松弛。通常刚拧完时预拉力比较大随时间而逐渐减小。在一般的情况下，十年之内约降低5~8%，估计以后的变化就非常小了。一方面，和弹簧系数有关的连接件之间的压力分布对受拉接头的承载力和刚性有影响，另外摩擦接头和表面处理的范围也有关系。

高强度螺栓连接的性能和很多因素有关，对于摩擦连接，滑动承载力是最重要的因素。因而首先应掌握摩擦面的状况和滑动系数的关系，其次为螺栓孔的间隙，母材的强度，接头处表面的缝隙，螺栓的握距等和摩擦承载力的关系。关于螺栓的布置问题，当顺应力方向螺栓布置比较多时，就有所谓多列螺栓的问题。再有次要的问题，如温度变化对摩擦承载力的影响、端部空隙的尺寸对承压承载力的关系、螺栓孔的间隙与连接处的性能和施工方法的关系、螺栓材质与连接件材质的关系、螺栓的握距和接头长度与承载力的关系等。受拉连接由于连接处的螺栓布置和外力的偏心引起很多问题，若考虑连接件的刚性则出现所谓杠杆作用，由于杠杆作用在连接处产生杠杆反力，若此反力与外力方向相同，对螺栓则产生附加力，这对受拉连接的设计是最重要的问题。作用外力分静载和反复荷载，这些荷载，对连接处产

生不同的影响,在上述的各种连接形式中要分别进行检算。

一个接头用两种以上不同的连接形式时,凡外力由各种连接形式共同分担的叫组合接头。设计时一开始就用组合接头形式的非常少,它们多由于结构的用途变更,增建或改建时使用。高强度螺栓的组合接头有和焊接组合的及和铆钉组合的等,在这些组合接头中,按各种连接形式的刚性分担应力,一处连接根据两种连接形式所占比例的不同,接头的承载力和刚度也跟着变化,主要问题是受力状态比较复杂,所以用试验方法比用理论计算方法更普遍。

为了发挥高强度螺栓的优点和达到设计要求,正确的施工管理是很必要的,这就要求作有关高强度螺栓的各种试验和检查,主要的有:关于高强度螺栓的机械性能、扭矩系数等的试验,连接面的检查,连接处组装的检查,拧紧机具的检查,螺栓预拉力的检查等。而且在这些试验检查内容中,对试验的方法、检查的数量,结果的判定和不合格时的处理方法等也都需要研究。

根据过去高强度螺栓连接的设计和施工研究的成果,有关学会和协会提出了标准,这不仅在日本是这样,世界上主要的国家也都一样。这些标准中所规定的事项是有关使用高强度螺栓连接应该研究的问题,因而比较各国规范,将研究高强度螺栓连接的主要问题加以归纳,对了解高强度螺栓很有参考价值。

上述高强度螺栓的各种问题,将在以下各章根据许多试验和研究资料加以讨论,并将结果详细论述,其中多数问题都已解决了,但也还有未解决的问题,有待今后继续研究。

## 1.2 发展过程

高强度螺栓用在钢结构上从何时开始,还不太清楚,大约有40年的历史,即在英国的巴索(C.Batho) 1934年和1936年的报告中记载了强度 $60\text{kgf/mm}^2$ 的螺栓开始用在永久性结构物上,贝里奇(P.A.S.Berridge)的论文中也有同样论述。以后的研究是以美国为中心进行的,弄清楚了螺栓连接的特性,开始时是作为铆钉的辅助手段或更换铆钉时代替铆钉用,新的考虑方法的标准订立以后,高强度螺栓成为钢结构接头连接的主要手段。

德国和日本是在美国研究和普及的推动下发展起来的,差不多同时于五十年代开始着手研究。

这些国家是分别根据本国国情发展起来的,美国、以德国为中心的欧洲大陆,以及日本都有些区别,下面分别介绍其研究和使用的过程。

美国于1938年开始试验研究高强度螺栓。1947年成立了铆钉和螺栓连接研究委员会,1951年委员会制订了高强度螺栓的最初规范,“高强度螺栓连接的施工规范”,发表后不久,美国钢结构协会同意使用,接着美国铁路工程协会及美国国家公路协会也都承认了,因此建筑结构物、铁路桥和公路桥都相继使用了高强度螺栓。1960年制订了“结构连接用ASTM A325螺栓标准”,1964年除A325螺栓外,强度比较高的A490螺栓也包括进去了。此后每隔数年进行一次小的修改,实质上大体仍为1964年的形式,此后高强度螺栓很快地得到普及。

从规范内容的改变,可看出高强度螺栓连接的使用方面的改变,以下回顾其主要经过。

1954年的规范中关于螺栓接头的设计,只按代替同直径的一个(ASTM A141)铆钉来处理。当允许滑动而使螺栓受剪时,则杆件的连接处可在工厂油漆,当承受反复荷载、冲击或振动荷载而不允许有滑动时,则连接处不能油漆。另外,螺栓拧紧时的预拉力要达到标准螺栓轴向力和与其相应的标准扭矩。

从1950年前后连续发表的报告,对高强度螺栓连接的各方面的问题都进行了讨论,同时积累了施工的经验,因此高强度螺栓的连接得到了推广。

1960年3月的规范是采纳了这些成果而修订的,从积极采用大的预拉力出发,规定了摩擦和承压两种连接的允许应力。

在1962年修订规范时,强调了以转角法作为主要的拧紧方法,为了便于施工,转角法规定了统一的转角。

美国材料试验学会(ASTM)在1951年对螺栓、螺母和垫圈规定了暂行标准,以后进行了几次修改,作为80公斤级螺栓的ASTM A325标准已广泛使用。关于用高强度钢的90~110公斤级的螺栓,在1952年的ASTM中规定了暂行标准,于1964年制订了结构用的A490的标准。

从以上所述各点可知,美国方式认为高强度螺栓连接单凭人拧不能得到准确的数值,尽管也可以用特别规定的方法,但普遍用轧制氧化皮摩擦面的滑动系数即0.35,和其他国家相比,所用数值较低,他们这样规定的原因,是根据本国的情况,因螺栓已进入标准化和大量生产的阶段,其目的是为了加速普及推广。截至目前为止,在桥梁、建筑等方面的工地接头已有90%以上使用高强度螺栓。

在欧洲,德国的研究最有系统,也是第一个制定了规范,其他各国大都继承德国的形式制定了规范。德国的研究从1953年开始,1956年制定了高强度螺栓连接的计算、施工、装配暂行标准。此标准将螺栓分为80公斤级和100公斤级两种,螺栓拧紧用扭矩法,其预拉力将轴向应力和剪应力的合力控制在屈服点的90%以内。设计采用的滑动系数比较大,摩擦面要作喷丸、喷砂、火焰等处理。对于接头母材断面螺栓孔的扣除有独特的规定,不受以前铆钉接头的控制。德国1974年修改后的DAST010规范,详见附录。

在德国,工地接头很少全部用高强度螺栓,而是桥面用工地焊接,其他使用高强度螺栓,或者如箱形梁翼缘用高强度螺栓,腹板用铆钉拼接等。

欧洲各国于1971年制定了成熟的统一的规范,即“欧洲高强度螺栓使用准则”对高强度螺栓连接的基本项目作了统一规定,但对使用的钢种和其他的细节则根据各国的具体情况决定,不强求数值统一。1975年对规范的一部分又作了修改,修改最大的一点是连接的容许承载力,无论摩擦连接、承压连接或受拉连接,都比过去增至1.3~1.4倍左右。

另外在英国,和在欧洲其他各国不同,根据独自のBS(British Standard)标准,其中有螺栓规格,设计、施工方面的规定。螺栓的强度,拧紧预拉力,拧紧方法等的内容都和美国相同,但是仅滑动系数不同,而是采用0.45。

日本和其他国家不同,结构物的设计方法,土木和建筑稍有不同,为此关于高强度螺栓连接的配合也不免受其影响,两者都从各自的出发点作了研究,因此下面尽管是叙述日本的研究和施工的经过,但为了不使这两方面弄混,所以首先叙述土木结构物的发展,然后叙述有关建筑结构物。

在日本,最初采用于钢结构的高强度螺栓是按摩擦连接考虑的。1954年和1956年开始在两座临时铁路桥上使用高强度螺栓,螺栓材料用极限强度 $60\text{kgf/mm}^2$ ,屈服点 $40\text{kgf/mm}^2$ 的低合金钢或中碳钢,不经淬火和回火,拧到屈服点。经过淬火、回火的极限强度 $80\text{kgf/mm}^2$ ,屈服点 $64\text{kgf/mm}^2$ 的螺栓于1956年开始使用。

横滨的根岸线和东海道新干线试验段结合梁的主梁拼接,不仅使用了80公斤级的螺栓,而且也使用了110公斤级的螺栓。此外1965年秋,在中央干线新笛吹川桥中使用了130公斤级

的螺栓。

在公路桥方面，1956年，东京大井町跨线桥的横联的连接，1959年煤气桥，城ヶ岛大桥的一部分开始采用，1962年完成的若户大桥的塔中，也使用了高强度螺栓。阪神高速道路公团的琵琶湖大桥和花环桥，从1964年开始使用130公斤级螺栓。

1964年6月为了使高强度螺栓能标准化，制定了日本最早的高强度螺栓标准，即JIS B 1186“摩擦连接用六角高强度螺栓、六角螺母、平垫圈”。从此高强度螺栓得到很快的推广，用在铁路桥、公路桥、城市桥、简易桥或长大桥，现在说日本所有的桥梁都在使用高强度螺栓，并不过分。但是从1964年到1966年使用的 $130\text{kgf/mm}^2$ (13T)级的螺栓，由于使用后数月或数年突然断裂，即所谓“延迟断裂”的事故相继发生，以后即禁止使用这种强度的螺栓，因此“延迟断裂”的研究也就活跃起来了。

现在日本在桥梁上主要采用的是 $110\text{kgf/mm}^2$ (11T)级的高强度螺栓。

以上所述，均为使用摩擦连接的情况，但在桥梁上也有使用承压连接者，承压连接最早用在铁路桥是1966年3月施工的东北干线荒川桥的桁梁桥面的更新工程，此处用的是6T级W7/8的埋头螺栓。1967年施工的大阪府道长吉公路跨线桥的一部分，使用的是7T级W7/8的圆头螺栓，后者正式使用是在1968年由建设省公路局和兵库县土木部计划修建的国道250号线加古川相生桥的新建工程，这些工程修建以后，各处的公路桥和铁路桥都有使用。

在建筑方面，日本于1957年开始使用高强度螺栓，到1961年末，有50座以上的建筑物共用了一百多万套高强度螺栓。建筑上普遍采用的螺栓为9T、10T、11T。高强度螺栓连接在建筑和桥梁方面一样，大部分采用摩擦连接，建筑结构还采用受拉连接，但由于1970年建设省通知所有受拉接头的使用都要经过批准，甚至需经建设大臣批准，因此就不能广泛地应用了。在1970年修改的“钢结构设计规范”中吸收了日本建筑学会提出规范的内容，1972年据此制定的“高强度螺栓连接设计施工指针”，其中受拉连接和摩擦连接仍然并列。

第 2 章 螺栓、螺母和垫圈

2.1 材料、材质

一般的高强度螺栓、螺母和垫圈经淬火、回火后应达到规定的机械性能，要求，其材料具有如下特性：

- ① 能够满足规定的机械性能，具有淬火、回火的特性；
- ② 容易加工、成型，价格便宜；
- ③ 具有耐延迟断裂的优点；
- ④ 材质应不受环境等的影响；
- ⑤ 具有耐冲击的优点。

关于高强度螺栓、螺母和垫圈的材质，在日本国家标准中有的有规定，有的没有规定，一般来说螺栓的材质是在中碳钢或低碳钢中掺入锰、铬、钼、硼、钛等合金元素的合金钢，螺母和垫圈采用中碳钢或锰钢等。表2.1为高强度螺栓用钢化学成分的示例。

高强度螺栓材料的化学成分 表-2.1

| 钢 种          | 化 学 成 分 (%) |           |           |        |        |           |           |                 |             | 用该钢种<br>制造的螺<br>栓的种类 |
|--------------|-------------|-----------|-----------|--------|--------|-----------|-----------|-----------------|-------------|----------------------|
|              | C           | Si        | Mn        | P      | S      | Cr        | Mo        | B               | 其他          |                      |
| S 40 C       | 0.37~0.43   | 0.15~0.35 | 0.60~0.90 | <0.030 | <0.035 |           |           |                 |             | F 8 T                |
| S 45 C       | 0.42~0.48   | 0.15~0.35 | 0.60~0.90 | <0.030 | <0.035 |           |           |                 |             | F 8 T                |
| S 55 C       | 0.52~0.58   | 0.15~0.35 | 0.60~0.90 | <0.030 | <0.035 |           |           |                 |             | { F 8 T<br>F 10 T    |
| S A E 1024   | 0.19~0.25   |           | 1.35~1.65 | <0.040 | <0.050 |           |           |                 |             | F 8 T                |
| S A E 1027   | 0.22~0.29   |           | 1.20~1.50 | <0.040 | <0.050 |           |           |                 |             | F 8 T                |
| S A E 1033   | 0.30~0.36   |           | 0.70~1.00 | <0.040 | <0.050 |           |           |                 |             | F 8 T                |
| S A E 1041   | 0.36~0.44   |           | 1.35~1.65 | <0.040 | <0.050 |           |           |                 |             | { F 8 T<br>F 10 T    |
| S A E 1024 B | 0.19~0.25   |           | 1.35~1.65 | <0.040 | <0.050 |           |           | 0.001<br>~0.003 |             | { F 8 T<br>F 10 T    |
| S C r 4      | 0.38~0.43   | 0.15~0.35 | 0.6~0.85  | <0.030 | <0.030 | 0.90~1.20 |           |                 |             | { F 10 T<br>F 11 T   |
| S C M 3      | 0.33~0.38   | 0.15~0.35 | 0.6~0.85  | <0.030 | <0.030 | 0.90~1.20 | 0.15~0.35 |                 |             | F 11 T               |
| S C M 4      | 0.38~0.43   | 0.15~0.35 | 0.6~0.85  | <0.030 | <0.030 | 0.90~1.20 | 0.15~0.35 |                 |             | F 11 T               |
| S C M 24     | 0.20~0.25   | 0.15~0.35 | 0.6~0.85  | <0.030 | <0.030 | 0.90~1.20 | 0.35~0.45 |                 |             | F 11 T               |
| F 11 T 用硼钢   | 0.20~0.25   | 0.15~0.30 | 0.6~0.85  | <0.030 | <0.030 | 0.90~1.20 |           | 0.001<br>~0.003 | Ti<br><0.10 | F 11 T               |

关于各国材质的规定和现在常用的高强度螺栓的钢材叙述如下：

2.1.1 日 本

日本工业标准 (JIS) B1186经过1964、1967、1970年三次修改，对材质都未作规定，

只规定了制成品的机械性能，以期能研究出满足此特性的钢种。

高强度螺栓用的钢种，在日本一般使用日本工业标准 (JIS) 或美国汽车钢铁标准 (SAE) 中规定的钢材。选择适合高强度螺栓用的钢种时，为了使强度高，含碳量就得比较高，就得用中碳钢或中碳合金钢，如 F8T~F10T 级用机械结构用碳素钢 (JIS G4051) 的 S45C~S55C 或 SAE1041，为了得到强度更高的 F11T 级，可用含铬和钼合金元素的铬钢 (JIS G4104) 中的 SCr4、SCM4 等。一般的中碳钢 (含碳量约 0.35% 以上) 淬火时，淬裂倾向比较高，这样的中碳钢淬火时，不能冷却过快，需用油淬。

可是，近年来对于高强度螺栓用钢，在螺栓厂、钢铁厂等作了很多研究，已研制出专用钢，最近的趋向是将含碳量往低控制 (0.25% 左右)，因此淬硬性较差，多为在低碳钢中掺入硼元素的硼钢。硼低合金钢的特点是：

① 具有能冷加工的优点，可以不要冷加工前的处理 (例如退火处理)，按冷轧状冷锻成形。

② 淬脆倾向低，可以用水淬。

③ 不增加高价元素即可得到可淬性及韧性，材料的成本低。

④ 从延迟破坏来看，低碳钢的敏感性低，这是已经明确的。

具体的是以 SAE1021~1027 为基础一般的增加硼、铬等。图 2.1 示高强度螺栓用低碳钢的回火性能曲线的一例。

再有，为了使高强度螺栓具有耐候性，研制了在通常高强度螺栓用钢中加入铜、镍等耐候有效元素。

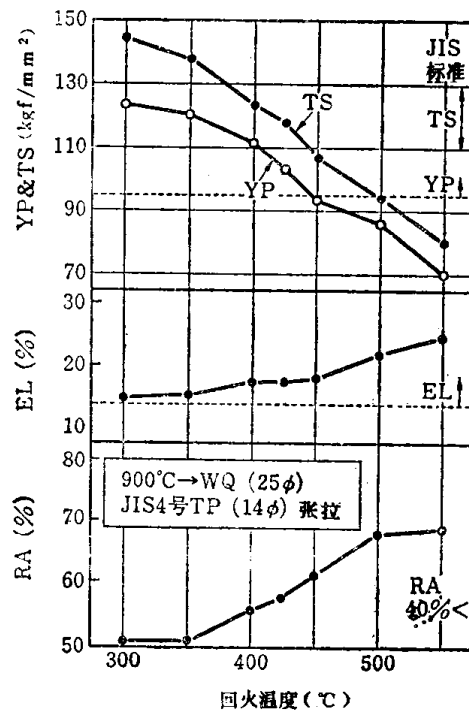


图 2.1 低碳钢的回火特性

## 2.1.2 美国、英国

ASTM (美国材料试验标准) A325 (80公斤级) 螺栓用钢，按化学成分可分为三种，其化学成分见表 2.2。

第 1 种为中碳钢 (C: 最低 0.30, Mn: 最低 0.50, P: 最高 0.040, S: 最高 0.050%)，第 2 种为锰低合金钢 (C: 0.15~0.23, Mn: 最低 0.70, P: 最高 0.040, S: 最高 0.050, B: 最低 0.0005%)，第 3 种为耐候钢，此种钢为在低碳钢和中碳钢中掺入耐候有效元素铜、铬等，或者再加钼、矾、钛等，第 3 种钢又可分为四类，其代号为 A, B, C, D。在 1970 年修订规范时，规定了新的镀锌螺栓，并且明文规定原则上钢种采用第 1 种。

另外，和第 1、2 种螺栓组合的螺母和垫圈的材质只限制 P、S 含量，没有碳和合金元素含量的规定，第 1、2 种的垫圈有渗碳的规定。第 3 种的螺母和垫圈除 P、S 含量外，和螺栓一样明文规定需加铜、铬等耐候有效元素，螺栓用 800°F (427°C) 以上的温度回火。

100 公斤级的 ASTM A490 是作为 A354 的 BD 级结构用钢制定的。其化学成分 C: 0.28~0.50 (螺栓尺寸小于 1<sup>3</sup>/<sub>8</sub> 英寸)，0.33~0.55 (螺栓尺寸大于 1<sup>1</sup>/<sub>2</sub> 英寸)，规定 P: 最高

0.045%，S：最高0.045%，合金元素没有规定。另外，螺母和垫圈的化学成分都没有规定，A490的回火温度规定为900°F（483°C）以上。

第1种和第2种的螺栓、螺母、垫圈的化学成分

表-2.2 (a)

| 元 素   | 成 分 (%)   |           |       |        |        |
|-------|-----------|-----------|-------|--------|--------|
|       | 第 1 种的螺栓  | 第 2 种的螺栓  | 螺 母   | 垫 圈    |        |
|       |           |           |       | 淬火, 回火 | 渗 碳    |
| 碳     |           |           |       |        |        |
| 熔炼分析  | 0.30 (以上) | 0.15~0.23 | —     | —      | —      |
| 复验分析  | 0.27 (以上) | 0.13~0.25 | —     | —      | —      |
| 锰     |           |           |       |        |        |
| 熔炼分析  | 0.50      | 0.70      | —     | —      | 1.00以下 |
| 复验分析  | 0.47      | 0.67      | —     | —      | 1.00以下 |
| 磷: 最大 |           |           |       |        |        |
| 熔炼分析  | 0.040     | 0.040     | 0.120 | 0.040  | 0.040  |
| 复验分析  | 0.048     | 0.048     | 0.128 | 0.050  | 0.050  |
| 硫: 最大 |           |           |       |        |        |
| 熔炼分析  | 0.050     | 0.050     | 0.23  | 0.050  | 0.050  |
| 复验分析  | 0.058     | 0.058     | —     | 0.060  | 0.060  |
| 硼: 最小 |           |           |       |        |        |
| 熔炼分析  | —         | 0.0005    | —     | —      | —      |
| 复验分析  | —         | 0.0005    | —     | —      | —      |

注：第2种的螺栓要用镇静钢，必须是优质钢。制造渗碳垫圈用的材料含碳量不得大于0.25%。

第3种的螺栓、螺母、垫圈的化学成分

表-2.2 (b)

| 元 素  | 成 分 (%)                |            |           |           |                         |                         |
|------|------------------------|------------|-----------|-----------|-------------------------|-------------------------|
|      | 第 3 种的螺栓* <sup>1</sup> |            |           |           | 第 3 种* <sup>2</sup> 的螺母 | 第 3 种* <sup>2</sup> 的垫圈 |
|      | A                      | B          | C         | D         |                         |                         |
| 碳    |                        |            |           |           |                         |                         |
| 熔炼分析 | 0.33—0.40              | 0.38—0.48  | 0.17—0.23 | 0.15—0.25 | —                       | —                       |
| 复验分析 | 0.31—                  | —0.50      | 0.16—0.24 | 0.14—0.26 | —                       | —                       |
| 锰    |                        |            |           |           |                         |                         |
| 熔炼分析 | 0.90—1.20              | 0.70—0.90  | 1.00—1.20 | 0.40—1.20 | —                       | —                       |
| 复验分析 | 0.86—1.24              | 0.67—0.93  | 0.96—1.24 | 0.36—1.24 | —                       | —                       |
| 磷    |                        |            |           |           |                         |                         |
| 熔炼分析 | 0.040以下                | 0.06—0.12  | 0.030以下   | 0.040以下   | 0.07—0.15               | 0.040以下                 |
| 复验分析 | 0.045以下                | 0.06—0.125 | 0.035以下   | 0.045以下   | 0.07—0.155              | 0.045以下                 |
| 硫    |                        |            |           |           |                         |                         |
| 熔炼分析 | 0.050以下                | 0.050以下    | 0.035以下   | 0.050以下   | 0.050以下                 | 0.050以下                 |
| 复验分析 | 0.055以下                | 0.055以下    | 0.040以下   | 0.055以下   | 0.055以下                 | 0.055以下                 |
| 硅    |                        |            |           |           |                         |                         |
| 熔炼分析 | 0.15—0.30              | 0.30—0.50  | 0.15—0.30 | 0.25—0.50 | 0.20—0.90               | 0.15—0.30               |
| 复验分析 | 0.13—0.32              | 0.25—0.55  | 0.13—0.32 | 0.20—0.55 | 0.15—0.95               | 0.13—0.32               |
| 铜    |                        |            |           |           |                         |                         |
| 熔炼分析 | 0.25—0.45              | 0.20—0.40  | 0.25—0.35 | 0.30—0.50 | 0.25—0.55               | 0.25—0.45               |
| 复验分析 | 0.22—0.48              | 0.17—0.43  | 0.22—0.38 | 0.27—0.53 | 0.22—0.58               | 0.22—0.48               |
| 镍    |                        |            |           |           |                         |                         |
| 熔炼分析 | 0.25—0.45              | 0.50—0.80  | 0.30—0.40 | 0.50—0.80 | 1.00以下                  | 0.25—0.45               |
| 复验分析 | 0.22—0.48              | 0.47—0.83  | 0.27—0.43 | 0.47—0.83 | 1.03以下                  | 0.22—0.48               |

续上表

| 元 素  | 成 分 (%)    |           |           |           |            |            |
|------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
|      | 第 3 种的螺栓*1 |           |           |           | 第 3 种*2的螺母 | 第 3 种*2的垫圈 |
|      | A          | B         | C         | D         |            |            |
| 碳    |            |           |           |           |            |            |
| 熔炼分析 | 0.45—0.65  | 0.50—0.75 | 0.30—0.40 | 0.50—1.00 | 0.30—1.25  | 0.45—0.65  |
| 复验分析 | 0.42—0.68  | 0.47—0.83 | 0.27—0.43 | 0.45—1.05 | 0.25—1.30  | 0.42—0.68  |
| 硫    |            |           |           |           |            |            |
| 熔炼分析 | —          | —         | 0.020以上   | —         | —          | —          |
| 复验分析 | —          | —         | —         | —         | —          | —          |
| 铜    |            |           |           |           |            |            |
| 熔炼分析 | —          | 0.06以下    | —         | 0.10以下    | —          | —          |
| 复验分析 | —          | 0.07以下    | —         | 0.11以下    | —          | —          |
| 钛    |            |           |           |           |            |            |
| 熔炼分析 | —          | —         | —         | 0.05以下    | —          | —          |
| 复验分析 | —          | —         | —         | —         | —          | —          |

\*1 A, B, C, D是第 3 种螺栓使用材料的分类, 由制造者决定选择哪种材料。

\*2 螺母和垫圈由上表所示的那种螺栓材料制造都可以, 由制造者选定。

英国的高强度螺栓规格BS3139中规定的螺栓材料(相当ASTM A325), 仅S、P含量要在0.06%以下, 碳和合金元素的含量没作规定, 而且螺母和垫圈的化学成分未作规定。

明确规定螺栓的热处理可用油淬或者水淬, 回火温度在800°F (427°C) 以上。

2.2 制 造

高强度螺栓一般的制造工序如图-2.2 所示, 另外, 在此图中示有各工序的成形形状。

2.2.1 螺 栓

螺栓是用直圆钢或盘条切成适当的长度制造的, 如下所述, 由于冷加工的发展, 必须连续向螺栓成形机内供给材料, 所以最近螺栓的原材料几乎都为盘条。由于送进螺栓成形机内的直圆钢或盘条均为轧制而成, 其外径的精度不能满足螺栓轴规定的公差。为此, 送进螺栓成形机前, 需经拔丝使外径均匀。螺栓的成形, 一般采用按成形中所规定的螺栓外径拔丝的方法, 然后, 切成适当长度, 进行头部成形, 螺纹成形, 热处理。

(1) 头部成形

下料后, 用高温加热头部成形的方法叫作热加工, 常温成形的方法叫作冷加工。

在制造高强度螺栓的初期广泛使用热加工, 所用机械多为摩擦压力机, 此生产方法不如冷加工好。因此只在螺栓的直径较大(例如M30左右)、冷加工能力有困难时, 制造长螺栓时或螺栓批量很小时才用热加工。从大量生产的意义考虑, 一般尺寸的高强度螺栓今后不会发展热加工制造。

冷加工因为是在常温使头部成形, 最近螺栓原材料的切断、头部镦粗、切成六角形(修边), 缩颈等全由一台多级式机器完成, 每分钟的产量, 由十根到近百根。冷加工螺栓镦粗机的示例如图-2.3 所示, 冷加工发展的理由在于能大量生产。同时对容易冷加工的螺栓专