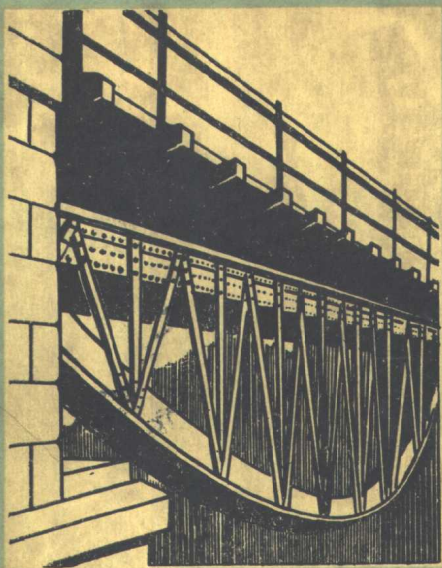




Т. М. 波格丹诺夫 著

金属结构的高强度螺栓连接

人民铁道
出版社

9222161

金属结构的高强度螺栓连接

T. M. 波格丹诺夫 著

徐承贻 刘达文 译

程庆国 校阅

人民铁道出版社

1964年·北京

本书介绍了金属结构连接用靠摩擦传力的螺栓，和有关螺栓连接受静载和振动荷载时的强度计算问题，叙述了接触面清理方法和拧紧螺栓的工具，以及苏联和其他国家使用高强度螺栓的经验。

本书可供从事钢结构设计、施工及养护工作的工程技术人员参考用。

金属结构的高强度螺栓连接

СОЕДИНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
КОНСТРУКЦИЙ НА ВЫСОКОПРОЧНЫХ
БОЛТАХ

苏联 Т.М.БОГДАНОВ 著

徐承贍 刘达文 译

程 庆 国 校阅

人民铁道出版社出版

(北京市霞公府甲24号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 010 号

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民铁道出版社印刷厂印

书号 1945 开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张 $3 \frac{1}{2}$ 字数 71 千

1964年8月第1版

1964年8月第1版第1次印刷

印数 0,001—7,000 册 定价(科六) 0.46 元

目 录

緒言	1
第一章 高强度螺栓连接的强度	4
1. 高强度螺栓连接的计算特点	4
2. 高强度螺栓预拉力数值及材料	7
3. 螺栓预拉力与扭矩的关系	13
4. 螺栓应力	15
5. 表面加工及摩擦系数	17
6. 高强度螺栓连接在静载作用下的工作情况	24
7. 连接的耐劳强度	32
第二章 拧紧螺栓的工具	46
8. 手搬	46
9. 风搬	53
10. 校正搬手的工具	56
11. 高强度螺栓预拉力的检验	59
第三章 高强度螺栓在钢结构连接中的 实际应用	63
12. 苏联应用实例	63
13. 其他国家应用实例	73
第四章 高强度螺栓在运营桥梁中的应用	85
14. 应用高强度螺栓更换松动的和有缺陷的铆钉	85
15. 高强度螺栓在铁路桥梁加固中的应用	90
第五章 结构要求和施工	96
16. 对基本结构的要求	96
17. 在结构拼装中应用高强度螺栓的施工特点	103
参考文献	108

緒 言

铆接是钢结构杆件最普通的连接方法。铆接虽有其许多优点，但同时也存在一系列的本质上的缺点：

1. 在结构物运营过程中，铆钉松动，虽更换之亦常得不到预期的效果；

2. 在铆接接点中，由各铆合点传递的应力并不均匀，钉孔旁有较高的局部应力（集中应力），以致降低接点的疲劳强度（震动强度）；

3. 铆钉不完全填满钉孔，因此在铆接接点中锈蚀发展而铆钉松弛；

4. 进行铆接工作需要能力强大的空气压缩机设备，以及风管，风动铆钉枪，扩孔小型钻机，铆合前用以系紧钣束的粗制螺栓，锻炉，铆顶，煤等等。这些都造成铆接费用的昂贵。对于加固及修理在运营中的桥梁、起重机及其他建筑物，铆接费用更急剧增加；

5. 铆接工作需高级技艺的铆工及管理机械人员。

这些情况促使进行在接点中应用预应力螺栓的研究，这种预应力螺栓在机械制造方面久已为大家所熟悉，而且实际采用。

在钢结构安装工作中，也早已使用螺栓，如在拼装杆件时用粗制螺栓作为暂时连接，随后以铆钉更换，或用精制螺栓作为永久连接。不过，以上两种情况，均如铆接一样，以受剪或受压计算，而不考虑接点接触面的摩擦力。

钢结构杆件用强大预应力螺栓的新的连接方法，即所谓高强度螺栓连接，是这样的：即对螺栓施一定的巨大而受控

制的预拉力，使沿接触表面所引起的摩擦力能完全承受被连接杆件的內力。

在国外，高强度螺栓已广泛使用于桥梁、高厦及工业房屋的钢结构工地连接。

最初，1938年美国 Y. 威尔逊的不完备试验已表明，用高拉力螺栓的接点，疲劳强度不低于铆接。但直至1947年，在美国成立了铆接及栓接的专门研究委员会后，工作方有所进展。

从1948年，美国铁路工程师开始在新建的铁路桥梁上以及更换运营中桥梁的松动铆釘时采用了螺栓，在钢架高厦及工业房屋亦用之。首批巨大建筑物采用高强度螺栓连接系在1953—1954年。1959年末建成的长大的麦基纳克海峡悬桥的中跨（长1160米），其加劲梁的工地连接用了高强度螺栓一百万个。在俄亥俄州原子能中心建造的三个厂房，所用钢料总重79,000吨，工地连接用了 A-325标号高强度螺栓1,500,000 个。纽约市在1957—1959年所建的40座钢架高厦中有23座系用高强度螺栓安装的。

应当指出，到现时为止，美国并不特殊注意到表面的特别处理，仅以一个 A-325号高强度螺栓代替一个铆釘*，不能认为有科学论据。

在欧洲，起先亦根据上述办法。但在1954—1956年，西德斯丹哈特教授的充分研究，对高强度螺栓可考虑为有独立性的连接方式建立了基础。1954年在西德建立了欧洲第一座用高强度螺栓连接的桥（跨越鲁尔河），跨度为45米。1956年颁布了用高强度螺栓连接的计算及建造暂行规范，至1959

* 美国1962年5月已发表新规范。参阅《铁道快报》1963年第1期。——译者注

年用此种螺栓安装的建筑物约有20,000吨。

1955年英国根据其自己的经验及试验室的研究，对于螺栓的制造及其拧紧方法都有所改进。1960年在跨越丹伊格腊总重400吨的铁路钢梁上，用独创的“扭切”式高强度螺栓作为工地连接。

虽然高强度螺栓连接的科学研究工作远未完成，但由于具有无可争辩的经济优点，尤其是对于工人的技艺要求大为降低，促使高强度螺栓在各种各样的钢结构中得到迅速应用。

在苏联，研究高强度螺栓的全面计划是由交通部科学技术委员会及工务总局会同拟定的，于1957年在桥梁科学研究所进行，同时并在各种建筑物开始使用。其中在1959年在苏联架设了第一孔用高强度螺栓连接的48米下承桁梁，活载重为H8（跨越 Тезы 河）。1958年列宁格勒起重运输装备工厂开始使用高强度螺栓于各种大型起重机的工地连接。

实践证明，在运营中的铁路桥梁使用高强度螺栓于维修加固工作，能收到相当大的经济效果，并提高桥梁的使用质量。

1961年交通部会同运输建筑工程部颁发了金属桥梁结构用高强度螺栓连接的设计技术准则。采用这种螺栓促使金属结构工程的技术及经济进步，同时在拼装式预应力钢筋混凝土结构中贯彻施工方法的工业化。

本书概括了由作者领导的在列宁格勒铁道工程学院桥梁科学研究所中进行的研究工作，并对国内外使用高强度螺栓的一些典型实例加以说明。

第一章 高强度螺栓连接的强度

1. 高强度螺栓连接的计算特点

在铆接中应力的传递是靠铆钉的剪切或承压，而在使用高强度螺栓的连接则与之不同，作用于接头或接点的力（由于外加荷载）全靠摩擦力来传递，这些摩擦力是由于螺栓的控制预拉力的影响而沿被连接杆件的接触面产生的。

参阅一个最简单的对接接头（图1）。显然，引起被连接板沿夹板面移动的力 S 的大小，与螺栓对于连接部份的压力，摩擦面数及摩擦系数有关。在极限情况下， S 应与摩擦力平衡，亦即具有下列等式

$$S = Nfm, \quad (1)$$

式中 N ——螺栓的预拉力；

f ——摩擦系数；

m ——摩擦面数（在图1中 $m = 2$ ）。

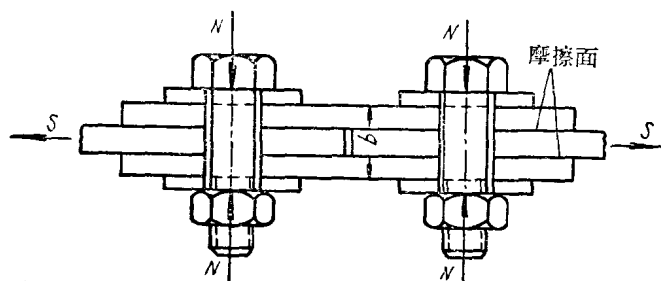


图1 接头图

b ——被连接板厚度

这里初次引用了关于“连接抗滑的可靠性”的新概念。在实际建筑物的杆件中最大的移动力应相当于杆件的负

荷能力，如以第一极限状态计算即等于

$$S = \omega_0 R_0,$$

式中 ω_0 ——杆件的工作面积；

R_0 ——杆件材料的计算强度。

当连接中不止一个螺栓而是 n 个螺栓，为使断面与靠摩擦传力的高强度螺栓连接有相等强度，则式（1）取下列形式

$$S = \omega_0 R_0 = N f m n, \quad (2)$$

这里 n ——杆件连接或半边拼接板上的螺栓数目。

当连接受外加荷载时螺栓并不受附加轴向应力与弯曲的影响，故其预拉力数值不变。但这样说仅在设计理想刚体构成的情况下方才正确，按实际情形远非如此：接点材料的物理及力学性能以及周围环境对张拉力的数值均有影响。建筑物在运营过程中，螺栓的预拉力不是固定的，并可能因各种因素的影响而降低：在法向应力的作用下被连接板及拼接板横向尺寸（厚度）的缩减；接点材料及螺栓材料的徐变；螺栓及结构物的不同膨胀系数；螺栓纹及被其夹紧的板束的挤压，以及拧紧螺母时所施加扭矩的不精确等。所有这些因素的影响均以引用工作条件系数 m_2 来考虑。如更考虑相应钢结构设计准则所采用钢结构一般工作条件系数 m_1 ，则高强度螺栓连接靠摩擦力所传递的计算力应等于

$$S = N f m n m_1 m_2. \quad (3)$$

试验证明钢结构连接用 40X 号钢制的高强度螺栓者工作条件系数 $m_2 = 0.84$ （参阅 §6），一般工作条件系数 m_1 取 0.9^* 。以 m_1 及 m_2 值代入公式（3），则桥梁及起重机的钢结构用高强度螺栓连接者其计算强度（荷载能力）等于

* 见《铁路、公路及城市桥涵设计规程》（CH200-62）。

$$S = 0.75 N f m n_0 \quad (4)$$

用 40X 号钢高强度螺栓连接的铝合金结构物由于有较小的弹性模量及较大的线膨胀系数，其工作条件系数 m_2 比钢结构的小些，等于 0.78，因此相应的计算强度等于

$$S = 0.7 N f m n_0 \quad (4')$$

从公式 (1) — (4) 可见摩擦力与杆件接触面积无关。考虑到用高强度螺栓的连接仅凭摩擦力传递作用力（外力），故将栓孔直径较螺栓直径加大 1—3 mm（减少接触面积）。这种情形屏除了螺栓受剪或受压的可能性，并稍简化工厂制造及安装工作，同时不要求孔眼的精确重合（如铆接所需者）。

用公式 (3) 所求得的光动力数值是最大的，在这情况下连接实际是刚性的，同时有下列正确关系

$$P < N f m n < S, \quad (5)$$

式中 P —— 外加荷载所引起的力；

S —— 使连接滑动的力。

在增加荷载时，连接发生数值相当于螺栓直径与栓孔之差数的颇大滑动（渐渐地或突然地），直至所有螺栓均受挤压为止（螺栓抗剪强度总是高于孔壁的支承强度）。同时摩擦力并不消失，摩擦力与孔壁支承力共同抵抗荷载所引起的力，亦即形成下列关系

$$P = n(N f m + 2 d \delta \sigma_T) > S, \quad (6)$$

式中 σ_T —— 屈服点；

d —— 螺栓直径；

δ —— 孔壁受压厚度。

在向连接继续增加荷载时，首先截面净面积的法向应力达到接点材料的屈服点而具有下列关系

$$P_1 = n(N f m + 2 d \delta \sigma_T) > \omega_0 \sigma_T. \quad (7)$$

最后当更增加荷载到破坏荷载 P_2 (这数值取决于连接截面净面积的拉断强度) 时, 将具有下列关系:

$$P_2 = \omega_0 \sigma_B < n(Nfm + 2d\delta\sigma_B). \quad (8)$$

为简化起见在公式(5)一(8)中不引用工作条件系数, 因不影响其原则上的正确性。考核用高强度螺栓连接在各工作阶段的情况, 可见杆件的滑动不独不引起连接破坏, 且因螺栓受压而增加其强度[公式(6)及(7)]。与铆接比较这是用高强度螺栓的很重要优点, 因为在铆接中由于铆钉切断将不可避免地导致结构物破坏。但对于重要建筑物, 如桥梁及起重机, 接点中绝对值微小的滑动可能引起大的变形, 比如主桁下垂, 就可能妨碍建筑物的正常运营。故计算用高强度螺栓连接时, 应严格遵守公式(4)以保证力之传递完全经由摩擦力。

在计算中实际应用公式(3)时, 应确定未知数 N 及 f , 以及材料的力学性能与其他各种因素的影响对 N 及 f 的关系。

2. 高强度螺栓预拉力数值及材料

连接中一个螺栓的能保证以摩擦力传力的预拉力数值, 可用式(2)决定, 如取 $n = 1$, 即

$$N = \frac{\omega_0 R_0}{f m} \quad (9)$$

在另一方面 N 值应取决于螺栓材料的强度条件。在拧紧螺母时螺栓受拉伸及扭转应力, 故强度条件可用众所熟悉的公式来表示

$$\sigma_{cA} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq R_{\sigma}, \quad (10)$$

式中 σ_{cA} ——螺栓截面受法向应力及扭转应力的复合应力;

σ ——法向应力；

t ——扭转应力；

R_{σ} ——螺栓材料的计算强度。

试验证明用 40X 钢制的螺栓，经过热处理后，螺纹精度为三级并加涂滑油者，采用下式已有足够的准确性：

$$\sigma_{ca} = \sqrt{\sigma^2 + 3t^2} \approx 1.35\sigma。$$

法向应力

$$\sigma = \frac{N}{F} = \frac{4N}{\pi d_1^2}，$$

式中 F ——螺栓截面经螺纹削弱后的面积，采用

$$F = \frac{\pi d_1^2}{4}；$$

d_1 ——经螺纹削弱后的螺栓直径。

将 σ_{ca} 及 σ 值代入公式 (10)，则得

$$\frac{1.35 \cdot 4N}{\pi d_1^2} \leq R_{\sigma}，$$

由此

$$N = \frac{\pi d_1^2 R_{\sigma}}{5.4} = 0.582 d_1^2 R_{\sigma}。 \quad (11)$$

对照强度公式 (9) 及 (11) 不难看出，如欲靠螺栓预拉力所引起的摩擦力来传力，则螺栓材料强度须较被连接材料强度大得多。例如 M22 螺栓用普通 3 号钢制造则用公式 (11) 计算的预拉力为

$$N = 0.528 \cdot 1.875^2 \cdot 2,000 = 4.1 \text{ 吨}$$

这样则摩擦力能保证传递的力仅为

$$S = 4.1 \cdot 0.45 \cdot 0.9 \cdot 0.85 = 1.41 \text{ 吨}$$

即比 2 号钢制的 23 mm 直径铆钉单剪强度小 4.5 倍〔用公式 (3) 计算， $m = 1$ ， $n = 1$ ， $m_1 = 0.9$ ， $m_2 = 0.85$ 及 $f =$

0.45〕。从此例可看出螺栓应用高强度钢制造。在国内外的情况亦确是如此。

因此用高强度钢制的螺栓遂名之为高强度螺栓，虽然更正确的名称应为预应力螺栓。但由于前一名称比较流行，本文即沿用之。

在国内普遍使用的螺栓的极限强度为 $130\sim 150\text{kg/mm}^2$ 。

国产钢料中ГОСТ 4543-57的低合金机械制造用钢最适宜于制造高强度螺栓。除含极希缺金属的低合金钢如含镍、钼等者外，最适当的是铬钢：40X，45X及50X与铬硅锰钢：25XГC及30XГC。

40X号钢(ГОСТ 4543-57)最为普遍使用，其极限强度为 100kg/mm^2 ，屈服点为 85kg/mm^2 ，具有良好淬透性。

为了提高40X号钢所制螺栓的极限强度，可用下列热处理方法：逐级加热至 $600\sim 750^\circ$ ，维持此温度20~25分钟，然后再加热至 $840\sim 860^\circ$ ，维持25~30分钟，淬油，以 $420\sim 450^\circ$ 温度回火，再维持1小时，然后置于 $18\sim 20^\circ$ 水中冷却。

实践证明，经这样热处理后，螺栓抗拉极限强度不小于 140kg/mm^2 ，亦即在计算中可采用为标准强度 R^H 。

这样热处理提高强度的钢无显著的屈服点，其条件屈服点取等于 $0.9R^H$ 。

假定拧紧螺栓时螺栓材料的复合应力不应超过0.8钢料屈服点，又匀质系数取0.95，则以极限强度来表示的螺栓材料计算强度 R_σ 为

$$R_\sigma = 0.8 \cdot 0.9 \cdot 0.95 R^H = 0.683 R^H。$$

以此值代入公式(10)则得

$$N = 0.4 d_1^2 R^H。 \quad (12)$$

用公式(12)可决定以不同适宜钢料所制螺栓的计算拉力。其中用40X号钢制经过热处理的高强度螺栓的预加拉力

按照表 1 采用。

表 1

螺 栓 公 称 直 径 (毫米)	预 拉 力 (吨)
18	13
22	20
24	24

具有这样预拉力的螺栓能靠摩擦力传递相当大的应力。例如一个 22 mm 直径螺栓，预加拉力 20 吨，则所承受的计算内力〔用公式 (4) 计算，取 $m = 1$ 〕等于

$$S = 0.75 N f = 0.75 \cdot 20 \cdot 0.45 = 6.75 \text{ 吨,}$$

比一个直径 23 mm 二号钢铆钉的抗单剪强度为高，尤其是如考虑到在工地连接，铆钉的数量须增 20%，则采用高强度螺栓可减少结构杆件接头的螺栓数目，并缩小拼接板及节点板的尺寸，因而改善结构。

根据研究，钢结构设计院建议用 ГОСТ 380-60 用铝脱氧的 5 号炭素钢来制造高强度螺栓。这种钢的原来极限强度为 50~60 kg/mm²。用这种钢制的螺栓经过热处理后，极限强度可提高到 110 kg/mm²。极限强度这样大的提高自不免引起材料塑性的过份减低。故不推荐 5 号钢制的高强度螺栓使用于重要结构物如桥梁、起重机等。

上文指出，西德在初期曾以一个螺栓代替一个铆钉，所用螺栓标号为 8G，其极限强度为 80 kg/mm²。以后考虑螺栓为独立性的连接方式，遂用标号 10K 的螺栓，其极限强度为 100 kg/mm²（热处理以前）*。在其化学成份方面此种螺栓钢料与苏联的 40X 钢极相近似，从下列化学分析的百分率比较即可看出。

* 照译原文。这强度应是热处理以后的。——译者

	炭	硅	锰	鉻	磷	硫	鎳
西德10 K鋼	0.37	0.32-0.34	0.63	0.82-0.83	0.017-0.03	0.019-0.025	微量
苏联40 X鋼	0.37-0.45	0.17-0.37	0.5-0.8	0.8-1.1	—	—	—

最近西德用标号 12K 的高强度螺栓，其极限强度为 120 kg/mm²，即与苏联 40X 钢制的高强度螺栓差不多。

高强度螺栓装入孔中有一空隙，故可用半精制螺栓以减省制造费用。钢结构最通用的螺栓头部及螺母为六角形者，其直径为 18，22，及 24 mm。螺栓的几何尺寸及公差应按 ГОСТ 7799-57 所规定，螺母则按 ГОСТ 5915-51（图 2）。

按规定 22 及 24 mm 直径螺栓的全长应为被连接钢钣束厚度加 40 mm，18 mm 直径螺栓则加 30 mm。

螺栓用圆钢制造，头部系热压而成。同时钢的组织有所改变，尤其是从栓杆过渡到头部范围内。故用 40X 号钢制的螺栓在模压后应以 830° 正火。为了区别于普通螺栓，高强度螺栓头部在模压时加三条与侧边垂直的线（参阅图 2）。

螺栓及螺母的螺纹应为公制，按照 ГОСТ НКПТ-32。螺纹精度——按 ГОСТ НКПТ-1252 的三级。螺纹应在热处理前用切削或滚压方法形成。用切削方法者螺杆尺寸应旋至螺纹的最大直径，用滚压者螺杆尺寸应为螺纹的中径。螺纹用滚压方法形成者较佳，因能改善螺纹质量，提高生产率并减低螺栓成本。

同样，高强度螺栓的半精制螺母亦用热压制成，然后对支承面加工（ГОСТ 1528-53），或用六角钢以自动机器切削及加工制成。

当拧紧螺母时，为了防止结构物钢钣的损伤，螺母及螺栓头下均置一圆垫圈使压力分布于较大面积。这种垫圈的尺

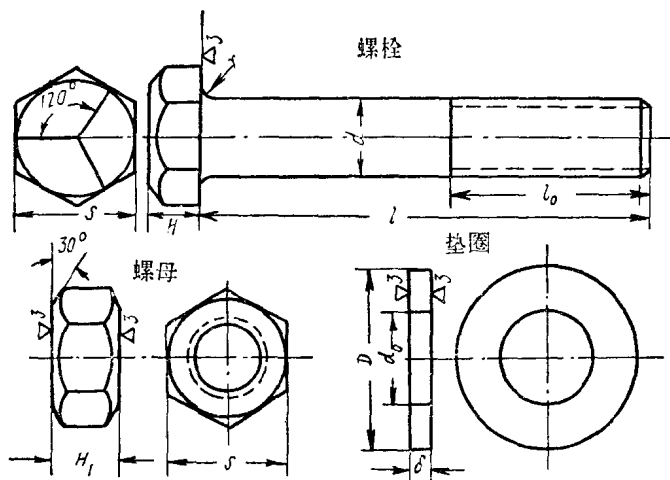


图2 高强度螺栓，螺母及垫圈

螺栓及螺母材料	机械制造用合金钢40X		
垫圈材料	炭素钢 Cr.3 或 40 X		
螺栓直径 d , mm	$18 \begin{pmatrix} +0.24 \\ -0.55 \end{pmatrix}$	$22 \begin{pmatrix} +0.52 \\ -0.55 \end{pmatrix}$	$24 \begin{pmatrix} +0.52 \\ -0.60 \end{pmatrix}$
孔眼直径 d_0 , mm	$20(+0.5)$	$24(+0.5)$	$27(+0.5)$
螺栓长度 l , mm	$b+30(\pm 1.5)$	$b+40(\pm 1.8)$	$b+40(\pm 1.8)$
	b ——连接板束厚度		
螺紋长度 l_0 , mm	按照ГОСТ7799-57		
头部高度 H , mm	$12 \begin{pmatrix} +0.43 \\ -0.7 \end{pmatrix}$	$14 \begin{pmatrix} +0.43 \\ -0.7 \end{pmatrix}$	$15 \begin{pmatrix} +0.43 \\ -0.7 \end{pmatrix}$
扳手边距 S , mm	$32(-1.0)$	$36(-1.0)$	$36(-1.0)$
过渡半径 r , mm	1	1	1.5
螺母高度 H_1 , mm	$14 \begin{pmatrix} +0.43 \\ -1.1 \end{pmatrix}$	$18 \begin{pmatrix} +0.43 \\ -1.1 \end{pmatrix}$	$20 \begin{pmatrix} +0.52 \\ -1.6 \end{pmatrix}$
垫圈厚度 δ , mm	$4(\pm 0.5)$	$6(\pm 0.5)$	$6(\pm 0.5)$
垫圈直径 D , mm	$45(\pm 1)$	$55(\pm 1)$	$55(\pm 1)$

注：括弧内数字表示允许公差。

寸可按表 2 采用，表中单位以毫米计。

表 2

螺 栓 直 径	18	22	24
外 径	45	55	55
孔 径	20	24	27
厚 度	4	6	6

垫圈用 40X 号钢制造并经过热处理，或用 C_T.3 号钢模压制成。在后一种情况时，为了提高硬度应先渗炭，渗炭厚度不小于 0.4mm，经缓冷后再淬火回火。经过热处理后垫圈硬度应为 H_{RC} 35-45。如有弯曲应不超过 0.3mm，垫圈不得有毛刺。

如在铝合金结构物中使用钢制高强度螺栓，为了防止电化腐蚀的可能性，螺栓及垫圈应镀锌或镀锡。

3. 螺栓预拉力与扭矩的关系

螺栓预拉力是由对螺母施加扭矩拧紧而发生的。为了使螺栓具有一定的拉力，则须确定用特种搬手测定的螺母扭矩与螺栓拉力之间的关系。

从应用力学中大家知道，外加扭矩 $M_{\kappa A}$ 应该克服：

a) 螺栓螺纹与螺母螺纹间摩擦力的扭矩 $M_p = N f_1 r$ ；

б) 产生螺栓预拉力 N （有效工作）的扭矩

$$M_n = N r \operatorname{tg} \alpha;$$

в) 螺母支承面摩擦力的扭矩 $M_T = N f_2 r_0$ ，即应成立下列等式：

$$M_{\kappa A} = M_p + M_n + M_T = N [r (f_1 + \operatorname{tg} \alpha) + f_2 r_0], \quad (13)$$

式中 f_1 ——沿螺栓螺纹及螺母螺纹面的摩擦系数；

r ——螺栓螺纹的平均半径；