

GB794 螺栓的破断原因和改进方法

沈国昇 李素芳
(上海螺钉厂) (上海机械学院)

【提要】 本文论述 GB794 布机螺栓在使用中破断的原因,指出疲劳源位置,证实主要是低应力疲劳破坏,同时在螺栓外形、选材、加工工艺等方面提出改进办法,以减少螺栓疲劳破坏,提高螺栓寿命。

按 1967 年国标制造的 GB794 螺栓,在布机上使用时发生大量破断,造成停机和疵布,严重影响生产,引起人们重视。1983 年初,我们对该螺栓的破断进行调查,并分析破断原因。先后三次在上棉九厂取来三批破断螺栓,共 145 件。破断情况见图 1 和表 1。

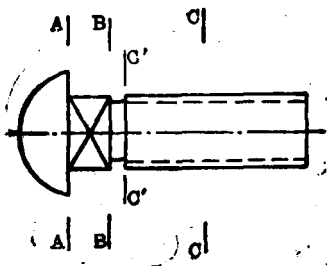


图 1 破断位置示意图

由断口分析可知,大部分为低应力疲劳破断,小部分是脆性正断,极少数破断是由夹杂物引起。现对其

原因和改进方法分析如下。

表 1 GB794 螺栓破断情况分析

| 批 数 | 破 断 处 | | |
|----------|------------|-----------|------------|
| | A-A 破断 | B-B 破断 | C-C 破断 |
| 第一批(51件) | 16(31.38%) | 6(11.76%) | 29(56.86%) |
| 第二批(43件) | 16(37.30%) | 2(4.70%) | 25(58.00%) |
| 第三批(51件) | 17(33.36%) | 4(7.84%) | 30(58.80%) |

一、GB794 螺栓破断分析

1. A-A 截面破断: 俗称脱头, 见图 2。断面上可见明显的贝纹花样, 它是疲劳裂纹扩展过程中留下的痕迹, 常见于低应力高周期的疲劳断口。从图 2 可见, 贝纹线扩展充

分, 几乎波及整个断面。所有贝纹线大致都围绕方颈的一个角点, 该角点就是疲劳源。疲劳裂纹就在该点萌生和发展, 从图 3、4 可见, 疲劳源区无夹杂物, 也无夹杂物留下的微坑。由于疲劳裂纹萌生后, 在循环载荷作用下, 上、下裂纹表面相互摩擦, 因而源区平整光滑。故可认为, 断裂实样在角点的疲劳源不是金属内部夹杂物引起的。



图 2 脱头实样断口

对断口作了电镜分析, 图 5 为疲劳纹, 图 6 为裂纹扩展解理花纹, 图 7 为河流的放大, 图 8 是准解理花纹。

从宏观断口和微观电镜分析, 根据疲劳纹存在条件^[1], 得出: (1) 方颈角点是疲劳源萌生地; (2) 疲劳纹萌生后即处于张开型状态, 破断面与张应力垂直, 整个断面呈皿状, 见图 9; (3) 由于宏观的疲劳条纹充分扩展,



图3 疲劳源低倍放大图(×56)

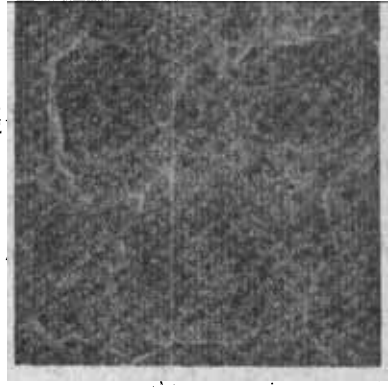


图6 解理花纹(×500)

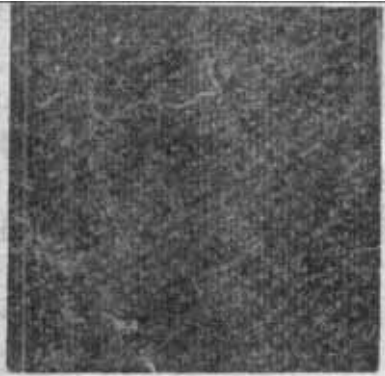


图4 平整、光滑的疲劳源区(×530)



图7 河流的放大(×1900)



图5 距角点约6.5毫米处疲劳条纹(×2200)

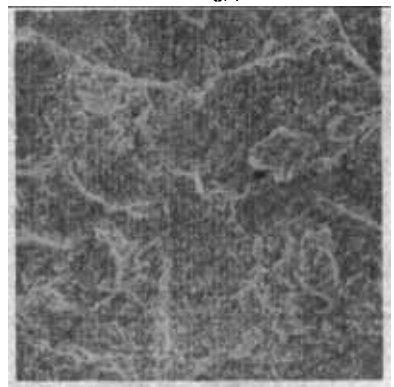


图8 准解理花纹,有撕裂棱(×500)



图9 皿状发展的裂缝

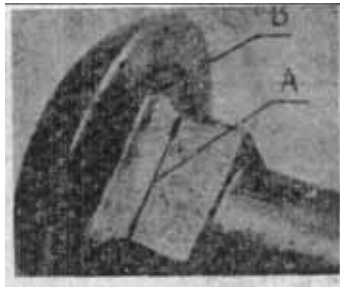


图10 GB794 的方颈

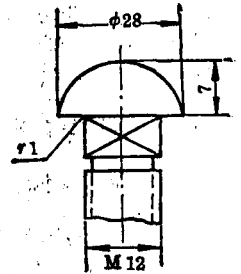


图11 M12 的主要尺寸

可推断这是低应力疲劳断裂。

图 10 是 GB794 螺栓的头部。按 1967 年国标，方颈四个角部没有要求圆角过渡。方颈和半元头部连接处有 $r=1$ 过渡。实际制造的螺栓在方颈四角和半圆头部结合处，留有尖锐的倾角(见图 10 B 处)。在使用中，一旦在角点形成疲劳源，由于疲劳裂缝的尖端 $r=0$ ，因此方颈四边的圆角再大，也不能提高螺栓疲劳寿命。从几何形状分析，方颈角点是三个面的交合，在受载时，该处应力集中系数肯定比四边处大，是当然的疲劳源萌生地。从金属压力加工工艺看，方颈四角上无圆角过渡，对变形金属流动也极为不利。从图 10 可见，A 处尺寸最小，显然是因为角部金属流动受阻造成的。因此，角部用圆角过渡，用圆角和半圆头部结合，在金属压力加工工艺上是合理的。且对提高螺栓疲劳寿命有极大作用。

GB794 的头形，主要有三种形式：德制 Din、必加诺和我国的 GB794。头部的各部分尺寸对方颈和方颈结合处的应力集中系数有很大关系。我们认为，对此应作光弹分析，确定一个在工艺、受力、使用上都能顾及的头型(目前无法进行)。为说明问题，引用资料^[2]对 T 型头部的分析结果。由图 11 可知， $D=28$ ， $d=12$ ， $m=7$ ， $r=1$ 。故 $D/d=2.3$ ， $r/d=0.083$ ， $m/d=0.583$ 。根据资料 [2] 图 104， $r/d=0.075$ ，查得 $\sigma_{max}/\sigma=8.3$ ，由图 105， $r/d=0.100$ ，查得 $\sigma_{max}/\sigma=7.7$ ，按线性插入得 $r/d=0.083$ 时， $\sigma_{max}/\sigma=8.11$ 。可肯定在方颈四角及其与头部结合处，其

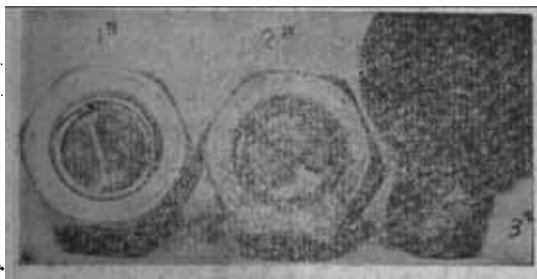


图 12 C-C 截面破断实样

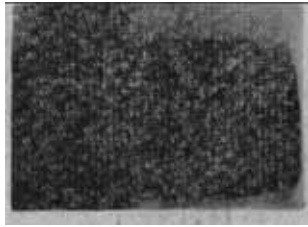


图 13 点源的疲劳断口

$\sigma_{max}/\sigma > 8.11$ 。如将上述参数改为： $D=27$ ， $m=8$ ， $r=2$ ，则从资料^[2]可得出 $\sigma_{max}/\sigma=5.8$ 。应力集中系数大大降低。可见，用光弹

分析寻找合理头型，以减小应力集中系数，提高疲劳寿命是可能的。

2. C-C 截面破断：这种破断占坏螺栓的一半以上。图 12、13 是破断实样。从图 12 的断口实样可见 1*、3* 螺栓在双向交变平面弯曲载荷下工作。它们的最后破断区在中央。3* 的最后破断面积大于 1*。因此，可知破断时 3* 的当量拉应力大于 1*。3* 的最后断裂面积约占断面 $1/3$ 强。2* 为交变单向弯曲载荷下的断口，最后破断区在断面的一边，占整个断面 $1/2$ 弱，可见其当量轴向拉应力较低。这三件螺栓的疲劳源为线状，周向可见疲劳沟线。故可认为，螺纹 C-C 截面的破断是低应力疲劳破断。这和头部 A-A 面破断性质一致。图 13 是点源疲劳断口，宏观可见疲劳条纹。最后断裂口约占 $1/6$ ，有剪切唇。

对 GB794 螺栓在螺纹处破断原因有不同看法。资料 [3] 指出：主因是由于螺纹上有缺陷，主要是裂口，致使应力集中而产生疲劳断裂。并介绍了部分缺陷情况。如图 14，主要有齿顶、齿侧面存在裂口或折叠，较严重的是缺陷出现在齿谷。

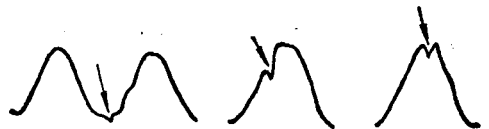


图 14 螺纹的加工缺陷

我们认为：齿顶、齿侧上的缺陷不是造成螺纹处破断的主要原因，因为它们在螺栓受载后，不会处于二向拉应力状态，不具备裂缝扩展应有的应力条件。从实样断口分析，也从来没有发现断面延续到齿部。应该说，齿谷的缺陷是较严重的。但缺陷不同于疲劳

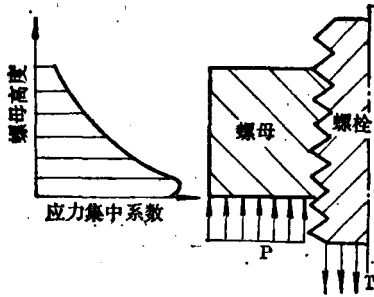


图15 螺栓、螺母受力分析

裂缝，其前端 r 较大。且被发现的缺陷在尺寸上较小，深约0.04毫米(见资料[3]图35)。因此，如它不出现在和螺母结合的螺纹中，也不是破断的主要原因。

当螺栓螺母结合体受力后，在螺母高度范围内，螺栓螺纹上应力集中系数是不均匀分布的。从图15可看出，沿螺母高度上应力集中系数有一极大值，它出现在螺母受压面第一、二扣处。当受载时，螺母受压，螺栓受拉，所以破断发生在螺栓上。使用中的GB794螺栓，首先在具有最大应力集中系数的螺纹底部，周向材料性能最差或有宏观、微观缺陷的地方萌生疲劳源，继而发展，直至破断，这是C-C面破断的主要原因。实际破断和上面分析一致。破断面总是发生在螺母受压面第一、二扣上。

螺纹是多缺口构件，其应力集中状况比单缺口构件大大改善。螺纹处破断原因不能简单地讲是缺口效应。螺纹处实际应力集中系数，由两部分叠加而成。一是轴向载荷引起的应力集中；二是螺母螺栓结合体在螺纹上引起的应力集中。根据资料[4]，当牙型为 60° 时，这个叠加应力集中系数为6.5。实际使用时，由于螺母总有塑性变形，因而应力集中系数比6.5要低。

根据GB794螺栓大量断口宏观分析，最后破断区面积最大为断面的 $\frac{1}{3}$ (对M12而言)。作如下定量计算：设20*钢退火后冷轧， $\sigma_b = 50$ 公斤/毫米²，破断时当量载荷 $P = (3A_{\text{当}}/5) \sigma_b = 30A_{\text{当}}$ 。其中， $A_{\text{当}}$ 为螺栓当量受

载面积。工作时当量应力为30公斤/毫米²。对20*钢退火， $\sigma_s = 0.6\sigma_b$ ，即 $\sigma_s = 30$ 公斤/毫米²。由此可见，GB794布机螺栓用20*钢经冷锻成型后再作去应力退火处理，在使用时工作应力在 σ_s 附近，就无安全系数可言，其大量破断也就不可避免。因此，对GB794螺栓应作热处理强化。

由上分析可见，如何减小应力集中系数的不均匀分布，是防止螺纹处破断的重要问题。我们认为下面各种方法是可取的：(1)选用更高强度材料或用热处理强化。(2)用两只扁螺母同时上紧，既可防松又可改善应力集中系数的不均匀分布。(3)采用异型螺母(见图16)，估计可使最大应力减小30%，用(b)型应加厚垫圈。(4)选用低弹性模量材料制造螺母。

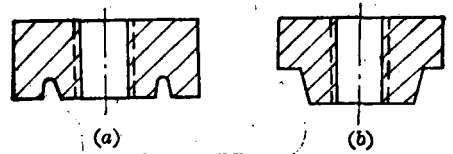


图16 两种异形螺母

3. B-B截面破断：见图17，其左边一件呈皿状断口，说明断面和最大主应力线垂直。右边一件呈疲劳断口。中间一件断裂发生在末牙细纹处，即图1 C'-C'处。

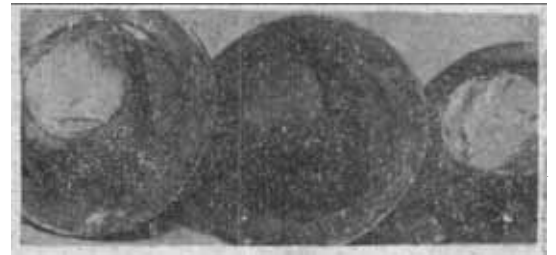


图17 B-B截面破断试样

按1967年国标螺杆和方颈结合处无圆角过渡，在该处存在应力集中。解决办法是用圆角过渡，并把方颈角制成 45° ，见图18。

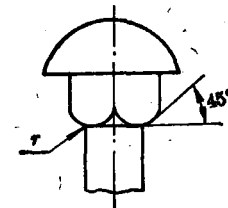


图18 45°方颈角

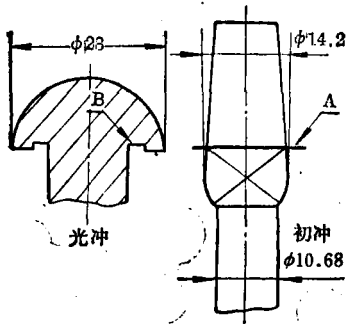
多缺口构件的最大应力集中系数出现在多

缺口的两端。对螺栓来说，显然出现在末牙螺纹处。因此，极少量螺栓在该处破断是可以理解的。

二、GB794 螺栓加工工艺和其抗疲劳性

GB794 螺栓的加工工艺是：退火线材→剪切→初冲→光冲→退火→轧牙。存在问题如下：

1. 折叠：GB794 螺栓在124双击冷镦机上生产。图 19



是光冲、初冲坯料图。可见，初冲时有飞边，如A所示。在光冲成型时，飞边失落、或打入头部而造成折叠，如

图 19 光冲初冲坯料图 B所示。图 20 是 B 处折叠的放大照片。显然，这是在头部和方颈连接处的一条裂缝，长约 1.5 毫米。它的存在使螺纹使用寿命大大下降。

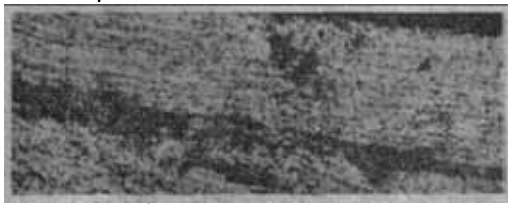


图 20 由A处飞边造成 B 处折叠

2. 冷加工裂缝：GB794 螺栓在冷成型时，金属发生剧烈流动。从图21光冲后坯料电镜照片上可见，在流线之间顺流线方向夹有许多微裂纹，长约 0.0241 毫米，说明金属在塑性变形时发生分离。因此，GB794 螺栓的头部带有一定密度的微裂纹。这些微裂纹在退火处理后仍存在。对图 9 所示实样的电镜观察发现其裂纹更多，更明显，特别是裂纹尖端附近区域。我们认为，这些裂纹大部分是原冷加工裂纹在外载荷作用下扩展起来

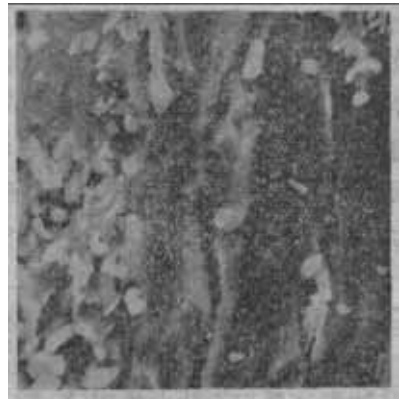


图 21 冷镦后头部的微裂纹(×3000)



图 22 主裂缝转折处周围的微裂纹(×400)

的。它将诱发主裂缝的扩展，降低螺栓疲劳寿命。图 22 是主裂缝转折处的周围微裂纹分布照片。可对疲劳裂缝的扩展作如下推测：在角部形成疲劳源后，疲劳裂缝的扩展即受三个因素控制：(1)裂缝尖端区域各点应力状态；(2)裂缝尖端区域微裂纹分布情况；(3)碳化物分布。头部受载后，埋藏在金属流线之间的微裂纹，根据各自所处的应力状态，或静止，或扩展。在疲劳裂缝尖端附近区域内的微裂纹，都可诱发裂缝扩展。这时，要根据哪一条微裂纹所处的应力状态对裂缝的扩展有利，裂缝便与这一条微裂纹串起来。因而，主裂缝有可能跳跃到上边或下边微裂纹上去。裂缝扩展是在裂纹体内进行的，所以具有跳跃式前进的特点。图 22 就是这种情况的表现。

3. 内部碳化物的影响：从图 21、22 还可看出冷成型后，碳化物沿金属变形流线分布。

在碳化物和基体之间有“脱开”的情况，即存在裂纹或空洞。因而疲劳裂缝沿碳化物和基体的界面发展，一旦受到碳化物的阻碍，它便向周围应力状态最有利其发展的一条微裂纹跳跃，从而摆脱束缚，释放形变弹性能，转化为表面能。由此可见，GB794 螺栓冷成型后，随金属流线分布的碳化物对疲劳裂缝的扩展基本上不起阻碍作用，甚至还有利于扩展。

4. 冷镦变形程度的安排：从图 19 可见，在初冲工序中冷镦变形程度较小，主要是方颈处预成型。而光冲工序，变形程度极大。由图 19 可得：初冲变形程度为 43.43%，光冲变形程度为 75%。

从镦头高度分析，初冲变形程度 23.37%，光冲为 73.1%。因此，光冲工序金属剧烈流动，造成金属流线之间夹有微裂纹，使螺栓抗疲劳性能变差。

由上面分析得出：GB794 螺栓生产工艺有不合理的地方，有必要作进一步研究。

三、安装预紧力和螺栓的疲劳寿命

螺栓的疲劳寿命和单件螺栓的抗疲劳性能有关，且和被连接件、预紧力、受载情况等密切相关。安装预紧力对螺栓的疲劳寿命有很大影响，适当的预紧力将有效地提高螺栓使用寿命，较提高螺栓单件强度或更换材料，有更大经济效益。探讨如下：

布机工作时，梭子以 220 次/分的频率往复运动。整台布机包括 GB794 螺栓都处于振动之中，这种振动可认为是一种循环载荷，各零部件固定螺栓的载荷形式随其安装位置而各不相同，或静载叠加轴向拉-压，或静载叠加径向弯曲，其失效形式都为疲劳破坏。据资料[5]： $P/Q = 1 + K_b/K_p$ (式中： P 为零件外载荷； Q 为螺栓预紧力； K_b 为螺栓刚度； K_p 为零件刚度)。

当外载荷 P 满足方程时，被螺栓联接的零件，其相接触的表面发生临界分离。这是

螺栓对循环外载荷敏感和不敏感的转折点。当交变的外载荷小于满足上述方程的 P 时，螺栓对外载荷不敏感。反之，则螺栓对外载荷敏感。图 23 表示螺栓在预紧力作用下的受载曲线。图 24 是不同预紧力作用下，螺栓受到不同的交变应力。

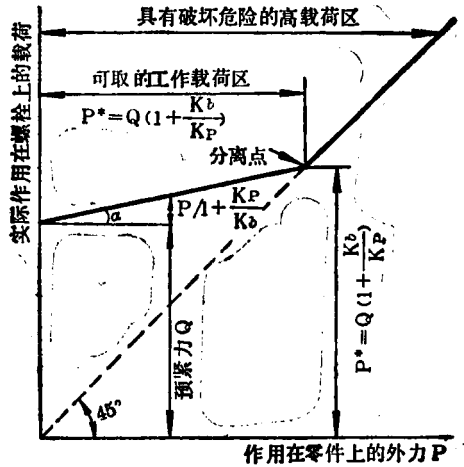


图 23 外载荷和螺栓所受的实际载荷

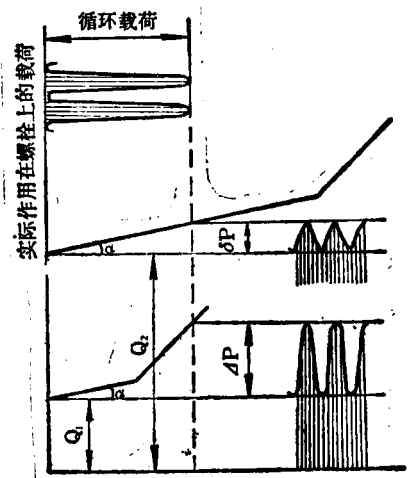


图 24 不同预紧力时螺栓受载

用断裂力学观点，缺口构件的疲劳寿命可分二相处理，即 $N_f = N_i + N_p$ (式中： N_i 为疲劳裂纹生成相； N_p 为疲劳裂纹传播相； N_f 为缺口构件的疲劳寿命)。根据资料[6]：

$$N_i = n / (\Delta K_I / \sqrt{\rho})^n$$

和试验条件有关的材料参数 n 随缺口半径 ρ 增大而增大。 N_p 可通过 Paris 公式积分

得到: $N_a = \int_{a_1}^{a_2} da/c(\Delta K_1)^n$, 积分上、下限是指

裂纹扩展的第 I、II 阶段。可见, 不管是疲劳裂纹萌生还是疲劳裂纹扩展, 都和 ΔK_1 有关。减小 ΔK_1 , 使 N_i 、 N_b 上升, 结果 N_f 提高。由于螺栓预紧力的提高, 使螺栓受到的循环载荷由 ΔP 下降到 δP , 即 $\Delta\sigma$ 下降, 见图 24。根据裂纹前端应力场强度因子和名义应力的关系得出 $\Delta K_1 = Y\Delta\sigma\sqrt{a}$, 其中 Y 为裂纹几何效应因子, a 为裂纹半长。显然, $\Delta\sigma$ 减小, ΔK_1 也减小, 构件疲劳寿命提高。

为了从理论上估算预紧力大小, 对断口作定量分析。但因受条件限制(低强度钢的微观疲劳纹在疲劳裂纹扩展阶段, 并不连续存在, 因此无法得到“裂纹长度—单位长度的疲劳条纹数”之间的实验曲线, 仅根据微观疲劳纹发现点和疲劳源距离作定量计算), 下面分析仅供参考。

由图 5 测得, 疲劳条纹间距 $\mu \approx 0.0018$ 。根据 Paris 公式, $\mu = C(\Delta K)^n$, 式中 C 、 n 都是和试验条件有关的材料参数, 由资料[7], 取 $C = 10^{-9} \sim 10^{-10}$, $n = 3.5$, 得 $\Delta K = \sqrt[n]{\mu/C}$

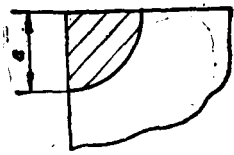


图 25 角部裂纹

$= 61.27 \sim 118.27$ 。由资料[8], 对角部裂纹有: $K \approx \sigma\sqrt{2a}$, 见图 25。

$\therefore \Delta K = \Delta\sigma\sqrt{2a}$ (a 指裂纹尖端和角点距离,

实测 $a \approx 6.5$ 毫米)。得 $\Delta\sigma \approx 17 \sim 32.8$ 。取 $\Delta\sigma = 25$ 公斤/毫米², 如用 8.8 级强度的螺栓, 其 $\sigma_s = 64$ 公斤/毫米², 则 $[Q + P/(1 + K_b/K_s)] < 64A$, Q 为预紧力, P 为作用在被连接件上的外力, $P = \Delta\sigma A = 25A$, A 为螺栓截面积。 K_b/K_s 由于机架是铸件, 近似看为弹性模量之比, 取 0.8 (实际要大一些)。 $\therefore Q < 50.11A$, $Q/A < 50.11$ 。

故建议预紧力在螺栓上造成的拉应力在 40~48 公斤/毫米, 过低可能失去对振动冲击的抑制作用, 过高可能超出 σ_s , 造成低周大应变疲劳, 反而减低螺栓使用寿命。

在实际使用中, 预紧力随载荷循环而减小。这种减小是多种因素造成的, 如机器振动, 零件结合表面粗糙, 受载后辗平造成松弛; 螺栓实际受载超过其 σ_s 而发生轴向伸长, 造成松弛; 没有采取防松措施, 防松措施不可靠等。为防止预紧力减小, 有以下几种方法: (1) 使被连接件结合表面尽可能光滑、平整; (2) 采用可靠防松措施; (3) 采用多次上紧; (4) 提高螺栓材料的 σ_s 。

四、GB794 螺栓的选材

选材对使用寿命起决定作用。从提高经济效益的角度讲, 材料的冷锻工艺性要好, 成本要低。使用寿命要和布机维修周期结合起来考虑。被推荐使用的有 35* 钢和 20MnTiB 钢等, 被推荐的热处理工艺是低马处理, 或调质处理。下面是我们的看法。

1. 35* 钢的含碳量较大, 变形抗力大, 冷作硬化指数大, 冷锻工艺性差。成型后, 如作马氏体处理, 将得到孪晶、位错混合状的马氏体。其中孪晶马氏体在孪晶交接处及其内部有显微裂纹。这些裂纹的存在, 或诱发疲劳裂纹的扩展, 或成为疲劳源, 对螺栓的抗疲劳性能不利。而且, 由于 35* 钢作马氏体处理, 其 σ_s 很高, K_{Ic} 却很低^[9]。根据 Peterson^[21] 推荐, 疲劳缺口敏感度 $q = (K_f - 1)/(K_t - 1)$ (其中 K_f 为疲劳缺口应力集中系数, K_t 为缺口理论应力集中系数)。 q 值越大, 材料对缺口越敏感, 抗疲劳性能也就越差。35* 钢调质处理, 据资料[10]表 2~4, q 值高达 0.64~0.66, 而低碳马氏体的 q 值为 0.33~0.35。故 35* 钢作 GB794 螺栓的材料是不够理想的。

2. 20MnTiB 钢, 是低马处理用钢, 其强度、塑性都很好。由于微量 B 的存在, 显著提高了淬透性, 特别适用于大截面零件作低马处理, 但 GB794 螺栓的截面较小 ($\phi 10.77$ 毫米), 易淬透。我们认为, GB794 螺栓的强度要求不很高, 只要达到 8.8 级就可以了。从冷锻工艺看, 因强化元素 Mn 和 Ti 的存

在,其变形抗力和硬化指数都较大。曾对20MnTiB钢作墩粗试验,结果表明其变形前后的硬度变化是20*钢的2倍。

3. 20*钢如不作热处理强化,其强度等级为4.8,是不能胜任布机上的振动载荷的。1979年上海螺钉厂对20*钢采用低马处理,效果较好。低碳钢来源广,成本低,低马处理后其强度、韧性都很好,较采用合金钢有更大的经济效益。但20*钢低马处理还有不足之处。

4. 我们推荐采用ML15Cr钢,主要理由是:(1)能提高淬透性,从图26中15*钢和25*钢的实验曲线^[10]可以推知:20*钢低马处

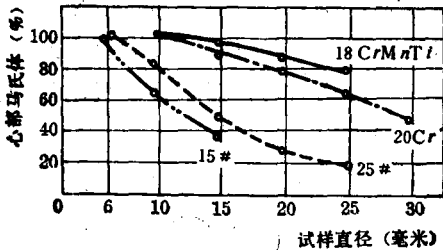


图26 几种钢的心部马氏体和其直径的关系

理后心部马氏体含量在70%左右,尚有30%非马氏体。由于加入铬可增大奥氏体过冷稳定性,细化组织,提高淬透性。所以ML15Cr钢淬火后心部马氏体百分数含量曲线在15*钢实验曲线之上。且Cr对提高冲击韧性,脆性转化温度都有较好作用。从冷墩工艺角度看,加入Cr对铁素体强度极限作用不如其他元素如Mn、Ti显著。因而变形抗力变化不大,冷墩工艺性好。(2)ML15Cr钢含碳比20*钢低,低马处理后硬度相对较低,有可能轧制皱纹,利用表面残余压应力来抵抗疲劳破坏。(3)ML15Cr钢常用来制造工作速度高,断面不大,心部韧性高的零件,如曲柄销,联轴节等。故用它制造GB794螺栓较理想,且成本也较低。

五、GB794 螺栓的热处理

ML15Cr钢低马处理后,显微组织是二

相的,即少量铁素体加板条状马氏体。根据前面分析,GB794螺栓冷成型后作热处理强化可提高承载能力和使用寿命,还可弥合冷成型造成的微裂纹。

我们选用低马处理的原因是:(1)低马组织的断裂韧性比其他组织高。(2)低马处理后,原来的变形流线基本消失,代之的是板条马氏体组织。疲劳裂纹扩展时,特别当板条束和裂纹垂直时,将受到韧性很好的板条状马氏体阻碍。(3)低马体没有微裂纹。(4)低马体的缺口敏感性小。

六、结 论

我们认为GB794布机专用螺栓在使用中破断的主要原因是:(1)1967年国标中GB794螺栓的结构和外形不符合抗疲劳设计要求。(2)冷墩工艺不合理,冷墩成形后,存在折叠和冷应力裂纹。(3)经去应力退火的GB794螺栓本身强度不够,疲劳寿命低。(4)配用的螺母,无卸载结构。(5)没有适当的预紧力和防松措施。

对GB794螺栓,我们认为以采用中强度钢,同时作抗疲劳设计为好。

本文得到上海交通大学蔡泽高教授,上海机械学院李萍等同志的支持和帮助,表示感谢。

参 考 资 料

- [1] 上海交通大学编,《金属断口分析》,P.180.
- [2] R. E. Peterson,《Stress Concentration Design Factor》,P.122~123.
- [3] 中国纺织机械厂,《低碳马氏体处理应用于布机螺栓的试验》。
- [4] R. B. Heywood,《Designing By Photoelasticity》.
- [5] R. B. Heywood,《Designing Against Fatigue》,P.256.
- [6] 李庆生,“缺口疲劳的弹性断裂力学分析”,《太原工学院学报》,1982,NO. 4.
- [7] 《金属机械性能》,机械工业出版社。
- [8] 《Engineering Fracture Mechanics》,1972. Vol. 4, PP175~179.
- [9] H. O. Fucks,《Metal Fatigue In Engineering》.
- [10] 西安交大金属材料及强度研究室,《低碳马氏体及其用钢》。