

# 冷轧扭钢筋混凝土构件 技术规程应用培训教材

张承起 主编

T11756



中国建筑工业出版社

# 冷轧扭钢筋混凝土构件 技术规程应用培训教材

张承起 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

冷轧扭钢筋混凝土构件技术规程应用培训教材 / 张承起主编.

北京: 中国建筑工业出版社, 2008

ISBN 978-7-112-10047-7

I. 冷… II. 张… III. 冷轧—钢筋混凝土结构—结构构件—  
规程—技术培训—教材 IV. TU756-65

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 055405 号

本书围绕冷轧扭钢筋混凝土构件技术规程, 介绍冷轧扭钢筋的基本性能及其应用、混凝土结构用钢筋选择等, 可供土建结构设计、施工和钢材生产技术人员等阅读。

\* \* \*

责任编辑: 蒋协炳

责任设计: 赵明霞

责任校对: 安 东 王雪竹

冷轧扭钢筋混凝土构件技术规程应用培训教材

张承起 主编

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京天成排版公司制版

北京市书林印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 4 字数: 100 千字

2008 年 6 月第一版 2008 年 6 月第一次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 14.00 元

ISBN 978-7-112-10047-7  
(16850)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 序 言

冷轧扭钢筋是由我国科研人员自主研发的一种对Ⅰ级盘圆钢筋进行冷轧扭转加工挖潜实用节材深加工钢筋。经过20多年的不断研究和创新,其断面由扭转扁平型发展到现在的扭转方型,应用范围也由原来受弯板类构件受力主筋、分布筋扩大到焊接钢筋网领域。新版行业标准《冷轧扭钢筋》JG 190—2006和《冷轧扭钢筋混凝土构件技术规程》JGJ 115—2006的修订完成发布和实施,为冷轧扭钢筋的推广奠定了良好的基础。

专业技术培训是加速科技成果转化先进生产力的重要环节,是促进科技成果推广应用的有效方法,是加速科学技术进步,推动经济建设和社会发展的具体实践,是深入贯彻落实科学发展观,建设创新型国家的根本要求。新版行业标准《冷轧扭钢筋》JG 190—2006和《冷轧扭钢筋混凝土构件技术规程》JGJ 115—2006已颁布实施了,为了让广大设计人员和生产技术人员全面系统地掌握冷轧扭钢筋的性能,冷轧扭钢筋混凝土构件技术规程编制组的同志们结合标准和技术规程的修订工作,总结科研人员多年来在冷轧扭钢筋的材料性能和结构性能试验、结构设计选用和纵向受力钢筋配筋率等研究成果,编辑完成了《冷轧扭钢筋混凝土构件技术规程应用培训教材》。这是一部实用的冷轧扭钢筋标准和应用技术规程宣传贯彻培训教材,希望相关人员认真学习和掌握其生产和设计使用方法,为冷轧扭钢筋更好地推广应用,为建设资源节约型、环境友好型社会作出应有的贡献。

我们对所有参加冷轧扭钢筋研究工作的相关科研人员和标准编制组的同志表示深深的谢意,感谢他们为冷轧扭钢筋标准和应用技术规程发布和实施所付出的努力。

建设部科技发展促进中心

2007年11月

# 目 录

## 序言

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 编者的话.....                            | 1  |
| 冷轧扭钢筋基本性能及其应用.....                   | 6  |
| 混凝土结构用钢筋选择 .....                     | 29 |
| 关于执行《金属材料 室温拉伸试验方法》标准若干问题 .....      | 39 |
| 冷轧扭Ⅲ型焊接钢筋网和绑扎钢筋网混凝土平板静力结构性能的试验 ..... | 42 |
| 650 级冷轧扭钢筋预应力混凝土圆孔板试验 .....          | 47 |
| 受弯构件纵向受力钢筋的配筋百分率的讨论 .....            | 53 |

## 编 者 的 话

冷轧扭钢筋是一种经冷加工后的钢种,它是由 HPB235(Q235)热轧细直径圆钢经冷拉、冷轧和冷扭后一次成型的钢筋——冷轧扭钢筋。在保留原截面(母材)中心区域晶体的相对稳定和平衡(弹性核心区域),提高材质强度和保证足够延性的前提下:从截面成型的尺寸、比值、节距和截面面缩率等几何参数的定量,经数千个不同样品试件,优选出符合四项材质(强度、屈服值、伸长率和冷弯)标准、通过可靠度及 95%保证率分析,并应用于板、梁构件作破坏性检验,其检验结果是:

配置各种(I、II、III型)冷轧扭钢筋的构件,当达到破坏时,构件不是立即“折断”,而它是一种在破坏前有一段延续时间的明显变形和先兆的非常典型的属“延性破坏”特征的构件。

### 一、冷轧扭钢筋技术开发、发展、提高和完善

从 1979 年冷轧扭钢筋的开发北京 2 号国际航站楼工程建筑面积达 50 万  $\text{m}^2$  的应用,同时在全国范围内,包括北京、上海等 10 多个省市相继编制了地方标准和规程,又于 1993 年在浙江宁波召开了全国首届冷轧扭钢筋的应用技术研讨会。从 1997 年、1998 年相继在全国两标准《冷轧扭钢筋混凝土构件技术规程》JGJ 115—97 和《冷轧扭钢筋》JG 3046—1998 批准发布至今已有 28 年的历史,在全国这样一个大生产、应用的场地,数以万计的建筑工程的应用,在全国已得到了认可。并经对全国生产厂家的质量抽检,无一质量失控。冷轧扭钢筋技术的应用已为国家及企业创造了较大的综合性效益。

此次《冷轧扭钢筋》JG 190—2006 及《冷轧扭钢筋混凝土构件技术规程》JGJ 115—2006 行业标准的修订发布,又已历时 20 个年头,相对原标准有了显著的发展、提高和完善。表现在材质的改性上、可成型上、可焊性上和系列化产品上。

#### ● 改性上

在保证高强度下,550 级 I、II、III 型材性的延性(伸长率)均有了显著的提高,II 型和 III 型伸长率为  $A \geq 10\%$  及  $12\%$ 。而 I 型,从强度 580MPa 降至 550MPa,则原有伸长率  $A_{11.3} \geq 4.5\%$  必将有相应的提高。从工程应用而言,当  $A \geq 5\%$  时,可认为该品种应算为塑性材料。650 级 III 型预应力冷轧扭钢筋的伸长率  $A_{100} \geq 4\%$ 。超静定的板、次梁构件的结构设计,均可考虑塑性变形。

#### ● 加工成型上

550 级 III 型冷轧扭钢筋可作弯钩,可作梁、柱内的箍筋。

#### ● 可焊性上

550 级 III 型冷轧扭钢筋可作点焊的冷轧扭钢筋网片。

#### ● 系列化产品上

\* CTB550 强度级别有三种

I 型冷轧扭钢筋，其标志直径有 6.5、8、10、12 四种；

II 型冷轧扭钢筋，其标志直径有 6.5、8、10、12 四种；

III 型冷轧扭钢筋，其标志直径有 6.5、8、10 三种。

\* CTB650 III 型预应力冷轧扭钢筋，其标志直径有 6.5、8、10 三种。

二、有关冷轧扭钢筋性能的几个重要的背景参数

1. 极限抗拉强度值

冷轧扭钢筋属无明显屈服点的钢筋，其强度标准值系根据极限抗拉强度来确定，并具有 95% 的保证率，据样本数 2537 件试样试验统计结果比较如表 1。

| 冷轧扭钢筋抗拉强度(N/mm <sup>2</sup> ) |       |       | 表 1    |
|-------------------------------|-------|-------|--------|
| 原标准(JG 3046—1998)             |       |       | 591.78 |
| 修订标准<br>(JG 190—2006)         | 550 级 | I 型   | 577.00 |
|                               |       | II 型  | 577.88 |
|                               |       | III 型 | 553.00 |
|                               | 650 级 | III 型 | 658.10 |

2. 拉断伸长率

为便于与其他钢筋的伸长率作比较，对原始标距取用 A，即以 5 倍钢筋标志直径为标距试验结果的统计见表 2(取用样本数 2329 件)。

| 冷轧扭钢筋拉断伸长率 A <sub>11.3</sub> 、A、A <sub>100</sub> (%) |                          |       | 表 2   |
|------------------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|
| 原标准(JG 3046—1998)(A <sub>11.3</sub> )                |                          |       | 4.516 |
| 修订标准<br>(JG 190—2006)                                | 550 级(A)                 | I 型   | 9.12  |
|                                                      |                          | II 型  | 10.87 |
|                                                      |                          | III 型 | 12.91 |
|                                                      | 650 级(A <sub>100</sub> ) | III 型 | 4.06  |

从上表看出，除 650 级预应力冷轧扭钢筋外，550 级的 I 型 A=9.12%，II 型 A=10.87%，III 型 A=12.91%，故三种型号的冷轧扭钢筋从 A=9% 提高到 A=12%，即增幅达 30% 以上。

3. 最大拉力下总伸长率

冷轧扭钢筋最大拉力下总伸长率 A<sub>gt</sub> 试验结果，均采用 σ-ε 曲线图按确定的放大倍数测算方法求得(取用样数 469 件)。

| 冷轧扭钢筋最大拉力下总伸长率 A <sub>gt</sub> (%) |       |       | 表 3    |
|------------------------------------|-------|-------|--------|
| 原标准(JG 3046—1998)                  |       |       | 1.0047 |
| 修订标准<br>(JG 190—2006)              | 550 级 | I 型   | 1.104  |
|                                    |       | II 型  | 1.868  |
|                                    |       | III 型 | 2.286  |
|                                    | 650 级 | III 型 | 0.677  |

从表 3 可知, 550 级Ⅲ型冷轧扭钢筋的  $A_{gt}$  已达到 ISO 国际标准对无明显屈服点钢筋  $A_{gt} \geq 2$  的要求。

#### 4. 冷轧扭钢筋的冷弯

由各地做出  $180^\circ$  弯曲试验结果表明, 当弯心直径为  $3d$ , 弯转角度  $180^\circ$  时的冷轧扭钢筋的表面均无裂纹、鳞落和断裂等现象, 这说明冷轧扭钢筋的变形能力良好, 并达到规定要求。

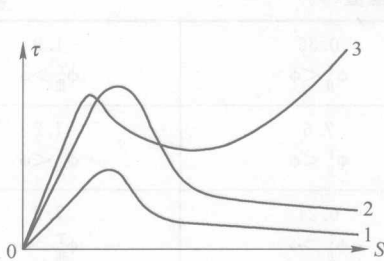
#### 5. 冷轧扭钢筋与混凝土的粘结性能

以热轧带肋钢筋、光圆钢筋 (HPB235)、冷轧扭钢筋 (550 级 I 型) 与混凝土粘结性能做对比试验。

从对比试验的图 1 中, 可以清楚看出: 冷轧扭钢筋兼有带肋钢筋那样高粘结强度 (粘结强度相近, 略小于变形钢筋), 又兼有光圆钢筋那样与混凝土共同工作不出现劈裂破坏的粘结特性。且由于螺旋效应, 在后期出现应力回升的现象。冷轧扭钢筋混凝土构件的受力荷载试验出现裂缝较晚, 其裂缝分布均匀且细而密。这些对提高构件的承载力和正常使用条件均是有利的。

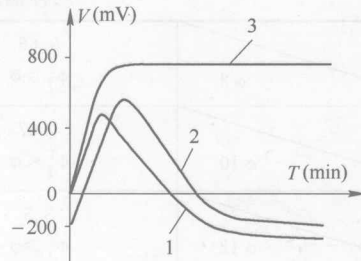
#### 6. 冷轧扭钢筋的锈蚀

任何金属材料当介入大气的自然环境中, 将随着时间的推移, 都会产生锈蚀的还本现象。对于任何冷加工后的钢筋, 在其表面上的氧化物已基本清除, 使之锈蚀更为直观。通过对原母材钢筋 HPB235、冷轧扭钢筋 550 级 I 型和阻锈后冷轧扭钢筋采用电化学法埋入混凝土棱柱体或在大气环境自然作锈蚀比较如图 2 所示。



1—光圆钢筋 (HPB235); 2—带肋钢筋 (HRB400);  
3—冷轧扭钢筋 (550 级 I 型)

图 1 钢筋  $\tau$ -S 曲线



1—冷轧扭钢筋; 2—原母材钢筋 (HPB235);  
3—阻锈后的冷轧扭钢筋

图 2

冷轧扭钢筋锈蚀稍敏感 (即有直观的锈), 未出现严重的锈蚀现象。与原母材钢筋 HPB235 相比, 折氧电位值略低, 电位随时间衰减速度亦略快, 但最后趋势终会收敛为一水平线并接近。550 级Ⅱ型、Ⅲ型的横截面的最小尺寸, 均大于 550 级 I 型。同时Ⅱ型、Ⅲ型冷轧扭钢筋的抗锈蚀性和耐久性有了大的改善。

#### 7. 650 级Ⅲ型预应力冷轧扭钢筋的应力松弛

650 级Ⅲ型冷轧扭钢筋作为中、小型预应力混凝土构件的钢筋, 所做得的应力松弛试验结果。

试验时的张拉控制应力  $\sigma_{con} = 0.7 f_{ptk} = 455 \text{ MPa}$ , 张拉后 1 小时的应力松弛率约 1%, 1000 小时后的松弛率 3.3%~3.56% 之间。1 小时是 1000 小时松弛率的约 30% 左右, 而

1000 小时的松弛率均小于 5% 的规定值。因此结构设计计算时取用应力松弛率取 8%，即  $\sigma_l=0.08\sigma_{con}$ 。

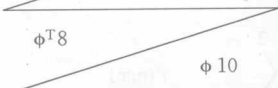
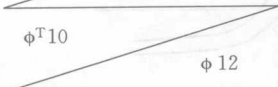
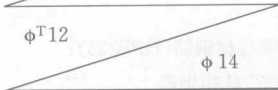
三、结构计算中的应用问题

- 1. 不得作任何起重用的吊环之用
- 2. 混凝土的强度等级  
普通混凝土构件 $\geq$ C20  
预应力构件 $\geq$ C30
- 3. 550 级的Ⅲ型冷轧扭钢筋可作梁、柱构件的箍筋和点焊的冷轧扭钢筋网片。
- 4. 550 级的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型冷轧扭钢筋可作强度( $A_s f_y$ )代换。现将冷轧扭钢筋与 HPB235(Q235)作强度( $A_s f_y$ )对照，如表 4。

冷轧扭钢筋( $\phi^T$ )与 HPB235(Q235)钢筋( $\phi$ )强度( $A_s f_y$ )比照 表 4

| 冷 轧 扭 钢 筋 |         |         |         | HPB235(Q235) |         |
|-----------|---------|---------|---------|--------------|---------|
| $\phi^T$  | Ⅰ 型     | Ⅱ 型     | Ⅲ 型     | $\phi$       |         |
| 6.5       | 10620   | 10512   | 10749.6 | 8            | 10550.4 |
| 8         | 16308   | 15228   | 16286.4 | 10           | 16485   |
| 10        | 24588   | 23796   | 25448.4 | 12           | 23738.4 |
| 12        | 34610.4 | 33386.4 |         | 14           | 32310.6 |

两种钢筋直径对换强度差值(%) 表 5

|                                                                                                     |           |                           |                              |                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|
| $\phi^T 6.5$<br> | $\phi 8$  | 0.66<br>$\phi_I^T > \phi$ | 0.36<br>$\phi_{II}^T < \phi$ | 1.9<br>$\phi_{III}^T > \phi$ |
| $\phi^T 8$<br>   | $\phi 10$ | 1.07<br>$\phi_I^T < \phi$ | 7.6<br>$\phi_{II}^T < \phi$  | 1.2<br>$\phi_{III}^T < \phi$ |
| $\phi^T 10$<br>  | $\phi 12$ | 3.5<br>$\phi_I^T > \phi$  | 0.24<br>$\phi_{II}^T > \phi$ | 7.2<br>$\phi_{III}^T > \phi$ |
| $\phi^T 12$<br>  | $\phi 14$ | 7.1<br>$\phi_I^T > \phi$  | 3.3<br>$\phi_{II}^T > \phi$  |                              |

从上表 5 强度比较可知：

- 用冷轧扭Ⅱ型钢筋 $\phi_{II}^T 8$ 代换 HPB235  $\phi 10$ ，强度差值为 7.6% 外，其余 $\phi_{I, II, III}^T 6.5$ 、8、10、12 均可代换 $\phi 8$ 、 $\phi 10$ 、 $\phi 12$ 、 $\phi 14$ 。只是用 $\phi_{III}^T 10$ 代换 $\phi 12$ ，及 $\phi_I^T 12$ 代换 $\phi 14$ 时略大 7.2% 及 7.1%。
- 当采用冷轧扭钢筋强度对换的直径小于 HPB235 钢筋直径一级时，不仅不会降低构件的承载力，且对粘结锚固能力(因属变形钢筋)、混凝土构件抗裂缝的能力和构件的刚度均有提高。
- 5. 可用于非抗震构件及抗震设防工程中的非抗震构件如：板类、次梁类和过梁等结构构件或不受地震力作用控制的结构，如地基基础等构件均可使用。
- 6. 当受弯的冷轧扭钢筋混凝土构件的跨高比符合《冷轧扭钢筋混凝土构件技术规程》

JGJ 115—2006 附录 D 中有关要求时可不作挠度验算。

#### 四、两标准修订后的效益分析

##### 1. 节约用钢量

按理论计算  $360/210=1.71$ , 即用 1t 冷轧扭钢筋可替换 1.71t 的 HPB235(Q235)热轧圆钢(对圆钢而言节约应为 41.6%)。

2. 将 HPB235(Q235)热轧圆钢筋改性为冷轧扭钢筋和工厂的加工可合二为一。冷轧扭钢筋和加工的合二为一后, 它无需调直(无调直后的应力损失)、截断、弯折成型等工序, 它是一种节材、节能、节约劳动力, 且符合绿色、环保的产品。

3. 550 级Ⅲ型冷轧扭钢筋可点焊成焊接网片。冷轧扭钢筋焊接网片, 可提高绑扎网片的承载力、锚固和施工速度。它亦是一种工厂化、绿色、环保的产品。

##### 4. 冷轧扭钢筋已成系列化

550 级的供应有:

I 型( $\Phi T6.5$ 、 $\Phi T8$ 、 $\Phi T10$ 、 $\Phi T12$ )四种;

II 型( $\Phi T6.5$ 、 $\Phi T8$ 、 $\Phi T10$ 、 $\Phi T12$ )四种;

III 型( $\Phi T6.5$ 、 $\Phi T8$ 、 $\Phi T10$ )三种。

650 级的供应有:

650 级(Ⅲ型)预应力冷轧扭钢筋的直径有  $\Phi T6.5$ 、 $\Phi T8$ 、 $\Phi T10$  三种。

5. 650 级(Ⅲ型)预应力冷轧扭钢筋, 可制作中、小型板、次梁类预制构件。根据地域的不同, 可编制图集, 建立工厂, 可制造楼(屋顶)板、沟盖板、过梁和非地震区的梁类等预制预应力冷轧扭钢筋混凝土构件, 供应国家正在开发的农村建筑市场。可以预料, 前景是大好的。

## 冷轧扭钢筋基本性能及其应用

自建筑工业行业标准《冷轧扭钢筋》JG 3046—1998《冷轧扭钢筋混凝土构件技术规程》JGJ 15—97 颁发以来,其推广应用就纳入全国统一标准(规程)的指导和管理,使该项应用性技术得到健康的发展。

与此同时,研究者们始终没有中断对冷轧扭钢筋性能进一步优化的研究。根据两标准(规程)修订的要求,经几年努力,以原工艺为基础,研制开发了冷轧扭Ⅱ型、Ⅲ型钢筋和预应力型钢筋。将原来单一近似矩型截面,发展成近似方型截面和圆截面等不同截面形式,使其主要性能指标的强度和塑性得到进一步优化。也使其应用范围进一步扩大,除可作为受弯构件(板类)的纵向受力主筋外,还可用于抗剪箍筋、乃至焊接钢筋网用钢筋等。冷轧扭钢筋作为一种我国自行研制开发的冷加工钢筋,在科学技术的进步中不断提高完善,在激烈的市场竞争中得以生存和发展。其根本原因在于自身的不断改进和提高。这次修订完成的《冷轧扭钢筋》JG 190—2006 和《冷轧扭钢筋混凝土构件技术规程》JGJ 115—2006 就是这些研究成果的具体反应。必将对冷轧扭钢筋及其应用起到重要作用。

对于冷轧扭钢筋等一些小直径冷加工钢筋,为了合理地使用,除对它们的性能和应用范围及技术条件了解和掌握外(通常由其产品标准和工程应用规程来控制),对一些涉及钢筋基本概念或要求的内容需作科学的认识,是有利于如何正确地应用冷加工钢筋。

### 1 钢筋混凝土结构用钢筋

众所周知,钢筋混凝土结构是钢筋与混凝土两种不同结构材料的复合,其共同工作的前提是钢筋与混凝土间的粘结,通过它来传递两者之间的应力、使变形协调,还要考虑结构构件正常使用极限状态对其变形和裂缝的控制。因此,对钢筋混凝土结构用钢筋要从不同角度对其提出不同适用条件的要求。

#### 1.1 钢筋的外形及规格

钢筋的外形以圆截面为主,可分为光圆和带肋以及螺旋状周期变化截面(其截面可以是圆型、方型、矩形)。外形不同主要是从钢筋与混凝土粘结锚固性能考虑,所以光圆钢筋用作纵向受力钢筋时两端必须做弯钩,对于带肋钢筋或其他螺旋状周期变化截面钢筋就无需弯钩要求。

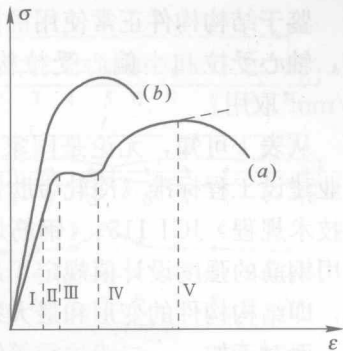
钢筋的规格(主要指直径),根据不同设计要求,可从 $\phi 6 \sim \phi 40$ 及以上提供。其中冷加工钢筋的规格一般在 $\phi 12$ 及以下,是讨论研究的重点。

#### 1.2 钢筋的强度与塑性要求

##### 1.2.1 钢筋应力-应变曲线

典型的钢筋应力-应变曲线如图1所示。以低碳钢 Q235 为例,钢筋在单向拉力作用下工作分为五个阶段。I 为弹性阶段,截面应力从零开始至比例极限  $f_p$ ,曲线为有一定斜

率的直线段，材料完全处于弹性，即荷载卸除后，拉伸过程中的伸长变形(弹性变形)将完全消失，直线的斜率即为弹性模量  $E_s=\Delta\sigma/\Delta\epsilon$ ；Ⅱ为弹塑性阶段，图形线段由直线转为光滑曲线，此阶段的变形包括弹性和塑性两部分，所以一旦荷载卸除后，塑性变形的部分就成为不能恢复的残余变形，应力—应变关系为非线性，弹性模量为一变量  $E_t=d\sigma/d\epsilon$ ，其末端称为上屈服点，此时的伸长率约为 0.15%；Ⅲ阶段称塑性阶段，应力保持在屈服强度  $f_y$ (一般指下屈服点)的水平不变，但应变持续均匀增大，形成了一个屈服平台，通常称为塑性流动或流幅，此时的变形在试样试验长度范围内是均匀的，伸长率由屈服开始时的 0.15% 增加到 2.5%~3%，曲线为一水平线段，弹性模量  $E_s=0$ ；Ⅳ为强化阶段，钢筋又恢复继续承受增长荷载的能力，曲线又平缓上升至极限抗拉强度  $f_t$  止。其间的应力—应变亦为非线性，极限抗拉强度所对应的伸长率约在 25% 左右；Ⅴ阶段为颈缩破坏，其时  $\sigma\epsilon$  曲线分为虚实两条，其中实线段是名义  $\sigma\epsilon$  曲线，由于颈缩使截面减少而导致应力下降，虚线为真实  $\sigma\epsilon$  曲线，即根据瞬时真实横截面面积计算的轴向应力，故实际截面(指颈缩部位)的应力也仍然是增加的，断后的总伸长率可达 35% 左右。



(a)低碳钢；(b)低合金钢  
图 1  $\sigma\epsilon$  曲线

1.2.2 钢筋的强度指标

根据国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068—2001 和《混凝土结构设计规范》GB 50010—2002 的有关规定：材料强度的概率分布宜采用正态分布或对数正态分布。材料强度的标准值可取其概率分布的 0.05 分位值确定(即应具有不少于 95% 的保证率)。而钢筋强度标准值则视钢种不同区分为，对于有明显屈服点钢筋系根据其屈服强度确定，用  $f_{yk}$  表示；对无明显屈服点钢筋(即所谓“硬钢”)系根据其极限抗拉强度确定，表示为  $f_{ptk}$ 。

材料强度设计值则由强度标准值除以材料分项系数获得，不同钢筋品种其材料分项系数也不同，同种类钢筋的材料分项系数基本一致。表 1 列出钢筋混凝土结构常用钢筋的材料强度标准值、设计值和材料分项系数。

各钢筋强度特征值及系数 表 1

| 种 类    |           | 抗拉强度标准值(N/mm <sup>2</sup> ) | 抗拉强度设计值(N/mm <sup>2</sup> ) | 实际材料分项系数   |
|--------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|------------|
| 热轧钢筋   | HPB235    | 235                         | 210                         | 1.12       |
|        | HRB335    | 335                         | 300                         | 1.12       |
|        | HRB400    | 400                         | 360                         | 1.11       |
|        | RRB400    | 400                         | 360                         | 1.11       |
| 冷轧带肋钢筋 | CRB550    | 550                         | 360                         | 1.53(1.30) |
| 冷轧扭钢筋  | I 型       | 550                         | 360                         | 1.53(1.30) |
|        | II 型      | 550                         | 360                         | 1.53(1.30) |
|        | III 型     | 550                         | 360                         | 1.53(1.30) |
|        | 预应力 III 型 | 650                         | 430                         | 1.53(1.30) |

注：材料分项系数栏括号内数值系根据冷加工钢筋为无明显屈服点钢材，其条件屈服强度取  $0.85R_m$  ( $R_m$  为钢筋极限抗拉强度标准值，即  $f_{ptk}$ )，则材料分项系数就是  $0.85R_m/f_y$ 。例如：冷扎扭 I 型钢筋， $f_{ptk}(R_m)=550\text{N/mm}^2$ ， $f_y=360\text{N/mm}^2$ ，则材料分项系数也可表述为  $\gamma_R=0.85\times 550/360=1.30$ ，其他类推。

鉴于结构构件正常使用的限制,对钢筋强度设计值也作了规定:在钢筋混凝土结构中,轴心受拉和小偏心受拉构件的钢筋抗拉强度设计值大于  $300\text{N/mm}^2$  时,仍按  $300\text{N/mm}^2$  取用。

从表 1 可知,无论是国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010—2002,还是其他专业建设工程标准《冷轧带肋钢筋混凝土结构技术规程》JGJ 95、《冷轧扭钢筋混凝土构件技术规程》JGJ 115、《钢筋焊接网混凝土结构技术规程》JGJ/T 114 都对钢筋混凝土结构用钢筋的强度设计值规定了最大上限为  $360\text{N/mm}^2$ 。这也是基于正常使用极限状态的考虑,即结构构件的变形和最大裂缝宽度的限制。

而对于按一、二级抗震等级设计的各类框架中的纵向受力普通钢筋还规定了:其钢筋的抗拉强度实测值与屈服强度实测值的比值不应小于 1.25;钢筋的屈服强度实测值与强度标准值的比值不应大于 1.30。这些比值通称强屈比,是一种强度储备的度量,其值愈大,强度储备也愈大,设计应用时的经济性也差,反之储备不足,结构的安全性就低。因此,要有适度的强屈比。规范规定的不小于 1.25 和不大于 1.30 就是这道理。

需要指出,虽然在欧洲混凝土结构模式规范 CEB-FIP 中将钢筋的塑性(延性)按强屈比( $f_t/f_y$ )。最小规定值和最大力(荷载)下总伸长率( $A_{gt}$ )划分为 A、B、S 三个等级。其中 A 级( $f_t/f_y$ ) $_k \geq 1.08$ ,且  $A_{gt} \geq 5\%$ ;B 级( $f_t/f_y$ ) $_k \geq 1.05$ ,且  $A_{gt} \geq 2.5\%$ ;S 级( $f_t/f_y$ ) $_k \geq 1.15$ ,且  $A_{gt} \geq 6\%$ 。若以 B 级为基准,则 A、B 级间的( $f_t/f_y$ ) $_k$  仅相差 2.8%,但  $A_{gt}$  却相差高达 2 倍,即使是 S 级基于抗震要求,与 B 级的( $f_t/f_y$ ) $_k$  差也仅 10%, $A_{gt}$  的差超过 2 倍。由此可见,国内外有关规范仍以伸长率大小作为判别钢筋塑性(延性)的指标,而强屈比只是从强度储备角度所提出的技术条件之一,并不是将其视为钢筋的塑性(延性)指标。

### 1.2.3 钢筋的塑性

钢筋的塑性指标,通常采用伸长率来表述,它是钢筋在静拉力作用下塑性变形发展能力的指标之一。其值为试样测量范围(通常称标距)的伸长( $\Delta l$ )与试验前该相同测量范围(即原始标距  $l_0$ )的比值,以百分数表示: $A = (l_1 - l_0)/l_0 \times 100(\%)$ 。因此,该值是一个无量纲的相对值,即单位长度的变形(伸长)量。由于钢筋的应变(伸长率)在拉伸试验各不同工作阶段的变形表现形式也各不相同,因此伸长率的表述方式和意义也不同。鉴于《金属材料室温拉伸试验方法》GB/T 228 与原标准《金属材料拉伸试验方法》GB 228 在符号表述上有很大差异。现将有关性能特征值符号述叙如下:

1) 伸长率以 A 表示。钢筋的断后伸长率,标距取短比例标距为  $A = 5.65 \sqrt{S_0}$ 。式中  $S_0$  为试样原始横截面面积;长比例标距为  $A_{11.3} = 11.3 \sqrt{S_0}$ ;定标距以标距值为下角标。例如定标距 100mm,表示为  $A_{100}\text{mm}$ ,其他类推。

最大力下总伸长率以  $A_{gt}$  表示,最大力下非比例伸长率以  $A_g$  表示。

2) 强度指标以 R 表示。抗拉强度表示为  $R_m$ ;上屈服强度表示为  $R_t$ ;下屈服强度表示为  $R_e$ ;条件屈服强度表示为  $R_p$ ,当以伸长率 0.2% 时强度为条件屈服,强度时,表示为  $R_{p0.2}$ 。最常用的伸长率特征值有:

#### (1) 断后伸长率

迄今为止,国内外有关钢筋伸长率的测定和判据仍普遍采用断后伸长率这一指标。它是否真实地反映钢筋的塑性性能呢?从钢筋  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线可知,就钢筋自身的塑性性能而言,

只有断后伸长率才是完整反映了钢筋塑性变形的全部过程，自然也应该包括颈缩变形在内。当然，颈缩现象是由于强化阶段末钢材的应变硬化能力不足以补偿试样横截面面积的减少时，以收缩(即颈缩)的形式表现其变形能力。此后，塑性变形就主要集中于横截面面积不断减少的颈缩区域。若将试样原始标距作某一等分刻度(取 10mm)，可测得试样断后标距范围内各等分刻度的伸长分布如图 2 所示。

由图 2 可知，在标距范围内(取 10mm×10mm 范围)所测定的断后伸长率  $\delta_{100}$  既不是测量区域内的最大值，也不是最小值，而是测量范围内(100mm)的平均值。因此，标距范围内颈缩区以外段的实际伸长率并未达到该平均值；而颈缩区域内的伸长率又大于该平均值。对此，常常被人们认为断后伸长率不能真实表征材料塑性的依据。这是一个涉及如何正确理解金属材料的塑性性能和其判据指标的问题。

首先，断后伸长率其定义就已十分明确表达了钢筋在单向拉力作用下材料延展能力的大小，其过程包括了弹性变形、弹塑性、塑性、强化及颈缩等全部的变形，当然也包括颈缩这样的局部变形在内。因此，从概念上讲，不能认为断后伸长率  $A_{11.3}=4\%$  的钢筋拉断时的总伸长会达到总长度的 4%，即当总长度为 100m 的钢丝，断后总伸长并不能达到 4m。

至于颈缩变形在工程应用中是否有实际意义(即涉及是否真实地反映钢筋塑性问题)，得从钢筋本身的塑性和设计允许达到变形的限制来加以讨论。基于钢筋与混凝土共同工作及变形协调等基本原则，在 GB 50010—2002 有关正截面承载力计算的一般规定中，限制了纵向受拉钢筋的极限拉应变取为 0.01(即相当于钢筋的伸长率为 1%)；混凝土极限压应变，当处于非均匀受压时的极限压应变为 0.0033。而且这些极限状态的变形限值还与钢筋强度设计值相协调。也就是说，在正常使用条件下，钢筋在全长范围内任何位置的伸长变形不仅不可能达到钢筋拉伸时颈缩阶段，乃至流幅阶段(即弹塑阶段)也是不可能的。伸长变形的大量储备都是为偶发事件发生钢筋应力超过其强度设计值至钢筋拉断之前为结构构件变形提供必需的保证。因此，只要钢筋的伸长变形(伸长率)可使所形成的混凝土结构构件的破坏形式为延性破坏就可满足工程应用要求。这是钢筋混凝土结构构件对钢筋塑性的最关键要求。

显然，混凝土结构构件只要是延性破坏，即使是以钢筋拉断为破坏特征，结构构件已经历了较大的变形和裂缝开展过程，而最终在钢筋拉断之前必然要经过颈缩阶段。从这意义上讲，钢筋的拉断伸长率作为表征其塑性指标是无可非议的。

当然，断后伸长率在测定时由于断口对接所带来的测量误差是不可避免的。但这种误差的影响是有限的。以  $\Phi 10$  钢筋为例，设断后测定伸长率  $A=35\%$ ，则断后测量标距长度应为  $l_1=67.5\text{mm}$ ，若断口测量误差达  $+0.5\text{mm}$ (为相当大的目测误差)，则真实断后标距长度应为  $l'_1=67\text{mm}$ ，其真实断后伸长率应  $A'=34\%$ ，测量引起的误差仅 2.9%；若断后测定伸长率为  $A=12\%$ ， $l_1=56\text{mm}$ ，断口误差仍为  $+0.5\text{mm}$ ，真实断后标距应为  $l'_1=56.5\text{mm}$ ，其真实断后伸长率应  $A'=12.9\%$ ，测量引起的误差仅 0.9%。

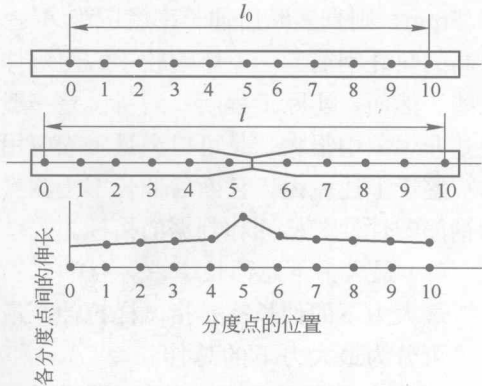


图 2 颈缩与伸长示意

55.5mm，则真实断后伸长率就应为  $A'=11\%$ ，其测量误差就达 8.3%。可见，对伸长率较高的热轧钢筋其误差影响较小，但对伸长率较低的钢筋(例如冷加工钢筋)其误差影响就大些。然而，实际工程断口测量误差一般均小于 0.5mm 范围，所以实际测量所造成的误差并非想象中很大，是可以满足工程应用的精度要求。

鉴于上述原因，且断后伸长率检测操作简便实用，仍是目前国内外有关标准普遍采用的钢筋塑性性能检测和判据的指标。

(2) 最大力下总伸长率  $A_{gt}$

最大力下的伸长率是指试样拉伸至最大力时标距范围内的伸长与原始标距长度的百分比。可分为最大力下的总伸长率( $A_{gt}$ )和非比例伸长率( $A_g$ )。其中  $A_g$  不包括弹性变形，而( $A_{gt}$ )包括了弹性和塑性伸长(即弹性、弹塑性、塑性及强化阶段的全部变形伸长)。有关  $A_{gt}$  虽在国内外许多相关标准的技术条件中都有所描述，但均明文不作为判别钢筋是否合格的指标和供货条件。

有关钢筋在最大力下总伸长率的测定方法，国家标准《热轧带肋钢筋》GB 1499—1998 的附录 A(标准的附录)中提出了如图 3 所示断后的测定方法。

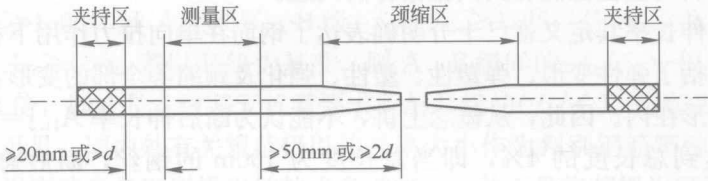


图 3 钢筋断裂后测量  $A_{gt}$  示意

根据图 3 所示标志测量并计算最大力下总伸长率为：

$$A_{gt}(\%) = [(l_1 - l_0)/l_0 + \sigma_b/E_s] \times 100$$

式中  $l_1$ ——为试样断裂后所测量的测区距离；

$l_0$ ——试样试验前同样测量标记间的距离；

$\sigma_b$ ——试样实测的抗拉强度；

$E_s$ ——钢筋的弹性模量，对热轧带肋钢筋值取为  $2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 。

将  $A_{gt}$  根据上述方法测定计算结果与用自动记录  $\sigma-\epsilon$  曲线测量结果进行比较列于表 2。

不同方法测定  $A_{gt}$  及比较(%)

表 2

| 钢筋品种     | 冷轧扭Ⅲ型钢筋 |       |       | I 级钢筋(Q235) |       |       | 新Ⅲ级钢筋(HRB400) |       |      |
|----------|---------|-------|-------|-------------|-------|-------|---------------|-------|------|
| 试样号      | 1       | 2     | 3     | 1           | 2     | 3     | 1             | 2     | 3    |
| 自动记录法    | 2.31    | 2.21  | 2.33  | 17.09       | 16.66 | 17.46 | 11.66         | 10.15 | 9.06 |
| 标准推荐法    | 2.64    | 2.01  | 2.65  | 18.96       | 19.33 | 10.86 | 10.86         | 10.93 | 9.89 |
| 两方法比较(%) | 12.50   | -9.05 | 12.45 | 10.34       | 11.19 | 9.37  | -6.86         | 7.14  | 8.39 |

注：两方法比较的偏差(%)以自动记录测定结果为基准。

需要指出，用图 3 方法测定  $A_{gt}$  时，还明确规定了  $l$ (或  $l_0$ ) 应不小于 100mm 的最小值限制，即不确定的标距要求。显见，对不同直径的钢筋，这一标距要求反而使  $A_{gt}$  的结果不统一了。例如当取  $l$ (或  $l_0$ ) = 100mm 时，对  $\phi 10$  钢筋来讲标距就相当于  $10d$ ( $d$  为钢筋直

径);而对 $\Phi 20$  钢筋而言就只有  $5d$ 。故若将两者  $A_{gt}$  作比较时原始标距就不相同。由此可见,  $A_{gt}$  的测定并非不需要考虑标距的长短问题, 与断后伸长率的测定一样, 需要有一可相互比较的标距要求。而标距长短仍可分为长、短比例和定标距三类。所以对同钢种同直径的钢筋, 采用原始标距愈短, 测定结果的伸长率愈大, 误差的影响也愈大。对于不同品种的钢筋, 由于其自身塑性要求不同, 宜选取不同标距要求, 不必苛求标距的统一。

还应指出,  $\sigma\epsilon$  曲线可知, 最大力下的总伸长率是除去颈缩(局部区域)以外的全部变形, 从理论上讲在单向拉伸状态下钢筋各截面的伸长率均会达到该值, 所以也有将  $A_{gt}$  称为“均匀伸长率”(注: 这种提法是否妥当有待讨论)。也就是说若  $A_{gt}=2\%$ , 则  $100m$  长的钢筋, 最大力下总伸长就要达  $2m$ 。然而, 在实际工程中并非是这样概念, 尤其象受弯构件(两端铰接)当在均布荷载作用时, 沿梁跨度、弯矩是抛物线状分布、跨中弯矩最大。因此, 当跨中截面上受拉钢筋的应力达最大时(即荷载最大时), 此处应变达  $A_{gt}$ , 但其他截面位置的受拉钢筋应力均未达最大值及其应变。也就自然达不到  $A_{gt}$  值。

#### 1.2.4 关于钢筋的均匀伸长率

有关均匀伸长率目前并无相关的标准和定义, 只从一些文章中将其与最大力下总伸长率等同称呼, 即均匀伸长率就是最大力下总伸长率。例如一些报道称: 若干国际标准对受力钢筋的均匀伸长率提出了最低标准要求  $\geq 2\% \sim 2.5\%$ ; 高延性钢筋  $\geq 5\% \sim 6\%$ 。若以此为依据, 似又与最大力下总伸长率  $A_{gt}$  不为同一概念, 因为据此我国全部热轧钢筋都属高延性钢筋。因此, 有必要从钢筋在拉伸试验过程的均匀伸长作些讨论。

由  $\sigma\epsilon$  曲线可知, 钢筋的塑性变形从截面应力达到比例极限开始至拉断为止, 存在于其全过程。除去颈缩阶段外, 在弹塑性、塑性及强化阶段的伸长变形也不尽相同。以材料弹性模量为例, 只有塑性流动阶段模量为零, 而其他阶段弹性模量都是变量。而钢筋的伸长变形过程实质是组成钢材的有序排列的晶体晶格产生位错, 即滑移变形过程。由吕特斯顿线可证实, 这种均匀伸长从上屈服点开始直到下屈服点止。即由于塑性流动使得晶体晶格的位错密度不断增加, 到下屈服是其密度增加足以造成位错运动的困难时, 就进入应变硬化阶段, 即应变的增长快于应力的增加, 此时钢筋伸长实际已并不均匀了。因此, 均匀伸长对有明显屈服点钢筋更主要地是表征钢筋流幅的长短, 其值愈大, 表示平台长度也愈长, 则钢筋的塑性也就愈好。若以流幅长短作为均匀伸长率来判定, 目前我国混凝土结构用钢筋中的 I 级钢筋(Q235)可达  $2.5\% \sim 3\%$ 。若将最大力下总伸长率就视为均匀伸长率, 则 I 级钢筋就可高达  $20\%$  或更高些, 这一结果显然也不符合有关均匀伸长的概念。同样道理新 III 级钢筋也存在类似问题。

然而, 对于某些无明显屈服点的钢筋, 虽然无屈服平台, 其强屈比仅在  $1.05 \sim 1.10$ , 但仍有较好的塑性。其最大力下总伸长率也可达  $2.5\%$ , 甚至  $5\%$  或更高些(如上述 CEB~FIP 中的 A、B、S 级钢筋)。在我国混凝土结构工程施工及验收规范和其他相关的预应力混凝土结构设计和施工规程中, 有关预应力筋张拉控制应力的变形控制规定了预应力筋计算伸长值  $\Delta l$  为:

$$\Delta l = \frac{F_p \cdot l}{A_p \cdot E_s} \quad (1)$$

将(1)式变换为

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{F_p}{A_p \cdot E_s} \quad (2)$$

(2) 式左边为预应力筋全长范围的平均伸长值, 即所谓的均匀伸长率  $\epsilon$ 。所以, 对类似于预应力筋这类钢筋(均属高强度钢筋)将最大力下总伸长率视为均匀伸长率并给  $A_{gt} \geq 2.5\%$  或更高要求倒是可行的。

由此可见, 有关均匀伸长率是否就是最大力下总伸长率这一概念, 仍有待进一步研究解决, 目前不宜将其与最大力下总伸长率等同, 以免造成各种误解。

应当指出, 无论采用哪种伸长率, 都必须有一原始标距和对应伸长变形(或断后)标距的测定和计算过程, 最大力下总伸长率也不例外。而标距长短仍分为长、短比例和定标距三种。所以对同种同直径钢筋, 采用的原始标距愈短, 测定结果伸长率就愈大, 误差的影响也要大些。而不同的钢筋品种, 由于其自身塑性要求的不同, 宜选取不同的标距要求, 不必苛求标距的统一。

由此可见, 所谓伸长率(无论是断后或最大力下伸长率)仅仅是从不同角度表征钢筋的塑性性能。而在工程应用究竟需要多大的伸长率才能满足要求呢? 最根本的就是所形成混凝土结构的破坏是脆性或延性。一般讲塑性好的钢筋所形成的混凝土结构延性也较好, 但这不是惟一条件。例如冷拉扭 I 型钢筋, 其断后伸长率  $A_{11.3} \geq 4.5\%$  (取 95% 保证率) 与热轧钢筋相比, 伸长率是很低的, 但其所形成的混凝土结构(受弯板类、梁类构件)却表现为典型的延性破坏特征(跨中挠度超过  $l/50$ , 或裂缝宽度大于 1.5mm 等等)。因此, 对不同钢筋品种要有不同伸长率要求, 不能用统一标准来衡量钢筋的塑性。从这意义讲, 钢筋强度级别的不同, 其塑性指标也对应不同, 所以对热轧钢筋和冷加工钢筋来讲, 热轧钢筋塑性高于冷加工钢筋。对同是热轧钢筋, 则随强度提高, 塑性就下降。表 3 列出部分热轧钢筋和冷加工钢筋的强度和塑性(伸长率)指标。

钢筋的强度和塑性指标

表 3

| 指 标                        | 热 轧 钢 筋     |             |             |             | 冷 加 工 钢 筋           |             |             |                   |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------|-------------|-------------|-------------------|
|                            | HPB235      | HRB335      | HRB400      | RRB400      | 冷拉扭 I 型             | 冷拉扭 II 型    | 冷拉扭 III 型   | 冷轧带肋 CRB550       |
| 强度标准值<br>N/mm <sup>2</sup> | 235         | 335         | 400         | 400         | 550                 | 550         | 550         | 550               |
| 伸长率 A(%)                   | $A \geq 25$ | $A \geq 16$ | $A \geq 14$ | $A \geq 14$ | $A_{11.3} \geq 4.5$ | $A \geq 10$ | $A \geq 12$ | $A_{11.3} \geq 8$ |

构件产生脆性破坏的另一个重要的原因, 会因构件的超配筋率脆性破坏和少配筋率脆性破坏。构件脆性破坏以另一个重要的标志不仅是被压碎、钢筋应力达屈服值、构件的变形和裂缝宽度超大, 甚至钢筋断裂等, 均不能判定为该构件为脆性破坏。主要是观察构件在受力的全过程中, 经过肉眼能观察出: 构件在破坏前, 有明显的变形和先兆, 以及人们有充裕的时间去进行加固处理。

提高钢筋的强度, 都必须以“牺牲”其塑性为代价, 只是途径不同。对热轧筋来讲就是加入合金元素; 对冷加工钢筋来讲是通过机械方式冷作获得。当然, 热轧钢筋的总体性能水平要高于同级别冷加工钢筋, 例如可焊性等。

### 1.3 混凝土结构用钢筋品种

根据上述钢筋性能及混凝土结构对钢筋性能要求, 目前我国钢筋混凝土结构用钢筋主要有两大类: 一类是热轧钢筋, 有光圆和带肋两种, 供货分直条和圆盘条。其中圆盘条为小直径( $\phi 12$  及以下), 有光圆和带肋之分, 钢筋强度级别有 HPB235 和 HRB400, 前者是