

# 冷轧扭钢筋粘结锚固性能的试验研究<sup>\*</sup>

管品武 刘立新  
(郑州工业大学土建系)

徐有邻  
(中国建筑科学研究院)

**摘 要:** 本文通过大量的冷轧扭钢筋粘结锚固的拉拔试验,较详细地分析了冷轧扭钢筋的粘结锚固机理、影响粘结锚固的主要因素,在统计分析的基础上给出了冷轧扭钢筋各种粘结强度特征值的计算公式,推导出冷轧扭钢筋的临界锚固长度计算公式,并通过 17 根梁式锚固试验进行验证,最后在可靠度分析的基础上提出了冷轧扭钢筋混凝土构件粘结锚固长度的设计建议,为编制国家标准《冷轧扭钢筋混凝土构件技术规程》提供了依据。

**关键词:** 冷轧扭钢筋 粘结锚固 可靠度

**中图分类号:** TU511

## 1 前言

冷轧扭钢筋是采用目前建筑工程中广泛使用的碳素结构钢  $Q^{235}$ 、 $Q^{215}$  热轧圆盘条钢筋为原材料 (母材),按照规定的工艺参数经专门的冷轧扭钢筋机经调直、冷拉、冷轧、冷扭一次加工成具有一定截面形式和螺距的连续螺旋状的冷强化钢筋。和母材相比冷轧扭钢筋的极限抗拉强度提高近一倍,伸长率能控制在合理的范围内 ( $\delta_0 \geq 4.5\%$ )。用冷轧扭钢筋代替母材应用于建筑工程可节省钢筋 35~40%,并可节省相应的钢筋现场加工劳动力;而且由于它具有连续螺旋状外形,提高了与混凝土的粘结性能。使钢筋能与混凝土更好地协同工作,改善了构件的受力性能,具有显著的社会经济效益。目前全国已有近二十个省市颁布了冷轧扭钢筋应用的地方标准,采用冷轧扭钢筋的建筑面积已达数千万平米,并被建设部批准为 96 年科技成果重点推广项目之一。

但由于目前各省市的冷轧扭钢筋产品规格相差较大,技术规程也不太统一,为了进一步推广和利用这一高强节材的新钢种,加强统一管理和交流,94 年建设部批准成立《冷轧扭钢筋混凝土构件技术规程》编制组,受编制组委托,我们经过大量试验,研究了冷轧扭钢筋的粘结锚固性能和机理,为工程应用和《规程》的编制提供依据。

## 2 冷轧扭钢筋粘结锚固拉拔试验研究

### 2.1 试验概况

为探讨冷轧扭钢筋的粘结锚固机理和性能,我们制作了 212 个拉拔试件,混凝土强度  $f_{cu} = 9.2 \sim 46.7 \text{ MPa}$ ,保护层厚度  $C = 10 \sim 46 \text{ mm}$ ,锚固长度  $l_a = 100 \sim 300 \text{ mm}$ ,配箍率  $\rho_s = 0.252\% \sim 0.784\%$ ,锚筋直径  $d_0 = 6.5 \sim 12 \text{ mm}$ 。试验过程采用 X-Y 函数记录仪实现连

续加载和记录，图 1 和图 2 分别为标准试件和试验装置示意图

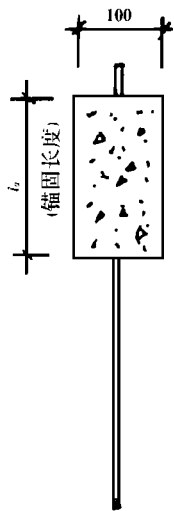


图 1 标准试件示意图

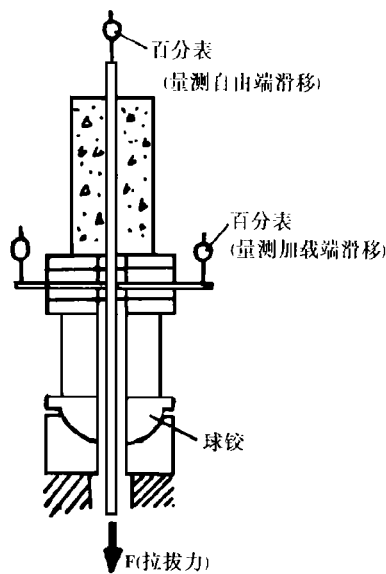


图 2 拉拔试验装置示意图

2.2 冷轧扭钢与混凝土的粘结机理分析

标准试件的平均粘结应力—滑移 ( $\tau$ - $S$ ) 曲线如图 3 所示。整个加载过程可分为以下三个阶段。

(1) 胶结段 ( $OA$  段)：加载之初，加载端即有滑移，但很小，自由端未滑动。这说明胶结滑移逐渐向内渗透，但未达到自由端。当  $\tau \approx 70 \sim 80\% \tau$  (稳定滑移粘结强度) 时，自由端才开始滑移，这说明此时化学胶结力已完全丧失。这一过程中钢筋和混凝土之间的化学胶结力和机械咬合力起主要作用。机械咬合力是由于钢筋具有连续螺旋状外形而和混凝土产生的连续楔体作用而产生的。

(2) 摩阻段 ( $ABC$  段)：加载至自由端滑动以后，滑移速度加快， $\tau$ - $S$  曲线呈明显的非线性，这一过程 ( $AB$  段) 摩阻力是构成粘结力的主要因素，当  $\tau = \tau$  时，摩阻力达到最大值， $\tau$ - $S$  曲线出现第一峰值而开始转折。随后，因为钢筋的挤压作用，其界面处的混凝土被碾平、挤碎，因摩阻力减小，滑移速度进一步加快， $\tau$ - $S$  曲线呈下降趋势 ( $BC$  段)。

(3) 挤压段 ( $CD$  段)：随着荷载的增大，滑移和钢筋逆螺旋方向转角 (因钢筋实际轴线和其横截面中心线不重合而呈空间螺旋状) 也增大， $\tau$ - $S$  曲线经历波谷后又开始呈上升趋势。这是因为  $\tau = \tau$  (残余粘结强度) 时，摩阻力已减至最小，但此时钢筋的大滑移和高应力，使钢筋产生明显扭转，使其沿钢筋截面中心产生对周围混凝土的反对称三角形挤压作用 (如图 4 所示)，这样钢筋和混凝土之间又形成了新的咬合面，摩阻力、机械咬合力越来越大，而且起主导作用，使  $\tau$ - $S$  曲线又呈上升爬坡趋势。至  $\tau = \tau$  (极限粘结强度) 时，二者增至最大，随后咬合面混凝土被碾平、挤碎而破坏， $\tau$ - $S$  曲线又呈下降趋势。

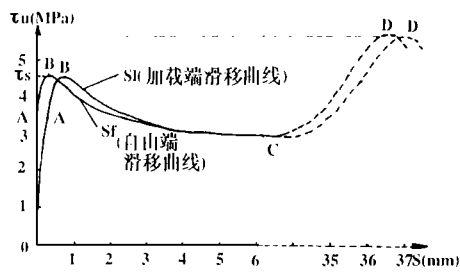


图 3  $\tau$ -S 曲线

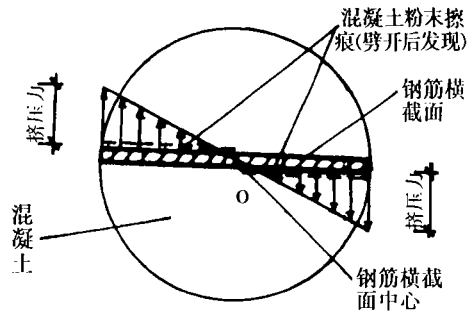


图 4 钢筋挤扭作用示意图

试验结束后，劈开试件，可明显发现钢筋表面前后只有各一半面积上有混凝土粉末和明显擦痕，而且呈反对称分布（如图 4 虚线所示）；同时钢筋螺距比试验前增大，说明在拉力作用下，钢筋横截面中心线有渐趋同于钢筋空间实际轴心线的趋势，由于界面混凝土的约束，而产生顺槽方向的逆螺旋挤扭作用。在加载后期，冷轧扭钢筋对周边混凝土的挤扭作用是其粘结锚固性能的一大特点，这也是其宏观上具有二次峰值，加载后期类似于螺旋钢筋但粘结刚度较其好的主要原因，即钢筋的表面倾斜类似于螺旋钢筋的横肋。

总体说来，冷轧扭钢筋的粘结强度主要由混凝土与钢筋表面的化学胶结力、摩阻力以及机械咬合力组成。但因其独特的外形特征，粘结性能也有以下特点：

(1) 冷轧扭钢筋表面扁平，又有连续螺旋（钢筋表面倾斜），所以其粘结机理兼有光圆钢筋和螺旋钢筋的特点。在加载初期（残余粘结强度  $\tau$  以前，OABC 段），类似于光滑钢筋，粘结刚度好，但粘结强度较高。这因为冷轧扭钢筋体表面积大，而且表面较粗糙，同时还有较大的机械咬合力；加载后期（残余粘结强度  $\tau$  以后，CD 段），类似于螺旋钢筋，这是因为扭转钢筋沿与混凝土接合面顺槽滑移，造成较大的侧向挤扭力和摩阻力，机械咬合作用表现明显。

(2) 试件的破坏形式以钢筋拔出为主。但当混凝土强度低（ $<C20$ ）、保护层厚度小（ $C\leq 15\text{mm}$ ）、钢筋尺寸大（ $\Phi 8$  以上）也会发生劈裂破坏（扭劈）。

(3) 挤扭作用对粘结强度影响较大，但只在大滑移时充分发挥，与极限粘结强度  $\tau$  对应的滑移  $S_u$  很大（ $S_u > 30\text{mm}$ ），已不具有工程意义，但在采用转折处稳定滑移粘结强度  $\tau$  来设计锚固长度时，可靠指标  $\beta$  可适当降低，因为冷轧扭钢筋的粘结破坏是刚度问题（延性破坏），而非强度问题， $\tau$  可作为工程安全储备。

2.3 影响冷轧扭钢筋粘结锚固性能的主要因素

(1) 混凝土强度影响

A 类试件共 39 个 5 组， $f_{cu}=9.2 \sim 46.7\text{MPa}$ 。试验表明，粘结强度随混凝土强度的提高而增加，但呈非线性，与抗拉强度  $f_t$  大致成正比。这是因为无论钢筋与混凝土的化学胶结力、摩阻力、挤压力等都与混凝土的质量有关。经统计回归有：

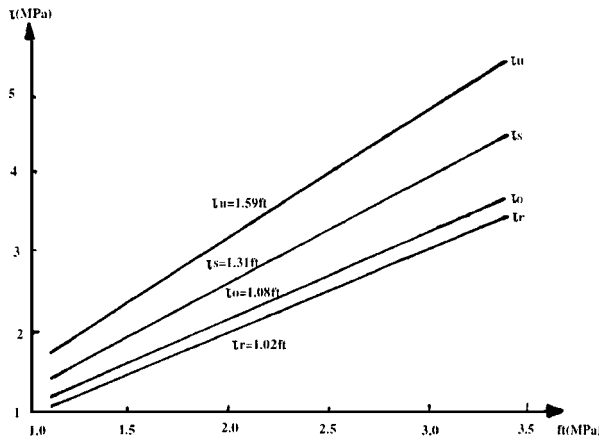


图 5 混凝土强度影响

$$\tau=1.08f_t \quad (n=23, \mu=0.998, \delta=0.138)$$

(1)

$$\tau=1.31f_t \quad (n=24, \mu=0.983, \delta=0.038)$$

(2)

$$\tau=1.02f_t \quad (n=24, \mu=0.983, \delta=0.033)$$

(3)

$$\tau=1.59f_t \quad (n=23, \mu=1.022, \delta=0.061)$$

(4)

式中  $n$ —试件样本数;

$\mu$ —测量值和公式计算值比值的平均数;

$\delta$ —测量值和公式计算值比值的变异系数;

$f_t$ —混凝土抗拉强度,按 $f_t=0.267f_{cu}^{2/3}$ 计算(以下同)。

(2) 锚筋种类影响

B 类试件共 4 组 48 个, 锚筋种类有  $\Phi 6.5$ 、 $\Phi 8$ 、 $\Phi 10$ 、 $\Phi 12$  等四种, 试件尺寸  $b \times h \times l_a = 100 \times 100 \times 200\text{mm}$ , 中心置筋, 平位浇注。规格不同的钢筋, 有不同的体表面积, 但相对截面周长  $u/d^2$  近似相等, 因此截面周长影响相对较小, 但因其具有不同螺距, 因此也将产生不同的机械作用; 另外试件锚固长度一致, 但相对锚长  $l_a/d$  相差较大, 因此对试验结果必将产生一定的影响。经分析表明: 相对螺距  $S/d$  越小。相对锚长  $l_a/d$  越小, 粘结强度越好, 粘结强度和  $d^2/(la \cdot S)$  大致呈线性关系。经回归分析有公式:

$$\tau=1.11f_t \quad (n=31, \mu=1.000, \delta=0.026)$$

(5)

$$\tau=(0.7+151.2d^2/(la \cdot S))f_t \quad (n=34, \mu=0.999, \delta=0.0076)$$

(6)

$$\tau=1.05f_t \quad (n=34, \mu=1.000, \delta=0.017)$$

(7)

$$\tau=(0.79+200d^2/(la \cdot S))f_t \quad (n=28, \mu=0.987, \delta=0.011)$$

(8)

式中  $d$ —冷轧扭钢筋等效直径(由面积等效原则将其折算成同横截面面积的圆的直径, 以下同);

$S$ —冷轧扭钢筋螺距;

$l_a$ —锚固长度。

(3) 保护层厚度  $C$  的影响

C 类试件共 4 组 48 个, 保护层厚度  $C=10$ 、 $15$ 、 $20$ 、 $25\text{mm}$  等, 同时利用了试验条件类似的 B 类试件。试验表明: 当  $C \geq 20\text{mm}$  时, 钢筋的挤扭作用已不能扭劈试件, 以钢筋缓缓拔出为破坏形式, 因此在满足工程习惯和构造要求时, 保护

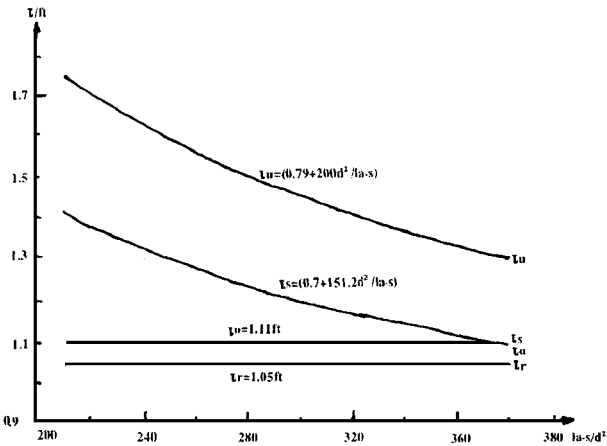


图 6 锚筋影响

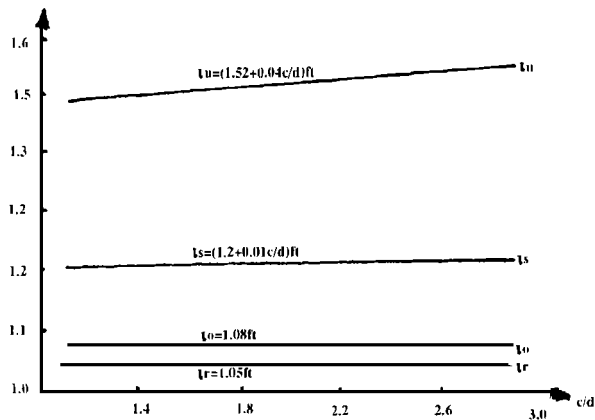


图 7 保护层厚度影响

层厚度影响对冷轧扭钢筋的粘结锚固性能影响较小，可以忽略。经统计回归有：

$\tau = 1.08f_t$  (  $n=28, \mu=1.003, \delta=0.030$  ) ( 9 )

$\tau = ( 1.20+0.01c/d ) f_t$  (  $n=28, \mu=0.005, \delta=0.970$  ) ( 10 )

$\tau = 1.05f_t$  (  $n=21, \mu=1.004, \delta=0.0298$  ) ( 11 )

$\tau = ( 1.52+0.04c/d ) f_t$  (  $n=28, \mu=1.009, \delta=0.0167$  ) ( 12 )

( 4 ) 锚固长度影响 D 类试件共 3 组 48 个，锚固长度  $l_a=100、200、300\text{mm}$ ，锚筋  $\Phi 10$ ，中心浇注。试验表明：随着锚固长度增加，荷载增大，但平均粘结强度减小，锚长较短时，这种变化尤为明显：锚长较长时 ( $l_a/d>20$ )，渐趋平缓。但同以前各类因素一样  $\tau$  和  $\tau$  影响不明显，仍以  $f_t$  统计。回归公式如下所示：

$\tau = 1.14f_t$  (  $n=24, \mu=0.998, \delta=0.026$  ) ( 13 )

$\tau = ( 1.071+3.35d/l_a ) f_t$  (  $n=46, \mu=1.012, \delta=0.0145$  ) ( 14 )

$\tau = 0.94f_t$  (  $n=21, \mu=1.012, \delta=0.0375$  ) ( 15 )

$\tau = ( 1.32+7.27d/l_a ) f_t$  (  $n=44, \mu=1.003, \delta=0.021$  ) ( 16 )

( 5 ) 配箍率影响 E 类构件共 4 组 29 个，配箍率  $\rho_{sv}=0.252\% \sim 0.784\%$ 。在加载初期，箍筋影响很小，当钢筋发生大滑移后，箍筋限制混凝土的横向变形，可增强对锚筋的挤压作用，因此对  $\tau$  有一定的影响，但因混凝土一般不劈裂 ( 甚至不开裂 )，因此总体上影响较小尤其是对  $\tau$  和  $\tau$ 。经统计回归有

$\tau = 1.14f_t$  (  $n=20, \mu=1.003, \delta=0.032$  ) ( 17 )

$\tau = ( 1.285+60.6p_{sv} ) f_t$  (  $n=23, \mu=1.000, \delta=0.019$  ) ( 18 )

$\tau = 0.94f_t$  (  $n=18, \mu=0.999, \delta=0.038$  ) ( 19 )

$\tau = ( 1.42+69.22p_{sv} ) f_v$  (  $n=22, \mu=1.000, \delta=0.025$  ) ( 20 )

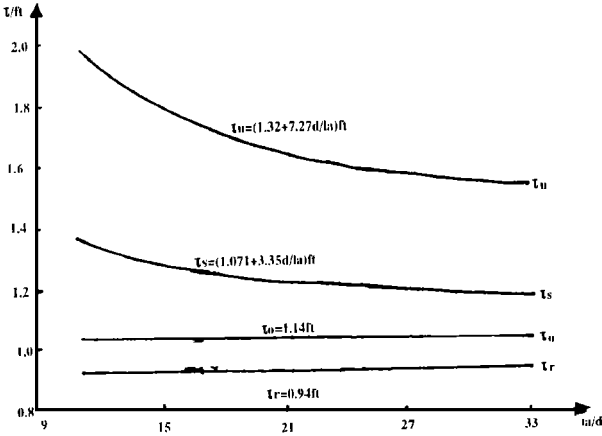


图 8 锚固长度影响

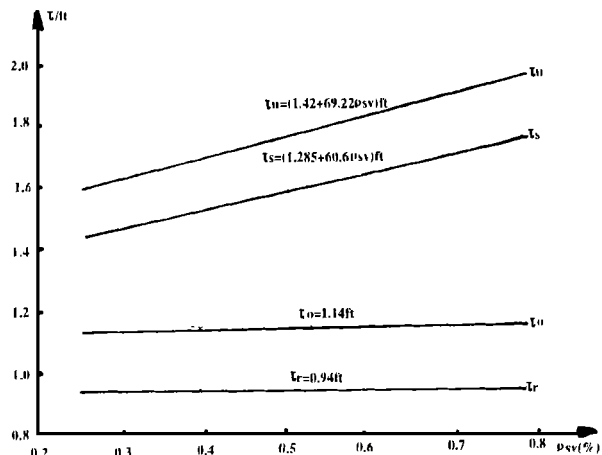


图 9 配箍率影响

通过以上分析和试验可知，影响冷轧扭钢筋粘结锚固性能的主要因素是混凝土强度和

锚固长度，因此在忽略或合并次要影响因素的基础上，由大量试验资料统计回归出冷轧扭钢筋粘结强度特征值的计算公式：

$$\tau = 1.14f_t \quad (n = 120, \mu = 0.999, \delta = 0.082)$$

(21)

$$\tau = (1.076 + 3.55d/la) f_t \quad (n = 132, \mu = 1.003, \delta = 0.021)$$

(22)

$$\tau = 1.04f_t \quad (n = 128, \mu = 0.998, \delta = 0.080)$$

(23)

$$\tau = (1.32 + 7.27d/la) (0.893 + 0.04c/d + 20.04\rho_v) f_t$$

$$(n = 120, \mu = 0.998, \delta = 0.120)$$

(24)

式中  $\rho_v$  为试件配箍率，按  $\rho_v = nA_{sv1} / (b \cdot s)$ ， $n$  为箍筋肢数； $A_{sv1}$  为单肢箍筋的横截面积； $b$  为截面宽度； $s$  为箍间距。

2.4 临界锚固长度的确定

锚固于混凝土中的钢筋在拉拔力的作用下，可能因钢筋应力过大而失效，也可能因锚固力不足而发生锚固破坏。在某一特定状态，锚固力等于钢筋抗力，锚固破坏和钢筋失效同时发生，这一状态称为锚固承载力极限状态，其相应的锚固长度称为临界锚固长度  $l_{a,cr}$ 。此时有

$$\tau \cdot u \cdot l_{a,cr} = f_y \cdot A_s$$

(25)

又因为  $A_s = \frac{\pi}{4} d^2$

(26)

$$4u/\tau = 5.026d$$

(27)

把 (22)、(26)、(27) 式代入 (25) 式，并化简有

$$l_{a,cr}/d = 0.185f_y/f_t - 3.30$$

(28)

若取  $f_y = 360MPa$ ，利用 (28) 式可得不同混凝土强度等级的临界锚固长度值，具体结果见表 1。

3 冷轧扭钢筋的梁式锚固试验验证

3.1 试验概况

以上公式均建立在拉拔试验基础上，而实际受力构件往往同时受到弯矩和剪力作用，拉拔试验不能反映构件钢筋锚固区的弯矩和剪力共同作用影响，为了验证以上公式的正确性，我们设计了 17 根不同锚固长度和混凝土强度的悬臂梁试验。其中混凝土强度  $f_{cu} = 16.6 \sim 39.6MPa$ ，锚筋种类有  $\Phi 8$ 、 $\Phi 10$ ，设计锚长在拉拔试验临界锚固长度附近，而且成对出现。同时避免垂直正应力的影响，在加载端处预留孔洞使钢筋和混凝土不结合，在支座以外的悬臂部分预留人工缝以设计锚固长度。构件和试验装置如图 10。

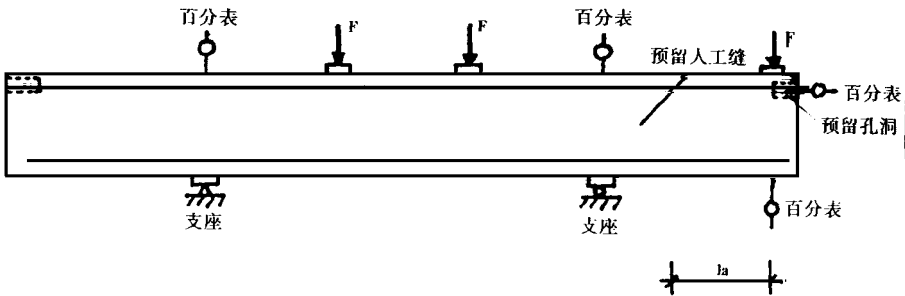


图 10 梁式锚固试验

3.2 试验分析

根据钢筋应力和锚固钢筋的滑移，并参考裂缝的发展形态，大致将梁的破坏形态分为以下三种：

(1) 锚固破坏：钢筋稳定滑移时  $\sigma < f_y$ ，梁上斜裂缝发展迅速而充分，至破坏荷载时，设计锚固段锚筋附近出现一系列小而密的平行小裂缝。斜裂缝的充分发展说明钢筋滑移剧烈，锚固长度不足；平行小裂缝的出现，说明冷轧扭钢筋在加载初期类似于光圆钢筋，钢筋滑移大，而在加载后期存在劈裂现象又类似于螺纹钢筋，而且极限破坏荷载也大于钢筋稳定滑移时荷载，说明其粘结应力和滑移曲线也存在二次峰值。这些都和拉拔试验结果符合较好。

(2) 正截面弯曲破坏：钢筋稳定滑移时， $\sigma \geq f_y$ ，设计锚固段内几乎无裂缝出现，而在靠近支座处出现数条垂直裂缝。锚固段内钢筋屈服而钢筋未明显滑移说明锚固长度足够，构件不会发生锚固破坏。

(3) 斜截面弯曲破坏：加载初期，支座上方出现垂直裂缝，随着荷载增加，支座垂直裂缝和人工斜裂缝缓慢发展，不产生新的裂缝，当荷载增至某一值时，加载端出现一垂直裂缝，而后迅速发展为斜裂缝向支座处延伸，构件随之失去承载能力，钢筋滑移突然发生而且剧烈，但此时钢筋应力  $\sigma \geq f_y$ ，这说明钢筋失效先于锚固破坏，锚固长度足够。

以上三种破坏形式的典型裂缝图如图 11 所示。图 12 则形象地表示梁锚试验结果和临界锚固长度的关系（图中  $d_0$  为冷轧扭钢筋的相应母材直径），从图上可明显发现：锚固长度  $l_a$  大于临界锚固长度  $l_{a,cr}$  时，构件大多发生非锚固破坏，位于曲线上方；反之，当  $l_a < l_{a,cr}$  时，则大多发生锚固破坏，位于曲线下方。这说明拉拔试验基本反映了梁中冷轧扭钢筋的粘结锚固性能，公式（28）可以用来确定实际构件的设计锚固长度。

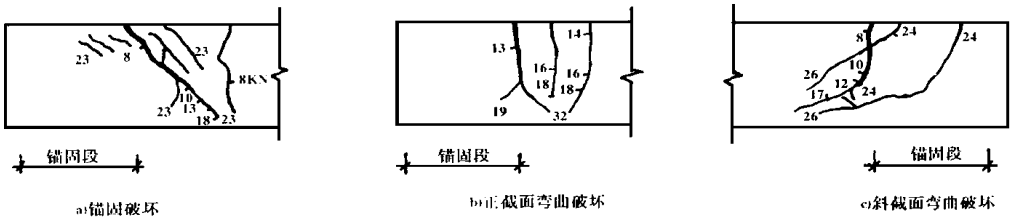


图 12 梁锚试验典型裂缝图

4 可靠度分析和设计建议

4.1 可靠度分析

(1) 极限状态方程和可靠指标

公式（28）实质上为锚固承载力极限状态方程，如果改写成锚固抗力  $R$  和对锚筋的作用效应  $S$  的形式（即  $R=S$ ）有

$$(17.84 + 5.408 l_a / d) f_t = f_y \tag{29}$$

根据《建筑结构设计统一标准》（GBJ 68—84），一般结构或构件属于延性破坏，目标可靠指标取为 3.2，尽管冷轧扭钢筋的粘结锚固破坏是刚度问题，考虑到锚固可靠性对结构正常发

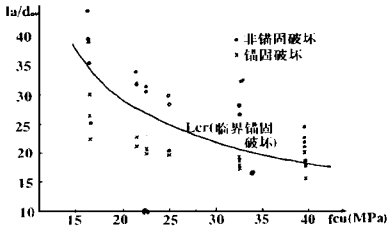


图 12 梁式锚固试验结果

挥其功能具有重要意义，因此取目标可靠指标  $\beta_a=3.87$ ，其相应的失效概率  $p_{fa}=6.24 \times 10^{-5}$ 。对于正常设计在极限状态时，锚固失效概率  $p_{fa}$  应是钢筋应力超过屈服强度事件与锚固力小于屈服力事件同时发生的概率，即

$$P_{fa}=P\left\{\sigma > \tau, \sigma < f_y\right\}=P_{fo} \cdot P_{fo} \tag{30}$$

式中  $P_{fa}$  为锚固失效概率；

$p_{fo}$  为粘结锚固应力达到设计应力 ( $\tau$ ) 事件的概率； $p_f$  为钢筋应力达到最大值  $f_y$  的失效概率。由《统一设计标准》可知， $p_f=6.9 \times 10^{-4}$  (其相应可靠指标  $\beta=3.2$ )。所以有

$$P_{fo}=P_{fa}/P_f=6.24 \times 10^{-5} / 6.9 \times 10^{-4}=9.04 \times 10^{-2} \tag{31}$$

相应的可靠指标  $\beta=1.32$ 。

(2) 二阶矩法求解

假定式 (29) 中各随机变量相互独立， $R$  和  $S$  服从对数正态分布，有

$$\beta=(\ln \mu_R-\ln \mu_S) / \sqrt{\delta_R^2+\delta_S^2} \tag{32}$$

式中  $\beta$  为粘结锚固应力达到极限 ( $\tau$ ) 事件的可靠指标；

$\mu_R$ 、 $\mu_S$ 、 $\delta_R$ 、 $\delta_S$  分别为抗力  $R$  和作用效应  $S$  的平均值及变异系数。

在求得钢筋屈服强度、混凝土抗拉强度、几何尺寸以及计算模式准确性等的平均值和变异系数，进而求得  $\mu_R$ 、 $\mu_S$  和  $\delta_R$ 、 $\delta_S$  后，并代入 (32) 式有

$$\ln \left(17.992+5.454 l_a / d\right)+\ln \left(\mu_t\right)-5.94 \\ -1.32 \sqrt{0.0043+\left(\frac{0.0078 l_a / d}{17.992+5.454 l_a / d}\right)^2+\delta_t^2}=0 \tag{33}$$

以不同强度等级混凝土抗拉强度的统计参数  $\mu_t$  和  $\delta_t$  代入 (33) 式，用计算机迭代即可求得表 1 所示在一定保证率下的钢筋锚固长度的可靠度解。

4.2 设计建议

我国现行设计规范 (GBJ 10-89) 考虑传统习惯，以  $5d$  间隔值确定基本锚固长度，我们在临界锚固长度和可靠度解的基础上，建议按新Ⅲ级钢的标准来确定冷轧扭钢筋的基本锚固长度，具体结果见表 1 所示；同时为适应计算机设计的方便，并参考各国锚固长度设计趋势，也建议采用公式

$$\left[l_a / d_o\right]_o=0.141 f_y / f_t \tag{34}$$

式中  $\left[l_a / d_o\right]_o$  为冷轧扭钢筋基本锚固长度；

$d_o$  为钢筋的标志直径 (轧前母材直径)；

$f_y$  为钢筋抗拉强度设计值；

$f_t$  为混凝土抗拉强度设计值。

同时考虑到钢筋在不同受力形式下的影响，建议采用

$$\left[l_a / d_o\right]=\beta\left[l_a / d_o\right]_o \tag{35}$$

式中  $\beta$  为锚固形式系数，以确定不同锚固形式下的设计锚固长度，具体数值见表 2。

图 13 则形象地比较了以上四种锚固长度的相对大小。

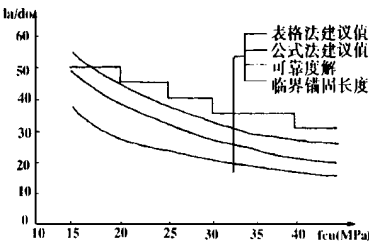


图 13 各种锚固长度的对比



表 1 冷 轧 扭 钢 筋 的 锚 固 长 度  $(l_a/d_o)$

混凝土强度等级		C15	C20	C25	C30	C40
临界锚固长度		37.6	28.0	23.8	20.6	16.5
可靠度解		49.4	39.5	34.0	30.1	24.1
本文	表格法	50	45	40	35	30
建议值	公式法	54.6	44.6	37.8	32.7	27.3

表 2 锚 固 形 式 系 数  $\beta$

锚固形式	延伸长度	搭接长度	受压搭接	支座锚固
$\beta$	1.2	1.2	0.85	0.35

5 主要结论

通过试验研究，本文对冷轧扭钢筋的粘结锚固性能取得以下进展：

1. 通过拉拔试验的观察分析，得出其粘结锚固性能可归纳为四个界限状态和三个受力阶段，即自由端滑移粘结强度  $\tau_f$ 、稳定滑移粘结强度  $\tau_s$ 、残余粘结强度  $\tau_r$ 、极限粘结强度  $\tau_u$  和胶结段、摩阻段和挤压段。

2. 分析了冷轧扭钢筋与混凝土的粘结机理，提出了反对称三角形挤扭作用的受力模型，较好地解释了锚筋的受力全过程。

3. 通过大量拉拔试验资料的统计回归，确定了各特征粘结强度  $\tau_f$ 、 $\tau_s$ 、 $\tau_r$  和  $\tau_u$  的计算公式 (1) ~ (24)。

4. 通过梁式锚固试验，验证拉拔试验基础上的粘结强度特征值的计算公式和临界锚固长度。

5. 由可靠度分析得到了具有一定可靠度保证的锚固长度，并在此基础上提出了冷轧扭钢筋的基本锚固长度和设计锚固长度建议值。

参 考 文 献

1 王传志·腾智明<sup>(12)</sup> 9 钢筋混凝土结构理论<sup>(8)(12)</sup> 建筑工业出版社

2 徐有邻<sup>(12)</sup> 9 变形钢筋—混凝土粘结锚固性能的试验研究<sup>(8)(12)</sup> 中国建筑科学研究院

3 刘立新·王美凤等<sup>(12)</sup> 河南省工程建设地方标准 9 冷轧扭钢筋混凝土设计与施工规程<sup>(8)</sup> 7 试 行<sup>(6)(12)</sup> 郑州工学院等

4 吴佳雄<sup>(12)</sup> 冷轧扭钢筋与混凝土粘结性能试验研究报告<sup>(12)</sup> 浙江工学院

5 中华人民共和国行业标准 9 冷轧扭钢筋混凝土构件技术规程<sup>(8)</sup> 7 讨论稿<sup>(6)(12)</sup> 1996 年 3 月

6 第一届全国冷轧扭钢筋及应用技术研讨会 9 论文集<sup>(8)(12)</sup> 宁波北仑港<sup>(12)</sup> 1993 年 11 月

(下转 34 页)

## Microstructures and Mechanical Properties of Rapidly Solidified Al-4Ti-2V-3La Alloy for Elevated Temperature Application

Yang Mingshan\* Tang Yali Shen Ningfu Liu Xiaofang

( \* *Department of Mathematics & Mechanics* )

( *Department of Materials Science and Engineering* )

**Abstract** Optical metallography ( OM ) 、transmission electron microscopy ( TEM ) 、and scanning electron microscopy ( SEM ) techniques were used to study rapidly solidified ( RS ) Al-4Ti-2V-3La alloy . A large amount of fine and homogenously dispersed intermetallic particles , which is of diamond cubic crystal structure (  $a = 1.47 \text{ nm}$  ) with the composition stoichiometry of  $\text{Al}_{20}(\text{Ti}, \text{V})_2\text{La}$  , were distributed on matrix . The room temperature and elevated temperature tensile properties of RS Al-4Ti-2V-3La , which approached advanced RS elevated temperature alloys , were measured . It is shown that potentiality of RS Al-Ti-La based alloys for elevated temperature application . Alloying additions and technology improvement are effective approaches to develop the alloy .

**Keywords** Rapid solidification Al-4Ti-2V-3La alloy microstructure mechanical property .

( 上接 16 页 )

## The Study of Bond Capacity Between Cold-rolled Bars and Concrete

Guan Pinwu Liu Lixin Xu Youlin

( Zhengzhou University of Technology )

( Building Research Association of China )

**Abstract** In this paper the bond mechanism and main factors causing the bond capacity between cold-rolled bars and concrete are studied in detail , based on a large amount of pull-out bond tests about cold-rolled bars . And formula of characteristic bond strengths is regressed , the formula on limited bond length of cold-rolled bars is also deduced . Then 17 beams' bond experiment is made to prove the formal formula and conclusion . Finally , based on the analysis of reliability method , bond lengths of cold-rolled bars concrete elements are suggested for composing the Chinese Specification For Design And Construction of Cold-rolled Bars Concrete Elements .

**Keywords:** cold-rolled bars bond reliability method