HTRB700钢筋材料性能试验

王丽梅^{1,2†}, 王安宝^{1*}, 卢芳云², 周布奎^{1†}, 郝鲁波¹, 薛宇龙¹, 张磊¹

1. 军事科学院国防工程研究院, 北京 100036;

2. 国防科技大学文理学院, 长沙 410073

†同等贡献

*联系人, E-mail: wabwgg@sina.com

收稿日期: 2019-05-23; 接受日期: 2019-07-18; 网络出版日期: 2019-09-25

摘要 研究表明, 提高钢筋的强度将有效提高构件承载力、降低钢筋用量、减小施工难度. 目前国外研制并应用于实际工程的高性能钢筋的屈服强度为400–900 MPa. 我国研制的高强钢筋的屈服强度已达700 MPa. 钢筋是应变率敏感材料, 抗震结构以及抗爆结构在设计时均需考虑钢筋的应变率效应. 为研究HTRB700钢筋的应变率效应, 本文对HRB400和HTRB700钢筋材料的性能进行了试验测试, 分别研究了其性能机理和应变率效应. 其中, 应变率效应试验的应变率范围为 2.5×10^{-4} – 100 s^{-1} . 对应变率效应试验结果进行了拟合分析, 给出了计算公式, 为推广HTRB700新型高强度高塑性钢筋在抗震和抗爆结构中的应用提供参考.

关键词 HTRB700钢筋, 应变率效应, 准静载, 快速加载, 动力提高系数

PACS: 45.50.-J, 46.50.+a, 46.80.+j

1 引言

研究表明, 钢筋强度每提高100 MPa, 钢材用量可节约6%–10%^[1], 因此研制和推广应用高强钢筋是降低钢结构工程成本的有效手段, 意义重大. 塑性往往随强度的提高而降低, 这是制约高强度钢筋应用的主要因素. 目前, 国外通过调整钢材的组分、创新冶炼工艺等手段提高钢材的强度、韧性、耐疲劳性、可焊性等性能^[2], 应用于实际工程的高性能钢材的屈服强度已达685–980 MPa. 而我国规范用钢筋强度仅为335–500 MPa^[3,4]. 钢材强度偏低, 导致结构承载力较低, 结构用钢量居高不下.

HTRB700钢筋为我国自主研制的高性能钢筋. 通过配方的优选, 钢材冶炼、热处理和商品化材工艺路线的创新^[5], 达到细化晶粒、提高强度、保证材料塑性的目的, 使钢材的屈服强度达600–900 MPa^[6], 且伸长率达到了现行HRB400的标准. 但在应用于混凝土结构工程前, 尚有其材料力学性能问题需要解决. 研究表明, 爆炸或冲击荷载作用在结构上会在钢筋材料中引起较高的应变率, 材料呈现应变率效应. 因此, 在对结构进行爆炸或冲击荷载作用下的动力反应分析时, 应当考虑材料的应变率效应. 本文通过钢材的微观结构分析, 2.5×10^{-4} – 100 s^{-1} 应变率范围内应变率效应的对比试验对上述问题进行研究, 将HTRB700与

引用格式: 王丽梅, 王安宝, 卢芳云, 等. HTRB700钢筋材料性能试验. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 024611

Wang L M, Wang A B, Lu F Y, et al. Material performance experiments of HTRB700 reinforcing bar (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 024611, doi: 10.1360/SSPMA-2019-0179

HRB400的试验结果进行对比, 研究HTRB700的性能提高情况, 为其推广应用提供参考.

2 钢材的微观结构

图1所示为HRB400和HTRB700螺纹钢纵剖面的金相组织. 在较低倍数显微镜下, 两者均呈较明显的带状组织(图1(a)和(c)), 即存在沿轧制方向的组织. 研究表明, HRB400和HTRB700试样的显微组织均由铁素体和珠光体组成, 其中深色部分为珠光体, 白色或者浅色部分为铁素体. 但是, 图中显示两种试样的晶粒尺寸及相的构成比例不同. 经统计测量, HRB400的铁素体晶粒尺寸为 $12.4\ \mu\text{m}$, 而HTRB700的为 $6.2\ \mu\text{m}$, 后者仅为前者的50%; 其次, HTRB700的珠光体体积分数为57%, 而HRB400的为47%. 晶粒细化使得钢材韧性提高, 同时珠光体较铁素体强度高, 因而HTRB700较传统的HRB400具有更高的强度.

扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察, 进一步证实了金相检验的结果, 即HTRB700的铁素体含量低于HRB400. 图2展示了HRB400和HTRB700的SEM纤维组织, 其中铁素体呈灰暗色, 层片状的珠光体(内的渗碳体)呈亮白色. HRB400的珠光体和铁素体均具有较为明显的等轴状特征(图2(a)), 并未显现金相照片中出现的组织. 反之, HTRB700的珠光体和铁素体沿钢筋轴向的组织特征

图2 HRB400和HTRB700的SEM显微组织. (a), (b) HRB400; (c), (d) HTRB700

Figure 2 SEM microstructures of HRB400 and HTRB700. (a), (b) HRB400; (c), (d) HTRB700.

非常明显(图2(c)). 高倍观察发现HTRB700的珠光体显微组织与HRB400的不同, 虽然不同珠光体领域的分界还能得到辨别(见图2(d)内的亮线), 但渗碳体明显碎化, 只是保持一定的有序排列, 其形貌介于层片状和粒状之间. 这种珠光体组织的强度略低但塑性更好.

3 应变率效应试验

为分析钢筋混凝土结构在爆炸和冲击荷载作用下的动力反应, 需要对建筑钢筋动力性能进行研究. 应变率效应试验测量钢筋的应力应变曲线, 通过对应力应变曲线的分析, 获得材料的力学性能, 包括弹性模量、屈服强度、抗拉强度、伸长率等.

核武器爆炸荷载作用下, 钢筋混凝土结构中钢筋的应变率范围一般为 $0.05\text{--}1\ \text{s}^{-1}$; 常规武器荷载作用下, 构件中钢筋的应变率要高得多, 达到 $10^2\ \text{s}^{-1}$ 量级^[7]. 因此, 受实验设备功能的限制, 并从实用的角度考虑, 确定试验的应变率范围为 $0.05\text{--}100\ \text{s}^{-1}$.

试验分3段进行: 通过准静载拉伸实验, 研究材料在 $2.5\times 10^{-4}\ \text{s}^{-1}$ 时的应变率效应; 通过快速加载试验, 测量钢筋在 $0.05\text{--}1\ \text{s}^{-1}$ 应变率范围内的应力应变曲线, 研究材料的中应变率效应. 这两部分试验在KG-4T动载材料试验机上进行(如图3(a)所示). 通过高速动载试验, 测量钢筋在 $1\text{--}100\ \text{s}^{-1}$ 应变率范围内的应力应变曲线, 研究材料的高应变率效应, 在VHS160/100-20高速

图1 HRB400和HTRB700的金相组织. (a), (b) HRB400; (c), (d) HTRB700

Figure 1 Metallographic structures of HRB400 and HTRB700. (a), (b) HRB400; (c), (d) HTRB700.

图 3 (网络版彩图) 动载材料试验设备. (a) KG-4T; (b) VHS160/100-20

Figure 3 (Color online) Mechanical material experimental equipments. (a) KG-4T; (b) VHS160/100-20.

试验机上进行(如图3(b)所示). 并对 $0.05\text{--}100\text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的钢筋强度提高系数进行了综合分析, 给出了计算公式.

为便于对比, 对HRB400和HTRB700两种钢筋进行了应变率效应试验. 参照GB/T228-2002《金属材料室温拉伸试验方法》, 并考虑动力加载装置最大拉伸力的限制, 用于静态拉伸和中应变率效应试验的试件形状按图4(a)加工, 标距段长度50 mm, 直径5 mm; 用于高应变率效应试验的试件按图4(b)图纸加工, 标距段长度20 mm, 直径6 mm. 试验时, 每种钢筋分别在8个应变率下加载, 每个应变率下进行3次试验.

3.1 试验结果

3.1.1 静态拉伸试验结果

在静态拉伸试验中, 实验员手动控制加载速度, 使试件从开始加载到预估屈服阶段的总时间维持恒定, 从而保证弹性阶段的应变速率约为 $2.5\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$, 待试件接近断裂时, 降低加载速度, 以便得到完整的应力应变曲线, 如图5所示. 其中, σ 为应力, ε 为应变.

图 5 (网络版彩图) 静态拉伸试验的应力应变曲线. (a) HRB400; (b) HTRB700

Figure 5 (Color online) Stress-strain curves in quasi-static tensile experiments. (a) HRB400; (b) HTRB700.

图 4 试件加工图. (a) 准静载和中应变率效应试验; (b) 高应变率效应试验

Figure 4 Machining drawing of specimen. (a) Quasi-static load and medium strain rate effect tests; (b) high strain rate effect tests.

3.1.2 中应变率效应试验结果

在中应变率效应试验中, 对HRB400和HTRB700进行了4组试件的动态拉伸性能测试, 每组取3个有效数据, 获得了加载过程中的应力-应变曲线. 试验前测量了各个试件的截面尺寸, 试件直径均在 $(5\pm 0.02)\text{ mm}$ 范围内, 故计算强度时截面直径统一按照5 mm计算. 图6所示为 0.5 s^{-1} 量级的两组试验结果.

3.1.3 高应变率效应试验结果

在高应变率效应试验中, 对HRB400和HTRB700进行了3组试件的动态拉伸性能测试, 每组取3个有效数据, 获得了加载过程中的应力-应变曲线. 试验前测量了各个试件的截面尺寸, 试件直径均在 $(6\pm 0.02)\text{ mm}$ 范围内, 故计算强度时截面直径统一按照6 mm计算.

由于激光测量较灵敏, 试验得到的原始应力应变曲线有不同程度的波动, 如图7所示. 在平滑处理曲线时, 先去除波动较大的点(如图7中A, B等), 然后采用移

图 6 (网络版彩图)中应变率约为 0.5 s^{-1} 时, 两种钢筋的应力应变曲线. (a) HRB400; (b) HTRB700

Figure 6 (Color online) Stress-strain curves of HRB400 and HTRB700 at about 0.5 s^{-1} in middle strain rate experiments. (a) HRB400; (b) HTRB700.

图 7 高应变率效应试验曲线的平滑处理

Figure 7 Trend curve of high strain rate experiments.

动平均法给出其趋势线, 并将参数周期设置为300, 即第 i 个数据点是对300个数据取平均^[8], 将平均数据点连接得到平滑处理曲线. 图8为应变率约为 10 s^{-1} 时两种钢筋的应力应变曲线.

图 8 (网络版彩图)高应变率约为 10 s^{-1} 时, 两种钢筋的应力应变曲线. (a) HRB400, $\dot{\varepsilon}=8.28$; (b) HTRB700, $\dot{\varepsilon}=8.15$

Figure 8 (Color online) Stress-strain curves of HRB400 and HTRB700 at about 10 s^{-1} in high strain rate experiments. (a) HRB400, $\dot{\varepsilon}=8.28$; (b) HTRB700, $\dot{\varepsilon}=8.15$.

3.2 试验结果汇总

应变率效应试验结果汇总于表1, 表中所列数值均为每组试件的平均值. 其中, R_{el} 为屈服强度, R_{m} 为抗拉强度, E 为弹性模量, A_{gt} 为最大力总伸长率, A 为断后伸长率. 定义动力提高系数(DIF)为动态强度与静态强度的比值, DIF_{el} 为屈服强度动力提高系数, DIF_{m} 为抗拉强度动力提高系数. 强屈比 K 为抗拉强度与屈服强度的比值.

从应变率试验数据整体来看, 主要有以下规律.

(1) 两种钢筋实测的静态屈服强度均高于其屈服强度特征值, 两者的比值均约为1.20.

(2) 就静态试验的强屈比而言, GB1499.2-2007《钢筋混凝土用钢第2部分: 热轧带肋钢筋》中规定, 在有较高要求的抗震结构中, 要求钢筋的强屈比不小于1.25, HRB400钢筋适用于抗震结构. 另外, HRB400钢筋的强屈比明显高于HTRB700, 且强屈比随变形速度的增加有明显的降低趋势.

(3) 钢筋的屈服强度和抗拉强度随变形速度的增

表 1 2.5×10^{-4} – 100 s^{-1} 应变率范围的试验结果汇总表**Table 1** Results summary in strain rate of 2.5×10^{-4} – 100 s^{-1}

材料	$\dot{\varepsilon} (\text{s}^{-1})$	$R_{\text{eL}} (\text{MPa})$	$R_{\text{m}} (\text{MPa})$	$E (\text{GPa})$	$A_{\text{gt}} (\%)$	$A (\%)$	K	DIF_{eL}	DIF_{m}
HRB400	2.5×10^{-4}	479	680	205.0	12.4	18.7	1.42	1.00	1.00
	0.042	506	711	201.2	11.3	17.3	1.41	1.06	1.05
	0.41	544	731	205.2	10.0	14.7	1.34	1.14	1.08
	0.49	544	754	217.8	10.8	16.7	1.39	1.14	1.11
	0.60	552	749	210.5	10.4	17.0	1.36	1.15	1.10
	0.67	559	886	213.5	12.2	17.0	1.17	1.17	1.39
	8.28	562	922	218.4	14.9	22.8	1.18	1.17	1.39
	64.76	580	951	208.3	14.4	23.0	1.49	1.43	1.50
HTRB700	0.042	852	1024	219.9	5.5	8.5	1.20	1.01	1.00
	0.47	883	1055	207.5	5.6	9.3	1.19	1.05	1.03
	0.58	866	1038	210.3	5.8	9.6	1.20	1.03	1.02
	0.73	878	1061	222.6	6.1	10.8	1.21	1.04	1.04
	0.82	860	1082	191.7	12.5	20.4	1.26	1.02	1.06
	8.15	841	1077	213.2	9.8	16.5	1.28	1.00	1.05
	67.94	888	1110	210.8	11.3	20.6	1.25	1.05	1.09

加均有提高的趋势, 屈服强度的提高幅度小于抗拉强度的提高幅度. 在试验中动态应变率范围为 2.5×10^{-4} – 100 s^{-1} , 在此应变率范围内, 与静态试验结果相比, HRB400 钢筋屈服强度提高了 30%、抗拉强度提高了 44%, HTRB700 钢筋屈服强度提高了 23%、抗拉强度提高了 28%.

(4) 每种钢筋的断裂总伸长率随变形速度的增加有一定波动, 没有明显的规律性. 另外, GB1499.2-2007《钢筋混凝土用钢第 2 部分: 热轧带肋钢筋》中规定, 钢筋的断裂总伸长率应不小于 16% 和 15%, 最大力总伸长率不小于 7.5%, HRB400 钢筋满足要求.

从图 5、6、8 和表 1 数据可以看出, 随着应变率的增大, 钢筋的屈服强度和极限强度提高, 极限强度对应的应变无明显变化; 钢筋的屈服强度动力提高系数 DIF_{eL} 随应变率的增大明显提高, 而且提高系数与钢筋应变率的数量级有关, 即相同数量级应变率条件下, DIF_{eL} 的提高系数相差不大.

4 钢筋的动力模型

经验型的材料动力模型可分为两类: 一类首先给出材料的力学性能特征值, 在此基础上确定材料的应

力-应变关系式, 如两折线或三折线模型, 其参数的物理含义明确. 另一类以 Johnson-Cook (J-C) 模型为代表, 直接给出材料的应力-应变关系式, 其中包含部分材料力学性能特征值. 参照文献[8], 给出三折线模型, 式中下标“s”表示准静载.

4.1 三折线模型

文献[8]中, 钢筋的屈服强度和抗拉强度随应变率的变化规律分别用式(1)和(2)表示:

$$\frac{R_{\text{eL}}}{R_{\text{eL,s}}} = 1 + \frac{D_1}{R_{\text{eL,s}}} \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s}, \quad (1)$$

$$\frac{R_{\text{m}}}{R_{\text{m,s}}} = 1 + \frac{D_2}{R_{\text{m,s}}} \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s}. \quad (2)$$

三折线模型的应力应变关系可表示为

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_b, \text{ 弹性阶段,} \\ R_{\text{eL}}, & \varepsilon_b < \varepsilon \leq \varepsilon_e, \text{ 屈服平台,} \end{cases} \quad (3)$$

$$\sigma = R_{\text{eL}} + \frac{\varepsilon - \varepsilon_e}{\varepsilon_m - \varepsilon_e} R_{\text{m}}, \quad \varepsilon_e < \varepsilon \leq \varepsilon_m, \text{ 塑性阶段,} \quad (4)$$

式中, ε_b 、 ε_e 分别为屈服平台开始和结束时的应变, $\varepsilon_b = R_{\text{eL}}/E$, $\varepsilon_e = \varepsilon_b + (\varepsilon_{e,s} - \varepsilon_{b,s})$; ε_m 为极限强度对应的应变, $\varepsilon_m = \varepsilon_{m,s}$.

4.2 改进的三折线模型

对式(1)和(2)简单改造, 各增加一个系数, 如式(5)和(6)所示:

$$\frac{R_{\text{cl}}}{R_{\text{cl},s}} = D_{10} + \frac{D_1}{R_{\text{cl},s}} \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s}, \quad (5)$$

$$\frac{R_m}{R_{m,s}} = D_{20} + \frac{D_2}{R_{m,s}} \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s}. \quad (6)$$

用一元线性回归分析法处理表1中的屈服强度 R_{cl} 和抗拉强度 R_m , 可得两种钢筋的 D_{10} , D_1 和 D_{20} , D_2 , 如表2所示. 由于处理的是同一组试验数据, 因此式(1), (2)与式(5), (6)的 D_1 和 D_2 相等.

4.3 试验结果与模型结果的比较

由式(1), (2), (5), (6)计算所得的屈服强度 R_{cl} 和抗

拉强度 R_m 与试验平均值汇总于表3. 由表3可见, 屈服强度的计算值相对于测量值误差均小于4%, 绝大部分误差小于2%, 说明试验结果与模型吻合得很好. 而对于抗拉强度, 式(2)计算出的HRB400的抗拉强度与测量值的差别很大, 误差在9.8%–30.6%之间, 式(6)的计算结果则与试验结果吻合较好, 误差不大于10.1%, 说明试验结果与模型吻合得较好. 而对于HTRB700, 式(2)和(6)的计算效果相当, 计算值与测量值的相对误差小于7%, 二者吻合得很好.

DIF是描述钢筋性能的一个重要参数. 由上述模型得到的屈服强度动力提高系数和极限强度动力提高系数与试验平均值的比较如图9所示. 拟合曲线的斜率越大, 表示对于相同的应变率增加, 动力提高系数提高得越多, 说明材料具有较高的应变率敏感性. 由图9可以看出, HRB400对应变率变化更敏感. 这也符合文献

表 2 式(1), (2), (5), (6)的参数

Table 2 Parameters of eqs. (1), (2), (5), (6)

钢筋种类	$\dot{\varepsilon}_s$	$R_{\text{cl},s}$	$R_{m,s}$	D_{10}	D_1	D_{20}	D_2
HRB400	2.5×10^{-4}	479	680	0.9936	8.7902	0.7408	37.1239
HTRB700	2.5×10^{-4}	852	1024	0.9969	2.0660	0.9469	11.1111

表 3 模型计算结果与试验平均值

Table 3 Comparison of the results from the proposed model and average values from experiments

钢筋种类	$\dot{\varepsilon}$	R_{eL}					R_m				
		试验	式(1)	式(1) 误差 (%)	式(5)	式(5) 误差 (%)	试验	式(2)	式(2) 误差 (%)	式(6)	式(6) 误差 (%)
HRB400	0.042	506	524.0	3.6	521.0	3.0	711	870.2	22.4	694.0	−2.4
	0.41	544	544.1	0.01	541.0	0.5	731	954.8	30.6	778.6	6.5
	0.49	544	545.6	0.3	542.6	0.3	754	961.4	27.5	785.2	4.1
	0.60	552	547.4	−0.8	544.4	1.4	749	968.9	29.4	792.7	5.8
	0.67	559	548.4	−1.9	545.3	2.4	886	973.0	9.8	796.8	−10.1
	8.28	562	570.5	1.5	567.4	1.0	922	1066.4	15.7	890.1	−3.5
	64.76	580	588.6	1.5	585.5	0.9	951	1142.7	20.2	966.5	1.6
HTRB700	0.042	852	862.6	−1.2	859.9	0.9	1024	1080.9	5.6	1077.8	5.2
	0.47	883	867.6	1.8	864.9	−2.0	1055	1107.8	5.0	1104.6	4.7
	0.58	866	868.0	−0.2	865.4	−0.07	1038	1110.1	6.9	1106.9	6.6
	0.73	878	868.5	1.1	865.8	−1.4	1061	1112.7	4.9	1109.5	4.6
	0.82	860	868.7	−1.0	866.1	0.7	1082	1114.0	3.0	1110.8	2.7
	8.15	841	873.5	−3.7	870.8	3.5	1077	1139.5	5.8	1136.3	5.5
	67.94	888	877.9	1.2	875.2	−1.4	1110	1163.0	4.8	1159.9	4.5

图 9 两种钢筋的强度动力提高系数. (a) HRB400, DIF_{eL} ; (b) HRB400, DIF_m ; (c) HTRB700, DIF_{eL} ; (d) HTRB700, DIF_m .
Figure 9 DIF of HRB400 and HTRB700. (a) HRB400, DIF_{eL} ; (b) HRB400, DIF_m ; (c) HTRB700, DIF_{eL} ; (d) HTRB700, DIF_m .

[8]的结论: 屈服强度较低的钢种比屈服强度高的钢种呈现更加明显的应变率敏感性.

5 结论

本文以高强钢筋的推广应用为出发点, 以其力学性能研究为目的, 对HRB400和HTRB700钢筋进行了微观结构分析和应变率效应试验, 并给出了钢筋的动力模型.

从金相显微组织分析结果来看, 组成HRB400和HTRB700的晶粒有铁素体和珠光体, 珠光体比铁素体强度高. HTRB700的铁素体尺寸更小、珠光体含量更高, 因此其力学性能较HRB400有了显著提高, 其中抗拉强度、屈服强度分别提高至800和730 MPa以上. SEM观察进一步证实了HTRB700的铁素体含量低于HRB400的结论. 同时, 高倍观察发现虽然HTRB700珠光体间的分界还能得到辨别, 但渗碳体明显碎化, 只是保持一定的有序排列. 这种珠光体组织的强度略低但塑性更好.

在应变率效应试验中, 从实用的角度出发, 将应变率范围定为 $0.05\text{--}100\text{ s}^{-1}$, 分3段分别进行了准静载、中应变率和高应变率效应试验. 试验结果表明: 两种钢筋的屈服强度和抗拉强度随应变率的增加均有提高的趋势, 屈服强度的提高幅度小于抗拉强度的提高幅度. 与静态试验结果相比, HRB400钢筋屈服强度提高了30%、抗拉强度提高了44%, HTRB700钢筋屈服强度提高了23%、抗拉强度提高了28%. 给出了应变率型本构模型. 通过与该模型的对比分析表明, 试验结果与模型结果吻合得很好. 该模型可用于结构在爆炸和冲击荷载作用下的动力反应分析.

提出了改进的三折线模型, 并结合试验数据, 通过一元线性回归分析法确定了模型的系数. 将试验结果与模型结果进行比较, 试验结果与模型结果吻合得很好. 将由模型计算得到的动力提高系数与试验平均值进行对比, 可见HRB400比HTRB700对应变率变化更敏感. 这与文献[8]的结论相符, 即屈服强度较低的钢种(HRB400)比屈服强度高的钢种(HTRB700)呈现更加明显的应变率敏感性.

理论上, 钢筋强度的提高会伴随塑性的损失. 应变率试验表明, HTRB700 的塑性确实劣于 HRB400. 但 HTRB700 在强度大幅提高的同时, 塑性仍满足规范要求, 具有很大的推广应用价值.

参考文献

- 1 Huang W, Zhang L, Wang P, et al. Research on application and development of steel bars used in construction (in Chinese). *Architect Tech*, 2010, 41: 242–245 [黄伟, 张丽, 王平, 等. 建筑用钢筋的应用发展研究. *建筑技术*, 2010, 41: 242–245]
- 2 International Association for Bridge and Structural Engineering, ed. Shi G, translated. *Use and Application of High-Performance Steels for Steel Structures* (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 2010 [国际桥梁与结构工程协会, 编著. 施刚, 译. 高性能钢材在钢结构中的应用. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010]
- 3 Ministry of Housing and Urban-Rural Construction. *Code for Design of Concrete Structures (GB 50010-2010)* (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 2011 [住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范(GB 50010-2010). 北京: 中国建筑工业出版社, 2011]
- 4 Institute of Standard Quotas, Ministry of Housing and Urban-Rural Construction. *Technical Guidelines for Application of High Strength Hot Rolled Ribbed Bars in Concrete Structure* (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 2009 [住房和城乡建设部标准定额研究所. 热轧带肋高强钢筋在混凝土结构中应用技术导则. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009]
- 5 Chen N L, Rong Y H, Zuo X W, et al. Water-piercing quenching cooling device and method for rapid cooling by slit spraying (in Chinese). *China Patent*, CN2011104539582, 2011-12-29 [陈乃录, 戎咏华, 左训伟, 等. 采用狭缝喷水实现快速冷却的穿水淬火冷却装置及方法. 中国专利, CN2011104539582, 2011-12-29]
- 6 Housing and Urban-Rural Construction Department of Jiangsu Province. *Technical Specification for Heat Treatment Ribbed High Strength Reinforced Concrete Structures* (in Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 2012 [江苏省住房和城乡建设厅. 热处理带肋高强钢筋混凝土结构技术规程. 南京: 江苏科学技术出版社, 2012]
- 7 Rohr I, Nahme H, Thoma K. Material characterization and constitutive modelling of ductile high strength steel for a wide range of strain rates. *Int J Impact Eng*, 2005, 31: 401–433
- 8 Lin F, Gu X L, Kuang X X, et al. Constitutive models for reinforcing steel bars under high strain rates (in Chinese). *J Build Mater*, 2008, 11: 14–20 [林峰, 顾祥林, 匡昕昕, 等. 高应变率下建筑钢筋的本构模型. *建筑材料学报*, 2008, 11: 14–20]

Material performance experiments of HTRB700 reinforcing bar

WANG LiMei^{1,2†}, WANG AnBao^{1*}, LU FangYun², ZHOU BuKui^{1†}, HAO LuBo¹,
XUE YuLong¹ & ZHANG Lei¹

¹ *Institute of Defense Engineering, Military Academy of Sciences, PLA, Beijing 100036, China;*

² *College of Liberal Arts and Science, National University of Defense Technology, PLA, Changsha 410073, China*

The research shows that the increase of the strength of reinforcing bars can effectively improve the bearing capacity of the components, reduce the amount of reinforcing bars and decrease the difficulty of construction. At present, the yield strength of high-performance reinforcing bars developed abroad and applied in practical engineering is 400–900 MPa, while that in China has reached 700 MPa. As strain-rate sensitive materials, the strain-rate effect of reinforcing bars should be taken into account in the design of seismic buildings and explosion-resistant protective structures. In order to figure out the strain-rate effect of HTRB700, the properties of HRB400 and HTRB700 reinforcing bars are tested. Their performance mechanism and strain-rate response are studied respectively. Among them, the strain rate range of strain-rate effect experiments is $2.5 \times 10^{-4} - 100 \text{ s}^{-1}$. The calculation formula is obtained after fitting and analyzing the experimental results, which provides information for the popularization and application of HTRB700 reinforcing bars with new high strength and high plasticity in seismic and explosion resistant structures.

HTRB700 reinforcing bar, strain-rate effect, quasi-static load, fast loading, dynamic increase factor of strength

PACS: 45.50.-J, 46.50.+a, 46.80.+j

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0179](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0179)