

新Ⅲ级钢筋动力性能及在抗爆结构中的应用试验

高永红^{1,2}, 范俊奇^{1,2}, 楼梦麟¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 在静力试验的基础上首先利用 KG-5 型快速加载试验机对新Ⅲ级钢筋进行了不同应变率下的动力性能试验, 完整给出了材料的动态应力时程曲线, 定性研究分析了新Ⅲ级钢筋的动态力学性能; 然后利用 KG-500 型快速加载试验机对不同配筋率、不同混凝土强度的梁进行了快速加载条件下的抗弯性能试验, 比较研究了新Ⅲ级钢筋与普通Ⅱ级钢筋混凝土梁的动态抗弯承载性能及其与配筋率及混凝土强度的变化关系。结果表明, 新Ⅲ级钢筋具有良好的动态力学性能, 随变形速率增加, 其屈服强度提高, 但塑性保持不变; 在防护结构中合理采用新Ⅲ级钢筋具有良好的综合效益。同时指出了在使用中应注意与混凝土强度匹配的具体问题。

关键词: 快速加载; 动态力学性能; 抗弯承载性能; 试验研究

中图分类号: O347.3

文献标识码: A

Experimental Research on New Grade-3 Steel-bars Dynamic Mechanical Property and Its Application to Blast-resistant Structure

GAO Yonghong^{1,2}, FAN Junqi^{1,2}, LOU Menglin¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. The 3rd Engineer Scientific Research Institute of the Headquarters of the General Staff, Luoyang 471023, China)

Abstract: Based on the static tensing test, the dynamic mechanical behavior of new grade-3 steel-bars (NG3S) with different strain rates was first experimented systematically on the rapid loading test machine of KG-5, the complete dynamic stress-time curves of NG3S under high strain rate were given, and the dynamic mechanical properties of NG3S were analyzed based on the test results. Then, through dynamic beam test on the rapid loading test machine of KG-500, the static and dynamic bending bearing capacity of NG3S concrete beams with different reinforcing percents and concrete strengths were studied by experimental method and compared with the beams with ordinary grade-2 steel-bars. The result shows that the NG3S materials are of good dynamic properties and its

dynamic performance increases with the strain rate, but the plastic property maintains invariable. The adoption of NG3S in protective structure brings a favourable comprehensive benefit. Finally, the key problem was put forward that the NG3S should match with the concrete strength.

Key words: rapid loading; dynamic mechanical behavior; bending bearing capacity; experimental research

400 Mpa 热轧带肋钢筋(HRB400, 也称新Ⅲ级钢筋^[1])是专门为建筑结构应用开发的新型钢筋。资料表明^[2-8], 新Ⅲ级钢筋具有强度高、韧性好、焊接性能和抗震性能良好等优点。在欧洲等发达国家, 新Ⅲ级钢筋占建筑钢材总量的 70% 以上^[2]。我国原冶金部和建设部在 1995 年联合发文推广应用, 建设部早在 1996 年就将新Ⅲ级钢筋技术纳入国家标准《混凝土结构设计规范(GBJ10—1989)》^[2]。但由于宣传、推广力度不够, 设计部门对其应用性能还有顾虑, 施工和建设单位对其经济效益认识不足, 致使新Ⅲ级钢筋性能研究不够, 在工程中的使用不充分。

材料抗动载性能是抗爆结构动力分析和抗震设计的基本依据^[9]。规范和有限资料^[2-12]仅对新Ⅲ级钢筋静力性能进行介绍, 对动态行为研究不多。要在抗爆和抗震结构中推广应用, 对其动态力学性能的研究十分必要。本文通过快速加载下新Ⅲ级钢筋混凝土结构承载性能试验研究新Ⅲ级钢筋的动力行为, 对新Ⅲ级钢筋应用性能、综合效益进行分析、研究, 为在抗爆和抗震结构中应用该材料提供了依据。

1 试验方案设计

1.1 试件设计

(1) 材料动态力学性能试验。选用直径为 $\Phi 14$ 的新Ⅲ级钢筋和普通Ⅱ级钢筋, 每种钢筋制作 4 组

试验构件,其中 1 组做静载试验,另 3 组做不同加载速率下的快速加载试验. 每组试件的数量均为 5 根,为了保证试验构件的统一性,减小材料本身的影响,每种钢筋的 4 组构件均取自同一根钢筋.

(2) 新Ⅲ级钢筋混凝土动态抗弯承载性能试验. 通过不同配筋率及混凝土强度的钢筋混凝土梁的静载及快速加载下的承载性能的比较研究新Ⅲ级钢筋的使用性能. 试验梁长、宽、高分别为 1 200, 120, 200 mm. 共设计了 3 种配筋率 (0. 47%, 0. 64%, 1. 28%); 2 种混凝土强度 (标号为 C30, C40), 共 10 组梁, 每组 4 根. 每组取 1 根作静载试验, 其余 3 根作快速加载试验. 各组梁的主要参数见表 1.

1.2 试验加载方案

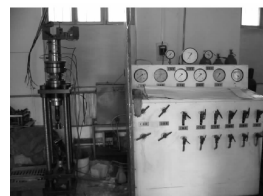
对于新Ⅲ级钢筋和Ⅲ级钢筋混凝土分别采用 KG-5 型和 KG-500 型快速加载试验机进行试验, 加载试验机如图 1, 主要技术指标见表 2.

根据规范要求^[13], 对材料静载试验采用的应

表 1 试验梁的材料参数

Tab.1 test parameter of testing beams

试验组数	主筋型号	构件数目	配筋率/%	混凝土强度
PL1 组	Ⅱ级	4	0. 47	C30
XL1 组	Ⅲ级	4	0. 47	C30
PL2 组	Ⅱ级	4	0. 47	C40
XL2 组	Ⅲ级	4	0. 47	C40
PL3 组	Ⅱ级	4	0. 64	C30
XL3 组	Ⅲ级	4	0. 64	C30
PL4 组	Ⅱ级	4	0. 64	C40
XL4 组	Ⅲ级	4	0. 64	C40
PL5 组	Ⅱ级	4	1. 28	C40
XL5 组	Ⅲ级	4	1. 28	C40



a KG-5

b KG-500

图 1 试验采用的快速加载试验机

Fig.1 Rapid loading test machines

表 2 试验机的主要技术指标

Tab.2 Qualifications of test machines

试验机型号	最大拉(压)力/kN	主活塞最大行程/mm	主活塞最大速率/(m·s ⁻¹)	装置质量/t	表面尺寸/mm		
					长	宽	高
KG-5	50	30	2 000	2	1 860	300	300
KG-500	5 000	30	1 500	25	6 060	3 658	1 320

变速率取 $2.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; 动力性能试验共设计了 3 种应变速率, 分别约为 1 s^{-1} , 10 s^{-1} 和 66 s^{-1} .

抗弯试验采用两端简支、四点弯曲方式加载, 纯弯段长度 0.3 mm, 构件的加载方式如图 2, 图中 P 为外荷载, L 为跨度. 试验加载速率约为 60 s^{-1} ; 试验同时对荷载、应变值、跨中挠度及试验后裂缝的宽度和具体位置进行测量.

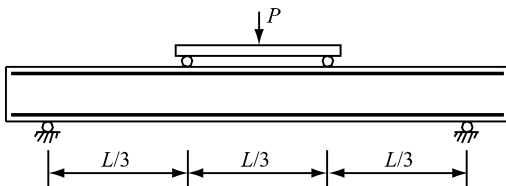


图 2 抗弯试验加载方案示意

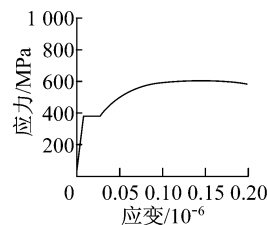
Fig.2 Schematic sketch of beam test

2 试验结果及分析

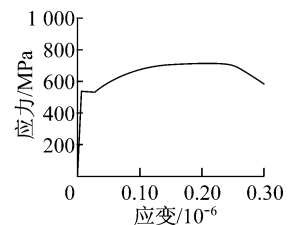
2.1 新Ⅲ级钢筋动力性能试验结果及分析

试验得出新Ⅲ级钢筋在静载及快速变形下的性能变化规律与普通Ⅱ级钢筋一致, 即各试件都产生

明显缩颈现象, 并最终都拉断, 且断口形状不变. 图 3 为静载试验中钢筋的应力-应变曲线, 图 4 为动载试验中钢筋的典型应力时程曲线^[12], 每一曲线均为相同变形速率同组试件的平均值. 由图 3、图 4 可知, 同普通Ⅱ级钢筋一样, 新Ⅲ级钢筋的抗拉应力-应变曲线具有相同的特征, 其曲线都包括弹性阶段、屈服阶段、强化阶段和颈缩断裂阶段 4 个阶段.



a Ⅱ级钢筋



b 新Ⅲ级钢筋

图 3 静载条件下钢筋拉伸应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve from static test

快速变形条件下新Ⅲ级钢筋的抗拉屈服上限提高得较多, 个别在静载时没有明显屈服上限的构件在快速变形下也明显显示了出来, 但屈服上限的数值离散性较大, 在实际应用中意义不大, 实际应用中

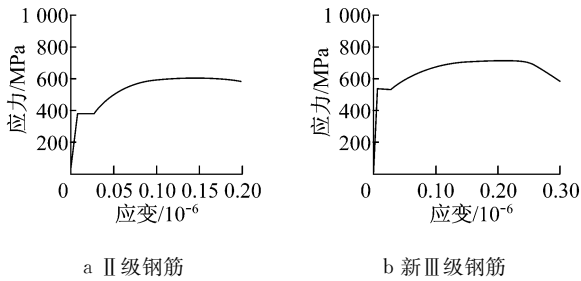


图 4 快速变形下钢筋拉伸应力时程曲线

Fig. 4 Stress-time curve from rapid loading test

取屈服下限值来表示其屈服强度. 表 3 中数据均为同组试件的平均值.

表 3 钢筋动力性能试验结果

Tab. 3 Experimental result from test at different strain rates

钢种	应变速率/s ⁻¹	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	强度提高比	截面收缩率/%
II 级钢筋	2.0×10 ⁻⁵	355.11	569.40	1.00	66.73
	1.5	368.84	574.78	1.04	68.70
	20.0	380.37	581.12	1.07	68.70
	100.0	467.07	627.72	1.32	68.70
新 III 级钢筋	2.0×10 ⁻⁵	496.85	678.73	1.00	65.64
	1.5	529.39	698.08	1.07	67.27
	20.0	551.45	716.52	1.11	67.27
	100.0	612.69	744.07	1.23	67.27

由表 3 可知: ①新 III 级钢筋的屈服强度及极限强度随变形速率的增大而增大, 但增大幅度不及普通 II 级钢筋. ②在快速变形作用下, 新 III 级钢筋的屈

服强度比普通 II 级钢筋高 31.18%, 极限强度提高 18.54%, 截面收缩率基本不变, 说明钢筋的塑性基本保持不变. ③与静载相比, 在动载作用下新 III 级钢筋的屈服强度有显著提高, 提高率为 23.31%, 略小于普通 II 级钢筋(提高率为 31.5%).

2.2 新 III 级钢筋混凝土梁抗弯性能分析

2.2.1 梁的破坏形态及分析

由图 5、图 6 可知, 同种类型的试件在快速加载下破坏特性与静载较相似, 但随着配筋率及混凝土强度的改变其破坏形态差别较大.

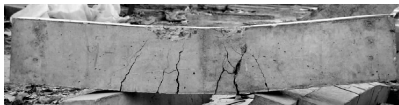
(1) 从初裂荷载及破坏后的裂缝数量看, 在混凝土强度相同的情况下, 随着配筋率的增加, 初裂荷载越高, 破坏时裂缝的数目也较多, 裂缝宽度越小.

(2) 从破坏形态看, 在正常配筋范围内, 新 III 级钢筋混凝土梁的破坏状态与普通钢筋混凝土梁没有明显差别, 大多数梁为延性破坏.

(3) 当混凝土强度相同时(C30), 在配筋率较低(0.64%)的情况下, 普通钢筋混凝土梁(PL3 组梁)的裂缝较少、宽度较大(图 6a), 呈现少筋梁脆性破坏的特征, 新 III 级钢筋混凝土梁(XL3 组梁)破坏时裂缝数目较多, 但裂缝宽度较小(图 6b), 呈现适筋梁塑性破坏的特征; 在配筋率较高的情况下, 普通钢筋混凝土梁(PL5 组梁)的裂缝数目较多, 但裂缝宽度较小(图 6c), 呈现适筋梁破坏的特征; 新 III 级钢筋混凝土梁(XL5 组梁)试件破坏时裂缝较少、宽度较大(图 6d), 呈现超筋梁的脆性剪压破坏的特征.



a PL3 组梁

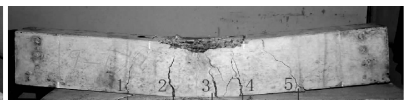


b XL3 组梁



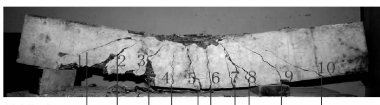
裂缝宽 13.0 17.0

a PL3 组梁



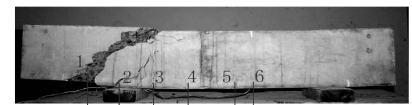
裂缝宽 4.0 12.0 10.0 8.0 4.0

b XL3 组梁



裂缝宽 2.0 5.0 5.0 3.0 4.0 5.0 2.0

c PL5 组梁



90.0 5.0 2.0 1.5 1.0 裂缝宽

d XL5 组梁

图 5 静载试验中梁的破坏形态

Fig. 5 Failure deformation of the beams from static test

图 6 快速加载试验中各组梁的破坏形态(单位: mm)

Fig. 6 Failure deformation of the beams from rapid loading test(unit: mm)

2.2.2 快速加载下新 III 级钢筋混凝土梁抗弯性能

表 4 中数据为同组数据的平均值. 可见, 在快速加载条件下各组梁的抗弯承载力均有很大提高, 且提高率随配筋率的增加而增大, 而延性比与静载条件下基本相同, 说明快速加载下梁的塑性并不降低.

对于合适的配筋率, 新 III 级钢筋混凝土梁承载

力提高率为 20%~30%; 普通 II 级钢筋混凝土梁承载力提高率大于 30%. 2 种梁抗弯承载力的提高比值与钢筋在快速加载下的强度提高基本相当.

2.2.3 2 种钢筋混凝土梁抗弯性能对比分析

表 5 中数据为同组数据的平均值. 由表 5 可见, 在快速加载条件下各组梁的抗弯承载力随配筋率的

表 4 梁抗弯试验结果

Tab.4 Experimental results from beam tests

组号	主筋	配筋率/%	混凝土强度	抗弯承载力/(kN·m)		抗弯承载力		延性比	
				静载	快速加载	提高率/%	静载	快速加载	
PL1 组	Ⅱ级	0.47	C30	10.35	12.57	21	5.53	5.26	
PL2 组	Ⅱ级	0.47	C40	10.75	12.96	20	4.75	4.32	
XL1 组	Ⅲ级	0.47	C30	13.39	17.07	27	8.19	8.38	
XL2 组	Ⅲ级	0.47	C40	14.17	17.86	26	7.31	6.92	
PL3 组	Ⅱ级	0.64	C30	13.39	18.41	37	8.95	8.92	
PL4 组	Ⅱ级	0.64	C40	13.70	17.41	34	7.85	7.87	
XL3 组	Ⅲ级	0.64	C30	16.62	21.61	30	9.52	10.03	
XL4 组	Ⅲ级	0.64	C40	17.25	22.53	29	10.88	9.83	
PL5 组	Ⅱ级	1.28	C40	23.63	32.23	36	3.78	3.56	
XL5 组	Ⅲ级	1.28	C40	25.98	36.58	40	3.02	2.87	

表 5 快速加载下新Ⅲ级钢筋与普通Ⅱ级钢筋混凝土梁的抗弯性能试验结果

Tab.5 Experimental results of bending performance of new grade-3 and ordinary grade-2 reinforced concrete beams

混凝土强度	配筋率/%	静载			快速加载			静载延性比		快速加载延性比	
		抗弯承载力/kN		提高率/%	抗弯承载力/kN		提高率/%	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅲ级
		Ⅱ级	Ⅲ级		Ⅱ级	Ⅲ级					
C30	0.47	10.35	13.39	29.4	12.57	17.07	35.8	5.26	8.19	5.26	8.38
C40	0.47	10.75	14.17	31.8	12.96	17.86	37.8	4.32	7.31	4.32	6.92
C30	0.64	13.39	16.62	24.1	16.68	21.61	29.6	8.95	9.52	8.92	10.03
C40	0.64	13.70	17.25	25.9	17.41	22.53	29.4	7.85	10.88	7.87	9.83
C30	1.28	23.63	25.98	10.0	32.23	36.58	13.5	5.78	3.02	5.56	2.87

增大而增大,延性比在不超过正常配筋率时随配筋率的增大而增大,当配筋率为 1.28%时延性比随配筋率的增大而减小.这是由于配筋率与混凝土强度不匹配造成的,当配筋率较低时梁的破坏随钢筋屈服而破坏,当配筋率过高时梁随混凝土的破坏而破坏,因此设计中应综合考虑承载力与延性比,选择合适的配筋率,以便充分发挥各种材料的性能.

新Ⅲ级钢筋混凝土梁抗弯承载力比普通钢筋混凝土梁有较大提高,提高率随配筋率的增加而减小,由表 5 知,在相同混凝土强度的条件下(此处以 C30 进行分析),当配筋率较小时(0.47%),提高率为 35.8%,其数值略高于钢筋材料的提高值;当配筋率较大时(1.28%),提高率仅为 13.5%,其数值远小于钢筋材料的提高值.其原因是由于配筋率与混凝土强度不匹配影响了梁的延性,没有充分发挥各材料性能造成的.当配筋率较合适时(0.64%),2 种梁的破坏形态和延性基本相同,其强度的提高率为 29.6%,与钢筋材料的提高值基本相当.这些特征均与静载条件下一致.唯一不同的是,提高值均较静载时大,这说明新Ⅲ级钢筋混凝土梁具有比普通钢筋混凝土梁更好的动载性能.

从表 5 还可看出,混凝土强度相同、配筋率为 0.47%的新Ⅲ级钢筋混凝土梁的抗弯性能与配筋率

为 0.64%的普通Ⅱ级钢筋混凝土梁的基本相同,这说明在结构中合理采用新Ⅲ级钢筋可节省约 30%的钢筋用量.

因此,为了充分发挥高强钢筋的优良性能,保证钢筋在达到屈服后有足够的塑性变形能力,避免结构发生脆性破坏,在设计中需要特别注意主筋配筋率与混凝土强度的匹配.当配筋率相同时新Ⅲ级钢筋混凝土结构应采用更高强度的混凝土,混凝土强度相同时应减小配筋率.

3 综合效益分析

目前市场上新Ⅲ级钢筋的价格仅比普通Ⅱ级钢筋高 5%左右,若配筋率匹配,在构件截面、承载力不变的情况下使用新Ⅲ级钢筋取代普通Ⅱ级钢筋,依本文的研究结果配筋率可降低约 30%,从而大幅节省现场施工中的运输量、场地占用量及施工工作量,能够有效降低工程建设成本,经济效益显而易见.

新Ⅲ级钢筋混凝土结构在快速加载条件下承载力高、延性好,是抗震、抗爆结构的理想材料.目前高强度混凝土、钢纤维混凝土和高配筋率在防护结构中往往配合使用,造成主筋密度大、空隙小,施工困难,而且质量也不易保证.若采用新Ⅲ级钢筋,可大

幅降低配筋率,增大施工间隙,克服使用普通钢筋多而密的缺点,为施工方便及施工质量提供了保证。

4 结语

(1) 在动载条件下新Ⅲ级钢筋的屈服强度比普通Ⅱ级钢筋高 31.18%,极限强度提高 18.54%,而塑性基本保持不变;与静载相比,在动载作用下新Ⅲ级钢筋的屈服强度有显著提高,提高率为 23.31%,略小于普通Ⅱ级钢筋。

(2) 无论对Ⅱ级钢筋还是新Ⅲ级钢筋,在快速加载条件下,都只有屈服强度和极限强度的提高,而塑性和弹性模量基本保持不变,因此快速加载下Ⅱ级钢筋和新Ⅲ级钢筋的本构关系可采用静载作用时的本构关系,只需将其强度乘以快速加载下的动力提高系数。

(3) 动载条件下新Ⅲ级钢筋混凝土梁的抗弯承载力有较大提高,提高率与钢筋在快速加载下的强度提高相当,同时不影响构件的塑性性能和延性。因此在快速加载下Ⅱ级钢筋和新Ⅲ级钢筋混凝土构件的截面抗弯承载力可按静载作用时的公式计算,只需将其中的材料强度乘快速加载下的提高系数。

(4) 若配筋率与混凝土强度匹配良好,采用新Ⅲ级钢筋的梁抗弯承载力比普通钢筋混凝土梁有较大提高,其提高率与钢筋材料的提高值基本相当;构件的延性与采用普通钢筋的构件相同,采用高强的新Ⅲ级钢筋并不会降低构件的塑性变形能力。

(5) 在使用过程中应注意配筋率与混凝土强度的匹配,相同配筋率的新Ⅲ级钢筋采用高强混凝土;混凝土强度相同时应降低配筋率。若仍采用传统的普通钢筋的设计习惯,不仅承载力提高不明显,而且会造成结构脆性破坏,造成严重的后果。

(6) 在防护结构中推广新Ⅲ级钢筋或更高强度的钢筋、采用高强钢筋、高强混凝土、钢纤维混凝土的配合使用将是今后防护结构的一个发展方向。

参考文献:

[1] 中华人民共和国建设部. GB50010—2002 混凝土结构设计规范[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
Ministry of Construction of People's Republic of China. GB50010—2002 Code for structure design of concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.

[2] 何成杰,张克球. HRB400 级钢筋的研制、性能和应用[J]. 施工技术,2001,30(10):4.
HE Chengjie, ZHANG Keqiu. Preparation, performance and

application of HRB400 reinforcement [J]. Construction Technology, 2001, 30(10):4.

[3] 肖力,潘政一,吴灏. 新Ⅲ级钢筋在建筑工程中的应用技术[J]. 浙江水利科技,2001,5:64.
XIAO Li, PAN Zhengyi, WU Hao. The application technology of HRB400 steel bar in architecture engineering [J]. Zhejiang Hydraulic Scientific and Technology, 2001, 5:64.

[4] 赵宗元,张希舜. HRB400 新Ⅲ级钢筋在结构工程中的应用[J]. 建筑技术开发,2000,27(4):3.
ZHAO Zongyuan, ZHANG Xishun. The application of HRB400 steel bar to constructional engineering[J]. Building Technique Development, 2000, 27(4):3.

[5] 秦斌,盛光敏,龚士弘. HRB400 抗震钢筋的综合性能[J]. 钢铁研究学报,2006,18(5):33.
QIN Bin, SHENG Guangmin, GONG Shihong. Properties of anti-seismic HRB400 reinforced steel bar [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2006, 18(5):33.

[6] 崔士起,孔旭,文斐智,等. HRB400 钢筋在建筑结构中应用的试验研究[J]. 建筑技术,2001,30(10):4.
CUI Shiqi, KONG Xu, WEN Feizhi, et al. The application and experimental research of HRB400 steel bar in building structure [J]. Architecture Technology, 2001, 30(10):4.

[7] 冀伟,吴颖,张国庆. HRB400 MPa 新Ⅲ级钢筋的开发应用前景与建议[J]. 天津冶金,2001,99(1):19.
JI Wei, WU Ying, ZHANG Guoqing. Prospect and suggestion of developing HRB400MPa steel bar of new III grade [J]. Tianjin Metallurgy, 2001, 99(1):19.

[8] 闫观文. HRB400 钢筋在水利工程现浇板中的应用[J]. 建筑技术,2002,33(5):360.
YAN Guanwen. HRB400 reinforcement applied to slab cast-in-situ for hydraulic works. [J]. Architecture Technology, 2002, 33(5):360.

[9] 史巨元. 钢的动态力学性能及应用[M]. 北京:冶金工业出版社,1993.
SHI Juyuan. dynamic mechanical behavior and application of steel[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1993.

[10] 王英,郑文忠. 对 HRB400 级钢筋的几点认识[J]. 低温建筑技术,2002,88(2):7.
WANG Ying, ZHENG Wenzhong. Some cognition to HRB400 steel [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2002, 88(2):7.

[11] 余志武,王中强,史召锋. 高温后新Ⅲ级钢筋力学性能的试验研究[J]. 建筑结构学报,2005,26(2):112.
YU Zhiwu, WANG Zhongqiang, SHI Zhao Feng. Experimental research on material properties of new III grade steel bars after fire [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2):112.

[12] 王晓重. 关于新Ⅲ级钢筋的介绍[J]. 湖南冶金,2004,32(1):45.
WANG Xiaochong. Introduction of the new III grade concrete-reinforcing bar [J]. Hunan Metallurgy, 2004, 32(1):45.

[13] 曾志兴,胡云昌. 提高钢筋强度及推广应用新Ⅲ级钢筋的分析[J]. 工业建筑,2002,32(5):70.
ZENG Zhixing, HU Yunchang. Analysis on increasing the strength of reinforcing bar and spreading the application of new grade III steel bar [J]. Industrial Construction, 2002, 32(5):70.