

国内 HRB600 级高强钢筋研究及应用现状

Research and application on HRB600 in china

张永志^{1,3} 于本田²

(1 甘肃省建筑科学研究院, 甘肃 兰州 730000;

2 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;

3 甘肃省绿色建筑与建筑节能工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: HRB600 级钢筋因其强度高、延性好、拥有良好的使用性能, 在国外已经得到广泛应用。国内对 HRB600 级钢筋才刚刚起步, 本文对国内 HRB600 级钢筋生产工艺、力学性能、配置 HRB600 钢筋的混凝土构件抗弯、抗剪性能、疲劳性能以及抗震性能相关研究进行了归纳总结, 并提出需进一步研究的问题。

关键词: HRB600; 高强钢筋; 力学性能; 现状

Abstract: HRB600 grade-high-strength bars has been widely used at home and abroad, because of its high strength, good ductility and performance. In our country, the HRB600 steel bar is just started. This essay makes a summary on manufacturing technique, mechanical property, concrete anti-bending, shear resistance, fatigue property and seismic performance of HRB600 grade-high-strength bars, and put up with the problems that need further research.

Keywords: HRB600; high-strength bars; mechanical property; current status

中图分类号: TU528 文献标识码: B 文章编号: 1003-8965 (2017) 05-0097-04

1 前言

在国家大力提倡节能减排、绿色环保的时代背景下, 普通强度钢筋作为土木工程建设用钢主材的状况已无法满足建设发展的需要, 2012 年年初, 为落实国务院关于节能减排的工作部署及国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要的要求, 住房和城乡建设部、工业和信息化部联合印发了《关于加快应用高强钢筋的指导意见》, 指导意见充分认识到推广应用高强钢筋的重要性和紧迫性, 并提出了推广应用高强钢筋的指导思想和基本原则、主要目标等。我国高强钢筋应用量占钢筋总用量的比例已经从 2011 年的 35% 提高至 70% 左右, 每年大约可节省钢筋 1000 万吨, 相应减少 1600 万吨铁矿石、600 万吨标准煤、4100 万吨水、同时减少二氧化碳和污水排放量 2000 万吨、粉尘 1500 万公斤^[1]。混凝土结构中采用高强钢筋已经取得了良好的社会、经济效益。但是, 目前我国主要使用的是 400MPa 的钢筋, 2010 年《钢筋混凝土设计规范》(GB50010-2010) 发布后, 500MPa 钢筋得到广泛的应用。较西方发达国家钢筋强度普遍在 500~700MPa 之间, 我国使用的钢筋强度还是偏低。HRB600 钢筋是一种新型的高强钢筋, 通过微合金化技术, 钢筋的屈服强度和极限抗拉强度都有大幅度提高, 并具有良好的塑性和加工性能^[2]。2011 年由河北钢铁集团承钢线材生产线依托钒钛资源优势成功研发, 目前国内大多数钢铁生产企业都具备了生产 600MPa 钢筋的生产技术。但由于在现行的国家标准中对 600MPa 钢筋的力学性能以及在钢筋混凝土中的参数取值未有规定, 导致目前在我国 600MPa 高强钢筋应用极少, 缺乏全面系统的相关混凝土构件及结构的力学性能研究, 尤其是基础性试验研究不足, 直接影响了 HRB600 级钢筋在实际工程中

的推广应用。本文归纳总结了 HRB600 高强钢筋研究的最新进展, 并提出了有待进一步研究的问题。

2 HRB600 钢筋生产工艺及力学性能研究

2.1 HRB600 钢筋生产工艺研究

2011 年河北钢铁集团承钢线材生产线在收集了大量国外相关资料, 充分发挥钒钛资源优势, 对钒钛技术进行深层次研究, 通过适量添加微合金元素 - 钒来改善钢筋的化学成分, 成功研制出了钒微合金化 600MPa 高强钢筋, 具有很好的综合力学性能, 满足国家标准的要求。但是由于钒价格偏高, 企业生产成本较高。因此, 为降低生产成本, 国内各大钢铁公司另辟蹊径, 研究采用复合微合金化结合 TMCP 技术生产 HRB600 高强钢筋, 这种方法充分发挥微合金元素所具有的析出强化和细晶强化, 从而提高钢的综合力学能力^[3]。沙钢把微合金化技术和螺纹钢筋的生产特点相结合, 通过合理设计高强钢的化学成分。同时, 通过采用“转炉 + 连铸 + 加热炉 + 控轧控冷”的工艺措施, 使所生产的螺纹钢性能更加稳定, 晶粒也更加细小, 有利于提高螺纹钢强度和塑性^[4]。济钢通过在钢中增氮, 会使钒在钢中的存在形式由固溶态为主转变为钒的碳氮化物的析出态, 增强沉淀强化作用, 而析出的氮化钒可以起到铁素体相变中形核核心的作用, 增加形核质点, 诱导铁素体析出, 从而细化晶粒尺寸^[5]。武钢针对现有技术存在的因加入过多合金引起的碳当量过高而带来的焊接性能变差问题, 以及增氮过多而引起铸坯低倍缺陷增多, 带来轧钢时性能不合格的不足, 在氩站采用吹入氩气, 在 LF 炉采用氮气, 其目的是为了在氩站成分微调时使成分均匀, 而

廉价的氮气可以替代氮的合金从而降低成本。与现有技术相比,在成本大幅降低的前提下,其热轧态屈服强度达到 600MPa 以上,延伸率 $A \geq 19\%$,且焊接性能优良^[6]。谢常胜^[7]通过改变钢材晶体组织,优化设计出 4 种试验钢材,通过测试奥氏体长大倾向性试验、连续冷却转变试验等试验,分析得到单一采用钒氮微合金化生产技术即可获得以铁素体珠光体为主的理想晶体组织,并且钒氮的量都很小,无需额外添加 Nb 等微合金元素,降低成本,可以避免应变时效。

2. HRB600 钢筋力学性能研究

由于现行的《钢筋混凝土用钢第 2 部分:热轧带肋钢筋》(GB1499.2-2007)、《钢筋焊接及验收规程》(JGJ18-2012)没有将 HRB600 的钢筋纳入其中,所以很多学者对 HRB600 钢筋进行了力学和焊接接头的试验研究。张敬涛^[8]针对 HRB600 钢筋正弯断裂、反弯断裂和断后伸长率不足的问题进行了原因分析,指出通过提高钢水纯净度、控制浇注温度、二次冷却及加热温度可以解决这些问题。胡煜^[9]对陕西龙门钢铁有限责任公司生产的 HRB600 钢筋原材进行了拉伸试验,该钢筋屈服强度为 620~655MPa,抗拉强度为 765~805MPa,断后伸长率为 19%~27%,另外还进行了 HRB600 钢筋焊件的拉力试验,断裂部位均位于母材。钢筋在高温后性能会发生退化,其退化程度随着经历温度的升高而增大,为研究 HRB600 级钢筋在高温情况下力学性能的变化情况,公伟^[10]、潘江威^[11]、于素健^[12]分别进行了高温后冷却力学性能测试和高温条件下力学性能测试,测试结果表明 HRB600 钢筋在高温后冷却后受拉,在温度为 600℃以下,其应力应变曲线与常温下无明显变化,超过 700℃其屈服强度和抗拉强度出现明显下降,温度越高下降幅度越大,且屈服强度下降的速率要大于抗拉强度;而在恒高温情况下,抗拉强度和屈服强度的变化趋势一致,随着温度升高而降低,温度越高,强度降低幅度越大,400℃~600℃范围内强度的下降速率达到最大,屈服强度要比抗拉强度的下降速率大。

3 HRB600 钢筋配置的混凝土构件性能研究

3.1 HRB600 钢筋混凝土梁抗弯性能研究

现行《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)未纳入 HRB600 钢筋,因此采用 HRB600 钢筋配置的钢筋混凝土梁在荷载作用下,构件的挠度能否满足要求,裂缝开展情况是否与普通强度钢筋相同都需要研究。在这一方面河北工业大学戎贤教授的研究团队做了大量的研究工作:戎贤^[13-14]、张健新^[15]、赵少伟^[16]、师长磊^[17]、李强^[18]、刘传正^[19]先后开展了配置 600MPa 钢筋的有粘结、无粘结和部分粘结钢筋混凝土梁和预应力钢筋混凝土梁受弯性能试验研究,分析《混凝土结构设计规范》

(GB50010-2010)中受弯承载力、挠度计算公式是否适用于 600MPa 钢筋,研究结果表明,配置 600MPa 钢筋混凝土梁的受弯性能与普通的钢筋混凝土梁相同,承载力和挠度计算可以按照现行规范中的计算公式进行。戎贤^[13]研究认为承载力计算时,600MPa 钢筋设计值取 520MPa,计算结果具有足够的安全储备,而李强^[18]研究认为屈服强度设计值取为 500MPa 时,计算结果才具有足够的安全储备。张建伟^[20]通过对 9 根 HRB600 级高强钢筋混凝土梁和 1 根 HRB400 级钢筋受弯的对比试验,得到对于 HRB600 级钢筋混凝土梁来说,现行规范中短期裂缝宽度、挠度计算仍适用,提出 HRB600 级钢筋与 C80-C100 混凝土匹配效果更佳。张未^[21]通过 10 根梁的受弯试验研究,得到 HRB600 级钢筋混凝土受弯构件在正常使用状态下的短期最大裂缝宽度一般大于 0.2mm,不能满足裂缝限制要求。

3.2 HRB600 钢筋作为箍筋的混凝土梁抗剪性能研究

HRB600 级钢筋作为抗剪箍筋的研究在国内研究较少,仅李朋^[22]开展了配置 1 根 HRB400、14 根 HRB500 和 1 根 HRB600 钢筋为箍筋的混凝土简支梁在集中荷载作用下的抗剪承载力试验研究,分析了混凝土强度、剪跨比、箍筋强度、配箍率和截面尺寸对梁体裂缝、挠度、承载力和破坏形态的影响,试验研究结果表明配置 HRB600 钢筋的混凝土梁斜截面承载力可按现行《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)的相关公式进行计算,并有足够的安全储备。

3.3 HRB600 钢筋混凝土构件疲劳性能研究

钢筋混凝土结构在使用过程中,会承受反复荷载作用,为研究 HRB600 级钢筋在疲劳荷载作用下的性能变化,国内学者进行了一定的研究。赵少伟^[23]、李强^[24]、郭蓉^[25]通过对配置 HRB600 级钢筋作为非预应力筋的有粘结与无粘结部分预应力混凝土梁进行了疲劳试验研究,研究结果表明,HRB600 级钢筋作为非预应力筋的部分预应力混凝土梁的疲劳性能和反复荷载作用后的静力性能均良好,但相对静载试验梁,配置 HRB600 级钢筋的混凝土梁裂缝出现的时间更早一些,裂缝数量多,变形较大,循环加载前梁体是否开裂对疲劳性能有较大影响,而 HRB600 级钢筋在疲劳荷载作用下力学性能难稳定且变形恢复能力没有受到疲劳荷载作用的影响。陈昉健^[26]就 HRB600 级高强钢筋本身进行了拉压疲劳试验,得到 HRB600 级钢筋在拉压往复荷载作用下,所能达到的最大应力和破坏前最大应变幅值均随试件长度的增加而减小,受压方向更为明显,相对 HRB500 钢筋,HRB600 级钢筋的所有试件都表现出脆性破坏特征。

3.4 HRB600 钢筋混凝土构件抗震性能研究

由于高强钢筋和普通强度钢筋的弹性模量相差不大,有观点认为采用高强钢筋后,构件中钢筋在受拉屈服时达到屈服变形会增大,当构件失效后,高强钢筋构件所能达到的延性系数要比普通钢筋低,认为同等条件设计下,在

地震荷载作用下配置高强钢筋的构件抗震性能较差。针对这一问题国内学者开展了配置高强钢筋构件的抗震性能试验研究。在常规形状混凝土柱抗震方面：同济大学苏俊省^[27-28]、王君杰^[29]开展了 HRB600 钢筋作为螺旋箍筋约束下混凝土圆柱和矩形截面柱的抗震性能试验研究，研究表明，采用高强度钢筋作为箍筋的混凝土柱破坏形式也为典型的弯曲破坏，墩底会形成塑性铰，纵筋断裂，采用 HRB600 钢筋等强度取代普通钢筋作为箍筋，构件的抗弯承载力、变形能力、延性及耗能能力等抗震性能不会发生明显降低，但采用高强钢筋可减少钢筋用量。张萍^[30]研究了轴压比对配置 HRB600 钢筋作为箍筋混凝土柱抗震性能的影响，研究认为随着轴压比的增大，试件抗震性能将变差。刘彬^[31]研究了 HRB600 钢筋作为箍筋，箍筋形式对混凝土柱抗震性能的影响，认为矩形箍的抗震性能不如八角箍和井字箍，而后面两种形式箍筋在抗震性能方面接近。在异形柱抗震方面：戎贤^[32-33]先后对配置 HRB600 级钢筋作为箍筋的十字形柱、T 形柱进行了抗震试验研究，研究结果表明配置 HRB600 钢筋的十字形柱和 T 形柱都具有良好的变形能力和承载能力，增大配箍率可提高构件的变形能力，增强延性性能，轴压比的提高对承载力有益，但会降低构件变形能力。在异形柱节点抗震性能的研究中，付广东^[34]与戎贤^[35]都得到了配置 HRB600 钢筋的异形柱节点比配置 HRB500 钢筋的承载力高，但是滞回性差，变形能力差，刚度退化相对早，耗能能力减弱，但通过配置 X 形箍筋可改善节点破坏特征。在剪力墙抗震方面：郭蓉^[36]研究了 600MPa 级高强钢筋用于剪力墙边缘约束端柱及墙板时对其抗震性能的影响，分析得到与普通钢筋混凝土剪力墙相比，端柱采用等强度代换配置高强纵筋的混凝土剪力墙的屈服荷载、位移和变形能力均有所提高，墙板配置高强分布筋的混凝土剪力墙的抗弯承载力、各项抗震性能指标也均有提升。

4 HRB600 钢筋在工程中的应用

由于《钢筋混凝土用钢第 2 部分：热轧带肋钢筋》（GB1499.2-2007）、《钢筋焊接及验收规程》（JGJ18-2012）、《混凝土结构设计规范》（GB50010-2010）没有将 HRB600 的钢筋纳入其中，目前 HRB600 钢筋在实际工程中应用不多，仅在我国上海、江苏和云南地区有一定数量工程中得到应用。吴栋^[37]介绍了 HTRB600 高强钢筋替代 HRB400 钢筋在楼盖梁板体系中的应用，并分析了采用 HTRB600 高强钢筋代替 HRB400 钢筋的经济性，采用 HRB600 钢筋，理论上结构最高节省用钢造价 16.48%。陈亚莲^[38]介绍了 HTRB600E 高强钢筋在如皋农村商业银行新建办公大楼工程地下室顶板、主楼框架梁和板应用情况，对比分析得出采用 HTRB600 钢筋代替普通钢筋，可减小钢筋用量，也可改善框架结构梁柱节点和框架柱中钢筋拥挤的现象，

提高工程质量，取得较好的社会效益和经济效益。陶荣生^[39]介绍了 HRB600 钢筋在上海市徐汇区某办公楼项目基坑工程地下连续墙中的应用，经分析计算，采用 600MPa 高强钢筋，可减少钢筋用量，提高结构安全储备能力，有助于保证工程质量。

5 有待进一步研究的问题

1) 由于《钢筋混凝土用钢第 2 部分：热轧带肋钢筋》（GB1499.2-2013）一直未实施，关于 HRB600 级钢筋的力学参数一直未明确，使得目前在使用 HRB600 级钢筋时，对钢筋的力学性能无法进行合格与否的判定，后续应对国内生产 HRB600 级钢筋的厂家的钢筋进行大量的力学性能试验研究，通过大量的试验数据，确定 HRB600 级钢筋的力学指标，进一步完善规范规定。

2) 目前 HRB600 钢筋在工程项目中应用较少，因此有必要持续进行配置 HRB600 钢筋混凝土构件的基础性研究，如抗弯承载力、抗弯刚度、抗剪承载力等方面的试验研究，试验结果可为《混凝土结构设计规范》（GB50010-2010）修订，为纳入 HRB600 级钢筋做基础准备。

3) 由于《钢筋焊接及验收规程》（JGJ18-2012）和《钢筋机械连接技术规程》（JGJ107-2016）没有 HRB600 钢筋，研究使用 HRB600 级钢筋采用焊接或机械连接后的钢筋试件的功能，不同工艺连接的高强钢筋接头的可靠性与安全性是十分重要的。

4) 抗弯试验中发现梁身会产生水平方向的裂缝，这说明钢筋和混凝土之间发生了相对滑移，需要研究 HRB600 级钢筋与混凝土的粘结锚固性能，进行 HRB600 级钢筋锚固长度、配箍率、混凝土保护层厚度、混凝土强度对高强钢筋与混凝土间粘结锚固性能的影响规律和影响程度的基础性试验研究。

参考文献

- [1] 况浩伟，潘文，叶燎原. 中国高强钢筋的发展概述[J]. 工业建筑，2016,46（增刊）：620-626,650.
- [2] 徐志东，范植金，徐志，等. V-Nb 微合金化热轧带肋高强度钢筋 HRB600 的连续冷却转变曲线[J]. 特殊钢，2014,35（2）：54-56.
- [3] 陈伟，施哲，赵宇. 钕微合金化控冷工艺生产 HRB500 抗震钢筋强韧化机理[J]. 中南大学学报（自然科学版），2011,42(6)：1604-1610.
- [4] 李阳，黄文克，张晓兵，等. 沙钢 600MPa 级抗震螺纹钢的开发[N]. 世界金属导报，2013-8-20，第 B07 版，高强钢筋专题
- [5] 李成军. 600MPa 级钒氮微合金化热轧高性能钢筋的研制[J]. 天津冶金，2012，(2)：8-10.

[6] 徐志东, 范植金, 朱启铭, 等. 600MPa 热轧带肋钢筋及其制备方法 [P]. 中国专利: CN103898407A, 2014-07-02.

[7] 谢常胜. 600MPa 级高强钢筋组织与力学性能研究 [D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2016.

[8] 张敬涛, 赵海飞. HRB600 高强度螺纹钢冷弯断裂的成因与对策 [C]. 2016 年钢锭制造技术与管理研讨会, 淄博, 2016.

[9] 胡煜, 韩建鹏, 郭红民, 等. 600MPa 高强钢筋的生产实践 [J]. 山西冶金, 2017, (02): 17-18, 22.

[10] 公伟, 胡克旭, 王懿迪. HTRB600 级高强钢筋高温后力学性能试验研究 [J]. 河北工程大学学报, 2017, 34(01): 6-11.

[11] 潘江威. 600MPa 级钢筋高温下力学性能的试验研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.

[12] 于素健, 卜国艳, 高立堂. 600MPa 级钢筋高温下力学性能的试验研究 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2017, 36(04): 119-125.

[13] 戎贤, 王海涛, 刘平. 配置 600MPa 级钢筋混凝土梁受弯性能试验研究 [J]. 河北工业大学学报, 2015, 44(05): 86-89.

[14] 戎贤, 刘旭, 刘平. 配置 600MPa 钢筋的无黏结部分预应力梁受弯性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2015, 45(9): 59-63.

[15] 张健新, 戎贤, 皮凤梅. 配置 600MPa 钢筋的无黏结部分预应力混凝土梁试验研究 [J]. 世界地震工程, 2017, 33(2): 142-147.

[16] 赵少伟, 宋昌, 师长磊. 配置 HRB600 级高强钢筋无黏结部分预应力混凝土梁变形性能试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2016, (2): 46-50.

[17] 师长磊. 配置 HRB600 级高强钢筋无黏结部分预应力混凝土梁试验研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2014.

[18] 李强, 戎贤. 配置 HRB600 非预应力钢筋的有黏结预应力混凝土梁受弯试验研究 [J]. 建筑科学, 2016, 32(11): 59-65.

[19] 刘传正. 配置 HRB600 级高强钢筋部分预应力混凝土梁抗弯性能试验研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2014.

[20] 张建伟, 姜立伟, 乔崎云, 等. HRB600 级钢筋高强混凝土梁受弯性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2017, 47(6): 6-12.

[21] 张未. 高强钢筋增强混凝土受弯构件刚度裂缝研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.

[22] 李朋, 王命平, 耿树江, 等. 高强箍筋混凝土简支梁抗剪承载力试验研究 [J]. 青岛理工大学学报, 2009, 30(5): 20-24.

[23] 赵少伟, 高洪健, 赵文志, 等. 配置 600MPa 钢筋部分预应力混凝土梁疲劳性能研究 [J]. 混凝土与水泥制

品, 2016, (1): 69-74.

[24] 李强, 戎贤, 李艳艳. 配置 HRB600 钢筋的部分预应力混凝土梁疲劳试验研究 [J]. 建筑结构, 2016, 46(2): 8-11, 29.

[25] 郭蓉, 郭娇, 胡霖嵩. 高强钢筋部分预应力混凝土梁疲劳性能研究 [J]. 施工技术, 2017, 46(11): 147-150.

[26] 陈昉健, 易伟建. 高强钢筋往复荷载变幅加载试验研究 [J]. 工业建筑, 2016, 46(7): 154-158.

[27] 苏俊省, 王君杰, 王文彪, 等. 高强度螺旋箍筋约束下混凝土圆柱的抗震性能试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(4): 206-211.

[28] 苏俊省, 王君杰, 王文彪, 等. 配置高强钢筋的混凝土矩形截面柱抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35(11): 20-27.

[29] 王君杰, 苏俊省, 王文彪, 等. 配置 HRB500E, HRB600 钢筋的混凝土圆柱抗震性能试验 [J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 93-100, 107.

[30] 张萍, 陈晓磊, 薛松, 等. 配置高强钢筋混凝土柱抗震性能试验研究 [J]. 结构工程师, 2017, 33(3): 147-155.

[31] 刘彬, 韩松, 王学峰. 配置高强钢筋混凝土短柱抗震性能研究 [J]. 工程建设与设计, 2017, (6): 37-40.

[32] 戎贤, 乔超男, 杨春晖. 配置 600MPa 级钢筋的十字形柱抗震性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2017, 47(6): 17-21.

[33] 戎贤, 段微微, 王浩. 配置 600MPa 级高强钢筋 T 形柱抗震性能试验研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(2): 148-154.

[34] 付广东, 赵海龙, 王铁成, 等. 配置 600MPa 级钢筋异形柱梁柱节点抗震性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2017, 47(3): 64-69.

[35] 戎贤, 王胜男, 张健新. X 形配筋增强高强钢筋异形柱边节点抗震性能试验研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(2): 100-106.

[36] 郭蓉, 朱凯. 配置 600MPa 级高强钢筋混凝土剪力墙的抗震性能研究 [J]. 工业建筑, 2017, 47(6): 34-39.

[37] 吴栋, 徐博. 热处理带肋高强钢筋在梁板结构中应用的经济性分析 [J]. 建材技术与应用, 2014, (1): 45-48.

[38] 陈亚莲, 奚红鑫. 浅谈 HTRB600E 钢筋在工程中的应用 [J]. 中小企业管理与科技, 2016, (1): 89.

[39] 陶荣生. 高强钢筋在基坑支护结构中的应用 [J]. 山西建筑, 2017, 43(14): 49-51.