



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

Q460 高强钢焊接截面柱极限承载力 试验与理论研究

(国家自然科学基金资助项目，编号：90815029；国家
建设高水平大学公派研究生项目，学号：2010626097)

姓 名：王彦博

学 号：0810020097

所在院系：土木工程学院 建筑工程系

学科门类：工学

学科专业：结构工程

指导教师：李国强 教授

副指导教师：陈素文 副教授

二〇一二年五月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Doctor of Philosophy

Experimental and Theoretical Study on the Ultimate Strength of Welded Q460 High Strength Steel Columns

(Sponsored by the National Nature Science Foundation of China, Grant No. 90815029, and by the China Scholarship Council, Student No. 2010626097)

Candidate: Wang Yanbo

Student Number: 0810020097

Department: Department of Building Engineering

Discipline: Engineering

Major: Structural Engineering

Supervisor: Professor Li Guoqiang

May, 2012

0460 高强钢焊接截面柱极限承载力试验与理论研究

王彦博

同济大学

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

高强钢具有比一般钢材更高的屈服强度、抗拉强度，因此在相同的受力条件下使用高强钢构件往往可以采用比普通钢构件更小的截面尺寸。高强钢构件的使用不仅能减少结构空间的占用，同时还能减少运输、焊接等工作量，并可缩短工期，从而带来可观的经济效益。高强度钢材的推广使用能减少对钢材、能源的消耗，减少污染，对建设节约能源型经济与产业升级具有重大意义。

现有 GB 50017-2003《钢结构设计规范》所涵盖的承重结构钢材最高牌号为 Q420。Q460 及更高屈服强度的构件设计是否适用现有规范，如何进行分析设计，成为亟待解决的问题。这一问题主要涉及高强钢的材料力学性能、残余应力对高强钢构件影响程度的变化与高强钢基本构件的受力性能等方面。本文针对这些问题进行了系统的试验与理论研究。

高强钢具有不同于普通钢材的残余应力-屈服强度比（残余应力比），残余应力比对试件极限承载力的影响是本文的主要研究内容之一。试验研究中，采用与轴压试件相同的制作工艺加工了 6 根相应的箱形和 H 形截面残余应力试件，分别采用分割法和盲孔法测试了 Q460 高强钢焊接箱形截面与焊接焰割边 H 形截面的残余应力大小与分布。两种方法的试验结果吻合较好，试验结果准确可靠。然后，基于试验结果提出了简化的残余应力分布模型。最后建立有限元模型，对 Q460 高强钢中厚板焊接箱形截面的残余应力进行了数值模拟。

为了研究高强钢中厚板焊接箱形柱的极限承载力，以 11mm 和 21mm 厚国产 Q460 高强钢中厚板制作了 7 个焊接箱形柱和 6 个焊接 H 形柱进行轴心受压试验。箱形试件包含宽厚比 8、12、18 三种截面，长细比分别为 35、50、70；H 形试件共包含三种截面尺寸，外伸翼缘宽厚比分为 3、5、7，长细比分别为 40、55、80。

同时，以数值积分法和有限单元法对已有焊接箱形柱和 H 形柱轴心受压试验进行了数值分析。数值积分法采用作者编制的电算程序，有限元法采用通用有限元程序 ANSYS。数值模型中考虑了实测的初始挠度、初始偏心及简化的残余应力分布模型，分析预测了 Q460 高强钢焊接箱形柱与 H 形柱轴心受压状态下的力学行为。数值积分法分析结果与有限元分析结果吻合。为了验证数值分析的准确性，将预测结果与已有试验结果进行了对比，发现考虑了残余应力、初始偏心、初始挠度的数值积分法与有限元分析可以准确地预测 Q460 钢焊接箱形柱的受压力学行为。通过对比采用简化残余应力分布模型与采用实测残余应力分布模型的有限元分析结果，验证了简化残余应力分布模型的准确性。

作为有限的试验结果的有力扩充,采用已验证的数值模型对 Q460 钢轴心受压柱的极限承载力进行了参数分析。数值模型考虑了 $1/1000$ 柱长的初始弯曲及由相应截面尺寸残余应力试验提出的残余应力分布简化模型。试件的主要参数为截面宽厚比与柱长细比。参数分析结果与现有规范比较结果表明,中厚板 Q460 高强钢焊接箱形柱可采用 GB 50017-2003《钢结构设计规范》中高于普通强度钢柱的 b 类柱子曲线;中厚板 Q460 高强钢焰割边焊接 H 形柱绕弱轴与绕强轴稳定系数,可沿用 GB 50017-2003《钢结构设计规范》中 b 类截面柱子曲线。

关键词: Q460 高强钢, 轴心受压, 极限承载力, 试验研究, 残余应力, 有限元分析, 数值积分, 参数分析, 设计建议

ABSTRACT

Due to the architectural and structural advantages, high strength steel members (yield strength ≥ 460 MPa) have been increasingly used in high-rise buildings, large span buildings and bridges in the past two decades. Compared with conventional mild carbon steel members, the application of high strength steel (HSS) members could not only reduce member size and save building space, but also show considerable economic benefits through reducing the workloads of transportation and welding and shortening the time of construction.

However, the current Chinese steel structures design code GB 50017-2003 limits steel strength grade up to Q420 (nominal yield strength 420 MPa). It is expected that the residual stresses of HSS are different to regular strength steel, since the stress-strain curves and high-temperature material properties of HSS are different from regular strength steel. As a major factor influencing the buckling behaviour of columns, emphases should be imposed on the effect of residual stresses on the maximum strength of HSS welded columns. Consequently, more work should be done to investigate whether the members fabricated from HSS can be designed according to the existing codes or whether the codes need to be modified to include HSS.

In the thesis, 3 welded box columns and 3 H-section columns fabricated from Q460 steel plates of 11mm and 21mm in thickness with different details were employed in the examination. Both sectioning method and hole-drilling method were adopted for measuring residual stresses of the specimens. The measured residual stresses obtained by using two different methods agree well with each other. Based on the test, the corresponding simplified residual stress distributions for Q460 HSS welded box and H sections were proposed. And a finite element model was developed to simulate the residual stress in Q460 HSS welded box sections and verified by comparing with the experimental results.

An experimental study on the ultimate strength of welded box and H-section columns fabricated from flame-cut steel with the nominal yield strength of 460 MPa under axial compression was conducted. This experiment program include 7 welded box columns and 6 welded H-section columns with varies slenderness from 35 to 70 for box columns and form 40 to 80 for H-section columns. The nominal thickness of component plates for box columns is 11 mm. The nominal thickness of flanges and

webs are 21 mm and 11 mm.

Nonlinear numerical analysis was performed with both numerical integration method (NIM) and finite element method (FEM). The calculation program base on numerical integration method (NIM) was written by authors, and the commercial finite element analysis software ANSYS was also adopted for comparison. The numerical models are based on the conducted experiments. The measured initial geometric imperfections and simplified distributions of residual stresses are taken into account in the numerical models. The predicted results obtained through NIM and FEM show a good agreement with each other. The test results and numerical results was compared for verifying the NIM program. It is demonstrated that both NIM and FEM, which take initial imperfections into account, could predict reliable results on the behavior of Q460 high strength steel welded box columns under axial compression. Moreover, the accuracy of the simplified distributions of residual stresses was verified by comparing the FEM results considering measured distributions with FEM results considering simplified distributions.

In order to extend the limited test data base, a parametric analysis on the ultimate bearing capacity of fabricated box and H-section steel columns with a nominal yield strength of 460MPa was conducted. The parametric study is aiming to select the appropriate buckling curves for the design of welded Q460 HSS columns. The initial bow of 1/1000 of column length and the proposed simplified residual stress pattern were considered in the numerical models. The main parameters were plate slenderness and column slenderness. The effect of residual stresses and initial geometric imperfections on the ultimate bearing capacity with varying parameters was investigated and discussed. A proposal for the design of high strength steel columns was given based on the comparison of parametric analysis with GB 50017-2003: the curve b, which is higher than the suggested curve c for ordinary steel welded box columns, suits better for the design of box columns fabricated from Q460 HSS; the currently adopted design curves can be extend to welded H-section columns fabricated from flame-cut 460 MPa HSS plates.

Key W ords: Q460 high strength steel, axially compressed, ultimate bearing capacity; experimental study, residual stress, finite element analysis, numerical integration, parametric study, design recommendation

目录

第 1 章 引言.....	1
1.1 课题研究背景.....	1
1.1.1 高强钢应用的经济性	2
1.1.2 高强钢的优势	3
1.1.3 高强钢的应用现状	3
1.2 高强钢在结构中应用的问题.....	8
1.3 课题研究的意义.....	9
1.4 本文各章的主要内容.....	10
参考文献.....	12
第 2 章 文献综述.....	14
2.1 引言.....	14
2.2 材料力学性能.....	14
2.3 高强钢基本构件的极限承载力与变形能力.....	15
2.3.1 受压构件	15
2.3.2 受弯构件	17
2.4 高强钢构件的连接.....	20
2.4.1 螺栓连接	20
2.4.2 焊接连接	21
2.4.3 连接节点	22
2.5 高强钢结构的抗震性能.....	22
2.6 冷轧薄壁高强钢结构研究现状.....	23
参考文献.....	25
第 3 章 残余应力测试与数值模拟.....	31
3.1 引言.....	31
3.2 残余应力试验方案.....	32
3.2.1 残余应力测试技术	32
3.2.2 残余应力试件设计与制造	33
3.3 残余应力测试-分割法	35
3.3.1 准备工作	35
3.3.2 分割法试验步骤	36
3.3.3 分割法测量结果	39
3.4 残余应力测试-盲孔法	42
3.4.1 准备工作	42
3.4.2 盲孔法试验步骤	44

3.4.3 盲孔法与分割法测量结果对比	45
3.5 简化残余应力模型.....	49
3.6 残余应力数值模拟.....	51
3.6.1 有限元模型的建立	51
3.6.2 边界条件与加载	52
3.6.3 参数设定	53
3.6.4 温度场分析结果	53
3.6.5 应力场分析结果	55
3.7 本章小结.....	57
参考文献.....	58
第 4 章 焊接箱形柱轴压试验研究.....	60
4.1 引言.....	60
4.2 试验概况.....	60
4.2.1 试件设计与制造	60
4.2.2 Q460 钢力学性能试验.....	62
4.2.3 加载制度及测点布置	64
4.2.4 几何初始缺陷	66
4.3 试验结果及分析.....	67
4.3.1 试验现象与荷载-位移曲线	67
4.3.2 荷载-应变曲线	72
4.4 试验结果与现有规范对比.....	74
4.4.1 规范简介	74
4.4.2 试验与 GB 50017-2003 预测结果的比较.....	75
4.4.3 试验与 Eurocode3 预测结果的比较	76
4.5 本章小结.....	77
参考文献.....	77
第 5 章 焊接箱形柱的参数分析与设计建议.....	79
5.1 引言.....	79
5.2 数值模型的建立.....	79
5.2.1 数值积分法	79
5.2.2 有限单元法	84
5.3 数值模型的验证.....	85
5.3.1 极限承载力结果的比较	85
5.3.2 荷载-挠度曲线的比较	86
5.3.3 简化残余应力分布模型的验证	87
5.4 参数分析.....	89
5.4.1 主要参数	89
5.4.2 计算结果	91

5.4.3 弯曲方向的影响	92
5.4.4 对初始几何缺陷的敏感性	93
5.4.5 宽厚比与长细比	94
5.5 设计建议.....	97
5.6 本章小结.....	98
参考文献.....	98
第 6 章 焊接 H 形柱轴压试验研究.....	100
6.1 引言.....	100
6.2 试验概况.....	100
6.2.1 试件设计与制造	100
6.2.2 Q460 钢力学性能试验.....	102
6.2.3 加载制度及测点布置	104
6.2.4 几何初始缺陷	106
6.3 试验结果及分析.....	107
6.3.1 试验现象与荷载-位移曲线	107
6.3.2 荷载-应变曲线	112
6.4 试验结果与现有规范对比.....	114
6.4.1 试验与 GB 50017-2003 预测结果的比较.....	115
6.4.2 试验与 Eurocode3 预测结果的比较	116
6.5 本章小结.....	117
参考文献.....	118
第 7 章 焊接 H 形柱的参数分析与设计建议.....	119
7.1 引言.....	119
7.2 数值模型的建立.....	119
7.2.1 数值积分法	119
7.2.2 有限单元法	122
7.3 数值模型的验证.....	123
7.3.1 极限承载力结果的比较	123
7.3.2 荷载-挠度曲线的比较	124
7.3.3 简化残余应力分布模型的验证	126
7.4 参数分析.....	127
7.4.1 主要参数	127
7.4.2 计算结果	128
7.4.3 对初始几何缺陷的敏感性	130
7.4.4 残余应力的影响	131
7.5 设计建议.....	133
7.5.1 我国 GB 50017-2003 《钢结构设计规范》	133
7.5.2 欧洲规范 Eurocode3	135

7.6 本章小结.....	138
参考文献.....	138
第 8 章 结论与展望.....	140
8.1 本文的主要工作.....	140
8.2 本文的主要结论.....	140
8.3 高强钢应用研究工作展望.....	141
8.3.1 高强钢在抗震区应用的思考	141
8.3.2 高强钢应用仍需开展的研究	146
参考文献.....	147
致谢.....	148
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	149

第 1 章 引言

1.1 课题研究背景

2008 年我国的粗钢产量达 5 亿吨，出口总量为 6425 万吨，进口 1661 万吨。国内钢铁材料的总消费量为 45285 万吨，占粗钢总产量的 87.2%。大部分钢铁材料消费在建筑业上，占总消费量的 54.42%。在钢结构方面，国家体育馆“鸟巢”与“中央电视台新台址”等一批大型钢结构建筑的建设，促进了高强度、高性能中厚板和 H 型钢的开发和应用，带动了建筑用钢的开发和应用技术的进步。但是，在取得成绩同时，我们仍然需要对我国建筑用钢品种开发和应用技术水平有一个清醒认识。目前，我国建筑用钢的开发和应用仍然面临诸多难题。这包括：钢材新品开发能力和建筑应用技术水平与发达国家相比相对落后；高强度、高性能钢材的消费比例偏低，造成建筑的单位用钢量偏高等。

20 世纪 90 年代以前，Q235 钢（相当于欧洲 S235，美国 ASTM A36）在建筑结构与桥梁建设中占主要地位，而 Q345 钢（相应于欧洲 S355，美国 ASTM A572）在当时被认为是高强度钢材（以下简称“高强钢”），其应用较 Q235 钢少^[1,2]。20 世纪 90 年代至今，屈服强度为 345~355MPa 的钢材在市场上逐渐替代了屈服强度 235MPa 的钢材成为主流。根据我国钢结构协会 2010 年对中国钢结构企业生产经营状况的调查结果，2010 年钢结构用钢各等级钢材占总用钢量的比例如下：Q235 钢为 31%，Q345 钢为 62%，Q390 钢为 4%，Q420 钢为 2%，Q460 钢为 1%，如图 1.1 所示。

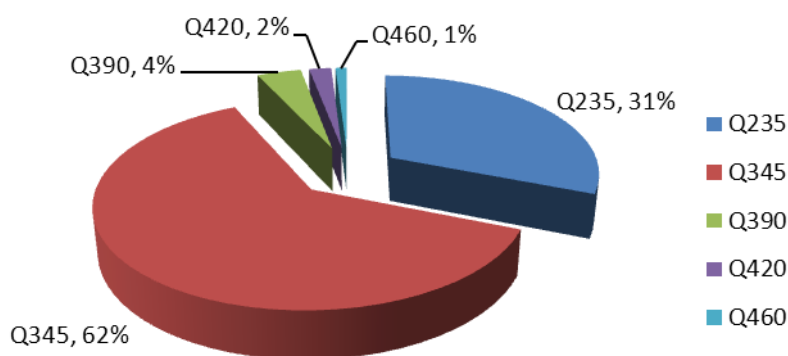


图 1.1 2010 年中国大陆消费各等级钢占总用钢量比例

随着材料科学的进步与冶金制造工艺的发展,更高强度的钢材相继在结构用钢的市场上出现,屈服强度从 460MPa 到 1100MPa^[1,2]。高强钢所代表的牌号范围也有了新的定义。近年来,各国普遍将屈服强度超过 420MPa 的钢材称为高强钢,屈服强度高于 690MPa 的钢材称为超高强钢。

1.1.1 高强钢应用的经济性

高强钢的应用能否带来经济效益,是其能否在工程中广泛应用的决定因素之一,也是研究人员所关心的重要问题。1961 年美国钢材市场出现了屈服强度高达 690MPa 的高强钢,Haaijer^[1,3]对高强钢构件的经济性进行了分析,认为高强钢可以降低结构自重并节省材料费用。但早期高强钢的碳当量较高,对焊接工艺要求苛刻且施工质量不宜控制,工程应用很少。20 世纪 90 年代,美国、日本等国提出了高性能钢的概念,不仅要求钢材具有高强度,还要具有较好的断裂韧性、可焊性、冷弯性能与一定的耐候能力。2006 年,Collin 与 Johansson^[1,4]给出了不同强度钢材的单位质量价格与单位强度价格,如图 1.2 所示。图 1.2(a)中对比了不同地区各种强度钢材的单位质量价格,可以看出钢材单位质量的价格随着强度增长而增长;图 1.2(b)假设钢材的强度均能得到充分利用,对比了不同强度钢材的单位强度成本,从中可以看出钢材单位质量价格的增长速度低于钢材强度的增长速度,因此高强钢提供每 MPa 承载力的成本要低于普通强度钢材^[1,3,4]。

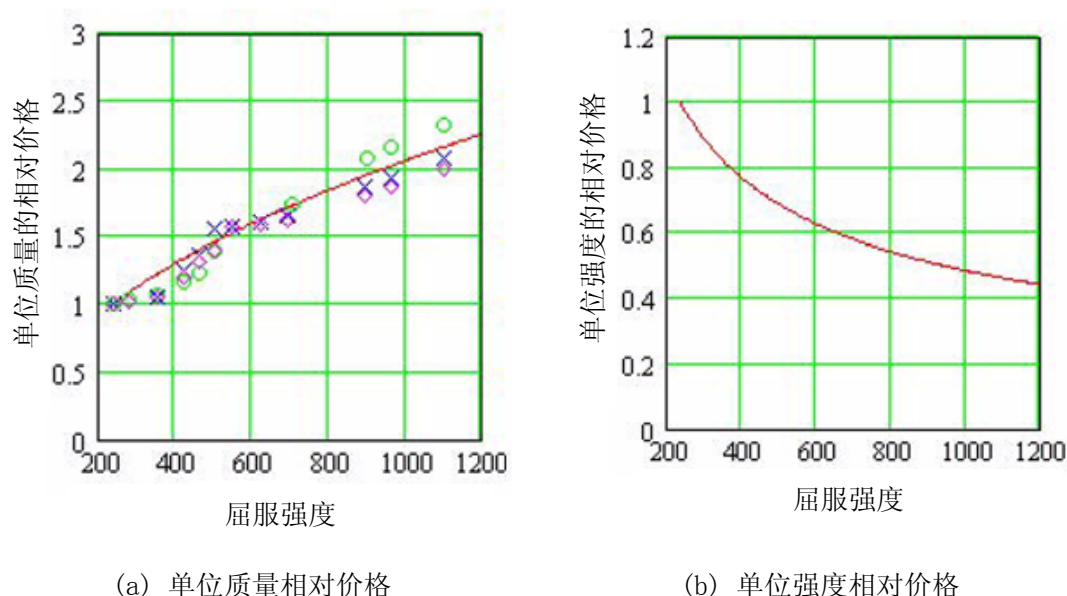


图 1.2 钢材价格的比较^[1,4]

Günther^[1,5]汇编了美国、加拿大、欧洲和日本关于高性能钢应用与研究的文

献，认为高性能钢在大、中跨桥梁中的应用能节省用钢量高达 20%。2011 年，Long 和 Jean-Francois 等人^[1,6]对高强钢用于钢柱与钢管混凝土柱的经济性进行了全面分析，研究了高强钢在单个柱与框架柱中的成本并与普通强度钢材方案进行比较，认为采用高强钢制造受压构件在总体造价上更为经济。高强钢在建筑结构与桥梁领域的应用均可以降低工程成本，但实际节约成本取决于结构的形式与不同时间、地区钢材的价格。不可忽视的是，随着钢材强度的增高，构件的稳定性将成为决定高强钢结构是否经济的关键。当高强钢应用于受拉构件或非稳定控制的构件时，其效率更高。

1.1.2 高强钢的优势

高强钢的应用不仅能为工程的建设方节约投资，还能解决设计与施工中的难题，为大型及复杂结构提供更为合理的解决方案，其优点可归纳如下：

- 1) 与普通钢材相比，高强钢具有更高的屈服强度与抗拉强度，因此在同样的受力条件下可以采用更小的截面尺寸，用钢量将得以降低。特别是当恒荷载中结构自重占较大比例时（如大跨度结构与桥梁等），采用高强钢将进一步减少用钢量。
- 2) 对于受力较大的构件，采用高强钢后构件截面减小，构件重量降低，解决了大型构件的运输与吊装问题。采用高强钢后构件的壁厚得以减小，厚板焊接等施工难题也将得以解决，同时减少了焊接工作量。
- 3) 对于高层与超高层建筑，减小柱的尺寸将提供更多的有效使用面积，尤其是在底层及地下停车库等柱轴力较大部位。
- 4) 采用高强钢，结构的自重得以降低，可以减少上部结构对基础的作用力，降低基础的造价。对于地震区结构，减小结构自重也同时降低了结构在地震下的作用力，使得抗震建筑设计的更为经济。
- 5) 高强钢的推广使用将显著减少单位建筑面积钢材、能源的消耗量，在解决工程问题的同时还可达到减少污染、改善环境的目的，对建设能源节约型经济与可持续发展社会具有重大意义。

1.1.3 高强钢的应用现状

近年来，高强钢在日本、美国、欧洲及中国等地区已有一些工程应用实例^[1,4,5,7-13]，涉及建筑结构、桥梁工程与输电铁塔结构等领域。

1) 建筑结构

日本的 Landmark Tower 与 NTV Tower，澳大利亚的 Star City 与 Latitude 大

厦，以及德国的 Sony Centre 等，采用了屈服强度 460MPa~690MPa 的高强钢，解决了设计与施工问题，取得了良好效果，如图 1.3-1.7 所示。



图 1.3 Landmark Tower (日本)



图 1.4 NTV Tower (日本)



图 1.5 Star City (澳大利亚)