

# Q500qD 高强卷制圆钢管焊接连接力学性能试验研究\*

邢遵胜<sup>1</sup> 王 垒<sup>1</sup> 颜 阳<sup>2,3</sup> 班慧勇<sup>4</sup> 童乐为<sup>3</sup> 曾祥文<sup>1</sup>

(1. 浙江精工钢结构集团有限公司, 浙江绍兴 312030; 2. 中铁上海设计院集团有限公司, 上海 200070; 3. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 4. 清华大学土木工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 针对 Q500 级高强圆钢管在工程应用中研究不足的问题, 通过对其进行材料性能试验及焊接工艺研究, 得出: Q500qD 钢板冷加工卷管后, 屈服强度和抗拉强度提高, 屈强比略有增大, 特别是其延性有所降低; 冲击功满足 GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》要求, 表明冷加工后韧性良好; 采用药芯焊丝进行同种钢对接焊时, 焊缝抗拉强度达标且断口位于焊缝, 验证了屈服强度匹配原则的有效性; Q500qD 与 Q355B 异种钢焊接接头抗拉强度及冲击功均符合 GB/T 50661—2011《钢结构焊接规范》。结果表明, 高强圆屈强比随牌号升高而增大, 建议工程中优先选用建筑结构用钢板并优化焊接参数(同种钢按屈服、异种钢按抗拉等强进行匹配), 以保障结构的安全性和可靠性。

**关键词:** Q500; 高强圆; 卷制圆钢管; 焊接工艺; 力学性能

## 0 引 言

高强钢是指钢材牌号不低于 Q460、Q460GJ 的高强度结构钢材<sup>[1]</sup>。自 2004 年国家体育场鸟巢项目大规模应用 Q460GJD 牌号高强钢起, 各高校、企业等对高强度结构钢的材料性能、焊接工艺等进行了大量研究<sup>[2-10]</sup>, 并在工程中普遍应用。

目前建筑工程中以应用高强钢板为主, 通过焊接连接将钢板加工为各种类型的构件。高强圆钢管尚没有规模化应用, 相关研究也较少。为此, 首次对 Q500 级高强圆钢管的材料性能、焊接工艺及性能等进行研究, 为工程应用提供依据。

根据 GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》<sup>[11]</sup>、JGJ/T 483—2020《高强钢结构设计标准》<sup>[12]</sup>、GB/T 19879—2018《建筑结构用钢板》<sup>[13]</sup>和 GB 714—2015《桥梁用结构钢》<sup>[14]</sup>规定的屈服强度和抗拉强度数值, 分析得到各类结构钢材料的屈强比要求如图 1 所示。

Q420 及以下的低合金高强度结构钢、桥梁结构钢的屈强比均小于 0.81。随着钢材牌号提高, 高强

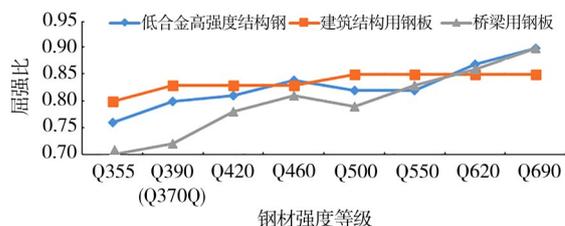


图 1 不同规范钢材屈强比

Fig. 1 Yield-tensile ratios of steels in different specifications

钢的屈强比数值增大, 特别是 Q620、Q620q、Q690、Q690q 屈强比大于 0.85。因此选用高强钢时, 应优先选用建筑结构用钢板, 以保证材料的屈强比满足设计要求。

试验用卷管材料采用南京钢铁股份有限公司生产的 Q500qD 钢板 (TMCP) 冷加工卷管成型后焊

\*中国钢结构协会研究开发项目 (CSCS2023-01)。

第一作者: 邢遵胜, 正高级工程师, 主要从事建筑钢结构设计、制造与施工技术研究, 65553089@qq.com。

通信作者: 颜阳, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事高性能结构及新型结构研究与设计, yanyang@sty.sh.cn。

收稿日期: 2024-03-31

接,圆钢管规格为 $\phi 400 \times 12$ 。

### 1 Q500qD 钢板及卷制圆管材料力学性能试验

对原材钢板和冷加工钢管取样,进行力学性能试验。其中,拉伸试件数量为1个,冲击试件数量为3个,结果取平均值。钢板试件从同批次原料钢板上切割,钢管材料从钢管上切割。钢管平行轧制方向为钢管长度方向,取样并机加工后,试验时直接

夹持;钢管垂直轧制方向(即沿钢管周长方向)对试样压平后再机加工。

由表1试验结果可知,采用冷加工卷管后,钢材屈服强度和抗拉强度均有所提高,但延性有所降低,且冷加工会导致钢管材料屈强比上升。不同试样的冲击功数值均能满足GB/T 50661—2011《钢结构焊接规范》的要求,且冲击韧性较好。

表1 材料力学性能试验结果

Table 1 Test results of mechanical properties of materials

类型	取样方向	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	屈强比	伸长率/%	冲击温度/℃	冲击均值/J
质保书		523	726	0.72	20.5	-20	164
钢板取样		546	682	0.80	21.8	-20	248
钢管取样	平行轧制方向	591	700	0.84	18.3	-20	233
	垂直轧制方向	585	715	0.82	19.5	-20	219

### 2 焊材匹配及焊材力学性能检测

参照施工现场焊接作业条件及焊接习惯,采用二氧化碳气体保护焊(GMAW)。钢板对接焊的焊接位置为横焊(H),钢管对接焊为全位置焊(6G)。

#### 2.1 Q500qD 圆钢管对接焊接试验焊材选用

Q500qD 圆钢管同材质对接焊接时,按照屈服

强度近似相同且略高的原则选择焊丝。根据钢板复验结果及试验需求,选用天津市金桥焊材集团有限公司生产的牌号JQ. YJ621K2-1、型号T624T1-1C1A-N3M1药芯焊丝,焊丝直径为1.2 mm。熔敷金属力学性能试验的取样方式如图2所示。

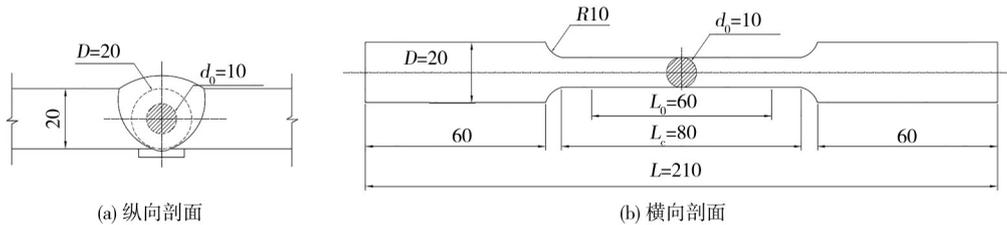


图2 熔敷金属拉伸试验取样简图 mm

Fig. 2 Sampling diagram for the tensile tests of deposited metal

由表2试验数据可见:焊材的力学性能试验结果与质保单基本一致,但屈强比较实测值略大;焊材屈服强度大于Q500q钢板的实测屈服强度,焊材

抗拉强度略小于钢板的抗拉强度,焊材性能满足GB 714—2015所规定的Q500钢材屈服强度的适配要求。

表2 焊丝熔敷金属试验结果

Table 2 Experimental results of welding wire cladding metal

类型	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	屈强比	伸长率/%	冲击温度/℃	冲击均值/J
Q500q 规范值	500	630	0.82	—	—	—
Q500q 钢板	546	682	0.80	21.8	—	—
焊材质保单	589	665	0.88	25.5	-40	106
熔敷金属试验	591	653	0.90	25.0	-40	106

#### 2.2 Q500qD 与 Q355B 圆钢管异种钢对接焊接试验焊材选用

进行异种钢对接焊接试验时,母材采用

Q500qD 与 Q355B 级同规格圆钢管 $\phi 400 \times 12$ ,焊材根据就低适配原则,根据Q355B钢管的抗拉强度等强匹配,由表3可知:焊材力学性能试

验结果与质保单基本一致, 屈服比和抗拉强度、屈服强度略大, 焊材性能满足 Q355B 钢材适配要求。选用天津市金桥焊材集团有限公司生产

的牌号 T492T1-1C1A 药芯焊丝, 焊丝直径为 1.2 mm。

表 3 异种钢焊丝熔敷金属试验结果

Table 3 Experimental results of dissimilar steel wire cladding metal

类型	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	屈服比	伸长率/%	冲击温度/℃	冲击均值/J
Q355B 钢管	411	550	0.75	24	20	138
焊材质保单	480	550	0.87	26	-20	102
熔敷金属试验	481	580	0.83	28	-20	105

### 3 Q500qD 圆钢管等强对接焊接力学性能试验

#### 3.1 试验方案设计

首先研究和考察 Q500 级  $\phi 400 \times 12$  圆钢管对接焊接的焊接工艺及其性能。

对接钢管均开设  $30^\circ$  坡口, 按照根部间隙约 4 mm 进行装配, V 形坡口处垫设陶瓷衬垫。焊接前清除坡口及焊口附近的油、锈、水及氧化皮; 焊接过程中, 在每道焊接完成后, 清理坡口及焊道内杂物, 检查上道焊道无缺陷后进行下一道焊接。焊接坡口及焊道焊接顺序设计如图 3

所示。

原材料钢板化学成分如表 4 所示。

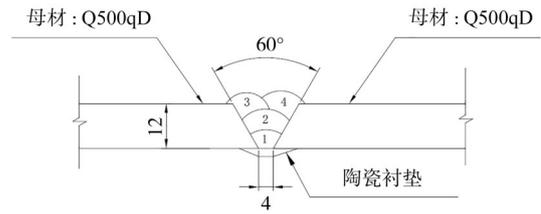


图 3 焊接接头坡口设计及焊接顺序 mm

Fig. 3 Groove design and welding sequence of welded joints

表 4 Q500qD 钢板化学成分

Table 4 Q500qD steel plate chemical composition

批号	C	Si	Mn	P	S	Alt	Nb	V	Ti	Cu	Cr	Ni	Mo
21111163490101	8	27	162	9	5	26	49	2	14	2	28	9	17

计算母材碳当量为:  $C_{ev}(\%) = m(C) + m(Mn)/6 + [m(Cr) + m(Mo) + m(V)]/5 + [m(Ni) + m(Cu)]/15 = 45\% < 50\%$ 。

$(Si)/30 + m(Mn)/20 + m(Cu)/20 + m(Ni)/60 + m(Cr)/20 + m(Mo)/15 + m(V)/15 + 5m(B) = 0.2\% < 0.25\%$ 。

根据上述数据及工程经验, 制定焊接工艺参数

计算钢材裂纹敏感性指数为:  $P_{cm}(\%) = m(C) + m$

如表 5 所示。

表 5 焊接工艺参数

Table 5 Welding parameters

道次	焊接方法	焊丝直径/mm	保护气体流量/(L·min) <sup>-1</sup>	电流/A	电压/V	焊接速度/(cm·min) <sup>-1</sup>
打底	GMAW	1.2	20	180	23	20
填充	GMAW	1.2	20	200	24	18
盖面	GMAW	1.2	20	180	23	16

#### 3.2 试验结果分析

通过工装夹具对钢管进行  $45^\circ$  固定, 按预设工艺参数进行钢管对接的 6G 焊接作业。取样进行抗拉试验、弯曲试验和低温冲击试验后, 试验结果如表 6 所示。

由表 6 数据可见, Q500qD 圆钢管对接焊接后, 各项性能指标均满足要求。其中, 因母材抗拉强度大于按屈服强度匹配的焊材熔敷金属的抗拉强度, 因此拉伸试样均断在焊缝位置, 但抗

拉强度均能满足要求。

由图 4 所见, 拉伸试样两侧为同种材质 Q500qD 时, 断裂位置为焊缝, 断口有明显的颈缩现象, 焊缝金属抗拉强度大于 Q500qD 高强钢技术要求, 试件判定合格。

因焊材实测抗拉强度低于卷管钢板的实测抗拉强度, 因此, 试件断裂位置均发生在焊缝处。

表6 焊接试验结果  
Table 6 Welding test results

样品编号	检测项目	技术要求	检测结果	单项判定
1-1.1	抗拉强度/MPa	≥630	674(焊缝断)	合格
1-1.2			702(焊缝断)	合格
1-2.1	180°面弯试验	单个裂纹或缺陷≤3 mm,单个试样裂纹或缺陷总长≤7 mm,4个试样各	无裂纹	合格
1-2.2			无裂纹	合格
1-2.3			无裂纹	合格
1-2.4			无裂纹	合格
1-3.1~3.3(焊缝中心)	冲击吸收功 (-40℃)/J	≥23.25	96 81 50 (平均76)	合格
1-3.4~3.6(热影响区)			124 113 129 (平均122)	合格

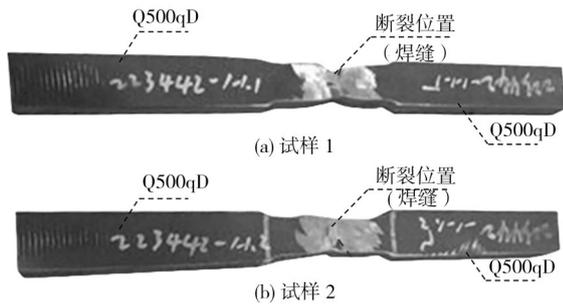


图4 焊接试样破坏位置

Fig. 4 Failure locations of welded specimens

表7 Q500qD与Q355B异种钢圆钢管对接焊接工艺参数

Table 7 Butt welding parameters of Q500qD and Q355B dissimilar steel circular tubes

道次	焊接方法	焊条(焊丝)直径/mm	保护气体流量/(L·min <sup>-1</sup> )	电流/A	电压/V	焊接速度/(cm·min <sup>-1</sup> )
打底	GMAW	1.2	20	200	24	22
填充	GMAW	1.2	20	220	26	24
盖面	GMAW	1.2	20	200	23	20

#### 4.2 试验结果分析

取样进行抗拉试验、弯曲试验和低温冲击试验后,试验结果如表8所示。

由表8可见,Q500qD圆钢管与Q355B圆钢管对接焊接后,各项性能指标均满足要求。其中,两组拉伸试验中,一组断于母材侧,一组断于焊缝处,抗拉强度均能满足要求。

由图5可见,拉伸试样1的断裂位置为Q355B侧母材,断口有明显的颈缩现象,断口抗拉强度大于钢材级别技术要求,试件判定合格。

拉伸试样2的断裂位置为焊缝区,断口有明显的颈缩现象,断口抗拉强度远大于钢材级别技术要求,试件判定合格。

### 4 Q500qD与Q355B圆钢管异种钢对接焊接力学性能试验

#### 4.1 试验方案设计

对Q500qD级高强钢圆钢管与Q355B级异种钢对接焊接工艺进行试验研究。焊接工艺设计和操作手法与第3节Q500qD高强圆钢管等强焊接基本一致。根据经验和多次试焊结果对焊接参数微调,结果如表7所示。

### 5 结论

1)随着钢材牌号的提高,高强钢屈强比增大。因高强钢一般用于结构受力较大的部位,建议工程项目在使用高强钢时优先选用建筑结构用钢板,以保证材料的屈强比满足设计要求。

2)采用Q500qD钢板冷加工卷管后,钢材屈服强度和抗拉强度均有所提高,但延性有所降低,且冷加工会导致钢管材料屈强比增大。冷加工后钢材的冲击功均能满足GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》的要求,且冲击韧性较好。

3)对比高强钢钢板和冷加工钢管,T624T1-1C1A-N3M1高强度药芯焊丝的各项性能比较稳定,但焊材屈强比数值较大。

4)对冷加工成型Q500qD圆钢管进行了模拟施

表 8 异种钢焊接试验结果  
Table 8 Welding test results of dissimilar steels

样品编号	检测项目	技术要求	检测结果	单项判定
2-1.1	抗拉强度/MPa	≥470	535(Q355 母材侧断)	合格
2-1.2			587(焊缝断)	合格
2-2.1	180°面弯试验	单个裂纹或缺陷≤3 mm, 单个试样裂纹或缺陷总长≤7 mm, 4 个试样各种缺陷总长≤24 mm	无裂纹	合格
2-2.2			无裂纹	合格
2-2.3			无裂纹	合格
2-2.4			无裂纹	合格
2-3.1~3.3 (焊缝中心)	冲击吸收功 (20℃)/J	≥25.5	103 105 110 (平均 106)	合格
2-3.4~3.6 (热影响区)			115 105 116 (平均 112)	合格



图 5 Q500qD 与 Q355B 异种钢对接焊接试样破坏位置

Fig. 5 Failure locations of Q500qD and Q355B dissimilar steel butt-welded specimens

工操作条件下的同材质、同规格对接焊接及力学性能试验,验证了焊接工艺参数的合理性。采用屈服强度匹配的原则选择焊材,试件拉伸试验的断口位置均在焊缝处,抗拉强度等指标满足标准要求。

5) 对冷加工成型 Q500qD 和 Q355B 材质的  $\phi 400 \times 12$  圆钢管进行了异种材质对接焊接及力学性能试验,焊接接头抗拉强度和冲击韧性均满足 GB/T 50661—2011《钢结构焊接规范》的要求。

#### 参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构焊接规范: GB/T 50661—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

- [2] 戴为志, 刘景凤. 建筑钢结构焊接技术: “鸟巢”焊接工程实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [3] 戴为志, 刘景凤, 高良. 建筑钢结构焊接应用技术及案例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [4] 高树栋, 李久林, 马德志, 等. 国家体育场钢结构工程 Q460E-Z35 特厚板焊接技术研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(7): 85-88.
- [5] 蒋联民, 胡湘红. Q460 高性能钢表面裂纹的分析[J]. 宽厚板, 2007, 13(1): 19-23.
- [6] 梁楠伟, 刘德义, 刘世程. 热处理对 Q460E 低合金结构钢组织与性能的影响[J]. 大连交通大学学报, 2008, 29(1): 84-88.
- [7] 黄东鑫. Q460E 焊接性能分析及匹配焊材研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [8] 邱德隆, 高树栋, 芦广平, 等. Q460E-Z35 钢焊接性试验及工艺评定[J]. 电焊机, 2008, 38(4): 26-50.
- [9] 贾良玖, 董洋. 高性能钢在结构工程中的研究和应用进展[J]. 工业建筑, 2016, 46(7): 1-9.
- [10] 李国强. 高强结构钢连接研究进展[J]. 钢结构(中英文), 2020, 35(6): 1-40.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. 低合金高强度结构钢: GB/T 1591—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高强钢结构设计标准: JGJ/T 483—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [13] 国家标准化管理委员会. 建筑结构用钢板: GB/T 19879—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [14] 中国国家标准化管理委员会. 桥梁用结构钢: GB 714—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

## Experimental Research on Mechanical Properties of Welded Joints of Q500qD High-Strength Cold-Rolled Circular Steel Tubes

Zunsheng Xing<sup>1</sup> Lei Wang<sup>1</sup> Yang Yan<sup>2,3</sup> Huiyong Ban<sup>4</sup> Lewei Tong<sup>3</sup> Xiangwen Zeng<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Jinggong Steel Building Group Co., Ltd., Shaoxing 312030, China;

2. China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China;

3. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

4. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

### Abstract:

In order to solve the problem of insufficient research on the engineering application of Q500 high-strength steel tubes, this paper conducted the material performance test and welding process research, the results showed that: after cold processing of Q500qD steel plates, the yield strength and tensile strength increased to 585-591 MPa and 700-715 MPa, respectively, the yield ratio increased to 0.82-0.84, while the ductility decreased. The impact energy (219-233 J at -20 °C) met the requirements of *High Strength Low Alloy Structural Steels* (GB/T 1591-2018), indicating good toughness after cold working. When T624T1-1C1A-N3M1 welding wires were used for the same steel butt welding, the tensile strength of the weld met the standard requirements, and the fracture occurred in the weld, which verified the validity of the yield strength matching principle. The tensile strength and impact power of Q500qD and Q355B dissimilar steel welded joints met the requirements of *Code for Welding of Steel Structures* (GB/T 50661-2011). The research showed that the yield ratio of high-strength steel increased with the increase of the grade. It is suggested that the steel plate used in building structure should be preferred in the project, the welding parameters should be optimized (the same steel should be matched according to yield, and the dissimilar steel should be strengthened according to tensile strength) to ensure the safety and reliability of the structure.

**Keywords:** Q500; high-strength steel; cold-rolled steel circular steel tube; welding process; mechanical property