

建筑结构用铸钢材料性能和设计强度取值的 试验研究

孔德煌

国核电力规划设计研究院有限公司，北京

收稿日期：2023年1月27日；录用日期：2023年2月17日；发布日期：2023年2月28日

摘要

本文收集了建筑结构常用铸钢G20Mn5N和G20Mn5QT的各项力学性能数据，经统计得出铸钢强度的标准值和标准偏差。调研并测定了铸钢节点和铸钢构件的几何尺寸(主要是厚度)偏差，提出符合铸造工艺生产现状的几何不定性均值和变异系数；进行了30~150 mm厚铸件分层力学性能测试及全厚度试板拉伸试验，研究常用基尔类型试块和不同厚度铸件试板力学性能测试值的差异。在试验和统计分析的基础上，提出了考虑厚度效应按厚度分组的抗力分项系数和设计强度值。

关键词

铸钢，厚度效应，抗力分项系数

Experimental Research of the Building Structure with Cast Steel Material Properties and Design Strength Values

Dehuang Kong

State Nuclear Electric Power Planning Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing

Received: Jan. 27th, 2023; accepted: Feb. 17th, 2023; published: Feb. 28th, 2023

Abstract

This paper collected the various mechanical performance data of the building structure commonly using cast steel G20Mn5N and G20Mn5QT, and calculated the cast steel strength standard value and standard deviation. The author invested and determined the geometry size (mainly thick-

ness) deviation of the cast steel joint, and put forward the geometrical uncertainty mean and coefficient of variation in accordance with the casting production status. The author made the 30~150mm thick casting thickness of layered mechanics performance test and the whole plate tensile test, and researched the mechanics performance test difference of the commonly used gill type try block and the different thickness casting plate. On the basis of the test and statistical analysis, the author put forward considering the thickness effect according to the thickness of the grouping resistance partial coefficient value and design strength.

Keywords

Cast Steel, Thickness Effect, Resistance Partial Coefficient

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 铸钢材料性能不定性的调研分析

1.1. 铸钢材料性能调研

目前国内广泛应用的铸钢牌号为 G20Mn5N 和 G20Mn5QT 可焊铸钢, 它们按 DIN EN 10293:2005-06 标准生产。本次研究的材性数据由东南网架钢构公司和中建钢构江苏分公司提供, 主要应用于大型体育场馆、机场车站、文化会展中心等建筑工程中的复杂节点。在材性数据收集过程中, 没有发现按中国标准《焊接结构用铸钢件》(GB/T 7659)和《一般工程用铸造碳钢件》(GB/T 11352)生产的非焊接结构用铸钢。这说明现有的铸钢材料国家标准并未被设计人员和铸钢生产者所接受, 应尽快制订符合我国国情的铸钢材料标准, 满足设计和工程应用要求。

根据收集到的国产 G20Mn5N 和 G20Mn5QT 铸钢的材料性能数据, 对屈服强度、抗拉强度、断后伸长率和屈服比分别绘制出直方图(图 1、图 2)。从图中可以看出, 铸钢的各项性能均高于材料标准的要求, 且分散性很小。

必须说明, 以上材料性能数据是由铸钢厂、钢结构厂从单铸试块(基尔类型试块)或单铸、附铸试板测得的。

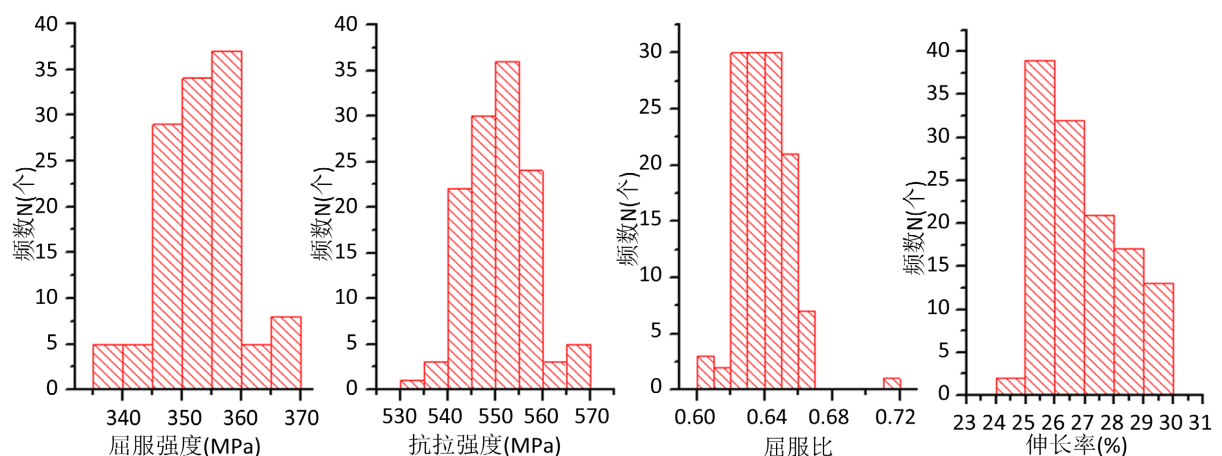


Figure 1. G20Mn5QT Statistical histogram

图 1. G20Mn5QT 统计直方图

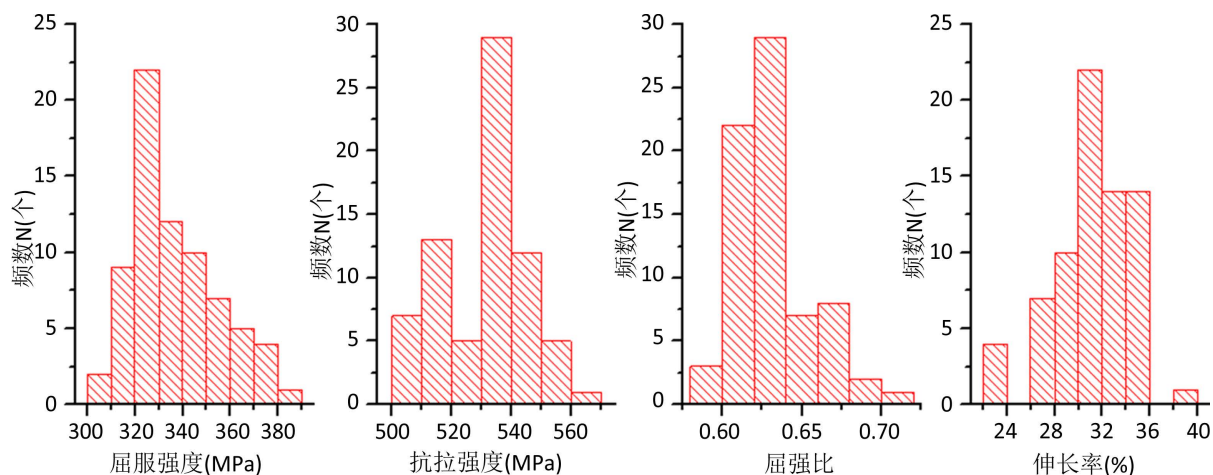


Figure 2. G20Mn5N Statistical histogram

图 2. G20Mn5N 统计直方图

1.2. 铸钢材料性能调研

从材料标准分析,目前常用的铸钢 G20Mn5N、G20Mn5QT 和 Q345、Q345GJ 钢板、型钢相比,材性指标基本相当,铸钢的屈服强度指标稍低, Q345GJ 钢要求屈强比不大于 0.80,铸钢和 Q345 钢对此未作规定。

根据铸钢与钢材的主要力学性能实测数据[1]对比, G20Mn5N 和 G20Mn5QT 铸钢的强度和塑性指标分别与 Q345 钢和 Q345GJ 钢相当。调质与正火处理相比可提高强度的均匀性,降低标准偏差,从而可提高强度设计值。对于 G20Mn5 铸钢,调质比正火处理的强度值均提高 10%。铸钢的屈强比较低,断后伸长率又较高,单纯从标准试块的这二项指标来看,铸钢的塑性性能还好于低合金结构钢和建筑结构用钢板。综合以上分析比较,可以认为由基尔型试块测得的铸钢性能数据和 Q345、Q345GJ 钢基本相同,处于同一水平。由此认为铸钢件的材料性能已经达到轧制钢板、型钢构件的实际性能,将会过高估量铸钢件的真实性能。

1.3. 取样方式对铸钢件力学性能测试值的影响

《一般工程用铸造碳钢》(GB/T 11352-2009) [2]以及其他铸钢材料标准规定,力学性能测试用试块应在浇注过程中单独铸出或附铸于其代表的铸件上。试块与其所代表的铸件在同一生产性热处理炉内进行处理。测试采用的试件应从单独铸造或附铸试块上取得。该试验结果代表浇注铸件钢液的质量,而不能完全代表铸件本身的性能。铸件本体的性能受到凝固条件及热处理时冷却速度的影响,而这些又受到铸件壁厚、铸件整体尺寸和形状的影响,两者之间存在一些差异。轧制钢板力学性能试验的试板取自材料成分相同、同炉冶炼、轧制过程相同及冷却方式相同的钢板,这些试板的试验结果能较真实地反映钢板的实际力学性能。一般认为单铸试块或附铸试块的力学性能要略高于铸件本体。如铸件厚度大于试块厚度较多时,标准试块测得的性能指标会高一些。

为了弥补以上不足,又考虑到所收集的材性数据远高于铸钢材料标准的要求,甚至还普遍优于同类低合金钢(Q345, Q345GJ)的情况,需要进行铸钢件截面厚度效应的试验研究,对铸件性能给出全面综合性评价,并提出按厚度分组铸钢材料的抗力分项系数和强度设计值。

1.4. 试块类型和厚度效应引起的不定性

铸钢构件各部位的性能与铸件形状、厚度、浇注深度、冷却速度等多种因素相关,复杂形状铸件各

部位的力学性能也会有差异。一般不可能破坏铸件而从本体取样,其力学性能测定用试块只能在浇注过程中单独铸出或附铸于铸件本体上。单铸试块有基尔试块、梅花试块和Y形试块三种,统称为基尔型试块。截面厚度或直径基本尺寸为28~30 mm,试块与其所代表的铸件同炉热处理。附铸试块的形状、尺寸和取样位置由供需双方商定,其厚度通常约为28~30 mm。

铸件浇注凝固及冷却时,表面与芯部的冷却速度是不同的。截面越厚,这种差别就越大,由此导致铸件芯部的结晶组织和力学性能与表面有明显差别。此外,由于铸件截面增厚,表面的冷却速度也会因芯部往外传热而减慢,其力学性能也会低于较薄的截面,这二种情况总称为厚度效应[3]。随着截面厚度的增加,铸钢的各项性能均有所下降,对塑性(以断后伸长率为代表)和韧性(以冲击吸收能量为代表)的影响尤为显著。

根据相关资料介绍[3],铸件存在不同程度的厚度效应,且不同成分,不同组织的铸件性能下降程度也有所不同,以铸钢厂目前常用的基尔型标准试块测得的性能指标不能反映厚壁铸件的真实性能。据国外试验数据,直径30 mm基尔型试块与 $\phi 500\sim\phi 600$ 试棒芯部的性能相比,后者抗拉强度下降10%,屈服强度下降25%,断后伸长率、断面收缩率及冲击吸收能量值一般下降40%~45%,甚至更多。针对目前国内铸钢件应用情况,一是要研究截面厚度效应的影响,考虑厚度增大对强度和塑性降低的影响[4];二是要限制厚截面铸件的应用,特别是在地震和寒冷地区及受冲击和振动场合的应用[5]。盲目增大铸件厚度,降低设计计算应力比不是科学合理的做法。

和钢构件的几何不定性参数相比,铸钢件截面不定性均值均小于钢构件,总体来讲,铸件厚度等尺寸偏差大于钢构件。这表明,由于铸造和轧制生产工艺的不同,几何不定性对抗力分项系数和设计强度的影响会大于钢构件。

2. 铸钢件计算模式不定性分析

2.1. 铸钢件和钢构件设计计算方法比较[6] [7]

结构构件计算模式不定性,主要是指抗力计算中所采用的基本假定和设计规范中所采用的公式不精确等引起的变异性。这种变异一般可通过构件试验或与精确模式(如弹塑性有限元分析)计算结果相比较而确定。

根据《铸钢节点应用技术规程》(CECS235:2008)4.2.2条说明:目前常用铸钢材料的强屈比和伸长率都与碳素钢或低合金结构钢相差不多,因而在铸钢材料满足相应的Q235或Q345钢材的性能要求时,铸钢管相贯节点和铸钢空心球的破坏准则和计算公式,原则上可采用相应的钢管相贯节点和空心球节点的破坏准则和计算公式。对轴心受压构件,近年进行的高强钢稳定承载力试验表明,其平均值可以提高,但铸钢的强度与Q235、Q345相近,因此仍可采用原有的计算模式不定性参数。

在本次的铸钢结构抗力分项系数计算中,构件类型仅为轴拉、轴压和弯矩作用在平面内或平面外的偏压构件四种(表1)。钢结构设计规范中包含的组合梁受弯、受剪、腹板受剪局部失稳,以及型钢梁的弹性及塑性破坏在铸钢结构中未见应用,且一般也不起控制作用而未列出。

Table 1. The calculation model of structural member is uncertain statistical parameter
表 1. 结构构件计算模式不定性统计参数

构件类型		μ_{Ω_p}	δ_{Ω_p}
	轴心受拉构件	1.050	0.070
	轴心受压构件	0.970	0.051
偏压构件	弯矩作用在平面内	1.050	0.075
	弯矩作用在平面外	1.070	0.096

Continued

型钢梁	弹性破坏	1.030	0.090
	塑性破坏	1.120	0.106
组合梁	受弯破坏	1.030	0.080
	受剪破坏	1.030	0.110
	腹板受剪局部失稳	1.030	0.110

3. 铸钢件截面厚度效应的试验研究

3.1. 铸钢件按厚度层分条实验

以目前我国常用的 G20Mn5 正火钢和调质钢进行铸件厚度效应试验,厚度有 30 mm、50 mm、75 mm、100 mm 和 150 mm 五种,试验项目为沿厚度分条拉伸和冲击试验,以及全厚度拉伸试验。试块的铸造和单铸、附铸试块的加工及试验由吴桥铸钢厂完成,对 30~150 mm 厚铸钢试块,由中建钢构江苏分公司加工试件,并进行各项力学性能测试。

为测定各厚度层的屈服强度、抗拉强度和断后伸长率而进行的分条拉伸试验,把厚度 30~150 mm 铸件分成 3~10 条;为测定各厚度层的冲击吸收能量值,在分成条后再分成若干段加工成冲击试样。以下用图形示出 50 mm 厚 G20Mn5QT 铸钢截面各厚度层力学性能的变化情况。

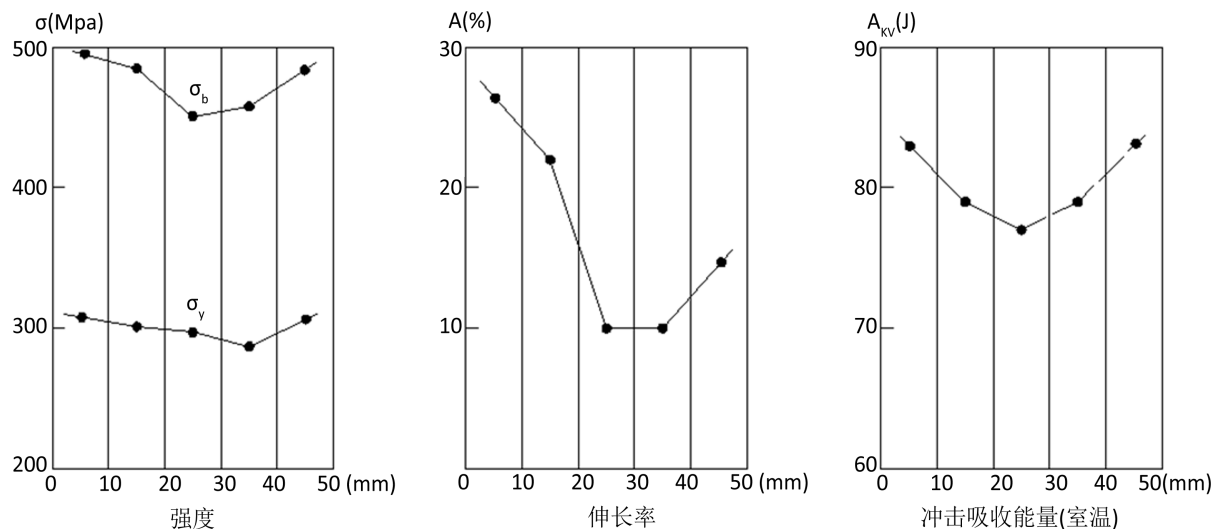


Figure 3. Mechanical properties of layers of 50 mm thick G20Mn5QT cast steel section

图 3. 50 mm 厚 G20Mn5QT 铸钢截面各层力学性能

图 3 表明,铸件截面各厚度层的力学性能是不同的,屈服强度、抗拉强度、断后伸长率及冲击吸收能量值均以表层为最高,向内呈逐层降低趋势。厚度愈厚,内层的性能降低越多,同时表层的性能也比薄铸件表层的性能低一些。

3.2. 全厚度分片拉伸试验与计算分析

全厚度试板测试可综合反映各层性能的不匀质性,以及在拉伸过程中的相互协调性。观察全厚度试板拉伸时的荷载—位移曲线(图 4),30 mm 厚铸钢试板有明显的屈服平台;50 mm、75 mm 厚试板有缓慢上升段;100~150 mm 试板均为上升段,无屈服平台。屈服时的试件伸长量和拉断时的位移量随铸件厚度增大而

迅速减小,厚度为75、100、150 mm时降低更为明显,拉断时的位移量仅为30、50 mm厚度时的一半。这表明铸件的塑性性能随铸件厚度增加明显下降,其主要原因是铸件厚度中间层的塑性性能大幅下降。

对5种厚度试验用铸钢板,与全厚度切片拉伸试验相对应,进行了全厚度试板拉伸过程的弹塑性有限元计算。计算时沿厚度由表层至中心分为若干条,每条的宽度和厚度与分条试验相对应。每条铸钢材料的力学性能,在分条试验测得数据的基础上,按从外向内变化的规律适当调整后取用。沿试件高度,同一条的材料性能取相同的值。通过有限元模拟计算得出的荷载位移曲线,与全厚度试板拉伸曲线相接近,表明试验统计数据可供计算分析采用。从曲线的变化规律,可分析得出全厚度试板的屈服强度、抗拉强度随板厚增加而降低的规律。

在对铸件试板进行拉伸模拟计算时,采用shell181单元建模,单元平面尺寸为切条宽(10~15 mm)×切条高(10 mm),沿高度方向划分30份。试件实际高度为450 mm,考虑上下夹持段后,取试件计算高度为300 mm。约束试板下端各节点的竖向位移和左下角节点的水平位移,对试板上端各节点施加相同的竖向位移。以上端位移逐级线性增大的方式进行加载,直至上端位移迅速增大进入不稳定状态为达到破坏。

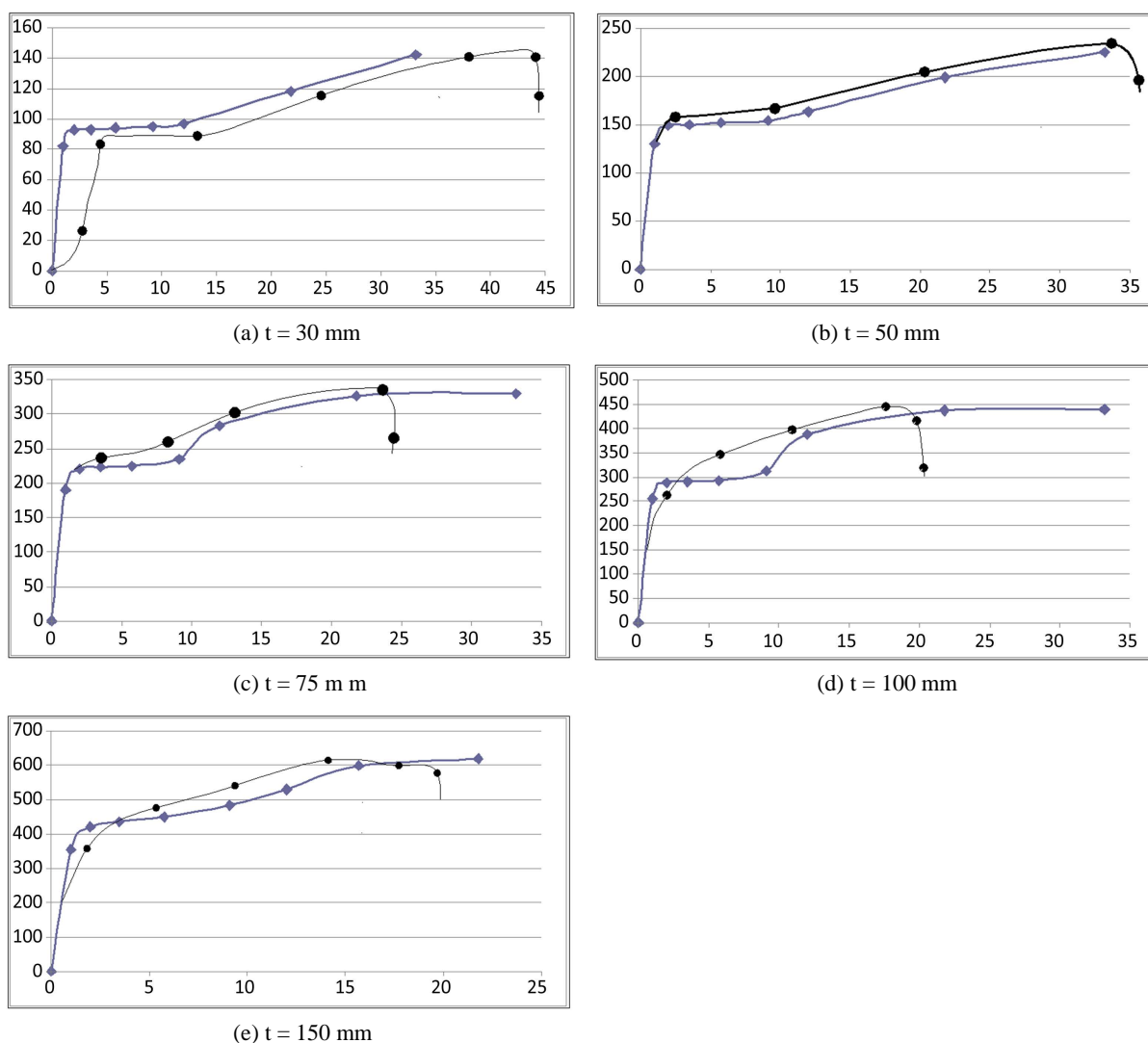


Figure 4. Load-displacement curve of 30~150 mm thick specimen

图 4. 30~150 mm 厚试件荷载—位移曲线

拉伸位移分 8 级施加, 提供各试件上端中心节点各级荷载步的位移及试件下边各节点的竖向反力, 做出该试板的荷载位移曲线(图 4), 图中横坐标为位移, 单位 mm; 纵坐标为荷载, 单位 KN。从图中可以看出, 各试板的屈服应力均略小于试件各厚度层的平均屈服强度, 表明试板中心各层的塑性性能降低已影响变形协调, 使整体屈服强度降低。

4. 铸钢件的抗力分项系数

4.1. 可靠度指标

结构设计所采用的可靠度指标, 理论上应根据结构设计安全等级, 结构件的重要性、破坏性质(脆性、延性)及失效产生的后果, 并考虑使用经验和经济因素等确定。根据铸钢材料的实际性能, 特别是厚壁铸件的塑性性能(如断后伸长率)和冲击性能(如吸收能量值)较低的状况; 以及铸钢节点中易出现缩松、缩孔、夹砂等缺陷, 材料密实度低, 组织分布状况不均匀, 进入塑性后变形发展迅速, 节点虽未彻底破坏, 但已不能使用; 同时考虑到标准规范的继承性, 仍将铸钢构件的破坏类型归属为脆性破坏, 当设计安全等级为二级时, 其可靠度指标应大于等于 3.7, 相应的失效概率小于等于 1.08×10^{-4} (钢构件的可靠度指标为 $\beta \geq 3.2$, 相应的失效概率小于等于 6.87×10^{-4})。

4.2. 铸钢材料性能不定性

对 G20Mn5N (正火)和 G20Mn5QT (调质) [8]的材性试验数据分析后得出表 2。

Table 2. Test data of cast steel properties

表 2. 铸钢材性试验数据

牌号	材料标准规定屈服强度 标准值/MPa	屈服强度 平均值/MPa	屈服强度统计 标准偏差/MPa	屈服强度统计 标准值/MPa
G20Mn5N	300	335.32	17.9	305.87
G20Mn5QT	300	350.93	7.2	339.09

4.3. 铸钢件材性试验取样方式及厚度效应影响

根据 30~150 mm 厚铸件全厚度试板拉伸试验屈服强度统计数据, 并与基尔型试块的屈服强度比较, 得出按厚度分组的屈服强度降低平均值和变异系数(表 3)。

Table 3. Thickness effect parameters of cast steel

表 3. 铸钢件材料试验厚度效应参数

铸件厚度/mm	平均值 $\mu_{\Omega 3}$	变异系数 $\delta_{\Omega 3}$
基尔型试块($\Phi 28 \sim 30$)	1.0000	0.0044
≥16~30	0.9537	
>30~50	0.9294	
>50~75	0.8936	0.0168
>75~100	0.8279	
>100~150	0.7592	

按[1]再考虑试验加载速度和试验机柔度的影响得出三者的综合影响系数为铸钢件材性试验不定性影响参数。

4.4. 铸钢构件截面几何不定性

通过对构件截面厚度调研统计和对圆管、箱型截面的计算分析,得出铸钢件截面几何不定性统计参数(表 4)。

Table 4. Statistical parameter of geometric uncertainty of section of cast steel

表 4. 铸钢构件截面几何不定性统计参数

厚度组/mm	不定性均值 $\mu_{\Omega A}$	不定性变异系数 $\delta_{\Omega A}$
$\geq 16\sim 30$	0.965	0.042
$> 30\sim 50$	0.974	0.031
$> 50\sim 75$	0.980	0.025
$> 75\sim 100$	0.985	0.022
$> 100\sim 150$	0.985	0.020

4.5. 抗力分项系数的计算

在给定目标可靠度指标 β 后,根据我国《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)的规定,选取由可变荷载效应控制的组合: $1.2 \times$ 恒载 + $1.4 \times$ 活载(住宅),和永久荷载效应控制的组合: $1.35 \times$ 恒载 + $1.4 \times 0.7 \times$ 活载(住宅)。由于住宅活载比办公楼活载更为不利,因此仅考虑住宅楼活载的情况。按照给定的设计表达式及各荷载分项系数和荷载组合系数,采用与《钢结构设计标准》GB50017-2017 修编时计算钢材抗力分项系数相同的程序和方法[9],求出满足精度要求的抗力分项系数 γ_R 。

表 5、表 6 给出了不同厚度的四种典型构件:轴拉、轴压、偏压(弯矩作用在平面内)及偏压(弯矩作用在平面外)四种荷载比下的抗力分项系数。从表中可以看出,无论在何种荷载比下,轴心受压构件的抗力分项系数最高。这主要是由轴心受压构件计算模式不定性统计参数均值偏低所引起的。

对于荷载比 ρ ,以往钢结构设计规范制订过程中(包括新版钢结构设计规范) ρ 值一般取 0.25~2.0,而在实际工程中 ρ 值一般在 0.25~4.0 之间变化,仅有极少数的极端情况下, ρ 值会偏离出这个范围。因此,在计算铸钢材料的抗力分项时,取 $\rho = 1.0$ 、2.0、4.0 三种情况,取 $\rho = 4.0$ 比 $\rho = 2.0$ 算出的抗力分项系数约增大 2%,是偏于安全的。

Table 5. The calculation result of partial safety factor for resistance of G20Mn5N

表 5. G20Mn5N 抗力分项系数计算结果

荷载比 ρ	构件类型	厚度组/mm				
		$\geq 16\sim 30$	$> 30\sim 50$	$> 50\sim 75$	$> 75\sim 100$	$> 100\sim 150$
1	轴心受拉构件	1.182	1.192	1.228	1.316	1.434
	轴心受压构件	1.250	1.260	1.298	1.392	1.517
	偏压构件(弯矩作用平面内)	1.190	1.200	1.236	1.326	1.445
	偏压构件(弯矩作用平面外)	1.209	1.220	1.257	1.347	1.468
2	轴心受拉构件	1.196	1.208	1.246	1.336	1.456
	轴心受压构件	1.270	1.283	1.322	1.418	1.546
	偏压构件(弯矩作用平面内)	1.204	1.216	1.253	1.344	1.465
	偏压构件(弯矩作用平面外)	1.216	1.228	1.266	1.358	1.480
4	轴心受拉构件	1.217	1.230	1.268	1.361	1.483
	轴心受压构件	1.295	1.309	1.349	1.448	1.578
	偏压构件(弯矩作用平面内)	1.224	1.237	1.275	1.368	1.491
	偏压构件(弯矩作用平面外)	1.233	1.246	1.285	1.378	1.502

Table 6. The calculation result of partial safety factor for resistance of G20Mn5QT
表 6. G20Mn5QT 抗力分项系数计算结果

荷载比 ρ	构件类型	厚度组/mm				
		$\geq 16\sim 30$	$>30\sim 50$	$>50\sim 75$	$>75\sim 100$	$>100\sim 150$
1	轴心受拉构件	1.102	1.112	1.145	1.228	1.338
	轴心受压构件	1.165	1.175	1.210	1.298	1.414
	偏压构件 (弯矩作用平面内)	1.110	1.120	1.154	1.237	1.348
	偏压构件 (弯矩作用平面外)	1.129	1.139	1.173	1.258	1.371
	轴心受拉构件	1.121	1.132	1.166	1.251	1.364
	轴心受压构件	1.190	1.201	1.238	1.328	1.447
2	偏压构件 (弯矩作用平面内)	1.128	1.139	1.174	1.259	1.372
	偏压构件 (弯矩作用平面外)	1.140	1.151	1.187	1.273	1.387
	轴心受拉构件	1.143	1.155	1.191	1.277	1.392
	轴心受压构件	1.216	1.228	1.266	1.338	1.480
4	偏压构件 (弯矩作用平面内)	1.149	1.161	1.197	1.284	1.399
	偏压构件 (弯矩作用平面外)	1.158	1.170	1.206	1.295	1.411

4.6. 铸钢件抗力分项系数取值和强度设计指标

按调研和试验统计分析结构, 汇集材料强度数据, 考虑试验不定性, 几何不定性和计算模式不定性后, 经计算得出的按厚度和热处理方式分组的铸钢的抗力分项系数和强度设计值(表 7)。

从铸钢生产和工程应用考虑, 当铸件尺寸较大, 厚度较厚时, 宜采用正火状态交货, 尺寸较小并对性能要求较高时, 宜采用调质状态交货。对于低碳铸钢件, 正火和调质处理的效果基本相近。从大型试块的试验来看, 调质处理后提高的强度并不明显。有些铸钢厂尚缺少大型淬火池, 对特大型铸件调质后的变形还难以控制。对一些复杂的铸钢节点(如支管密集布置的相贯节点) [10], 调质后容易产生表面裂纹。偏于安全性考虑, 将两种热处理方式的抗力分项系数合一, 统一取 G20Mn5N 的抗力分项系数(表 7)。

Table 7. Test data of cast steel properties

表 7. 铸钢材性试验数据

铸钢牌号	厚度组/mm	抗力分项系数 γ_R	抗拉、抗压、抗弯 f	抗剪 f_v	端面承压(刨平顶紧) f_{ce}
G20Mn5N G20Mn5QT	$\geq 16\sim 30$	1.300	230	135	310
	$>30\sim 50$	1.300	230	135	
	$>50\sim 75$	1.350	220	125	
	$>75\sim 100$	1.450	205	120	
	$>100\sim 150$	1.600	185	110	

5. 结论

本文通过根据收集国产 G20Mn5N 和 G20Mn5QT 铸钢的材料性能数据, 对屈服强度、抗拉强度、断后伸长率和屈服比等性能指标进行统计分析, 计算材料性能不定性指标。通过铸钢试件全厚度分片拉伸试验结合数值模拟的方法分析了铸钢截面的厚度效应, 计算试验取样方式及厚度效应不定性指标。通过对构件截面厚度调研统计和对圆管、箱型截面的计算分析, 得出铸钢件截面几何不定性指标。

在以上铸钢各项不定性指标的基础上得出铸钢的抗力分项系数和强度设计值, 为《铸钢设计规程》的编制提供依据。

参考文献

- [1] 中冶建筑研究总院有限公司. 国产建筑钢结构钢材材性试验、统计分析与设计指标的研究[M]. 北京: 中冶建造研究总院有限公司, 2016.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局国家标准化管理委员会. GB/T11352-2009 一般工程用铸造碳钢件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [3] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册第 2 卷(铸钢) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [4] 郑庆行, 温玉磊, 等. ZG230-450 大型铸钢件塑性低的原因分析[J]. 热处理技术与装备, 2022, 43(5): 32-35.
- [5] 曹健峰, 等. 一种中强度耐低温铸钢材料组织与性能研究[J]. 失效分析与预防, 2022, 17(3): 181-184.
- [6] 谢坚, 等. 某综合楼采光顶 G20Mn5 铸钢节点受力性能分析[J]. 山西建筑, 2022, 48(7): 41-45.
- [7] 舒赣平, 等. 385m 超大型长江大跨越输电塔铸钢节点受力性能研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(8): 34-40, 47.
- [8] 苏兰, 等. G20Mn5 悬索桥夹用铸钢调质性能研究[J]. 大型铸锻件, 2022(3): 44-47.
- [9] 住房和城乡建设部. GB50017-2017 钢结构设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [10] 曹健峰, 等. GB/T 40800-2021《铸钢件焊接工艺评定规范》国家标准解读[J]. 重工铸造装备与技术, 2022, 57(6): 15-18.