

高端数控精密机床铸件的发展方向

马敬仲¹, 李克锐²

(1.北京第一机床厂, 北京 101300; 2.郑州机械研究所, 河南郑州 450001)

摘要: 介绍了我国机床铸件的质量现状, 论述了我国机床铸件的低碳当量、高强度对机床的精度及精度保持性的影响。指出提高高端数控精密机床铸件质量的核心是高碳当量、高强度、高刚度与低应力。通过对国内一些生产企业调查, 对如何提高机床铸件的质量提出了几点建议。

关键词: 机床铸件; 高碳当量; 高强度; 高刚度; 低应力

中图分类号: TG250 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2014) 12-1217-09

Development Direction of High Quality Numerical Control Precision Machine Tool Casting

MA Jing-zhong¹, LI Ke-rui²

(1.Beijing No.1 Machine Tool Plant, Beijing 101300, China;

2. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: The status of machine tool casting in China was introduced. The effects of low carbon equivalent and high strength on machine tool precision and precision retentivity were discussed. The high carbon equivalent, strength, rigidity and low stress are key technology for increasing high quality numerical control precision machine tool casting quality. Some advices were put forward for increasing machine tool casting quality.

Key words: machine tool casting; high carbon equivalent; high strength; high rigidity; low stress

在金属切削机床灰铸铁件技术条件中规定, 以力学性能作为验收的依据, 化学成分不作为验收依据, 如用户需要可在合同中说明。长期以来, 这项规定在我国不少机床铸件生产厂造成认识上的误区: 既然以力学性能为验收标准, 而化学成分不作为验收标准, 那么, 以降低碳当量的措施达到高强度, 则是最易实现的。长期以来由于我国机床铸件的高强度是在低碳当量下取得的, 它对机床性能的负面影响很大, 低碳当量、高强度产生的问题是: 收缩大, 导致缩孔、疏松倾向增加; 残余应力大, 导致尺寸精度稳定性差, 开裂倾向增大; 流动性差, 限制了铸件薄壁化; 加工性能差, 导致切削速度的降低与刀具寿命的下降; 减震性差, 导致加工精度与精度稳定性的降低; 质量稳定性差, 这是因为低碳当量导致的上述问题在生产中反复出现, 质量难以稳定。在2014年对国内有代表性的机床生产企业调查表明, 用户反馈意见中占第一位的是质量不稳定。

1 提高机床铸件质量的核心是高碳当量、高强度、高刚度与低应力

近50年来, 机床的精度已提高了100倍, 已进入亚

微米级及纳米级超精加工时代。高精度与精度的保持性是数控机床质量的首要指标。

1.1 机床精度与机床铸件的刚性及减震性

精度是指被加工零件能达到的加工精度。因为目前高档数控机床已进入航空航天、兵器、核工业、电子技术、船舶等军工领域。重型、超重型数控机床已进入大型电站设备、石化冶金设备、汽车制造等行业。这些高精度、高速切削、强力切削的数控机床对机床铸件的刚度与减震性提出了更高的要求: 航天航空、核工业、兵器、发电设备所需各种特殊性能的合金材料加工时又“粘”又“硬”, 故要求机床与机床铸件具有足够的抗变形能力, 即使在高速、强力切削下仍能保持高精度。从使用角度上看, 机床铸件的刚性比强度更为重要。实践与计算表明, 即使最大的切削力, 机床铸件的强度仍有较大的安全系数, 但却会出现由于刚性差、抗变形能力及减震性差而失去加工精度。因此高端数控精密机床在高速切削、强力切削下, 机床铸件必须具有较高的刚性与优良的减震性。

现代数控机床中主要受力的机床件, 往往不是按强度设计的, 大部分是按刚性设计的。提高机床铸件

基金项目: 国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项 (2012ZX04010031)。

收稿日期: 2014-09-20。

作者简介: 马敬仲 (1936-), 男, 教授级高工, 主要从事机床铸件的生产技术工作。

刚性的措施来自两个方面：一个是提高铸件的结构刚性，这就是机床件向双层壁、多层壁结构发展，形成机床件薄壁化，结构日益复杂的重要原因。另一项措施是提高机床铸件的材质刚性，即弹性模量，而弹性模量的高低主要取决于抗拉强度，见表1。因此现代的高端数控机床铸件皆采用了高强度灰铸铁HT300、HT350及高强度、高刚度球墨铸铁材质。

表1 铸铁的强度与弹性模量

Table 1 The strength and Young's modulus of grey iron

类别	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
灰铸铁	155	103.5
	185	111.7
	215	120
	265	129.7
	310	137.9
	355	141.4
球墨铸铁	400	144.8
	400~650	160~180

保持加工时高精度的另一因素是机床铸件必须具备优良的减震性。值得提出的是，在减震性能中，灰铸铁的减震性优于球墨铸铁，而灰铸铁中，碳当量高的减震性又优于碳当量低的。实践表明，高碳当量、低强度灰铸铁吸震率高，其次是低碳当量、高强度灰铸铁，球墨铸铁次于灰铸铁，碳钢最低，这也是机床件大部分是灰铸铁的原因。长期以来，机床件的高刚度、高强度与优良的减震性难以统一。前者要求低碳当量，后者要求高碳当量，因此高端精密机床的精度要求其铸件既要有强有力的抗变形能力的材质刚性，又要有优良的减震性，这就要求碳当量与高强度、高刚度在一个新的高度上达到平衡。即在高碳当量下达到高强度、高刚度。

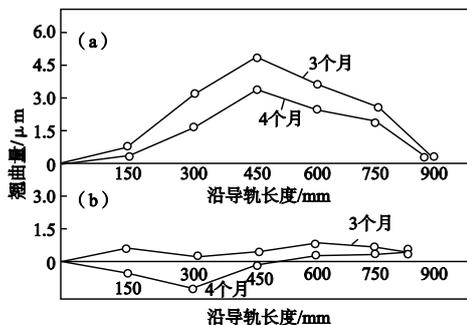
1.2 机床精度保持性与机床铸件的残余应力

机床精度保持性是高端数控机床最重要的质量指标，目前我国与国外还有相当大的差距。国内数控机床的精度保持性约为一年，而国外可达五年。这是我国数控机床进口量为世界第一的原因之一。铸件中的残余应力对铸件尺寸精度稳定性的影响是很大的。高精度的机床在加工中，引起塑性的，不可逆的变形有三个因素：工作负荷、材料刚度、残余应力，这三者中残余应力最为危险，因为其应力往往大于工作负荷，且它是持续的，不间断的。图1a为未经热时效的机床铸件，残余应力较大，铸件变形大。图1b为经过热时效后的机床铸件，残余应力较小，铸件变形较小^[1]。

在灰铸件中，残余应力与强度及碳当量有着密切的关系，它随碳当量的降低而增大^[2]，见图2，随抗拉强度的增大而增大^[2]，见图3。

因此，在相当长的一段时间，我国机床件的低碳

当量、高强度所带来较高的残余应力一直未能得到很好的解决。一些国外用户购买我国机床铸件后往往堆放半年或一年后再用，进行自然时效，降低与释放残余应力。因此，实现高碳当量、高强度的主要途径是高刚度，低应力的精度保持性。



(a) 未热时效铸件 (b) 经热时效消除残余应力60%的铸件

图1 热时效与未热时效对铸件变形的影响

Fig. 1 The distortion of casting with and without heat ageing

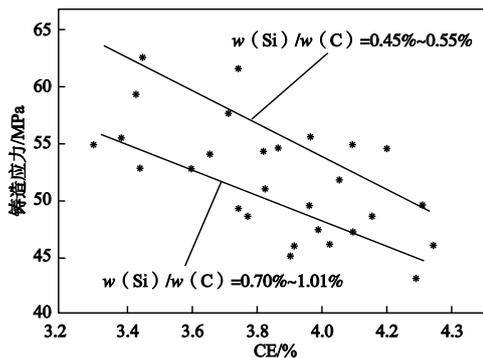


图2 碳当量对铸造应力的影响

Fig. 2 The effect of CE on casting stress

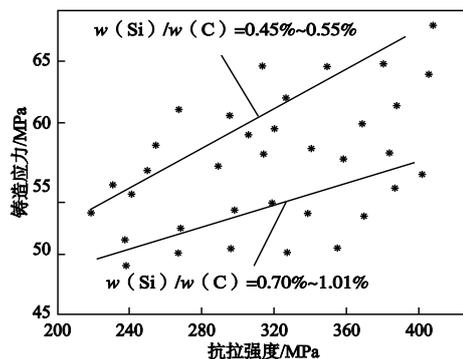


图3 抗拉强度对铸造应力的影响

Fig. 3 The effect of tensile strength on casting stress

1.3 机床铸件的高强度与加工性能

高精度的机床铸件，大部分都是用数控加工中心机床进行加工的。目前主轴转速从每分钟几千转到几万转，甚至达十几万转。切削速度大幅度提高，每台数控中心皆有几百把刀具，换刀速度从十几秒到10 s、3 s，甚至达1 s。因此要求机床铸件具有优良的切削性能。而现在的问题是低碳当量，在提高铸铁的

强度的同时,也导致了高硬度(表2)^[3]及加工性能的恶化。加工性能与硬度的关系见表3^[3]。

表2 灰铸铁的强度与硬度

Table 2 The strength and hardness of grey cast iron

抗拉强度/MPa	加工HBW
200	163
240	207
350	255
380	315

表3 硬度与灰铸铁的加工性能

Table 3 The processability and hardness of grey cast iron

硬度HBW	加工性能
160~190	易切削
190~220	切削顺利
220~240	可加工
>240	加工困难

德国企业中,常用试棒上抗拉强度与硬度的比值 m 来表征切削性能的高低,在同样的强度下, m 值越高,加工性能越优良,见表4^[3]。

表4 灰铸铁切削性能表征(德国)

Table 4 The cutting property of grey cast iron (Germany)

铸铁牌号	加工性能指标 m
GG20	0.95~1.18
GG25	1.04~1.39
GG30	1.15~1.50
GG35	1.25~1.67

注:在实际生产中,强度值的控制以在两级中间为宜,不必超过高一级的指标。

表4中加工性能指标 m 的计算方法如公式(1)所示:

$$m=R_m/HBW \quad (1)$$

式中 R_m 与 HBW 分别为 $\Phi 30$ mm 试棒的抗拉强度及硬度。

在灰铸铁的冶金指标中,硬化度(HG)也是衡量加工性能优劣的一个指标。

$$HG=\text{铸态试棒硬度}/\text{正常硬度}=\text{HBW实测}/(530-344Sc) \quad (\text{当 } HBW < 186 \text{ 时}) \quad (2)$$

$$HG=\text{铸态试棒硬度}/\text{正常硬度}=\text{HBW实测}/(930-744Sc) \quad (\text{当 } HBW > 186 \text{ 时}) \quad (3)$$

$HG < 1$, 表明加工性能良好,在保持强度下提高CE,是实现 $HG < 1$ 的合理途径。

1.4 机床铸件的碳当量与铸件薄壁化及缩松缺陷

在达到HT300力学性能条件下,其所含的碳当量不同,铸造性能中的铁液流动性与铸铁的收缩相差甚大。表5为不同碳当量下的铁液流动性^[3];表6、7为不同碳当量下的收缩性^[3],因机床铸件一般皆为亚共晶铸铁,因此碳当量越低,流动性越差,收缩越大。

由表5-7可知,要使机床铸件薄壁化,减少缩松、缩孔缺陷,必须在高强度下提高碳当量。目前国外的

机床比我国机床重量轻8%~10%。中型机床壁厚已达14~20 mm。小型机床件壁厚已达8~12 mm。低碳当量、高强度灰铸铁件已是实现薄壁化的严重障碍及造成缩松的重要原因。因此综合因素充分说明高碳当量、高强度、高刚度、低应力是我国高端数控机床铸件的发展方向。

表5 灰铸铁碳当量与铁液的流动性

Table 5 The CE and melt iron fluidity of grey cast iron

碳当量CE/%	流动性螺旋线长度/mm
4.0	500
4.2	680
4.3	780
4.5	720

表6 灰铸铁碳当量与铸铁的凝固收缩(体收缩)

Table 6 The CE and solidification shrinkage of grey cast iron

碳当量CE/%	缩松相对容积/%	体收缩率/%
4.05	0.57	2.80
4.08	0.64	3.22
4.02	0.64	2.98
3.76	0.76	3.33

表7 灰铸铁碳当量与铸铁的固态收缩(铸件20 mm)

Table 7 The CE and solid state shrinkage of grey cast iron

碳当量CE/%	自由收缩率/%
3.50	1.35
3.56	1.30
3.70	1.25
3.73	1.20
3.9	1.15

2 我国机床铸件质量的现状与发展方向

2.1 碳当量与强度

机床铸件在相同的强度下,碳当量高低是衡量材质优劣的重要标志。根据调查结果,我国机床铸件尚处在中、低碳当量、高强度阶段。仅有少数机床铸件厂已接近高碳当量、高强度材质的水平,但仍有相当距离。表8为2009年机床铸件质量调查的情况。由表8可知^[4],在同样强度下,国内机床件的碳当量远低于国外同牌号的碳当量。

2014年的全国机床件调查,着重调查了HT300材质的机床件,调查比较严谨,要统计连续60炉次的的数据,表9中的数据是13家生产厂连续60炉次的平均值^[5],表10为2009年与2014年两次调查HT300材质碳当量的对比。

由表9与表10可见,在近4~5年内,材质的质量有所进步。以HT300为例,碳当量<3.60%的企业,由45.5%降至15.4%。碳当量3.64%~3.68%的企业,由36.3%升至46.2%。碳当量为3.70%~3.76%的企业,由18.2%升至38.4%。碳当量整体平均值也由3.60%提至

3.67%，但是与国际先进国家HT300材质碳当量3.83%相比，还有相当差距。因此，在2014年的机床铸件调

查中发现，与此有关的问题仍然很突出。表11是高端数控机床对机床铸件要求中突出问题的调查结果^[5]。

表8 2009年调查的机床铸件碳当量的国内外对比

Table 8 The CE comparison of some enterprises at home and abroad in 2009

项目	HT250碳当量CE/%				HT300碳当量CE/%				HT350碳当量CE/%		
国外机床铸件	平均值 3.95				3.83				3.76		
	平均值 3.75				3.60				3.48		
国内11家机床铸件生产厂的机床铸件	3.67	3.78	3.73	3.77	3.53	3.59	3.65	3.64	3.50	3.58	
	各厂值 3.90 3.75 3.66 3.77 3.67 3.65 3.50 3.70				3.55						
	3.78	3.60	3.82		3.51	3.47	3.73		3.26	3.33	3.67

表9 2014年调查的国内13家机床铸件生产厂的机床铸件碳当量 (HT300)

Table 9 The machine tool casting CE of 13 enterprises in 2014

厂家编号	1	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
碳当量CE/%	3.67	3.67	3.67	3.67	3.74	3.57	3.73	3.66	3.64	3.76	3.72	3.59	3.68	3.72	3.67
CE平均值/%	3.68														

表10 2009年与2014年国内机床铸件二次调查中HT300材质碳当量的对比

Table 10 The CE of machine tool casting HT300

碳当量CE/%	2009年调查的11家企业情况				2014年调查的13家企业60炉次的平均值			
	碳当量均值3.52%				碳当量均值3.58%			
3.47~3.59	厂家数		比例		厂家数		比例	
	5		45.5%		2		15.4%	
	碳当量均值3.65%				碳当量均值3.67%			
3.64~3.68	厂家数		厂家数		厂家数		比例	
	4		36.3%		6		46.2%	
	碳当量均值3.71%				碳当量均值3.73%			
3.70~3.76	厂家数		厂家数		厂家数		比例	
	2		18.2%		5		38.4%	

表11 高端数控机床对铸件要求中的突出问题

Table 11 The main problems of the requirements for high quality numerical control precision machine tool casting

项目	薄壁化	高强度、高刚度与残余应力的矛盾	尺寸稳定性	高强度与切削性能矛盾	大型化	导轨耐磨
13家机床铸件	厂家数量 10	8	7	5	4	1
生产厂的调查	比例 77%	62%	54%	42%	30%	7.6%

由表11可知，各企业对机床铸件薄壁化、高强度、低应力、尺寸稳定性、切削性能等问题在高端机床铸件要求中占前几位。而这几个问题皆与碳当量有关，说明碳当量越低，这类问题越严重。在生产精密机床铸件中，对难度最大的调查中，选择结构复杂的企业占71%，位居第一。说明数控机床的刚性要求提高，不仅要高的材质刚性，还要对铸件的结构进行改进，设计了双层壁、多层壁，结构复杂的铸件，这给生产机床铸件的企业带来了困难，表12是对14家生产机床铸件厂家的调查情况^[5]。

表12 在生产高端数控机床铸件中难度问题的调查结果

Table 12 The investigation result of difficulties of machine tool casting production

项目	结构复杂	易变形	缩松	夹渣	薄壁	大断面	性能不合格
厂家数量	10	7	7	5	3	3	1
比例	71%	50%	50%	36%	21%	21%	7%

由表12可知，在调查的企业中，力学性能不合格仅占极少数，而由于在高强度下的低碳当量造成的铁液在复杂结构下充型困难、残余应力增大而造成的变形、收缩大造成的缩松等问题占前三位。调查表明，对13家机床铸件生产企业连续60炉次的统计表明，没有一家企业的力学性能是不合格的，差距是达到大于300 MPa强度下的低碳当量(表13)^[5]。

2.2 碳当量与残余应力

郑州机械研究所做的试验表明：无论是灰铸铁还是球墨铸铁，低碳当量是产生高残余应力的主要原因，提高碳当量则可有效地降低残余应力，见表14。

由表14可知，提高强度，可有效提高弹性模量，但其残余应力有所上升，但在满足强度要求下，提高碳当量则可有效地降低残余应力，减小变形，提高尺寸稳定性。球墨铸铁的残余应力虽高，但弹性模量高，抗变形能力增大，有利于减小变形。表14中2#灰铸铁

表13 13家企业机床铸件的抗拉强度与碳当量
(60炉次平均值)

Table 13 The strength and CE of machine tool casting
of 13 enterprises

企业编号	碳当量/%	抗拉强度/MPa
1	3.67	325
2	3.67	355
3	3.74	320
4	3.57	365.7
5	3.73	337
6	3.66	339
7	3.64	309.8
8	3.76	311
9	3.72	328
10	3.59	319
11	3.68	332
12	3.72	342
13	3.67	330

的强度低于1#灰铸铁，而弹性模量却高于1#灰铸铁，其原因是灰铸铁中弹性模量不仅与抗拉强度有关，还与成分中的合金化有关，2#灰铸铁的弹性模量高是由于加入合金的原因，表15为1#、2#灰铸铁的化学成分^[2]。

表14、表15表明，只要采取有力措施，HT300灰铸铁是可以实现高碳当量（3.88%）、高强度（ $R_m=322$ MPa）、高刚性（ $E=129$ GPa），低应力（残余应力

表14 灰铸铁与球墨铸铁碳当量对残余应力的影响

Table 14 The effect of CE on residual stress of grey
and ductile iron

类别	编号	碳当量	抗拉强度	弹性模量	应力框中最大
		CE/%	/MPa	/GPa	的残余应力/MPa
灰铸铁	1#	3.21	357	114	89.9
	2#	3.88	322	129	34.3
球墨	3#	4.26	443	161	108.8
铸铁	4#	4.44	705	176	88.1

34.3 MPa) 的。这组试验也与日本机床铸件厂HT300的碳当量相符，见表16^[3]。

20世纪80年代，我国机床铸件的残余应力约为30~100 MPa。目前郑州机械研究所对全国一些具有代表性机床铸件厂进行现场测试，机床铸件的残余应力约为70~150 MPa，其主要原因是其材质由HT200、HT250已升至HT300、HT350，另一原因就是HT300、HT350是在较低碳当量下获得的。调研与试验证明，要达到高刚度、低应力，采用高碳当量，高强度是合理的途径。

2.3 碳当量与弹性模量

众所周知，弹性模量随碳当量CE或石墨的增加而降低，见图4^[2]。最近国内共享集团的试验也有相应的试验结果(表17)^[6]。

在相同碳当量下如何提高弹性模量，共享集团做

表15 灰铸铁的化学成分及力学性能

Table 15 The chemical compositions and mechanical properties of grey iron

试样	化学成分/%								力学性能		
	CE	C	Si	P	S	Cu	Sn	Cr	抗拉强度/MPa	HBW	弹性模量/GPa
1#灰铸铁	3.21	2.70	1.504	0.034	0.016				357	229	114
2#灰铸铁	3.88	3.25	1.880	0.034	0.012	0.672	0.029	0.342	322	215	129

表16 日本FC30的化学成分

Table The chemical compositions of Japan FC300

CE	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	$w_B/\%$
3.82	3.15~3.25	1.80~2.00	0.8~1.2	<0.12	<0.12	0.4~0.6	0.2~0.4	

表17 碳当量对弹性模量的影响

Table 17 The effect of CE on Young's modulus

炉次	碳当量 CE/%	化学成分/%			Si/C	力学性能	
		C	Si	抗拉强度/MPa		弹性模量/GPa	
1	3.75	3.20	1.65	0.52	270	100.3	
2	3.74	3.18	1.71	0.54	325	104.2	
3	3.73	3.15	1.74	0.55	350	104.9	
4	3.71	3.12	1.79	0.57	325	108.0	
5	3.68	3.11	1.72	0.55	350	114.7	
6	3.67	3.08	1.76	0.60	325	110.4	
7	3.66	3.08	1.73	0.56	305	114.5	
8	3.65	3.07	1.74	0.57	340	117.8	
9	3.62	3.05	1.71	0.56	340	119.1	
10	3.60	3.03	1.72	0.57	290	118.6	
11	3.55	3.01	1.61	0.53	330	122.1	

了有益的探索,即采用合成铸铁,提高Si/C及合金化皆有利于弹性模量的提高。提高灰铸铁弹性模量的若干措施如表18-20所示^[9]。表18是配料对灰铸铁弹性模量的影响,采用合成铸铁,在不加合金下可提高弹性模量31.7%。表19是Si/C对灰铸铁弹性模量的影响,在碳当量3.65%下,将Si/C为0.51提至0.6,可提高弹性模量23.7%。表20为加入微量Sn对灰铸铁弹性模量的影响,加入0.04%~0.06%Sn,可提高弹性模量17.6%。其生产条件是:配料为合成铸铁(废钢70%,回炉铁30%);低N、低S、渗碳剂;过热温度1 510~1 520℃;静置5~10 min;孕育剂为Si-Ba、孕育剂加入量0.4%;加0.04%~0.06%Sn。测试结果如表21所示。

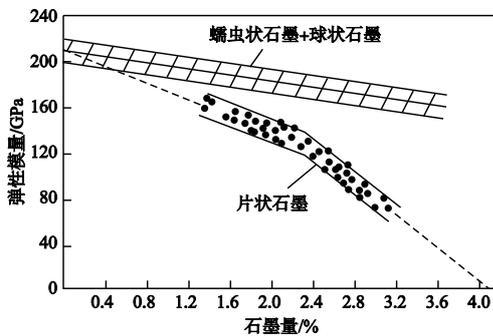


图4 石墨量对弹性模量的影响
Fig. 4 The effect of graphite content on Young's modulus

表18 配料对灰铸铁弹性模量的影响

类型	炉料配比/%		力学性能			
	废钢	生铁 回炉铁	抗拉强度/MPa	硬度HBW	弹性模量/GPa	
合成铸铁	70	0 30	325, 310	221, 217	128.9, 136.2	
非合成铸铁	60	15 25	320, 300	217, 203	100.5, 100.7	

注:化学成分为3.12% C, 1.75% Si, 未加合金。

由表22可知,企业4与企业10的低碳当量、高强度灰铸铁加剧了硬度的提高。达到HBW244~264,导致

表22 碳当量对强度、硬度、加工性能的影响(4个企业60炉次的平均值)

类别	企业编号	碳当量CE/%	化学成分/%				力学性能		加工性能 m 强度/硬度
			C	Si	Cu	Cr	抗拉强度/MPa	硬度HBW	
低CE	4	3.57	3.01	1.70	0.72		365	264	1.38
	10	3.59	3.01	1.76	0.4	0.3	319	244	1.30
高CE	8	3.76	3.13	1.90			311	196	1.58
	9	3.72	3.13	1.73	0.3		328	192	1.70

2.4 机床铸件材质与冶金质量

(1) 要求成熟度 $RG > 1$ 。 $(RG = R_m(\text{MPa}) / (1\ 000 - 800Sc))$ 。 $RG > 1$,表明在同样强度下,碳当量(或共晶度)高。导致铸铁收缩小、流动性好、残余应力低。

(2) 要求硬化度 $HG < 1$ 。 $(HG = \text{硬度HBW} / (530 - 344Sc))$ 。 $HG < 1$,表明在同样强度下,碳当量(或共晶度)高、硬度低,加工性能优良。表23为2014年机床铸件中材质冶金质量的调查。

表19 Si/C对灰铸铁弹性模量的影响

炉次	CE%	化学成分%			力学性能	
		C	Si	Si/C	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
1	3.67	3.06	1.83	0.60	350	126.8
2	3.67	3.06	1.82	0.59	350	119.8
3	3.65	3.07	1.75	0.57	350	133.1
4	3.65	3.07	1.74	0.57	340	117.8
5	3.66	3.07	1.76	0.57	325	114.9
6	3.66	3.08	1.74	0.56	330	128.7
7	3.66	3.08	1.73	0.56	305	114.5
8	3.66	3.09	1.70	0.55	330	109.6
9	3.68	3.09	1.70	0.55	300	107.6
10	3.66	3.12	1.63	0.52	325	104.6
11	3.66	3.12	1.60	0.51	325	102.5

表20 微量Sn对灰铸铁弹性模量的影响

Sn加入量/%	CE/%	化学成分/%			力学性能	
		C	Si	Sn	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
0	3.65	3.09	1.70	0.004 6	300, 310	109.6, 108.4
0.05	3.64	3.08	1.68	0.049	335, 350	125.9, 125.3
0.10	3.66	3.09	1.71	0.091	320, 305	126.7, 129.8

表21 加Sn后的测试结果

碳当量/%	化学成分/%			力学性能	
	C	Si	Sn	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
3.65	3.07	1.75	0.045	300, 310	123.2, 131.7

加工性能指数 m 的降低,恶化了加工性能。而企业8、企业9具有较高碳当量,硬度仅为HBW192、HBW196, m 值为1.58、1.70,远高于企业4、企业10的1.30、1.38。对企业9调查表明,其国外用户反映,该企业的机床铸件加工性能良好,且在较高CE下,也很少发生缩裂。因此,调查表明在高碳当量、高强度下获得较低的硬度与良好的加工性能是十分有效的。

由表23可知,低碳当量、高强度、高硬度的企业4、企业5的冶金质量基本上不合格。企业4的成熟度虽为1.04,但是它是在高硬度下得到的,其硬化度不合格,为1.05,所以它的品质系数未能达到合格。其抗拉强度有富余,完全可以适当提高CE,降低强度与硬度,提高冶金质量。而企业10基本上属于低碳当量、高强度、冶金质量差。企业8、企业9,冶金质量优良,品质系数达到1.18~1.27,尤其是企业9,国外用户反

映良好, 抗拉强度高, 平均328 MPa, 硬度低, 平均HBW190, 加工性能、铸造性能好, 很少发生缩裂、

缩裂, 在2014年调查中, 残余应力也是最低的。这与企业9铸铁件的高CE, 优良的冶金质量是分不开的。

表23 HT300机床铸件材质的冶金质量 (60炉次的平均值)

Table 23 The metallurgy quality of machine tool casting HT300

类别	企业编号	C/%	Si/%	碳当量CE/%	共晶度	力学性能			冶金质量	
						抗拉强度/MPa	硬度HBW	成熟度(RG)	硬化度(HG)	品质系数(Qi)
低CE	4	3.01	1.70	3.57	0.81	365	264	1.04	1.05	0.99
	10	3.01	1.9	3.59	0.82	319	244	0.93	0.98	0.94
高CE	8	3.13	1.9	3.76	0.86	311	196	0.996	0.84	1.18
	9	3.13	1.73	3.72	0.85	328	192	1.02	0.80	1.27

2.5 铁液温度的调查

2014年国内生产的机床铸件的铁液温度与2012年相比有了明显的提高, 见表24。高温低氧化的优质铁液是保证高碳当量、高强度灰铸铁冶金质量的重要基础。

表24 机床铸件铁液温度的调查结果

Table 24 The investigation result of melt iron temperature

年度	铁液温度/℃	企业数量/家	所占比例/%
2012	1 500~1 512	4	36
	1 480	2	18
	1 410~1 450	5	46
	1 480~1 550	8	62
2014	1 480	3	23
	1 420~1 440	2	15

2.6 废钢配比的调查

废钢配比是保证高碳当量、高强度灰铸铁的重要措施之一。表25为两次调查的结果^[9]。

2014年在12家机床件生产企业的调查中, HT300材质的废钢配比为50%以上的企业占83%, 与2009年的50%相比, 有了很大的提高。

表26 高端数控机床铸件的化学成分

Table 26 The chemical compositions of high quality numerical control precision machine tool casting

材质	平均碳当量/%	化学成分/%							
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	其他
HT250	3.95	3.25~3.35	1.85~2.05	0.8~1.2	<0.12	0.06~0.12	0.4~0.6	0.2~0.4	
HT300	3.83	3.15~3.25	1.80~2.00	1.0~1.3	<0.12	0.06~0.12	0.4~0.6	0.2~0.3	Cu, Sn
HT350	3.76	3.10~3.20	1.75~1.95	1.1~1.4	<0.12	0.06~0.12	0.4~0.6	0.2~0.3	

表27 高端数控机床铸件的配料比例

Table 27 The batch feeder proportion of high quality numerical control precision machine tool casting /%

材质	废钢	回炉料	新生铁
HT250	50~55	40~45	<10
HT300	60~70	35~40	<5
HT350	70~80	20~30	0

(3) 过热温度与静置。铁液的过热温度如表28所示, 静置时间为7~10 min。

(4) 推荐的Si/C比。HT250、HT300、HT350材质可将Si/C控制在0.58~0.63的范围内。

表25 HT300材质机床铸件的废钢配比调查结果

Table 25 The investigation result of steel scrap match of machine tool casting HT300

年度	废钢使用量/%	企业数量/家	所占比例/%
2012 (共10家)	60~80	2	20
	50	3	30
	40~45	3	30
	30~34	2	20
2014 (共12家)	100	1	8
	60	2	17
	50~55	7	58
	20~43	2	17

3 提高铸件质量的关键技术

(1) 推荐的化学成分, 见表26。生产控制时, 重要的是成分的波动值要小, C要达到 $\pm 0.05\%$, Si、Mn要达到 $\pm 0.10\%$ 。合金要在目标值范围内。

(2) 推荐的配料比例, 见表27。控制的关键是把高废钢比、高渗碳、高铁液过热温度三者进行统一控制, 缺一不可。

(5) 孕育剂与孕育工艺。孕育剂: 可采用75SiFe或SiBaCa孕育剂, 并注意封闭保存, 防止吸潮氧化。使用前进行250~300℃的预热处理。孕育方式: 可采用出铁槽孕育+随流孕育, 或倒包孕育+随流孕育, 防止孕育衰退。

表28 铸铁的过热温度

Table 28 The overtemperature of cast iron

材质	过热温度/℃
HT250	1 480~1 500
HT300	1 510~1 540
HT350	1 520~1 550

(6) 浇注温度。适当提高浇注温度是必要的，虽然浇注温度提高后液态收缩加大，需要加强补浇补缩，但有利消除夹渣与气孔。表29为日本企业铸件的出炉与浇注温度^[3]。

(7) 炉前控制。控制孕育前后的三角试块白口深度，虽很传统，但实用、方便，对炉前的操作人员与工人的快速判断十分有利。如果将三角试块白口大小与孕育效果，金相组织，热分析曲线及力学性能等相联系，则有利于铸铁质量的在线控制。热分析曲线分析，用孕育前后的过冷度比较控制孕育效果，该方法已在德国应用，并与冶金质量指标、共晶团数、弹性模量建立关系。

目前机床铸件的炉前热分析，合肥工业大学、清华大学都作了大量试验工作，希望能尽快在工厂中应用。

表29 日本铸造企业的铁液出炉与浇注温度
Table 29 The tapping and pouring temperature of Japan foundry enterprises

企业名称	出炉温度/℃	浇注温度/℃
吉田铸工所	1 510	1 420~1 380
池贝铸工	1 520~1 550	1 410~1 370
东芝机械	1 510	中件1 380~1 400, 大件1 350~1 370
丰田工机	1 480~1 510	平均1 370
东海铸造	1 510~1 550	1 420~1 370

(8) 弹性模量与残余应力的测试工作。表30为推荐的机床铸件材质的弹性模量与残余应力。弹性模量与残余应力是高端数控机床铸件材质的重要指标，而高碳当量、高强度是实现高刚度、低应力的途径。碳当量、抗拉强度、弹性模量、残余应力这四个数据的监测及数值高低，代表着高端数控机床铸件的质量与水平。

表30 高端数控机床铸件灰铸铁材质的弹性模量与残余应力
Table 30 The Young's modulus and residual stress of grey iron of machine tool casting

材质	弹性模量/GPa		残余应力/MPa	
	英国密烘公司	国内	退火前	退火后
HT250	120	110	<40	<20
HT300	135	125	<50	<20
HT350	145	135	<60	<20

(9) 打箱温度与残余应力。检测表明，打箱温度对铸件残余应力有着重要影响，见表31。

(10) 热时效与残余应力。为了最大程度的检测热时效的效果，对应力框试样采用了下列工艺，见表32。热时效结果见表33。

目前不少企业生产的20~140 t以上的大型机床件往往实行地坑保温工艺，则保温时间应以铸件的出坑温度为准，以<280 ℃为宜。

在2014年的调查中，一些企业的热时效流于形式，效果较差。为了提高热时效降低残余应力的效果，应注意以下事项。

表31 打箱温度对铸件残余应力的影响
Table 31 The effect of shakeout temperature on residual stress

打箱温度/℃	残余应力/MPa
500	70.2
200	56.5

注：残余应力系指试样中最大的残余应力

表32 热时效工艺参数
Table 32 The heat ageing process parameters

退火温度/℃	升温速度 / (℃·h ⁻¹)	保温时间 /h	炉温温差 /℃
590	30	4	±5

表33 热时效对消除残余应力的影响
Table 33 The effect heat ageing on relief residual stress

灰铸铁			球墨铸铁		
时效前 /MPa	时效后 /MPa	降低应力 /%	时效前 /MPa	时效后 /MPa	降低应力 /%
34.3	19.9	42	88.1	26.3	70.1

(1) 升温速度。在30~80 ℃/h之间，大型与复杂机床件在30~50 ℃/h范围内，某厂9 m工作台升温速度100 ℃/h，导致断裂。

(2) 退火温度。500~550 ℃，HT300、HT350为550~590 ℃。

(3) 保温时间。保温时间按每小时热透25 mm计算，如壁厚75 mm，则保温3 h，大型及复杂件再加1 h。

(4) 降温速度。应为30 ℃/h。

(5) 炉内铸件支撑合理。500~600 ℃时，铸件强度、弹性模量皆有下降，极易变形。故要做好铸件支撑，工作台要侧放，长型件要多点支承，铸件间隙应大于100 mm，保持炉气畅通。

(6) 炉内温度控制。温差应控制在±20 ℃以内。一些企业往往因为炉内温差过大，导致热时效后残余应力不降反升。

(7) 热时效次序。热时效应在粗加工之后进行。关于自然时效要注意的两个问题是：一是自然时效的时间一定要在6个月以上。研究表明，达到6个月才能使残余应力松弛，降低总量达到90%，9个月后可达到95%。二是自然时效的铸件必须置于室外，只有在昼夜冷热温度交替下才能达到时效目的。

在2014年5月的北京国际铸件展会上，江苏某机床铸件生产企业的机床件引起铸造工作者的关注。该企业较全面地贯彻了高碳当量、高强度的理念，在数控机床铸件的质量控制上取得了良好的结果。铁液温度为：1 500~1 520 ℃，电炉熔炼。废钢配比：HT250，

废钢53%；HT300，废钢60%。化学成分如表34所示。品质系数 Q_i ，对于HT250， $Q_i=1.1\sim 1.14$ ，对于HT300，加Cu、Sn时， $Q_i=1.14\sim 1.18$ ，加Cu、Cr时， $Q_i=1.16\sim$

1.26。加工性能，加工硬度值 $<HBW 220$ ，加工性能优良，导轨硬度均匀。以2 570 kg的磨床床身为例，导轨硬度如表35所示。

表34 江苏某企业机床铸件的化学成分

Table 34 The chemical compositions of machine tool casting of enterpriser in Jiangsu

材质	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Sn
HT250	3.1~3.4	2.0~1.7	0.6~1.0	<0.15	<0.1			
HT300	3.0~3.3	1.8~1.6	0.8~1.1	<0.15	<0.1	0.5~0.6		0.02~0.03
	3.0~3.3	1.8~1.6	0.8~1.1	<0.15	<0.1	0.5~0.6	0.15~0.25	

表35 磨床床身导轨硬度

Table 35 The guide hardness of grinder lathe bed HBW

项目	端头1	中间	端头2
长V导轨	250	210	206
长平导轨	250	200	205
薄壁加工面	210	215	220

根据该企业的生产数据，HT300已达到了高碳当量、高强度的水平，见表36。

经对该厂生产的磨床床身铸件残余应力进行实际测量(图5)，其最大残余应力低于21.1 MPa，见表37^[5]。

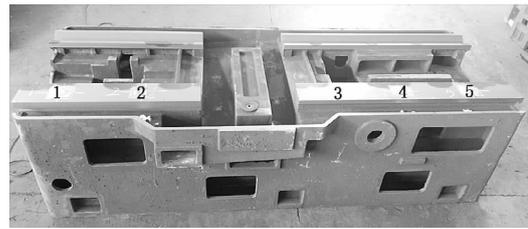


图5 床身铸件残余应力测量点布置

Fig. 5 The check point of residual stress on lathe bed

该企业情况表明，高端数控机床铸件所需要的高碳当量、高强度、高刚度、低应力是可以实现的。

表36 江苏某机床铸件厂高碳当量、高强度灰铸铁质量指标

Table 36 The quality index of grey iron with high CE and strength of enterpriser in Jiangsu

牌号	碳当量		化学成分/%					力学性能		Si/C	冶金质量				
	范围	平均	C	Si	Mn	Cu	Sn	R_m/MPa	HBW		成熟度RG	相对硬度RH	硬化度HG	品质系数	样品数量
HT300	3.7~3.8	3.75	3.15	1.77	0.91	0.52	0.25	353.6	277.1	0.56	1.11	0.89	0.96	1.16	47
	3.8~3.9	3.84	3.24	1.78	0.91	0.54	0.025	336.6	223.6	0.55	1.13	0.90	0.98	1.15	67
	3.9~4.0	3.94	3.32	1.80	0.91	0.55	0.025	322.2	221.9	0.54	1.15	0.92	1.01	1.14	16

表37 床身铸件残余应力测量结果

Table 37 The check result of residual stress of lathe bed

检测点	测量应变($\mu\epsilon$)			残余应力/MPa				应力角 θ°
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	σ_1	σ_2	σ_x	σ_y	
1	25	-3	-5	-0.5	-20.2	-17.8	-2.9	110.5
2	9	-2	14	-5.1	-18.7	-10.6	-13.1	-39.8
3	-3	-25	-2	13.7	-8.6	2.8	2.3	-44.4
4	-15	11	8	12.8	-5.5	9.3	-2.1	25.8
5	-10	-23	-22	21.1	12.0	13.6	19.5	114.7

4 结束语

高碳当量、高强度、高刚度、低应力是高端精密数控机床铸件材质的核心要求。只要认真执行高端机床铸件生产的成套技术，是可以达到高碳当量、高强度、高刚度、低应力的质量指标要求的。

参考文献:

[1] 高瑛, 马敬仲. 铸件的变形与实效 [M]. 北京: 机械工业出版社,

1985: 5-14.

[2] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册第一卷: 铸铁 [M]. 2版, 北京: 机械工业出版社, 2002.

[3] 马敬仲. 铸造技术应用手册第一卷: 铸铁 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.

[4] 马敬仲, 袁亚娟. 由若干企业的调查数据看我国机床铸件质量及其发展方向 [J]. 现代铸铁, 2010 (4): 15-23.

[5] 李克锐. 第二次全国机床铸件调查, 郑州机械研究所, (内部资料).

[6] 曲泽茂, 原晓雷. 提高灰铸铁弹性模量的研究 [J]. 现代铸铁, 2013 (4): 28-33.

[7] 卫东海, 李克锐, 吴现龙, 等. 碳当量对铸态球墨铸铁残余应力的研究 [J]. 铸造, 2013, 63 (4): 312-316.

[8] 卫东海, 李克锐, 吴现龙, 等. 降低铸铁件残余应力的研究及在机床床身上的应用 [C]//2014中国铸造活动周. 河南郑州: 中国机械工程学会铸造分会, 2014.

(编辑: 刘冬梅, ldm@foundryworld.com)

(选自《铸造》2014年第12期)