

45438

热加工译丛

紧密石墨铸铁

《重型机床》编辑部

6596/10

7925
9

目 录

紧密石墨铸铁的生产 and 性能 (英)	彭体元译 熊国庆校	(1)
以一种单一合金生产紧密石墨铸铁 (英)	李春立译	(12)
捷克斯洛伐克的蠕墨铸铁生产 (俄)	李龙城译	(21)
生产蠕虫状石墨铸铁的可能性 (俄)	李龙城译	(24)
紧密石墨铸铁生产的主要评价	刘大元译 熊国庆校	(29)
用稀土金属和钇的复合中间合金进行铸铁的变质处理	刘秉仁译 熊国庆校	(37)
紧密石墨铸铁的某些性能 (英)	李春立译	(40)
过渡型 (蠕虫状) 石墨铸铁结晶特征的研究 (英)	何传驹译 熊国庆校	(50)
某些元素对铸铁石墨形态的影响 (英)	林维俊译 熊国庆校	(59)
紧密石墨铸铁的断口 (英)	谢端乾译	(69)
铸铁中蠕虫状石墨的结晶和结构 (俄)	刘秉仁译 熊国庆校	(81)
铸铁中蠕虫状石墨的干磨损特性 (德)	罗吉荣译 熊国庆校	(83)
铁素体蠕墨铸铁的变形特点 (俄)	刘秉仁译 李龙城校	(90)
铁素体蠕墨铸铁的动力硬化 (俄)	刘秉仁译 李龙城校	(96)
紧密石墨铸铁及其应用 (英)		
.....李龙城 张 军 冯所传 熊国庆校编 刘大元 杨云峰 王一山译		(100)
蠕虫状石墨铸铁及用宅制造的高功率柴油机汽缸盖 (德)		
.....魏华胜 罗吉荣译 熊国庆校		(110)
蠕虫状石墨铸铁——一种制造发动机的特殊材料 (德)		
.....罗吉荣 魏华胜译 熊国庆校		(118)
纤维状石墨铸铁 (英)	魏伯康译 熊国庆校	(125)
球墨铸铁中微量元素的影响与中和 (摘译) (英)	张军译 熊国庆校	(140)
新的石墨分类方案 (日)	何传驹译 林汉同校	(156)
用热分析——相对导热率法快速测定镁铸铁的球化率 (英)		
.....王昌遥译 熊国庆校		(159)
测定凝固时长度——温度变化研究球铁的衰退作用 (德)		
.....黄国栋译 熊国庆校		(167)
凝固热法测试铁水质量 (德)	黄国栋译 熊国庆校	(173)



A791108

紧密石墨铸铁的生产及性能

G.F. Sergeant E.R. Evans

【提要】 紧密石墨铸铁的组织 and 性能介于灰铸铁和球墨铸铁之间，只是称谓不一。这种铸铁在实验中已得知多年，本文介绍了这种铸铁的可靠的生产方法，特别论及了用镁—钛—钨复合变质合金处理铁水的方法。

紧密石墨铸铁具有良好的综合性能：强度高，有一定的韧性，导热性好。这种铸铁特别适用于承受急冷急热的铸件，例如钢绞模，制动零件等，而且用它比用球铁更易获得高强度的复杂致密铸件。本文介绍了机械、物理和铸造等性能的试验结果以及质量控制和无损探伤的适用方法。

一、概述

1948年 Morrogh 研究用铈制取球状石墨组织时，在亚共晶和过共晶铁水中加入铈曾获得紧密石墨，他把这种组织称为“伪片状”石墨。Morrogh 也描述过这种组织，但随后 Day 指出，用不同的方法也获得紧密石墨的立体形貌（与图二相似）。1953年 Dawson 等人发现，在高氮铸铁中增加铁水中的氮含量也可以获得紧密石墨。此后人们对这种不同紧密度的石墨的存在作了大量的研究，同时发现在大断面铸件中会出现如图一所示的良好石墨组织。

在球状石墨组织的铸铁中，由于干扰元素的存在或镁量或铈量不足，也会出现一定紧密度的石墨组织。这种石墨组织有着各种不同的名称：“聚集片状”、“块状”、“厚片状”、“半球状”、“絮片状”和“蠕虫状”。人们采用了“紧密石墨”这个名称，因为这个名称恰当地描述了石墨的空间结构。显然“蠕虫状”这个术语（主要是美国采用）是个不恰当的误称，无论石墨组织类似蠕虫，但是有一种与紧密石墨很不相同的纯粹为蠕虫状的石墨结构，它

是在极低的含碳量的铸铁快速凝固时产生的。英国铸铁研究协会的研究公报 (No138) 对比了紧密石墨和细小的蠕虫状石墨的显微结构（用抛光的显微试样和表明空间形貌的深腐蚀试样进行观察），并强调了它们有十分不同的特性，因此推荐将“蠕虫状”这个术语用于纯粹的蠕虫状组织，亦可以称为“珊瑚状石墨”。

人们不久便确认，紧密石墨铸铁具有高于灰铸铁而接近于球墨铸铁的强度，而它的导热性几乎与灰铸铁相同。因此当要求高强度和高导热性的综合性能时，紧密石墨铸铁优于球墨铸铁，并早已用于制造钢绞模和包括机动零件汽缸及其他小零件的汽车铸件，后来又确认紧密石墨铸铁仅有较小的补缩，并比球墨铸铁更容易解决疏松问题。近年来工业上生产的紧密石墨铸铁中，已探索许多工艺方法，这些工艺方法主要基于镁、铈（或其他稀土元素）或氮的应用上。这些元素各有各自的优点和问题。虽然有些生产继续单独使用铈或其他稀土元素，但目前的趋势是采用镁和少量铈（或其他稀土元素）的复合使用方法。

如图一所示，紧密石墨的内部组织是由短

厚而末端呈园形的石墨片所组成。在显微镜下可见清晰可辨的特殊石墨结构。

借助扫描电镜，我们还可看出紧密石墨片相互连接的分支组织有点像铸铁中的片状石墨，但它彼此并不分开，而像球墨铸铁中的球状石墨形态，如图二所示。

图三是普通灰铸铁深腐蚀试样在扫描电镜下的石墨形貌，这种石墨也具有清晰的分支骨架但分支更广并呈板状。



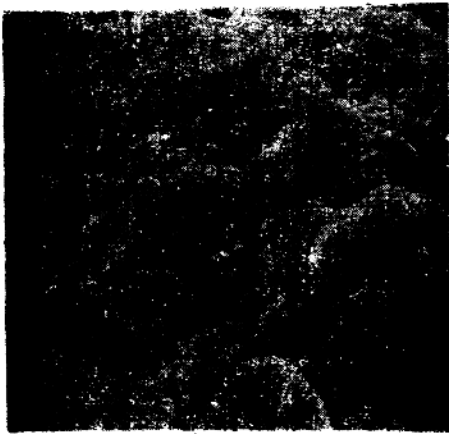
图三 扫描电镜下深腐蚀试样观察到的普通片状石墨结构 ×125

二、紧密石墨铸铁的工业生产

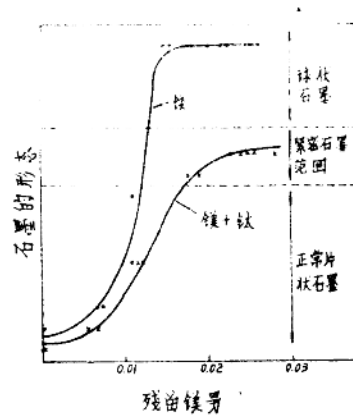
单独用镁只能在很窄的镁含量范围内才能获得良好的紧密石墨。因而使得这种方法的生产控制实际上难于实现。过多的加入量会出现球状石墨，而镁含量过低，将只有普通片状石墨的组织。图四的上面一条曲线说明了这一点。1966年有人建议采用镁和少量铈（或其他稀土元素）处理铁水的方法，但仅在含有0.15~0.5%Ti时才能避免出现球状石墨。最近有



图一 紧密石墨铸铁未腐蚀的显微组织 ×100



图二 扫描电镜下深腐蚀试样观察的紧密石墨结构 7×2150



图四 出现紧密石墨组织的镁含量范围

人指出，复合应用镁、钛及少量铈能可靠地获得良好的紧密石墨组织，而钛含量要低得多（0.08~0.10%Ti），并且镁含量的范围为0.015~0.03%。

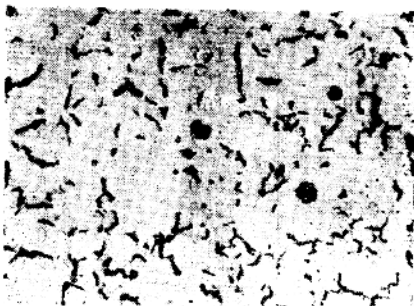
镁和铈复合处理的优点在于能重复产生紧密石墨，而单独使用镁几乎不可能做到这点，如图四所示。然而复合加入这些元素需要严格的控制，而实际上有些难于做到。英国铸铁研究协会按正确比例熔配的Mg—Ce—Ti单一合金添加剂在实际上极易控制。由于镁和铈都与硫化合，为节约添加剂和减少浮渣的形成，希望原铁水的硫含量低于0.035%。要做到这点通常用低硫炉料在电炉内冶炼或将原硫量较高的铁水冲天炉铁水进行脱硫。另一种方法是适当地增加添加剂的加入量对高硫铁水进行处理，但这是一种不经济的方法。生产紧密石墨铸铁的单一合金还可附加一些元素以改善其功能，例如使合金适用于较宽的原始含硫量范围。上述合金为紧密石墨的铸造生产提供了最简便的方法。工业用单一合金添加剂通常加在浇包内对铁水进行处理或采用一些适用于球铁生产的方法。合金的配制使之适用于铁水温度为1400℃和原始硫含量为0.03%，而且加入约1%的合金，铁水中残留镁量为0.025%。合金的优点是，如果原铁水硫含量低于0.03%，相同的合金加入量将因含有足够的钛以防止较高的残留镁量所产生的球状石墨。一般工业品级

的单一合金添加剂都含有钙，以便在硫含量范围较宽的铁水内获得良好的紧密石墨组织。但若处理温度低于1350℃的铁水，则这种合金也会产生球状石墨，如图五所示。使用这种合金时必须注意确保铁水有足够高的温度。

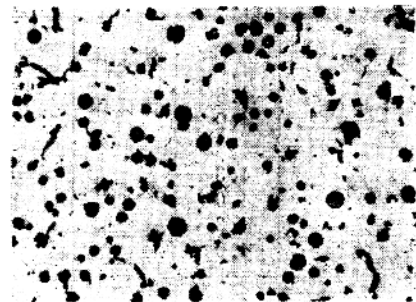
用含有5%Mg或10%Mg的Mg—Si—Fe合金在浇包内处理含钛铁水也能生产紧密石墨铸铁。钛以钛铁或含钛废料形式预先加在冲天炉或电炉内，其回收率达80%以上。钛铁或含钛的金属废料可加在电炉铁水中而获得高的回收率。但不推荐将钛加在浇包内的铁水中，因为回收率不稳定。为了满足工艺的要求，镁合金通常含有一定的铈量。可采用生产球墨铸铁的任何方法将合金加入浇包内，但由于获得紧密石墨需要的最终镁量较低，所以所用合金的量较少，通常为0.8~1.0%，这样而来的优点是温度损失及尘烟均较少。

加入0.2~0.5%含硅孕育剂进行最终的孕育处理对紧密石墨铸铁有好处。它具有珠光体促进元素的存在。如同其他类型铸铁一样锰、铬、锡、铜、铈和磷都可促成珠光体。保持较低的促成珠光体元素的含量（选择适当的原材料）或采用铁素体化的热处理（例如在900℃保温4—8小时，随后在650℃保温8—16小时）均可获得铁素体基体，从而降低硬度和提高韧性。

在灰铸铁和球墨铸铁通常采用的C、Si、Mn含量范围内均可获得良好的紧密石墨组



(a) 处理温度1400℃



(b) 处理温度1280℃

图五 用高钙单一合金处理铁水时处理温度对形成球墨的影响 ×100

织。至少在37—4.5%碳当量(3.1—3.9%C和1.7—2.9%Si)和0.1—0.6%Mn范围内,紧密石墨铸铁均可获得独特的性能。获得紧密石墨铸铁所需的镁量和铈量与最终的硫量(低于0.02%)有关,而磷含量最好低于0.06%以便铸铁获得一定的韧性。

当用镁—钛合金生产紧密石墨铸铁时必须注意回炉料中含有0.08—0.1%Ti。在球铁生产中这种炉料阻止形成良好的球墨组织,而且在灰铸铁中它促使过冷石墨的形成,并伴生着

铁素体,这就引起磨损问题。将不同的铸铁回炉料分类堆放是非常重要的实际操作。同样,将紧密石墨铸铁的回炉料与其他类型铸铁的回炉料分开,也是很重要的,以避免任何成分的污染。

三、紧密石墨铸铁的性能及其它

目前从不同的铸件(例如刹车鼓、液压阀和钢锭模等)生产中已积累了不少研究紧密石

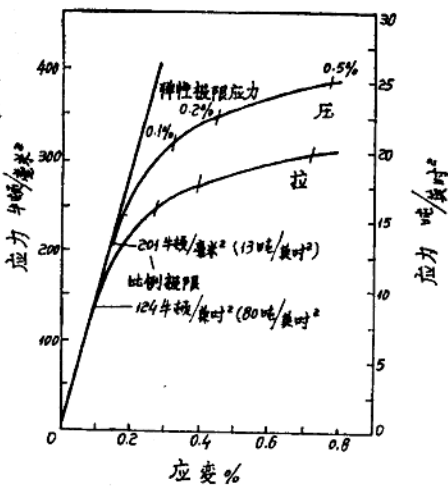
表1 铸件断面尺寸为30~200毫米的紧密石墨铸铁的性能

	碳当量	基体组织	铸件断面尺寸(毫米)			
			30	53	44.5 (楔形试样)	200
抗拉强度 牛顿/毫米 ²	4.3	铁素体	365	325	310	280
	4.0		400	350	330	300
	4.3	珠光体	440	370	360	320
	4.0		460	390	385	340
0.1%屈服强度 牛顿/毫米 ²	4.3	铁素体	260	230	210	190
	4.0		285	250	235	220
	4.3	珠光体	305	270	240	210
	4.0		340	280	265	230
0.2%屈服强度 牛顿/毫米 ²	4.3	铁素体	290	270	225	200
	4.0		325	295	265	240
	4.3	珠光体	330	300	295	255
	4.0		370	330	310	260
0.5%屈服强度 牛顿/毫米 ²	4.3	铁素体	325	300	230	225
	4.0		365	340	290	255
	4.3	珠光体	365	325	340	250
	4.0		—	365	330	290
弹性模数 千兆牛顿/米 ²	4.3	铁素体	162	162	162	162
	4.0		167	165	162	165
	4.3	珠光体	165	159	165	155
	4.0		165	—	162	155
延伸率 %	4.3	铁素体	4.5	4.5	5.0	4.5
	4.0		2.0	2.5	3.0	3.0
	4.3	珠光体	1.5	1.0	2.0	2.0
	4.0		1.0	1.0	2.0	1.5
硬 度 HB10/300	4.3	铁素体	140—155	135—150	120—130	120—130
	4.0		180—205	170—180	135—145	130—140
	4.3	珠光体	225—245	175—245	195—205	160—180
	4.0		210—260	175—240	195—215	160—190

墨铸铁性能的经验。英国铸铁研究协会正在着手进行包括生产方法、化学成分、基体组织及铸件断面大小对性能的影响。一种良好的紧密石墨组织所获得的性能与铁水的处理方法无关。下面就这种材质的性能及其它问题作些简略的分析，供大家参考。

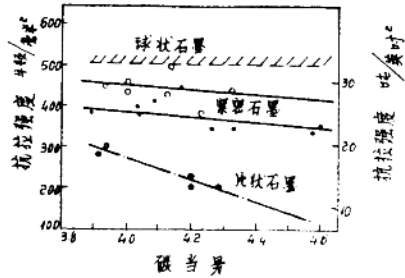
强度与应力/应变性能：

因为石墨是紧密的和尾部呈圆形，因而在一定的成分下比灰铸铁有更高的强度和破坏后有较大的应变及明显的韧性。另一方面，因为石墨是互相结合着的，所以这种铸铁的强度和韧性都不如球铁，表1表示几种碳当量、不同基体组织和不同尺寸试棒的紧密石墨铸铁的抗拉性能。不同于普通灰铸铁（它的应力/应变曲线从低应力值开始弯曲），紧密石墨铸铁在某种应力范围内都具有弹性，而类似大多数其它工程材料，它们的比例极限比球墨铸铁低，具有珠光体和铁素体混合基体组织，碳当量为4.35%的厚壁紧密石墨铸铁件在拉伸和压缩下的应力/应变曲线如图六所示。



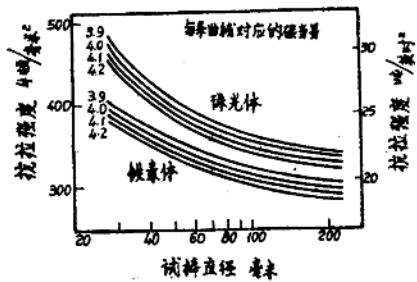
图六 紧密石墨铸铁拉——压下的应力应变曲线

紧密石墨铸铁的性能对碳当量变化的敏感性比灰铸铁小得多，甚至碳当量接近共晶成分值4.3%，珠光体和铁素体的紧密石墨铸铁都比低碳当量高强度的非合金灰铸铁将有较高的强度。图七比较了直径为 $\phi 30$ 毫米的紧密石墨铸铁，灰铸铁与球墨铸铁的抗拉强度。



图七 碳当量对 $\phi 30$ 毫米试棒的灰铸铁、紧密石墨铸铁、球墨铸铁抗拉强度的影响

紧密石墨铸铁的弹性模数是在低应力下测量其共振频率而确定的。它处于150~170千兆牛顿/米²的窄小范围内，比灰铸铁的弹性模数E₁高，但比通常报导的170~175千兆牛顿/米²的球墨铸铁低。断面尺寸和碳当量稍影响弹性模数，在较厚的断面和较高的碳当量下出现低的弹性模数值。



（图中曲线为强度变化区域的中心带 ± 30 牛顿/毫米²）
图八 不同碳当量的铁素体和珠光体紧密石墨铸铁的抗拉强度随铸件断面尺寸的变化

紧密石墨铸铁的强度随着断面尺寸的增加而减少，图八表明不同碳当量的珠光体或铁素体组织的紧密石墨铸铁的强度与壁厚的关系。这种特性与灰铸铁相似，而且随着断面尺寸的增加强度成比例下降的特性对紧密石墨铸铁和灰铸铁都是相似的。这点意味着设计者必须考虑铸件断面尺寸。如同灰铸铁一样，最好任何铸铁的性能都采用 $\phi 30$ 毫米的试棒作为标准壁厚。

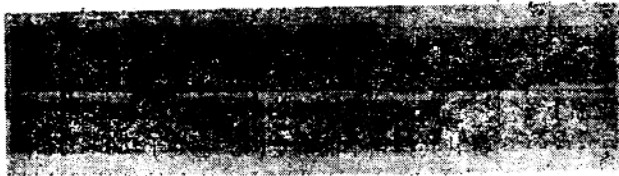
本文所引用的性能取自良好的典型紧密石墨铸铁。石墨紧密性较差的铸铁其性能接近灰铸铁。而组织中球墨数增加时将使性能接近球铁。正确的控制可避免这种极端的情况，但必须注意，减少断面尺寸或增加冷却速度会促进球状石墨的形成，特别是钛量不足或存在过量的钕或其他稀土金属时是如此。在石墨组织中

球状石墨约多于10%时，图八中的曲线将不正确地移到较高值，特别是在最小断面尺寸中更是如此，从而不真实地显示出较大的断面敏感性。

冲击韧性：

表2说明用 10×10 毫米V形缺口试样测得种铁素体和珠光体组织的紧密石墨铸铁的冲击韧性。这些铸铁显示出韧性到脆性的转变。紧密石墨铸铁由韧性变到脆性的断口表面形貌由黑色变为淡灰色；在这方面，紧密石墨铸铁比灰铸铁更接近于球铁。图九表示两种紧密石墨铸铁在 -75°C — $+200^{\circ}\text{C}$ 测试温度范围内的这的变化。所试验的铁素体紧密石墨铸铁的转变温度在 0°C ~ $+15^{\circ}\text{C}$ 之间，这和铁素体球铁的转变温度相似。珠光体紧密石墨铸铁在 100°C

以下发生逐步的转变，也相似于球墨铸铁的特性。然而，在韧性范围内铁素体紧密石墨铸铁的冲击值是6.8—7.5焦耳，低于冲击值为16.3—19焦耳的正常铁素体球铁。这些结果表明紧密石墨铸铁有可用的冲击韧性，在韧性温度范围内无缺口试样的紧密石墨铸铁的冲击韧性甚至高达约34焦耳。



上排——碳当量4.0%
下排——碳当量4.3%

图九 紧密石墨铸铁冲击试块断口表面形貌

表2 不同温度范围下紧密石墨铸铁的却贝V-缺口平均冲击值

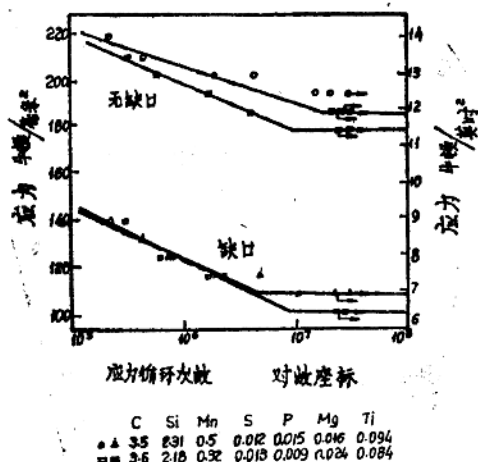
铸件断面	基体组织	平均冲击值 (焦耳/厘米 ²)										
		-60°C	-20°C	0°C	+10°C	+20°C	+40°C	+60°C	+80°C	+100°C	+160°C	+200°C
44.5毫米楔形试块	铁素体	4.1	4.8	5.4	5.4	6.1	6.8	6.8	6.8	6.8		
$\phi 200$ 毫米试棒	铁素体	4.1	5.4	6.8	6.8	6.8	6.8	7.5	7.5	7.5		
44.5毫米楔形试块	珠光体		2.7			2.7		3.4		4.1	4.8	4.8
$\phi 200$ 毫米试棒	珠光体		2.7			3.4		4.1		4.1	5.4	5.4

试验铸铁的成分%

	C	Si	Mn	Mg	Ti
铁素体	3.9	2.0	0.13	0.023	0.108
珠光体	3.6	1.7	0.34	0.020	0.052

疲劳性能:

图十表示带缺口和无缺口的珠光体紧密石墨铸铁的弯曲疲劳性能。正如其他类型的铸铁一样,紧密石墨铸铁的疲劳强度与它们的抗拉强度有关。耐久比(无缺口的疲劳强度/抗拉强度)约为0.45,且不受基体组织变化的影响这个比值与球墨铸铁和低磷工程灰铸铁相似。



图十 珠光体紧密石墨铸铁的疲劳曲线

在疲劳试样中,其根部半径为0.25毫米的V型缺口会降低紧密石墨铸铁的疲劳强度。强度缩减因子(无缺口的疲劳强度/有缺口疲劳强度)的典型值是1.75—它与球铁相似。但是对于球铁而言,根部半径大于5毫米缺口试样并不降低疲劳强度,这对于紧密石墨铸铁也是如此。紧密石墨铸铁不具有像灰铸铁一样的缺口不敏感性,因为它们没有灰铸铁中起到内部缺口作用的尖角片状石墨。

导热性:

灰铸铁紧密石墨铸铁和球墨铸铁的导热性见表3。

因为紧密石墨铸铁的石墨是互相连接的网状组织,它的导热性只稍低于相似成分的灰铸铁。表3说明不同碳当量和不同石墨形状的珠光体铸铁在100℃~500℃之间的导热性。和灰铸铁一样,紧密石墨铸铁的导热性随碳当量的增加而增加,随着温度增加到大约200℃导热性达最大值——球墨铸铁也是如此,但不同于灰铸铁,它随温度的升高导热性连续下降。紧密石墨铸铁同其他类型铸铁一样,铁素体基体代替珠光体基体会增加导热性。

表3 灰铸铁、紧密石墨铸铁和球墨铸铁的导热性

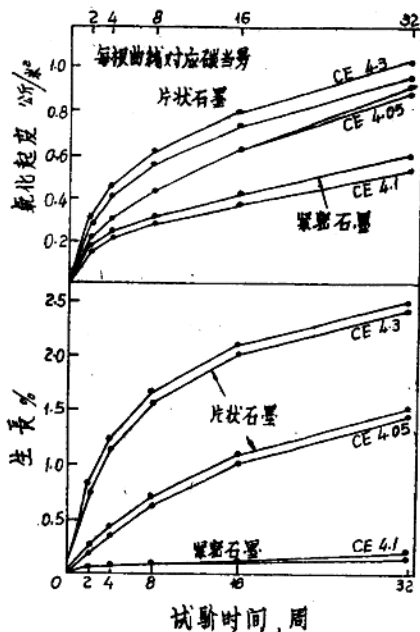
石墨组织	碳当量	导热性 (瓦/米·开)				
		100℃	200℃	300℃	400℃	500℃
片状	3.8	50.24	48.99	45.22	41.87	38.52
片状	4.0	53.59	50.66	47.31	43.12	39.94
球状	4.2	32.34	34.75	33.08	31.40	29.31
紧密状	3.9	38.10	41.00	39.40	37.3	35.17
紧密状	4.1	43.54	43.12	40.19	37.68	35.17
紧密状	4.2	41.0	43.50	40.00	38.5	36.00

减震性:

表4列出不同断面尺寸的典型珠光体紧密石墨铸铁的减震性值。这些数值是通过测试 $\phi 0.75 \times 7.5$ 英寸试棒的其共振频率曲线的频带宽度而确定的,其振幅相当于共振最大振幅的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 。碳当量或基体组织的变化不会引起减震性的明显变化,但增加铸件断面尺寸会引起减震性的增加——与石墨组织的粗化有关。与典型值为 13.2×10^{-4} (注:用扭转法测量时,灰铸铁得到稍高的数值)的灰铸铁相比较,紧密石墨铸铁的减性相当低,但比典型值为

表 珠光体紧密石墨铸铁的减震性

减震性 $\times 10^{-4}$	断面尺寸 (毫米)					200
	碳当量	15	30	53	44.5	
	4.0	4.0	4.6	5.0	5.0	7.3
	4.3	4.0	4.3	4.3	5.0	6.3



图十一 600°C时灰铸铁和紧密石墨铸铁的原断面生长曲线

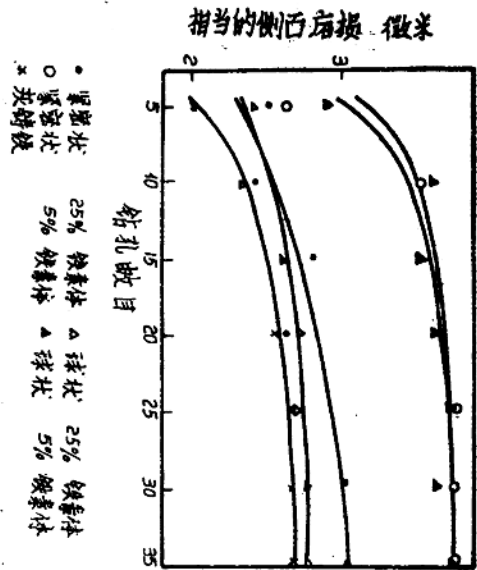
2.5×10^{-4} 的球墨铸铁高一些。

生长和氧化起皮:

兼有良好的导热性和较高强度的紧密石墨铸铁也适用于高温下工作的铸铁,因此它的抗生长性和抗氧化起皮性是重要的。厚大断面试样在空气中连续加热32周的试验表明,500°C时的生长和氧化起皮与相似成分的灰铸铁没有明显的区别。在600°C时紧密石墨铸铁的生长比灰铸铁少,而且抗氧化起皮性也是良好的,如图十一所示。

机械加工性:

当大量生产必须高速切削工件时,改变石墨形状会极大地影响机械加工性能。一般而言片状石墨组织的铸铁具有最好的加工性。然而这种比较取决于机械加工的条件,关于这方面有用的数据只能来自机械加工车间积累的经验。紧密石墨铸铁、球墨铸铁和灰铸铁加工性



图十二 灰铸铁、紧密石墨铸铁和球墨铸铁钻孔时钻头的磨损(钻头转速780转/分,进刀速度72毫米/分)

能的比较是通过钻 $\phi 6 \times 16$ 毫米的暗孔，并测量钻头侧面的磨损来进行的。图十二列出了试验结果，并表明紧密石墨铸铁和球铁的机加性能很相似，但比灰铸铸有较多的磨损。可是生产经验指出，正确地选择机械加工条件，加工这些材料是没有问题的。

四、铸造特性

用紧密石墨铸铁生产优质健全的铸件的能力，在许多方面类似其他铸铁，但这种材料也有一些不同于其他铸铁的特点。流动性和生产一种棱角清晰的铸件的能力似乎与相同碳当量的任何铸铁相似。虽然试验数据仍不可用，但如同其他铸铁一样，按通常的定义，流动性似乎取决于碳和硅的含量及浇注温度。根据正常的生产经验，流动性与最后的石墨组织无关。

因为高碳当量的紧密石墨铸铁的强度比许多低碳当量的高级铸铁的强度较大。这就使紧密石墨铸铁具有高强度和优良铸造性能的综合优点，而这种优良的铸造性能只有高碳当量低强度灰铸铁才能达到的。

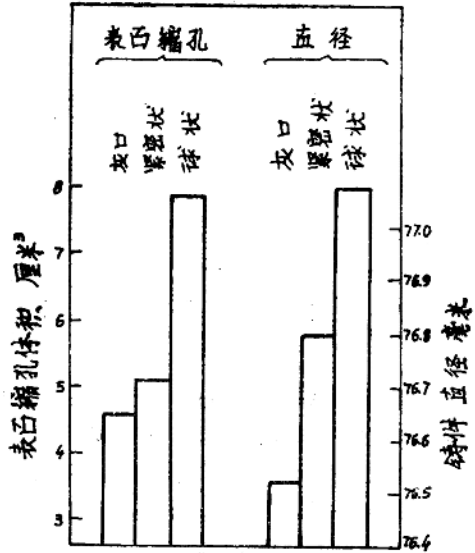
铸件的致密性：

紧密石墨铸铁比球铁较易获得没有内外疏松的健全铸件，但较灰铸铁稍困难些，这是因为铸型出现型壁移动的趋势也是介于灰铸铁与球墨铸铁之间。图十三表示用直径为76毫米球形试件证明上述作用的实验结果。用测量表面缩孔体积而得到的收缩量和最后的尺寸均小于球墨铸铁而大于灰铸铁。

同其他类型铸铁一样，增加铸型的刚性可改善紧密石墨铸铁的致密性。例如由湿型改为二氧化碳水玻璃砂或空气硬化砂型。避免不必要的高温浇注也可改善致密性。一般而言，接近共晶成分的铸铁具有最大的致密性，这对紧密石墨铸铁也是如此。

采用灰铸铁的浇冒口系统有时也能生产出

致密的紧密石墨铸铁，但仍建议紧密石墨铸铁的浇冒口系统应与生产球墨铸铁所用的相似。而，正如其他铸造合金一样，得到最大合格率的致密铸件所采用的最佳浇冒口系统将是一个经验积累的问题。



图十三 湿型铸造的灰铸铁、紧密石墨铸铁及球铁的球形铸件收缩及尺寸对比

夹渣的形成：

铸铁中活性元素(例如镁、铈、钙等)的存在会增加浇注时形成夹渣的危险性，因而有时也有出现球铁中常见的此类缺陷的危险性。由于紧密石墨铸铁的残留镁量较低，通常这种缺陷比球铁较轻微。

用类似Futtar对球铁所用的短形试件进行试验的结果表明，增加原铁水的碳当量和硫量会增加夹渣，这正好与球铁一样，如图十四所示。分别用镁和铈、用铈或用无钙的单一合金对铸铁进行处理，发现对形成夹渣的敏感性比含钙的单一合金要小，这证明钙促进夹渣的形成。这些结果指出，与球铁中相同的变量促使夹渣的形成。因此可以认为，为了获得无夹渣的铸件，应避免低温浇注系统。

表5

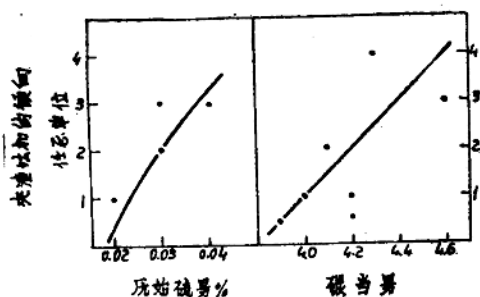
灰铸铁、紧密石墨及球墨铸铁热内的白口深度十麻口深度

组织和断面厚度									
碳当量	片状			紧密状			球状		
	3毫米	6毫米	9毫米	3毫米	6毫米	9毫米	3毫米	6毫米	9毫米
恒定的浇注温度1340℃									
4.3	灰	灰	灰	18毫米	3毫米	灰	白口	14毫米	3毫米
4.1	灰	灰	灰	21毫米	8毫米	灰	22毫米	16毫米	灰
3.8	灰	灰	灰	白口	15毫米	灰	白口	白口	3毫米
浇注温度高于液相线150℃的恒定过热度									
4.3	灰	灰	灰	18毫米	3毫米	灰	白口	14毫米	3毫米
4.1	灰	灰	灰	22毫米	3毫米	灰	白口	白口	4毫米
3.8	灰	灰	灰	白口	15毫米	灰	白口	白口	6毫米

控制和避免夹渣缺陷是一个值得关注的问题，并建立有效的控制工艺。许多球墨铸铁制造者的经验是，严重夹渣缺陷是偶尔发生的，并且不是单一原因造成的，而是出于许多控制参数暂时失调的综合作用。

钕或其他稀土元素的含量过高也会促进紧密石化铸铁组织中的白口倾向和形成不希望有的碳化物。

孕育处理会增加灰铸铁的共晶团数目和球墨铸铁的球墨数目。显然这对紧密石墨铸铁也是正确的，但由于它的硫含量很低，很难分清和计算紧密石墨铸铁的共晶团数目。



图十四 原始硫量及碳当量对形成夹渣倾向的影响

白口：

在薄壁断面内紧密石墨铸铁对白口形成的感性敏比灰铸铁大而比球墨铸铁小。如同其他铸铁一样，增加碳当量或用含硅孕育剂的最终孕育会降低薄断面或尖角处形成白口的倾向。

铸件质量控制

优质紧密石墨铸铁件的生产，要求铸造厂应有类似球墨铸铁或高强度灰铸铁一样的过程控制方法。一些主要的要求是：

1. 选择合适的原材料。控制硫量要低。使用低磷原材料。当要求铸态铁素体组织时，避免稳定珠光体的微量元素。
2. 选择合适的碳量和硅量以保证所要求的碳当量和机械——物理性能。一般而言，碳当量应接近共晶值4.03%。
3. 确保处理铁水的重量及其硫含量。
4. 根据处理铁水的重量和硫含量，计算并准确地称量处理合金的加入量。
5. 控制处理温度，过高的温度降低镁的回

收率，太低的温度会形成夹渣和球墨组织。

6. 使用高刚性的优质铸型和型芯，并供给适当的补给金属。

7. 不同成分的废料分开堆放。

无损检验：

推荐单独浇注试棒来检验铸铁的性能。虽然可以选择铸件进行破损试验，但希望铸件在使用前用无损检验法进行检验。球墨铸铁生产中广泛应用的共振频率（声频检验）和超音速检验也适用于紧密石墨铸铁，并对检验铸件的性能提供了可靠的方法。图十五指出用此法建立的抗拉强度与超音速或共振频率的关系，并提供了检验紧密石墨和区别紧密石墨铸铁与灰铸铁或球墨铸铁的方法。此图是根据 $\phi 30$ 毫米试棒数据绘制的。超音速直接在试棒上测定，而共振频率则在 $\phi 19 \times 190$ 毫米的机械加工试棒上测定。

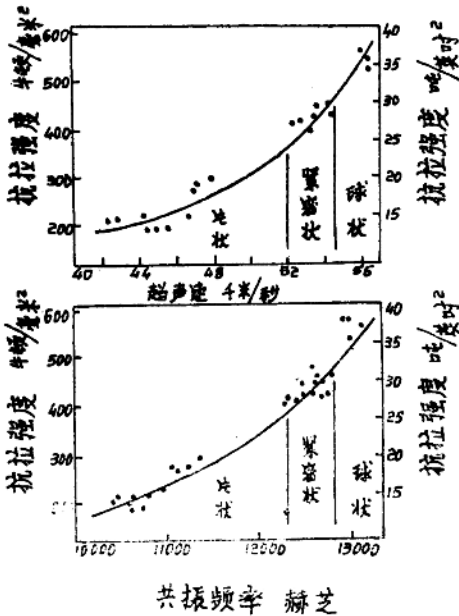
当这些检验用于铸件时，紧密石墨组织的超音速与铸件形状无关，但必须按断面厚度加以标定。比如 $\phi 30$ 毫米试棒的紧密石墨铸铁的超音速为5.2~5.45千米/秒，但对大型铸件例如钢锭模，良好的紧密石墨组织的超音速为4.85~5.10千米/秒。另一方面，声频检验必须对特别设计的一种铸件加以标定，并且为了提供标定范围，铸件事先要校核合格或不合格组织的例证。

因此选择无损检验的方法取决于铸造厂的生产类型。当生产大量同类的小型铸件时，最好选择声频检验。在所有其他情况下，超音速测量是较简便的检测方法。不管选用何种检验方法，希望每个铸造厂建立起自己的关系式。而且为了提供买主各种性能范围的产品而生产珠光体、铁素体和混合基体组织的铸造厂，必须将超音速或共振频率检验与对基体变化敏感的二次测量结合起来。适合于基体检验的方法有测量硬度法，涡流法或矫磁力法，以便首先评定基体组织，继之用超音速或声速检验以评定石墨组织。Lovertt和Carter等人的研究提供了这类检验的范例，他们将共振频率检验和硬度测定结合起来以预报各种基体组织铸铁的强度。

紧密石墨铸铁的新用途涉及新的质量要求。而且必须按情况的要求采用其他类型的破损或无损检验。例如液压件的渗漏检验和应用普通超音速检验以保证重要部位无疏松。

紧密石墨铸铁的现状

过去不可能获得的具有综合性能的一种新型工程材料现在是很有用的，而且在工业上日益变得更重要了。尽管处理工艺对灰铸铁铸造厂是不熟悉的，但是生产方法类似球墨铸铁生产广泛采用的实践和控制。没有镁处理经验的铸造厂，经过短期生产试制后，便能成功地掌握紧密石墨铸铁的生产。对于已生产球墨铸铁的工厂，无需基建投资，然而应该分开紧密石



图十五 不同石墨组织的铸铁抗拉强度与超声波和共振频率的关系

以一种单一合金生产紧密石墨铸铁

E. R. Evans J. U. Dawson, M. J. L. Alch

【摘要】 本文概括介绍了紧密石墨铸铁的历史和发展情况。这些铸铁用于对强度的要求接近球墨铸铁，而又要求具有灰口铸铁的铸造性能和热传导性的地方。本文还阐述了用单一加入的合金来生产紧密石墨铸铁的试验工作，给出了这些合金使用的例子，同时专门介绍了能够适宜处理含硫量范围较宽的原铁水的一种最佳合金。

引 言

紧密石墨的组织

多年前人们已经注意到片状石墨的紧密形式是介于正常片状石墨的一种中间形式。紧密石墨铸铁具有比灰口铸铁高得多的拉伸强度，但比球铁稍低。然而，对于某些用途，特别是当材料需要高强度和高的导热性这些综合性能时，紧密石墨铸铁比球铁和灰口铸铁是更为适用的。

在美国，紧密石墨铸铁常被称为蠕虫状石墨铸铁，由于生产上的实际困难，这种铸铁到目前为止还仅仅在很小范围内得到利用。我们的研究工作证实，这种铸铁能够以类似于生产球墨铸铁的工艺控制方法成功地进行生产。

在灰口铸铁铸件中的片状石墨可以通过加入较高含量的氮或加入少量球化元素进行变质处理，这些球化元素主要是镁或铈（稀土）。变质作用首先表现在片状石墨的端部纯化，随后是使石墨片变厚变短，继而形成一种介于正常的片状石墨和球状石墨的中间状态。完全变质的片状石墨已经有了几种称呼的术语。Morrogh曾称这种石墨为假片状石墨 (Guasi-flake graphite) 或堆积的片状石墨 (Aggregated flake graphite)，而这种石墨也被称为密集的 (Compacted)，碎块状的 (Chunky)，粗短的 (Stubby)，高级的

墨铸铁的回用废品，浇冒口和其他回炉料，因为这种废料含有钛，这会给其他铸铁的生产带来一些问题。对于其他铸造厂，必须准备合适的处理包，最好是茶壶包，还要有使铁水脱硫至0.035% S以下的装置。对于小规模的生产，用多孔塞包脱硫很成功。对于用电炉的工厂，选择合适的废料也能得到低硫铁水。

紧密石墨铸铁具有高的强度和导热性良好的综合性能，这已使其广泛用于制造钢锭模，

作为灰铸铁的代用材料，它还用于制造汽车零件。此外，这种材料有利于改善工程构件的设计及效能，例在液压阀制造中，一些要求高强度的铸件一般用紧密石墨铸铁代替球墨铸铁，因为前者易于获得无疏松的铸件。

《The BitSh Foundrgman》1978.

Vol: 71. Part 5 P115—124

彭体元译 熊国庆校

(up-graded), 半球状的 (Semi-nodular。或紫状石墨(floccular)“在美国, 常用的术语是蠕虫状石墨 (Vermicular graphite) 虽然这种石墨并不象这一术语所指出的类似于蠕虫状” (Webster 的字典解释为

——“类似一条虫, 特别是在形状上……”), 实际上这是一种互相联接的片状石墨。

然而, 在含硫很低的灰口铸铁中确有很好的蠕虫状石墨, 可称为真正的蠕虫状石墨图一表示这种组织的一个例子, 并能看出它与以后图中所

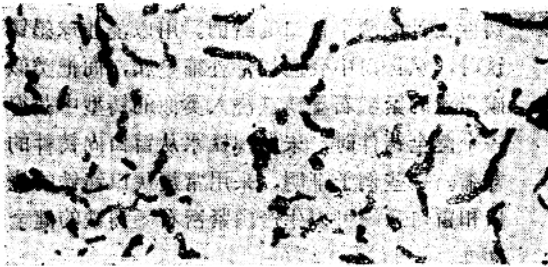
示的紧密石墨组织是完全不同的。

对于中等以上直到厚大断面的铸件, 用 N_2 , Ce和Mg生产的铸铁的紧密石墨组织之间是极为相似的。典型的紧密石墨组织示于图二。这种石墨也能够用Ce和Mg而不是用氮在较薄断面上很容易地得到。

虽然变质以石墨片变厚的方式表现出来, 从而引起了石墨片的紧实, 石墨在一个共晶团内仍保持着相互联接。在这一点上, 紧密石墨的组织类似于通常的灰口铸铁。这种相互联接的特征在常规的金相试样上不能显现 (图二), 而深腐蚀技术可以揭示石墨片这种明显的变质作用及其相互联接的特征。正常的片状石墨和紧密石墨铸铁试样, 经过深腐蚀可以除去金属基体并揭示出石墨的三个方向的组织, 利用扫描电子显微镜高倍放大时拍摄的照片示于图三和图四。



图一 真正的蠕虫状石墨铸铁中的类似细虫的石墨 ($\times 1250$, 未腐蚀)



图二 典型的紧密片状石墨铸铁 ($\times 100$ 未腐蚀)



图三 “正常”片状石墨深腐蚀试样 ($\times 1000$ 立体扫描象)



图四 用深腐蚀方法显示出(图2)的紧密石墨 ($\times 800$ 立体扫描象)

用铈处理的铸铁：

在过共晶铸铁中加入足够数量的铈，能得到全部的球状石墨组织；但对于薄壁的亚共晶铸件，尽管难以避免相当数量的共晶碳化物，它只得到紧密石墨的组织。

铈很少在铸铁中做为主要的合金元素来使用，但一些用铈处理的紧密石墨铸铁已成功地用于钢锭模及小型工程铸件。

含镁的铸铁：

自一九五〇年以来，发表了很多关于用镁处理的铸铁的论文，这就是最初的关于球墨铸铁生产的论文。从发表的这些论文中，出现了两种主要的生产紧密石墨铸铁的方法。一种方法是在很窄范围内控制残余镁含量以获这种铸铁；另一种方法是，在铸铁中加入少量某些抑制球状石墨形成的合金元素，从而使铸铁中的残余镁量允许在一个较宽的范围内变化。

第一种方法受到临界含镁量范围很窄的限制⁽⁶⁾。较小的镁量不能生产出完全的紧密石墨组织，而过量的处理又生产出球状石墨。在不足和过量处理之间含镁量相差仅为0.005%。第二种方法是由一个专刊所发明(1966年)，这种方法生产的紧密石墨铸铁含镁量从0.005%到0.06%，同时含有钍(0.15到0.50%)和稀土金属(0.001到0.015%)。

高氮铸铁：

在含有足够量氮的铸铁中也能够得到紧密石墨的组织。在小铸件中，对强度的影响是很小的，只是在显微组织上出现刚刚能被检查出来的轻微变化，但在厚大断面铸件中效果极为明显。氮能够影响铸铁中石墨的形状是由Dawson及其同事在1953年首先记载下来的。在这些早期的发现之后，一些研究者就有关高氮铸铁的性能和影响其生产的因素方面进行了一系列重要的研究。然而，以氮做为合金元素来生产紧密石墨铸铁是很少见的，因为氮含量的

控制极为困难，并且，在高含氮量的铸铁中有形成氮气孔的危险。

紧密石墨铸铁的性能

紧密石墨铸铁的性能介于片状石墨和球墨铸铁之间。紧密石墨铸铁的明显特征是，并不需要低的碳当量(不象灰口铸铁)就可达到接近球墨铸铁的拉伸强度和屈服强度。同时，紧密石墨铸铁的热传导性和热冲击抗力、加工性能更类似于灰口铸铁。与球铁相比，这种铸铁还更容易避免黑渣，以及介决收缩和补缩问题。

补缩的要求：

对于相似成份的紧密石墨铸铁，其补缩的要求比正常的片状石墨铸铁要大，而比球墨铸铁则有明显的减少。图五表示了为球墨铸铁铸件设计的两个冒口的断面。用以浇注球墨铸铁时，从冒口中要向铸件补缩金属，而把类似碳当量的紧密石墨铸铁浇入类似的铸型中获得一个健全铸件时，未发现铁水从冒口向铸件的补缩。一些例子证明，采用常规灰口铸铁的浇口和冒口系统可以生产出紧密石墨铸铁的健全铸件。



a 球墨铸铁 b 紧密石墨铸铁

图五 通过冒口的断面

流动性:

影响铁水流动性的主要因素是铸铁的碳当量 $<10>$ 。所以,在类似的碳当量情况下,片状石墨、紧密石墨和球状石墨铸铁的流动性没有明显的差别。但是,对于片状石墨铸铁,为了获得较高的强度就需要较低的碳当量。当紧密石墨铸铁的碳、硅含量更高些的情况下,其强度至少还等于片状石墨铸铁的最高强度。因此,对于相等的拉伸强度,紧密石墨铸铁流动性大大优于片状石墨铸铁。

导热性:

在铸铁中,石墨比金属基体有着大得多的导热性。因而,铸铁的导热性主要取决于石墨相的形状、数量和分布。在高碳灰口铸铁中,粗大的,相互连接的石墨片带来高的导热性,

而球墨铸铁里,孤立的石墨球,导致球铁较低的导热性。

在紧密石墨铸铁中存在着相互连接的片状石墨组织,所以其导热性类似于正常的片状石墨铸铁。紧密石墨铸铁的导热性稍低于高碳灰口铸铁,而类似于低碳、高强度灰口铸铁。表1列出了片状、紧密的和球状石墨铸铁的典型导热性的数值。

拉伸性能:

和球墨铸铁一样,紧密石墨铸铁的拉伸强度随碳当量变化的敏感性小于灰口铸铁。紧密石墨铸铁的拉伸强度接近某些球墨铸铁,这两种铸铁有着类似的屈服强度。紧密石墨铸铁的强度几乎远较最高牌号的灰口铸铁为高,其屈服强度和破坏时的延伸率常常是大得更多。表2列出了各种铸铁的拉伸性能。

表1 不同铸铁的典型导热性数值

铸 件 种 类	导 热 性 $\frac{Cl}{Cm \cdot S \cdot ^\circ C}$	
	中——小 断 面	厚 大 断 面
ASTM A48—74 牌号25	0.125	0.120~0.135
ASTM A48—74 牌号45	0.113	
紧 密 石 墨	0.118	0.105~0.120
球 状 石 墨	0.080	0.090

表2 各种铸铁的典型的拉伸性能

铸 铁 种 类	大 约 的 碳 当 量 %	0.1% 屈服强度 磅/吋 ²	拉 伸 强 度 磅/吋 ²	延 伸 率 %
ASTM A48—74 25级	4.4	15,000	25,000	< 1
ASTM A48—74 30级	4.2	20,000	30,000	< 1
ASTM A48—74 45级	3.6	25,000	45,000	< 1
紧 密 石 墨	4.2	33~41,000	48~57,000	3~7
球 状 石 墨	4.2	38~47,000	60~70,000	7~12