硅在铸铁中的固溶强化作用

李传栻

【摘要】分析了硅在灰铸铁和球墨铸铁中的固溶强化作用，详细介绍了硅固溶强化球墨铸铁的力学性能，并在此基础上提出了在生产应用中几点看法。

近年来，为了适应多方面的要求，各种新工艺、新材料不断涌现，轻合金铸件、铸钢件的应用都发展很快，但到目前为止，铸铁件的需求量仍然稳居首位。

2012年，世界各国各类铸件的总产量为10083万t，其中：灰铸铁件4599.6万t，占45.6%；球墨铸铁件2516.7万t，占24.9%；可锻铸铁件127.5万t，占1.3%。也就是说，目前世界各类铸件的总产量中，灰铸铁件和球墨铸铁件就占70%以上。

近年来，为了遵循可持续发展的理念，除了对铸铁件功能的要求日益增强以外，还增加了轻量化、低成本、节能减排、珍惜资源等多方面的要求。因此，各国铸造行业都非常重视改进铸铁材质方面的研究、开发工作。

硅是地壳中蕴藏最丰富的元素，无匮乏之虞，而且在各种铸铁中，硅都是主要构成元素之一，对铸铁组织中石墨的形态、数量，乃至基体组织的形成，都有非常重要的作用。但是，时至今日，硅在铸铁中的作用，我们的认知还很不够，有待进一步探索的空间仍然广阔。

一、硅在铸铁中的作用

硅在铸铁中的作用是多方面的，其中，我们最关注的首先是“促进石墨化”和“固溶强化”两项，除此以外，硅还有不少重要的作用。

在这里，简单地提一提以下两点：

（1）溶于液态铸铁中的硅，使铁液抗氧化能力大为增强，而且硅还可使氮在铁液中的溶解度降低。正是由于硅的这种作用，铸铁才可以在强氧化性、富氮的条件下熔炼。各种铸造合金中，只有铸铁才能用冲天炉、氧气回转炉这类熔炼设备，在富氧、富氮的气氛中熔炼。

（2）将铸铁中w_{Si}提高到3.5%以上，铸铁的抗氧化能力、抗热生长性能都大为改善。早期，各国耐热铸铁的标准中，就都有了硅系耐热铸铁的牌号。近年来，出于节能的考虑，各种内燃机提高了排气的温度，各国汽车行业中，都很重视耐热硅钼球墨铸铁件的应用。

1. 促进石墨化的作用

铸铁中硅是促进石墨化作用最强的合金元素，硅促进石墨化的能力，是镍的3倍，铜的5倍。

无论在液态或固态的铸铁中，硅与铁结合的作用都比碳强。液态铸铁中含有硅，就会使碳的溶解度降低。铁液中硅的含量越高，碳含量相应地越低，就会有更多的碳被排挤出来。

铁液为过共晶成分时，硅含量高，凝固过程中，就有更多的碳以初生石墨的形态析出，直到剩余的铁液达到共晶成分后发生共晶转变。

铁液为亚共晶成分时，凝固过程中，硅富集于初生奥氏体中。共晶转变时，硅富集于早期结晶的共晶奥氏体中，抑制碳与铁化合成渗碳体，增强碳在奥氏体中的扩散速度，促使碳以共晶石墨的形态析出。

共析转变时，固溶于奥氏体中的硅，仍然抑制碳与铁形成渗碳体，增快碳在奥氏体中的扩散速度，促使碳以共析石墨的形态析出。

在灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨

铸铁和黑心可锻铸铁中，碳和硅是影响石墨形态、数量的主要元素。就是基本上不含石墨的白心可锻铸铁，在其脱碳退火的过程中，硅促进碳在奥氏体中扩散，对于这种可锻铸铁的脱碳也有重要的作用。

此外，铸铁中的氧和氮都有稳定碳化物的作用。铸铁中含有的硅，可以使其中的氧、氮含量降低，这样，又间接地增强了硅的石墨化作用。

2. 硅在铁素体中的固溶强化作用

在固态的铸铁中，硅几乎全部固溶于奥氏体和铁素体，不进入碳化物。硅原子与铁原子可以结合成具有强共价键的含硅铁素体，不仅促进铁素体形成，而且使铁素体强化的作用很强。

为了解硅强化铁素体的能力，避免石墨形态和其他合金元素的影响，20世纪50年代，国外有人在碳含量为0.1%、不含其他合金元素的钢中，加入不同量的硅，以比较硅对力学性能的影响，结果见表1。表1中还列出了组织为全部珠光体、不含其他合金元素的碳钢的性能，供对比。

由表1可见，硅强化铁素体的作用很明显。硅含量的提高后，抗拉强度和硬度都随之提高。但是，硅固溶强化的铁素体，抗拉强度和硬度的值仍明显地低于珠光体。

铸铁中，利用硅的固溶强化作用，可以减少或不用铜、镍、锡、钼、铬等提高强度的合金元素，当然是有益的。可是，很长时间以来。铸造行业还没有充分地利用硅的这种潜能。

就灰铸铁而言，由于片状石墨切割基体的作用很大，铸铁的强度不高，一般对伸长率也不要求。虽然提高灰铸铁的强度，主要是靠控制石墨的形态、数量，以及减小共晶团的尺寸，但也不能不尽可能地增强基体组织。除需求量很少的低牌号灰铸铁外，一般都要求基体组织全部为珠光体。为了得到珠光体基体，铸铁中的硅含量当然不宜太高。因此，铸造行业的同仁也就很少注意硅的固溶强化作用。

就球墨铸铁而言，所有的牌号对伸长率都有严格的要求。由表1可见，珠光体中固溶的硅量增多，伸长率相应地有所降低，硅含量超过3%后尤为明显。

此外，从很多有关球墨铸铁力学性能的试验报告中，都可见到类似的数据。

经相当长的一段时间逐渐形成了这样一种观念，即：铸铁中的硅含量太高，会导致延展性、韧性降低。因此，硅的固溶强化作用往往没有受到重视。实际上，有些试验中只考虑硅含量的改变，忽略了其他因素的影响，无意中夸大了硅的“脆化”作用。

二、硅固溶强化作用的应用

硅在球墨铸铁中的固溶强化作用，最近已经受到了广泛的关注。谈到这里，不能不提及我国三十多年前在灰铸铁方面所做的工作。

1. 硅在灰铸铁中的固溶强化作用

牌号HT250以上的灰铸铁，基体组织都是珠光体。为了确保强度达标，生产中通常都加入铜、锡、锑之类的合金元素。

珠光体中，铁素体约占90%，如果适当地提高铸铁中的硅含量，在铁素体中起固溶强化作用，而铸铁组织中又不至于出现铁素体，当然可以节省合金元素，同时也简化了操作。

1980年前后，北京钢铁学院（现在的北京科技大学）钟雪友等人进行了这方面的研究、试验工作。在灰铸铁碳当量为4.05%左右的条件下，适当地提高硅含量（Si/C比为0.78左右），不加合金元素，铸铁的抗拉强度就可以保持在300MPa以上。

20世纪80年代，这项工艺曾在多家铸造厂得到确认和应用。

2. 硅在球墨铸铁中的固溶强化作用

生产球墨铸铁件，球化率、石墨球数量和石墨球平均尺寸等是基本的质量要求。在石墨球化正常的条件下，其切割基体的作用较在灰铸铁中大为减轻。通过

表1　不同硅含量的铁素体的力学性能

力学性能	硅含量（%）				全珠光体碳钢
	微量	0.82	2.28	3.40	
抗拉强度/MPa	280～290	315	540	645	840
伸长率（%）	60	55.0	50.0	21.0	10.0
硬度HBW	75	88	124	150	200

控制基体组织，可以在很大的范围内调整球墨铸铁的力学性能，以适应多种不同工况条件的要求。除等温淬火球墨铸铁和高镍奥氏体球墨铸铁外，常规的球墨铸铁目前已有十多种牌号，抗拉强度可以在350～900MPa之间改变，最低伸长率则可相应地在22%～2%之间改变。

QT450-10、QT500-7、QT550-5和QT600-3等牌号的球墨铸铁件，都由控制基体组织中铁素体与珠光体所占的份额，以确保力学性能符合要求。一般说来，生产这类球墨铸铁件时，应力求通过控制铸铁的化学成分和生产过程中的各项工艺条件，使铸件的铸态组织符合要求，以避免费时、耗能的热处理工序。

在工艺控制不足以确保铸铁强度的情况下，加入少量铜、镍之类的合金元素，也是常用的应对措施。但是，这样做既提高了生产成本，还要耗用珍贵的资源。

随着对球墨铸铁认识的逐渐深化，十多年前，欧洲就开始注意到硅在球墨铸铁中强化铁素体的作用，瑞典的研究工作发现：用途很广的QT500－7牌号球墨铸铁中，将硅含量提高到3.5%，基体组织全部是铁素体，不仅可以在保持抗拉强度在500MPa的条件下提高伸长率，更为重要的是，铸件的硬度均匀，可加工性显著改善。

在此基础上，国际标准ISO1083《球墨铸铁分类》2004年修订时，补充了一项“高硅球墨铸铁”的牌号JS500－10。

欧洲标准EN 1563《球墨铸铁件》2011年修订时，补充了3项“固溶强化铁素体球墨铸铁”牌号，见表2。

2012年，德国Herbert Löblich发表了有关硅固溶强化的铁素体球墨铸铁力学性能的研究报告。2013年，日本九州大学和日之出水道机器公司技术开发部也对此进行了试验研究。

三、硅固溶强化球墨铸铁的力学性能

近年来，关于硅固溶强化球墨铸铁的力学性能，已经发表了不少研究报告。目前见到的文献资料中，日本九州大学和日之出水道机器公司提供的数据比较全面，在这里简要地介绍给大家，供参考。

试验中，熔炼两种珠光体-铁素体球墨铸铁（QT1、QT2），两种高硅铁素体球墨铸铁（SiQT1、SiQT2），铸造厚度30mm、高50mm、长200mm的U形试块，然后制成试样，测定力学性能。QT1、QT2相当于QT500-7和QT600-3。SiQT1和SiQT2则是在二者的基础上提高硅含量，并相应地调整碳含量和其他成分。

1. 球墨铸铁的成分和金相组织

高硅球墨铸铁中，相应地降低碳含量，使碳当量大致相当。常规球墨铸铁QT1和QT2中，加少量的铜，并稍调高锰含量，以使组织中的珠光体含量符合要求。

4种球墨铸铁的化学成分见表3，试样金相组织的要点见表4，金相图片见图1。

2. 抗拉强度、屈服强度和伸长率

为了了解各种球墨铸铁抗拉强度与伸长率的关系，进行了大量的拉伸性能测试。常规球墨铸铁取了90种试样，其抗拉强度在400～700MPa，铜含量和锰含量也稍有差别；高硅球墨铸铁取了19种试样，抗拉强度在500～600MPa，硅含量在3.3%～4.65%。

抗拉强度与伸长率的关系见图2，屈服强度与伸长率的关系见图3。图2和图3中，蓝点是常规球墨铸铁的数据，红圈点是高硅球墨铸铁的数据。为了与现行标准的要求比较，两图中的绿色小方块是标准规定的抗拉强度、屈服强度和伸长率的最低值，其

表2　固溶强化铁素体球墨铸铁的牌号和力学性能要求（不同铸件壁厚的最低值）

牌号	铸件壁厚/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）
EN-GJS-450-18	≤30	350	450	18
	30～≤60	340	430	14
	＞60	由供、需双方商定		
EN-GJS-500-14	≤30	400	500	14
	30～≤60	390	480	12
	＞60	由供、需双方商定		
EN-GJS-600-10	≤30	470	600	10
	30～≤60	450	580	8
	＞60	由供、需双方商定		

间还连有曲线，落在曲线右方的数据都符合标准要求。

由图2可见，在抗拉强度相同的条件下，高硅球墨铸铁的伸长率比常规球墨铸铁高。由图3可见，在伸长率相同的条件下，高硅球墨铸铁的屈服强度比常规球墨铸铁高得多。

图4表示几种球墨铸铁抗拉强度和屈服强度的关系。由图4可见，在抗拉强度相同的条件下，高硅球墨铸铁的屈服强度（$\sigma_{0.2}$）比常规球墨铸铁高得多，硅的固溶强化作用使球墨铸铁的屈强比大为提高。

3. 疲劳特性

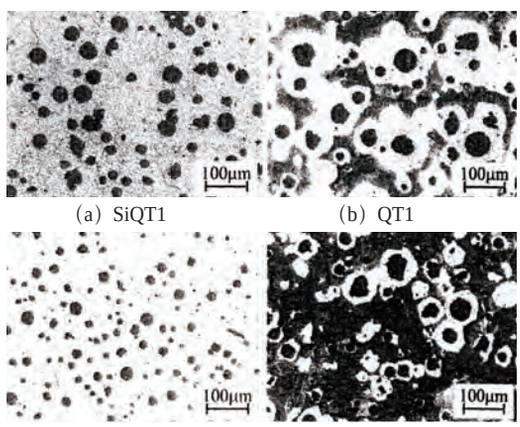
就表3所列的4种球墨铸铁进行了旋转弯曲疲劳试验，应力振幅与断裂循环次数的关系见图5。硅固溶强化的球墨铸铁，疲劳极限高于常规球墨铸铁。

4. 冲击韧度

为了了解硅固溶强化对球墨铸铁冲击韧度和脆性转变的影响，就SiQT1和QT1两种球墨铸铁，测定了标准试样在不同温度下的冲击吸收能量。试验中，分别用V型缺口试样、U型缺口试样和无缺口试样进行测定，以考察其对缺口形状的敏感性。图6、图7、图8中，黑点是QT1的测定值，空白点是SiQT1的测定值。

V型缺口试样测定的结果见图6。在70℃以上，SiQT1的冲击吸收能量大于QT1，但是，SiQT1的脆性转变温度（T）很高，约在67℃，而QT1的脆性转变温度则在－11℃左右，二者的差别相当大。

U型缺口试样测定的结果见图7。在60℃以上，SiQT1的冲击吸收能量大于QT1，但是，SiQT1的脆性转变温度（不同温度下U型缺口试样的冲击吸收能量），虽然比V型缺口试样的值略有下降，但还是很高，约是



（a）SiQT1　（b）QT1

（c）SiQT2　（d）QT2

图1　试样的金相组织

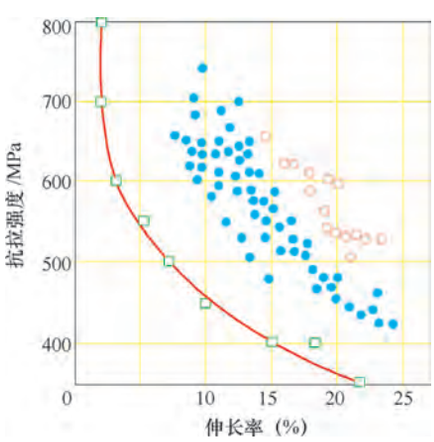


图2　几种球墨铸铁抗拉强度与伸长率的关系

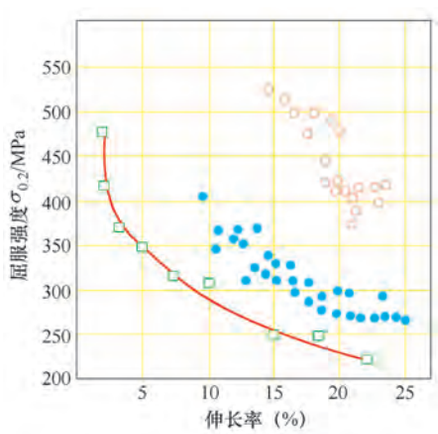


图3　几种球墨铸铁屈服强度（$\sigma_{0.2}$）与伸长率的关系

表3　4种球墨铸铁的化学成分（质量分数）　（%）

铸铁编号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Cr
SiQT1	3.22	3.82	0.24	0.020	0.009	0.01	0.042	0.031
QT1	3.65	2.24	0.40	0.016	0.006	0.22	0.040	0.024
SiQT2	3.04	4.40	0.27	0.022	0.004	0.01	0.037	0.036
QT2	3.68	2.12	0.41	0.013	0.009	0.34	0.034	0.023

表4　4种球墨铸铁试样金相组织的要点

铸铁编号	球化率（%）	石墨球平均直径 / μm	石墨球所占的面积（%）	铁素体与珠光体之比
SiQT1	96.0	20.2	20.2	全铁素体
QT1	96.4	16.7	16.7	约6：4
SiQT2	95.9	14.0	14.0	全铁素体
QT2	94.9	18.6	18.6	约2：8

60℃。QT1的脆性转变温度在仍然在－11℃左右。

无缺口试样测定的结果见图8。用无缺口试样测定时，SiQT1的脆性转变温度约是11℃，比用两种有缺口试样测定的转变温度大幅度下降。

在11℃以上，SiQT1的冲击吸收能量大于QT1。但是，用无缺口试样测定时，QT1的脆性转变温度很低，在－80℃以上未见明显的脆化的迹象。

5. 几点综合的看法

基于对上述数据的分析，大体上可建立以下的以下看法：

（1）在球墨铸铁中，硅固溶于铁素体，有抑制珠光体、促进铁素体的作用，而且固溶于铁素体的硅能使铁素体强化。

（2）对于基体为珠光体-铁素体混合组织、要求抗拉强度600MPa及低于此值的球墨铸铁，将硅含量提高到3.8%～4.4%，可以得到全铁素体组织，在抗拉强度满足要求的条件下，屈服强度、伸长率都有较大幅度的提高。同时，制得的铸件硬度均匀，可加工性明显改善。

（3）如要求抗拉强度在700MPa以上，则硅固溶强化的铁素体球墨铸铁不能满足要求。

（4）硅固溶强化球墨铸铁，疲劳极限优于常规球墨铸铁。

（5）硅固溶强化的球墨铸铁，脆性转变温度很高：用V型缺口试样和U型缺口试样测定时，脆性转变温度都高于室温，在60℃以上；用无缺口试样测定时，也在10℃以上。因此，硅固溶强化的球墨铸铁不宜用于制造结构上有应力集中部位的铸件，尤其不宜用于在低温条件下承受冲击载荷的铸件。

（6）在脆性转变温度以上，硅固溶强化的球墨铸铁的冲击韧度优于常规球墨铸铁。

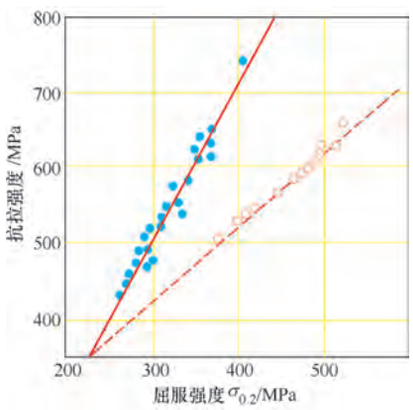


图4　几种球墨铸铁抗拉强度与屈服强度（$\sigma_{0.2}$）的关系

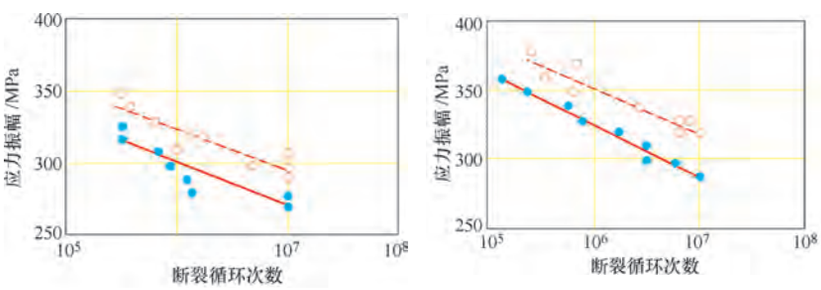


图5　4种球墨铸铁的*S-N*曲线

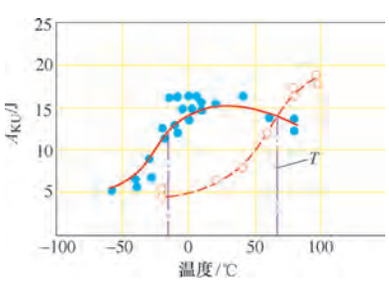


图6　不同温度下V型缺口试样的冲击吸收能量

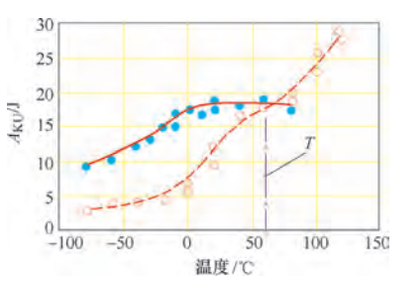


图7　不同温度下U型缺口试样的冲击吸收能量

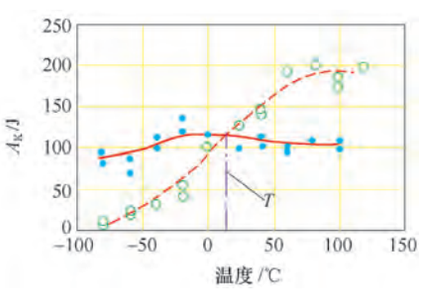


图8　不同温度下无缺口试样的冲击吸收能量

作者简介：李传栻，中国铸造协会顾问，资深铸造专家。

MW 20140718