DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3224

Cu 含量对 QT600-10 显微组织和力学性能的影响

杨宗武[1],柏建雨[1],张广勤[1],孙文辉[1],申高远[2]

(1. 徐州徐工精密工业科技有限公司,江苏 徐州 221600; 2. 上海交通大学 材料科学与工程学院 上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室,上海 200240)

摘　要:QT600-10 球墨铸铁主要用于差速器、凸轮轴等核心零部件，然而随着产品轻量化的快速发展,对 QT600-10 屈强比提出了更高要求。Cu 有助于提升 QT600-10 的屈强比，但是在工厂生产条件下根据经验严格限定了 Cu 含量不超过 0.2%(质量分数),这极大地影响了 Cu 对铸态 QT600-10 屈强比的调控作用。本文针对该经验参数的合理性开展研究,在稳定工厂生产条件下制备了具有不同 Cu 含量的铸态 QT600-10 球墨铸铁,并采用多种表征和测试手段对其组织形貌、元素分布、硬度及拉伸性能等进行分析。结果表明,0.2%(质量分数)Cu 含量上限并不具有合理性,Cu 含量提升至 0.456%(质量分数)时对铸态 QT600-10 的显微组织不产生显著影响且不引发有害相变,同时提升了铸态 QT600-10 的屈强比和硬度,并保持较高的伸长率。

关键词:铁素体基体球墨铸铁;固溶强化;显微组织;力学性能

中图分类号: TG143　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)11-1036-07

Influence of Cu Content on the Microstructures and Mechanical Properties of QT600-10

YANG Zongwu[1], BAI Jianyu[1], ZHANG Guangqin[1], SUN Wenhui[1], SHEN Gaoyuan[2]

(1. Xuzhou XCMG Precision Industrial Technology Co., Ltd., Xuzhou 221600, China; 2. Shanghai Key Lab of Advanced High-temperature Materials and Precision Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: QT600-10 ductile iron is mainly used in core components such as differentials and camshafts. However, with the rapid development of lightweight products, higher requirements have been put forward for the yield ratio of QT600-10. Cu contributes to improving the yield ratio of QT600-10. Nevertheless, under factory production conditions, the upper limit of Cu content is empirically restricted to 0.2%(mass fraction), which severely restricts the tailoring effect of Cu on the yield ratio of as-cast QT600-10. In this paper, the rationality of this empirical parameter was studied by preparing as-cast QT600-10 ductile iron samples with different Cu contents under stable factory production conditions, and analysing the corresponding microstructure, elemental distribution, hardness and tensile properties via various characterization and testing methods. The results show that the empirical limit of 0.2%(mass fraction) Cu is not always rational, for no significantly effect on the microstructures of the as-cast QT600-10 and no harmful phase transitions are found with increasing the Cu content to 0.456%(mass fraction). Meanwhile, the 0.456%(mass fraction) Cu content increases the yield ratio and hardness of the as-cast QT600-10 while maintaining a high total elongation. The findings of this research will provide an experimental basis for optimizing the composition of as-cast QT600-10 ductile iron and controlling the quality of the on-site casting process.

Key words: ferritic ductile iron; solid solution strengthening; microstructures; mechanical properties

收稿日期:2023-08-30

基金项目:徐工精密-上海交大联合攻关项目(23H010102515);国家自然科学基金(51821001)

作者简介:杨宗武,1993 年生,工学硕士. 主要从事铸造合金熔炼及过程控制. Email: jmxxh@xcmg.com

通讯作者:申高远,1999 年生,工学学士. 研究方向为高熵合金、增材制造、铸铁成分及工艺改性. Email: CannonShen@sjtu.edu.cn

引用格式:杨宗武,柏建雨,张广勤,等. Cu 含量对 QT600-10 显微组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术,2023,44(11): 1036-1042

YANG Z W, BAI J Y, ZHANG G Q, et al. Influence of Cu content on the microstructures and mechanical properties of QT600-10[J]. Foundry Technology, 2023, 44(11): 1036-1042

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

QT600-10硅固溶强化球墨铸铁，于2009年由Indexator公司首次提出，并在2012年列入欧洲标准，主要用于差速器、动力机械曲轴、凸轮轴、连接轴、连杆、齿轮、离合器片、液压缸体等核心零部件[1-3]。这种以铁素体为基体和Si固溶的设计理念大幅提升了球墨铸铁的屈服强度和伸长率，并使得该材料能够以铸态直接服役[4]。同时由于较少受到碳化物与珠光体形成元素的影响，生产时可以放宽元素含量的范围，使得生产成本得到显著降低，GB/T 1348—2019《球墨铸铁件》已经将QT600-10牌号合金列入其中[5]。另外，Si对铁素体的固溶强化效果要高于其他固溶元素，屈服强度可提高20%以上，屈强比可从0.6升至0.8[4]。再加上QT600-10以单相铁素体为基体，基体硬度较低，且更少受到冷却速度的影响，所以铸件本体硬度更为均匀，硬度差从50~90 HBW降低到现在的30 HBW水平，从而在加工时可以提高20%切削性能，减少50%刀具磨损，大大降低机加工环节的费用[6]。

随着产品轻量化的快速发展，铸件减重是关键，在维持同等结构承载能力要求下，提升QT600-10的屈强比将有助于铸件壁厚减薄，实现铸件减重。研究表明Cu的添加有助于改善QT600-10的屈强比[5]，这是因为在球墨铸铁的共晶转变过程中，Cu可以促进石墨化，减少或消除游离渗碳体的生成；在共析转变时，Cu可以促进珠光体的形成，抑制铁素体的形成；Cu对基体起固溶强化、沉淀硬化作用；Cu还是适中的石墨化元素，可以有效减少共晶碳化物的生成[7-11]。因此，在球墨铸铁中，Cu通常被视作有益的添加元素。尽管Cu的单价比Fe等元素贵，但从废铁中回收Cu的技术已趋向高纯化、低成本，获得了越来越多的应用[12]，故冶炼球墨铸铁过程中Cu的添加采用废铁中回收的Cu，而无需使用纯铜，并不带来额外的成本增加。

Cu在铸铁中的最大溶解度为3.5%(质量分数)，但在某些元素影响下，Cu的固溶度会大幅降低，如当Mg含量约为0.04%时，Cu的最大固溶度不超过1%，超过此浓度的Cu将以Mg_2Cu析出相的形式存在，降低铸铁的强度并损害加工性能[13]。另外，当Pb、Ti、Al等反球化元素存在时，Cu会促进片状石墨的生成[14-15]。再加上工厂生产条件下诸多干扰因素的存在，例如杂质元素的控制水平、铸造过程中的对流均匀程度等，因此，根据长期工厂经验，铸态QT600-10中Cu含量不能超过0.2%(质量分数)。但是这一经验参数极大地影响了Cu对铸态QT600-10屈强比的调控作用。

本文针对Cu含量经验参数的合理性进行研究，利用中频感应熔炼炉在稳定工厂生产条件下制备了具有不同Cu含量的铸态QT600-10球墨铸铁，并对其组织形貌、元素分布、硬度及拉伸性能等进行分析。研究结果有助于铸态QT600-10球墨铸铁成分优化并为铸造过程质量控制提供实验依据。

1　实验材料与方法

在中频感应电炉中，按照20%(质量分数，下同)高纯生铁、20%低锰废钢和60%的QT400回炉料配料熔炼，通过冲入法球化孕育，出铁温度控制在1 480℃，1%的球化剂和0.7%的一次孕育剂，浇注时添加0.1%硅钡随流孕育；浇注温度控制在1 390~1 360 ℃。表1为设计的含有不同Cu含量的终铁液化学成分。对铁液调质后浇注，通过QSN750-II光谱仪分析得到实际合金化学成分，方案1~3中Cu含量分别为0.016%，0.233%和0.456%，如表2所示。

铸件下线后，取铸件本体冒口位置，根据GB/T1348-2019《球墨铸铁件》标准，使用Smartzoom5光学显微镜观察铸件冒口位置的金相组织；使用TESCAN-Mira3扫描电子显微镜(SEM)对铸件进行更高倍数的显微组织表征，并利用其配备的X射线能谱仪(EDS)对铁素体基体和石墨球中各元素的分布情况进行研究。采用Wilson BH3000布氏硬度计检测铸件冒口位置的硬度；Y形单铸试块车削后，使用30T万能拉伸试验机测试其力学性能。

2　实验结果与讨论

2.1　材料组织

铸态QT600-10金相组织如图1所示。通过ZEN软件对腐蚀前3张金相图片(图1a, c, e)分析，3种方案的石墨大小均为6级；石墨球化等级均为2级，V与VI形石墨之和均大于80%(体积分数)，金相组织满足产品设计要求；通过金相显微镜100倍视野下可以观察到Cu含量增加未对石墨形态、尺寸及数量造成影响。

在硝酸酒精腐蚀后，通过光学显微镜观察，3种方案下基体仍为铁素体(图1b, d, f)，这主要是因为高含量的Si、较低含量的P、Mn、Cu、Sn、Cr是形成铁素体的关键。但是随着Cu含量增加，珠光体的含量有所增加。根据实际化学成分测算珠光体指数P_X，其中P_X的数值用式(1)表示：

$$P_X=0.3\times Mn-2.65\times(Si-2)+7.75\times Cu+90\times Sn+9.6\times Cr \tag{1}$$

根据式(1)可得P_X分别为-5.87%，-4.01%，-2.19%。因

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 不同Cu含量QT600–10的设计化学成分
Tab.1 The designed chemical compositions of QT600–10 with different Cu contents

(mass fraction/%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Sn	Mg
3.1~3.15	4.25±0.05	≤0.15	≤0.05	≤0.015	≤0.08	≤0.1 0.20~0.25 0.45~0.50	≤0.006	0.035~0.050

表 2 不同 Cu 含量 QT600–10 的实测化学成分
Tab.2 The actual chemical compositions of QT600–10 with different Cu contents

(mass fraction/%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Sn	Mg
方案 1	3.22	4.30	0.110	0.015	0.007 0	0.016	0.016	0.002	0.055
方案 2	3.16	4.27	0.112	0.015	0.006 3	0.017	0.233	0.003	0.050
方案 3	3.12	4.20	0.109	0.014	0.006 1	0.016	0.456	0.002	0.044

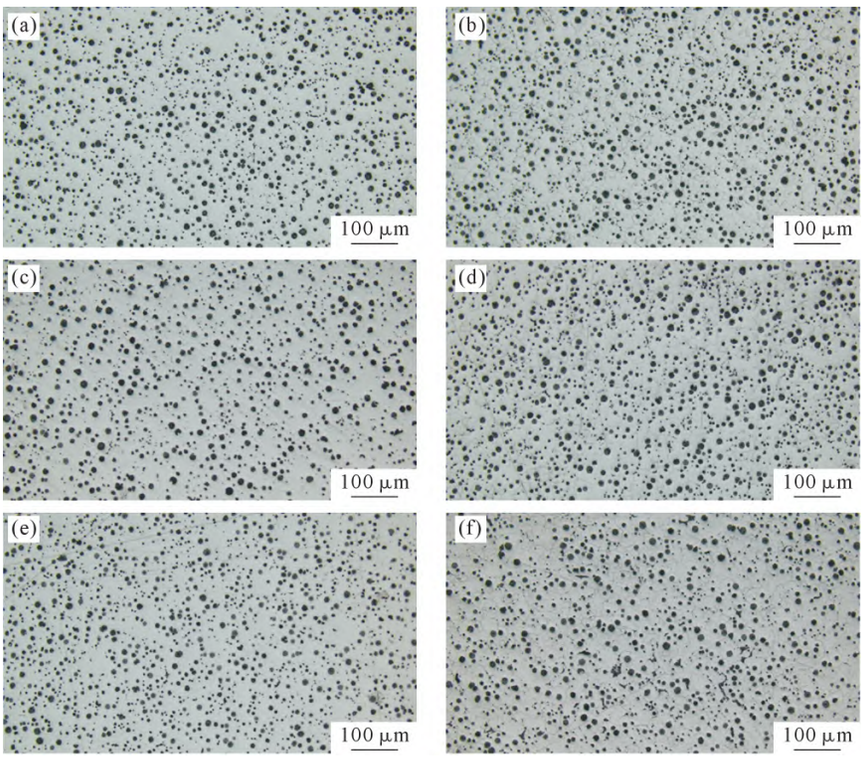

图 1 铸态 QT600-10 的金相组织:(a) 方案 1–腐蚀前,(b) 方案 1–腐蚀后,(c) 方案 2–腐蚀前,(d) 方案 2–腐蚀后,(e) 方案 3–腐蚀前,(f) 方案 3–腐蚀后

Fig.1 Microstructures of as-cast QT600-10: (a) sample 1-before corrosion, (b) sample 1-after corrosion, (c) sample 2-before corrosion, (d) sample 2-after corrosion, (e) sample 3-before corrosion, (f) sample 3-after corrosion

此,3 种方案下珠光体含量都很低,对力学性能负面影响有限。

铸态 QT600-10 更高倍数的电子显微镜(SEM)显微组织和元素分布情况如图 2 所示。由图 2a~c 可知,QT600-10 铸件中石墨球的球化度较好，在基体中的分布较为弥散、均匀,且 Cu 含量增加未对石墨形态、尺寸及数量造成明显影响,同时 Cu 含量增加并未导致铸件中出现有害相。由图 2d~f 可以观察到,石墨球内部的同心圆年轮状结构[16-17]趋势明显,而少见片状[15],表明石墨的球状生长情况较好,相比偏向片状或不规则状的球化不良的石墨球,这种完整的石墨球可以更好地作为裂纹抑制(crack arrester)相,从而增强球墨铸铁整体的韧性等力学性能[23]。石墨球内部同心圆年轮状结构的放大图如图 3 所示,其对应图 2e 中用白色虚线方框标出的石墨球。

由图 2d~f 中的 EDS 线扫描结果可知，铁素体基体富 Fe 贫 C,石墨球富 C 贫 Fe,有一定量的 Si固溶于铁素体基体区域,形成固溶强化,其他各种杂质元素则以更少的比重固溶于铁素体;而在石墨球区域,这些元素的浓度都接近于 0。另外,对图 2d~f 中黄色数字处进行了 EDS 点扫描，其结果如表 3 所示。图 2g~i 的 EDS 面扫描范围为图 2d~f 所示的区域,可以发现 Cu 元素也富集于铁素体区域，而在石墨球中的分布更少，这说明 Cu 也对铁素体基体带来

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

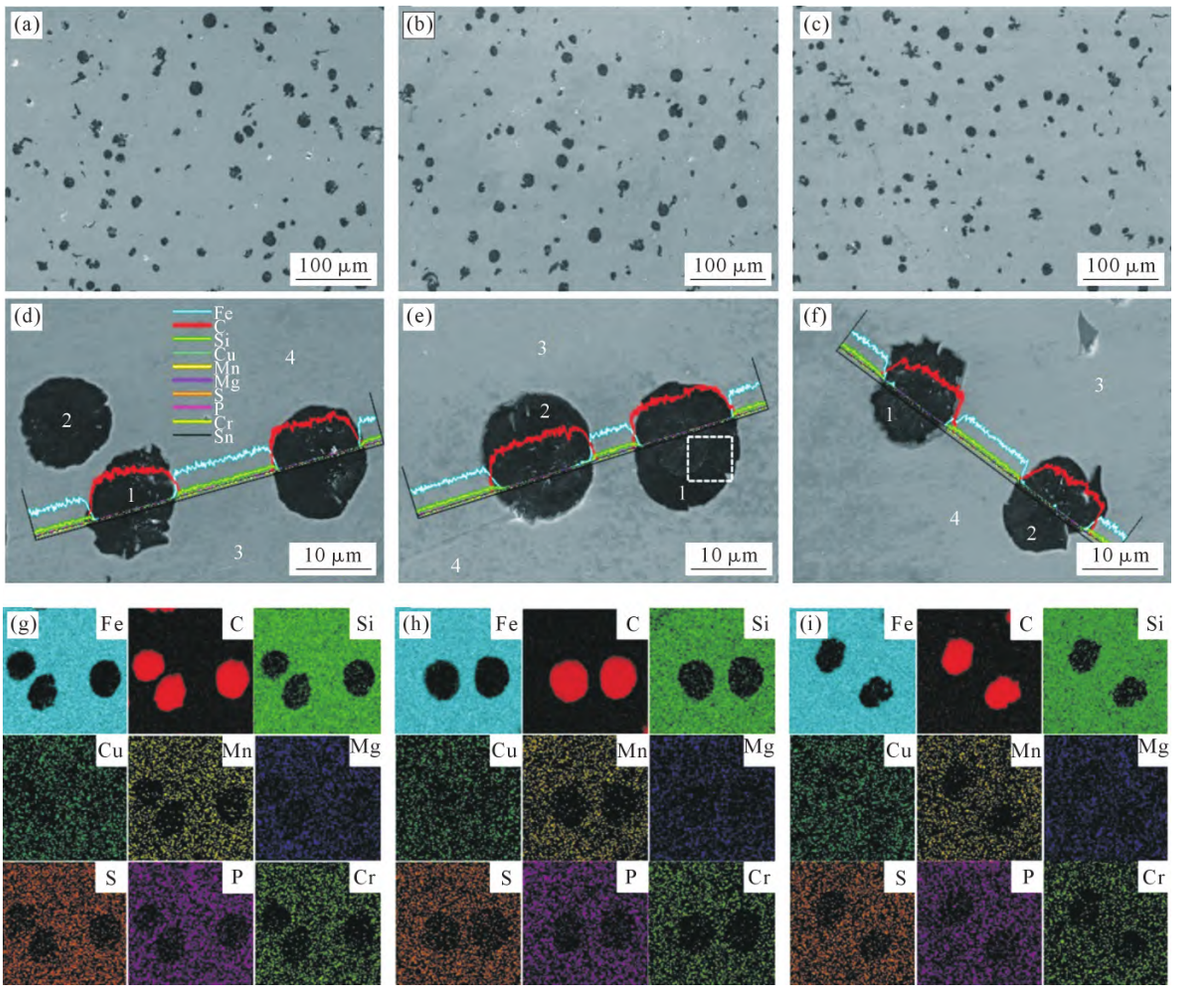

图 2 QT600-10 高倍显微组织和元素分布：(a~c) 方案 1、2、3 的显微组织，(d~f) 方案 1、2、3 的 EDS 线扫描结果及点扫描示意位置，(g~i) 方案 1、2、3 下 EDS 面扫描结果

Fig.2 Microstructures and elemental distributions of QT600-10 under high magnification: (a~c) microstructures of samples 1, 2, 3, (d~f) EDS line scanning results and the illustrating positions of the EDS point scanning of samples 1, 2, 3, (g~i) EDS mapping results of samples 1, 2, 3

了固溶强化作用。

由表 3 中的 EDS 点扫描结果可以看出，对于所有方案，Mg、Sn 等杂质元素的含量均远小于 0.08%，同时，对比方案 1~3 可知，随着 Cu 含量增加，铁素体基体中其他固溶元素的含量基本不变，而固溶的 Cu 含量从约 0.2%上升至约0.8%，表明 Cu 含量的增加未引发新相出现，几乎全部固溶进了铁素体，这说明了 Cu 的固溶度和固溶强化效应被最大化利用。

表3 QT600-10的EDS点扫描结果

Tab.3 EDS point scanning results of QT600-10

(mass fraction/%)

	相	位置	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Sn	Mg
方案 1	石墨	1	0.01	0	0	0	0.01	0.04	0	0
		2	0.01	0	0.02	0.02	0.02	0.05	0	0.01
	铁素体	3	3.26	0.17	0	0.03	0.14	0.20	0	0
		4	3.45	0.19	0	0	0	0.40	0.10	0
方案 2	石墨	1	0.05	0	0.03	0	0.01	0.07	0	0.02
		2	0.06	0.03	0	0	0.02	0.04	0	0
	铁素体	3	3.64	0.22	0.16	0	0.02	0.35	0	0.01
		4	3.44	0.10	0.04	0.15	0	0.52	0.22	0.06
方案 3	石墨	1	0.02	0.06	0	0	0	0.02	0	0.01
		2	0.10	0.01	0	0	0	0.09	0.13	0.01
	铁素体	3	4.21	0.16	0.11	0.11	0	0.82	0.14	0.08
		4	4.08	0.27	0.06	0	0	1.05	0.03	0.05

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

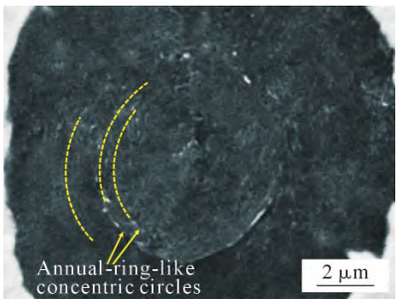

图 3 铸态 QT600-10 中石墨球内部同心圆年轮状形貌
Fig.3 Annual-ring-like concentric circle morphology inside the graphite balls of as-cast QT600-10

2.2 力学性能

QT600-10 球墨铸铁的强度、屈强比、伸长率和硬度随 Cu 含量的变化趋势如图 4 所示，具体数据如表 4 所示，其中图 4 中所有点采用的数值均为表 4 中相应物理量的平均数值，表 4 中“1#”~“9#”表示样品编号，且同一方案下的 3 个样品为全同的重复样。在合理的误差范围内，可认为 Cu 含量增加未导致屈服强度、抗拉强度明显变化，这是因为其变化率在 0.5 %以内，而不同重复样之间强度数值的波动具有偶然因素，但是屈强比由 0.815 提高至0.825，变化率在 1%以上，故可认为 Cu 含量的增加使屈强比得到了提高。同时发现，虽然随着 Cu 含量增加，伸长率有所下降，但是当 Cu 含量为 0.456%时，其伸长率依然达到 16.29%，保持在了较高水平。另外，随着 Cu 含量的增加，QT600-10 的硬度得到了显著提高。由于 Cu 在铁素体中以置换式固溶原子的形式存在，其原子半径、剪切模量等均与 Fe 不同，所以在 Fe 的晶格中会出现额外的弹性应力场，阻碍位错运动，提高了位错开始大量塑性滑移所需的Peierls-Nabarro 力，从而提升硬度[18]。诸多研究[19-21]均发现，包括球墨铸铁在内的合金材料中，在固溶强化机制下，硬度 H 往往与固溶元素的浓度 C 成线性关系，可用式(2)描述：

$$H=H_0+kC \tag{2}$$

式中，H_0 为无固溶时的硬度；k 为线性关系的斜率，表征该种固溶元素对合金硬度增加的能力。本研究中铸态 QT600-10 球墨铸铁的硬度随 Cu 含量增加的趋势显然与这种线性关系吻合。

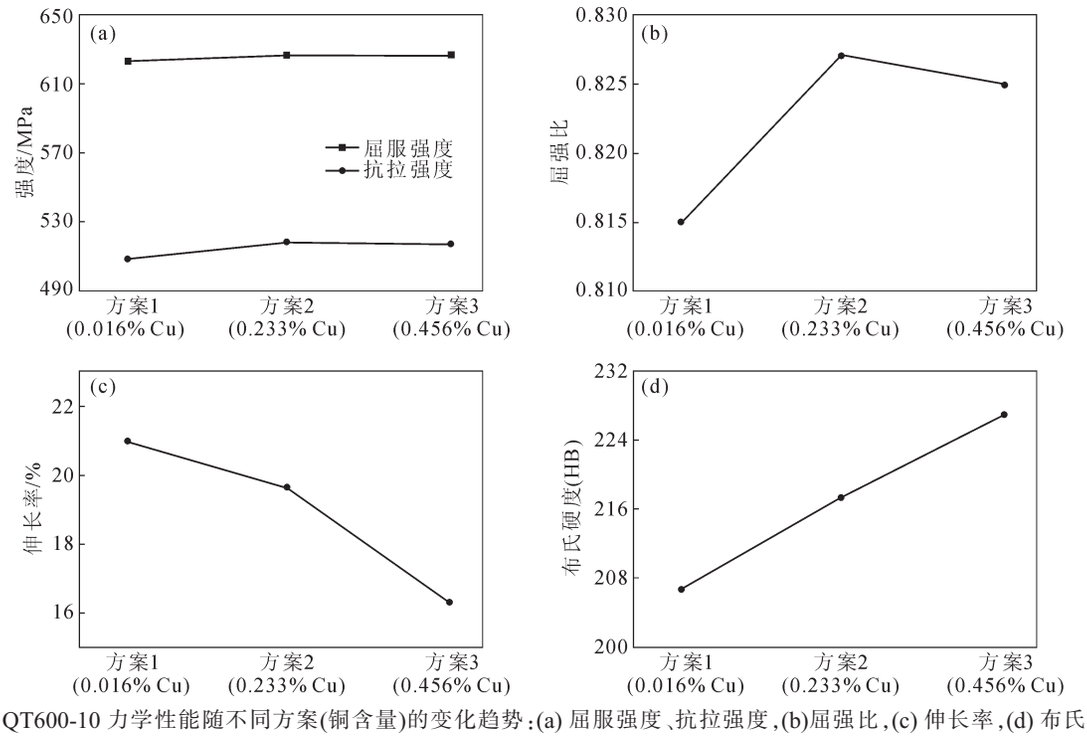

图 4 QT600-10 力学性能随不同方案(铜含量)的变化趋势：(a) 屈服强度、抗拉强度，(b)屈强比，(c) 伸长率，(d) 布氏硬度
Fig.4 The correlation between Cu content and the mechanical properties of QT600-10: (a) yield strength and tensile strength, (b) yield ratio, (c) elongation, (d) Brinell hardness

表 4 QT600–10 拉伸力学性能
Tab.4 Tensile properties of QT600–10

检测结果	方案 1				方案 2				方案 3			
	1#	2#	3#	平均	4#	5#	6#	平均	7#	8#	9#	平均
抗拉强度 /MPa	624	622	624	623	628	627	623	626	627	625	626	626
屈服强度 /MPa	516	516	493	508	521	522	512	518	519	515	518	517
伸长率 /%	22.86	20.00	20.00	20.95	19.96	18.14	20.80	19.63	19.67	12.00	17.20	16.29
硬度 (HB)	204.0	209.0	207.0	206.7	217.0	215.0	220.0	217.3	226.0	227.0	228.0	227.0

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

固溶的 Cu 含量增加对屈强比的提升可以作如下解释，固溶强化对屈服强度的提升比对抗拉强度的提升更为明显，因为固溶强化是合金整体的均匀强化机制，主要依靠位错与晶格之间的作用，位错之间相互作用带来的加工硬化较少，故对抗拉强度影响并不明显[22]。在抗拉强度提升幅度更小的情况下，屈服强度提升幅度更多便可以显著增加屈强比，有利于铸件的减重。图 4a 可以看出屈服强度的提升幅度比抗拉强度的提升幅度更大。综上，质量分数为 0.456%的 Cu 初始添加量尚未到引发有害相变的浓度，且有助于提升 QT600-10 的综合力学性能，尤其有利于屈强比的提升，实现铸件轻量化发展。

3　结论

(1)Cu 含量不应超过 0.2%的经验参数并不合理，当 Cu 含量上限拓宽至 0.456%时，Cu 含量的增加未对石墨形态、尺寸及数量造成明显影响，也未导致铸件中出现有害相，而是几乎全部固溶进了铁素体中。

(2)在 Cu 含量上限拓宽至 0.456%时，Cu 含量的增加可以提升铸态 QT600-10 的屈服强度、屈强比和硬度，并保持较高的伸长率，Cu 的固溶强化作用是关键。故可以将 Cu 含量上限拓宽至 0.456%，更好地发挥 Cu 的固溶强化能力。

参考文献：

[1] LARKER R. Solution strengthened ferritic ductile iron ISO 1083/JS/500-10 provides superior consistent properties in hydraulic rotators[J]. China Foundry, 2009, 6(4): 343-351.

[2] 陈忠士，邹泽昌，程艳，等. 铸态 QT600-10 合成球墨铸铁凸轮轴组织及力学性能[J]. 铸造，2015, 64(11): 1138-1141.
CHEN Z S, ZOU Z C, CHENG Y, et al. Microstructures and mechanical properties of as-cast QT600-10 synthetic ductile iron camshaft[J]. Foundry, 2015, 64(11): 1138-1141.

[3] GASSNER G, BAUER W, SCHUMACHER P, et al. Werkstoff-und fertigungstechnische Grundlagen der Herstellung und Anwendung von hoch siliciumhaltigem Gusseisen mit Kugelgraphit[J]. Giesserei, 2012, 99(5): 20-23.

[4] BORGSTRÖM H. Influence of strain rate, temperature and chemical composition on high silicon ductile iron[J]. Minerals, 2021, 11(4): 391.

[5] 崔兰芳，逄文华，朱家辉，等. GB/T 1348—2019《球墨铸铁件》标准解读[J]. 铸造，2022, 71(11): 1435-1441.
CUI L F, PANG W H, ZHU J H, et al. Interpretation of GB/T 1348—2019 "Spheroidal Graphite Iron Castings"[J]. Foundry, 2022, 71(11): 1435-1441.

[6] HUQ M J, SHIMIZU K, KUSUMOTO K, et al. Effect of carbon and titanium addition on erosive wear behavior of high chromium white cast irons[J]. International Journal of Metalcasting, 2023: 1-15.

[7] OMRAN A M, ABDEL-JABER G T, ALI M M. Effect of Cu and Mn on the mechanical properties and microstructure of ductile cast iron[J]. International Journal of Engineering Research and Applications, 2014, 4(6): 90-96.

[8] RAO L, TAO W W, WANG S J, et al. Influence of the composition ratio of manganese and copper on the mechanical properties and the machining performance of ductile iron[J]. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, 2014, 21: 573-579.

[9] YI P Y, GUO E J, WANG L P, et al. Effect of Cu content on microstructures and mechanical properties of ADI treated by twostep austempering process[J]. China Foundry, 2019, 16(3): 168-176.

[10] UPADHYAY S, SAXENA K K. Effect of Cu and Mo addition on mechanical properties and microstructure of grey cast iron: An overview[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26: 2462-2470.

[11] MACHADO H D, ARISTIZABAL-SIERRA R, GARCIA-MATEO C, et al. Effect of the starting microstructure in the formation of austenite at the intercritical range in ductile iron alloyed with nickel and copper[J]. International Journal of Metalcasting, 2020, 14: 836-845.

[12] 陈小红. 从废水处理铁渣中选择性提取钴和铜的工艺研究[D]. 长沙：中南大学，2014.
CHEN X H. Technical study on selective extracting cobalt and copper from wastewater treatment iron sludge[D]. Changsha: Central South University, 2014.

[13] GÓRNY M, TYRAŁA E, SIKORA G, et al. Identification of Mg_2Cu particles in Cu-alloyed austempered ductile iron[J]. Metals and Materials International, 2018, 24: 95-100.

[14] 程建龙. 铸态高强度高韧性 QT600-10 球墨铸铁控制技术[J]. 铸造技术，2019, 40(6): 579-581.
CHENG J L. Control technology of cast high strength and toughness QT600-10 ductile iron casting[J]. Foundry Technology, 2019, 40(6): 579-581.

[15] BAI Y L, LUAN Y K, SONG N N, et al. Chemical compositions, microstructure and mechanical properties of roll core used ductile iron in centrifugal casting composite rolls[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2012, 28(9): 853-858.

[16] 陈建国. 铸铁在固态相变时石墨球化机理的研究[J]. 株洲工学院学报，1996, 10(1): 44-51.
CHEN J G. A research into the fundamental principals of the graphitization in the process of solidification of cast iron[J]. Journal of Hunan University of Technology, 1996, 10(1): 44-51.

[17] THEUWISSEN K, LACAZE J, VÉRON M, et al. Nano-scale orientation mapping of graphite in cast irons[J]. Materials Characterization, 2014, 95: 187-191.

[18] WANG Z P, FANG Q H, LI J, et al. Effect of lattice distortion on solid solution strengthening of BCC high-entropy alloys [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(2): 349-354.

[19] VADIRAJ A, BALACHANDRAN G, KAMARAJ M, et al. Mechanical and wear behavior of quenched and tempered alloyed hypereutectic gray cast iron[J]. Materials & Design, 2011, 32(4): 2438-2443.

[20] MURAKAMI T, SAHARA R, HARAKO D, et al. The effect of solute elements on hardness and grain size in platinum based binary

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

alloys[J]. Materials Transactions, 2008, 49(3): 538-547.

[21] XU Y L, GENSCH F, REN Z, et al. Effects of Gd solutes on hardness and yield strength of Mg alloys[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2018, 28(6): 724-730.

[22] SOMEKAWA H, SCHUUH C A. Effect of solid solution elements on nanoindentation hardness, rate dependence, and incipient plasticity in fine grained magnesium alloys[J]. Acta Materialia, 2011, 59(20): 7554-7563.

[23] BENEDETTI M, FONTANARIA V, LUSUARDIB D. Effect of graphite morphology on the fatigue and fracture resistance of ferritic ductile cast iron[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 206: 427-441.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net