DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.04.003

Co 含量对 CB2 耐热钢室温力学性能的影响

白玉洁,郑　康,刘　越
(东北大学 材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110819)

摘　要:为研究 Co 含量对 CB2 钢室温力学性能的影响,调整 CB2 钢中 Co 元素的含量分别为 1.0%、3.0%和 6.0%。利用室温拉伸和布氏硬度观察 Co 含量对 CB2 钢室温力学性能的影响规律,采用扫描电子显微镜、X 射线衍射仪和 Thermo-Calc 热力学分析软件等分析手段,研究 Co 含量对 CB2 钢室温力学性能的影响机制。研究发现:随着 Co 含量的增加,CB2 钢的抗拉强度和屈服强度均增加,断面收缩率呈先增加后降低的趋势。当 Co 含量为 3.0%时,能够使 CB2 钢获得全马氏体组织,同时基体中析出相的平均尺寸最小;当 Co 含量为 3%时,其细化 $M_{23}C_6$ 相的尺寸的效果最好,增强了析出强化效果,CB2 钢抗拉强度为 840 MPa,屈服强度为 646 MPa,断面收缩率为 58.4%,硬度为 271 HB。

关键词:CB2 钢;Co 含量;力学性能;耐热钢

中图分类号:TG142.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)04-341-05

Effect of Co Content on Room Temperature Mechanical Properties of CB2 Steel

BAI Yujie, ZHENG Kang, LIU Yue
(School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang110819, China)

Abstract: The effect of 1.0%, 3.0% and 6.0% Co content on the mechanical properties of CB2 steel at room temperature, such as tensile strength and brinell hardness, was studied by means of scanning electron microscope, X-ray diffractometer and Thermo-Calc thermodynamic analysis software. The results show that with the increase of Co content, the tensile strength and yield strength of CB2 steel increase, and the reduction rate of section increases first and then decreases. When the Co content is 3.0%, the total martensite structure of CB2 steel can be obtained, and the average size of the precipitated phase in the matrix is the minimum. When Co content is 3%, the effect of refining $M_{23}C_6$ phase size is the best, which enhances the precipitation strengthening effect. The tensile strength of CB2 steel is 840 MPa, yield strength is 646 MPa, the section shrinkage rate is 58.4%, and the hardness is 271 HB.

Key words: CB2 steel; Co content; mechanical properties; heat resistant steel

随着社会经济的迅速发展,我国不断增长的用电需求同火力发电所带来的环境污染之间的矛盾日益尖锐。为了降低污染,提高能源转换效率,大力发展高运行参数的超超临界火电机组技术成为解决这一矛盾的关键途径。然而,火电机组运行参数的提高势必会对机组部件材料的使用性能提出更高的要求[1,2]。在这一背景下,耐热钢的成分优化设计成为开发性能更优的新型超超临界用钢的主要途径。

CB2 钢作为新一代铁素体耐热钢的代表型钢种,是在 X12CrMoWVNbN10-1-1 钢的基础上通过引入 1%的 Co 元素开发而来的。目前,CB2 钢已经应用于超超临界蒸汽参数条件下汽缸、阀门等汽轮机高温部件材料的生产,并成为了 625 ℃超超临界机组铸件的理想材料[3-5]。一些学者研究发现[6,7],Co 在铁素体耐热钢中的作用主要是扩大了奥氏体相区,并降低钢的 Ms 点,从而使耐热钢在回火后的微观组织为全马氏体。Fujita[8]曾发现 Co 可以抑制高铬铁素体钢在高温淬火下 δ–铁素体的形成。δ–铁素体的形成会减少板条马氏体的数量,降低位错密度。同时,一部分 MX 型析出相也会在 δ–铁素体内部析出,减少了马氏体内部碳化物的数量,弱化了 MX 相的析出强化作用。TODA[9]对 15Cr-3W 钢进行了 Co 元素的成分优化,发现 Co 元素的加入能降低短期蠕变速率,增加短期蠕变强度。

综上,Co 元素的加入能够有效改善耐热钢的使用性能,而目前对 Co 含量的成分优化缺乏系统研究。国内外对于 Co 元素在铁素体耐热钢中的研究主要集中在对传统耐热钢高温蠕变前后的微观组织

收稿日期:2018-09-06
基金项目:国家大学生创新实验项目(171106)资助
作者简介:白玉洁(1997-),河北沧州人,本科生.研究方向:新型耐热钢.电话:13032499365,
E-mail:13032499365@163.com
通讯作者:刘　越(1960-),辽宁沈阳人,博士,教授.研究方向:新型耐热钢,金属基复合材料研究.
电话:024-83682551,Email:dbdx555@163.com

观察上，关于 Co 含量对 CB2 钢组织和性能影响的研究却鲜有报道。在这一背景下，本文在 CB2 钢的基础上进一步优化 Co 含量，结合室温力学性能的检测结果，观察 Co 含量对 CB2 钢微观组织和力学性能的影响规律，并分析其影响机制，揭示 CB2 钢中 Co 元素的作用机理，为开发性能更优的耐热钢材料提供一定的理论指导。

1 实验材料及方法

在 CB2 钢的基础上调整 Co 含量，分别为 1.0%、3.0%和 6.0%。采用真空感应熔炼炉制得不同 Co 含量的试验钢，在 1 600 ℃下浇注成楔形试块，尺寸如图 1 所示。在试块底部取金相和拉伸试样。试验钢化学成分如表 1 所示，热处理工艺是 1 100 ℃保温 2 h 后空冷，730 ℃回火 2 h 后炉冷。

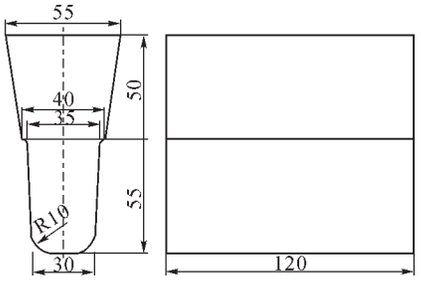


图 1 楔形试块尺寸
Fig.1 Size of wedge-shaped block

室温拉伸实验按照《GB/T 228.1-2010 金属材料拉伸试验》的标准在 SANS 万能试验机上进行，拉伸试样平行段的直径为 5 mm，标距为 25 mm。拉伸的应变速率为 0.8 mm/min。硬度检测采用 HBS3000 数显布氏硬度计，选用 10 kg 载荷，测量时间为 5 s。进行硬度检测，在每个实验钢表面沿一个方向各打5个点，取各点硬度的平均值为该实验钢的硬度。

采用扫描电子显微镜(SEM)观察断口缩颈的大小、裂纹源的走势以及断口韧窝的尺寸等；采用 XRD 衍射分析 CB2 钢中的组成；采用 Thermo-Calc 热力学计算软件和铁基数据库 TCFE6 计算出实验钢在不同温度下的相组成。

2 实验结果

2.1 Co 含量对 CB2 钢拉伸性能的影响

拉伸性能通常可以作为钢的性能指标之一。图 2 为不同 Co 含量 CB2 钢的室温拉伸性能曲线。可见，随着 Co 含量的增加，试验钢的抗拉强度从 793 MPa 增加到 840 MPa，屈服强度从 613 MPa 增加到 646 MPa。当 Co 含量从 1.0%上升到 3.0%时，强度值增大更为明显，延伸率值随 Co 含量的变化值并不明显。断面收缩率先增加后降低，添加 3.0% Co 的 CB2 钢的断面收缩率最高。因而 Co 含量为 3.0%时，实验钢的强度和塑性较高，综合力学性能较好。

拉伸断口形貌可用来观察钢在受载荷作用下的微观形态。图 3 为不同 Co 含量 CB2 钢断口形貌的 SEM 图像。塑性断裂的本质是基体组织与第二相粒子界面在拉应力的作用下破裂形成裂纹、裂纹不断延展最终导致材料断裂失效。韧窝的开口尺寸越大，数目越多，则材料的塑性越好，强度越低。从图 3(a)中可以看出试验钢断口有很明显的缩颈，且裂纹呈米字型分布。观察各试样断口，不同 Co 含量试验钢的拉伸断口均为韧性断裂，断口中的韧窝尺寸、大小

表1 实验用CB2钢化学成分 w(%)
Tab 1 Chemical compositions of testing CB2 steels

钢	C	S	Mn	P	Si	Ni	Cr	Mo	V	Nb	N	Co	B	Fe
1.0%Co	0.110	0.000 9	0.506	0.009	0.009	0.209	9.25	1.537	0.191	0.060	0.02	1.120	0.009 0	余量
3.0%Co	0.137	0.000 8	1.283	0.012	0.469	0.300	9.31	1.512	0.187	0.089	0.03	2.987	0.007 5	余量
6.0%Co	0.148	0.001 0	1.358	0.008	0.358	0.310	9.76	1.539	0.179	0.078	0.26	6.035	0.008 6	余量

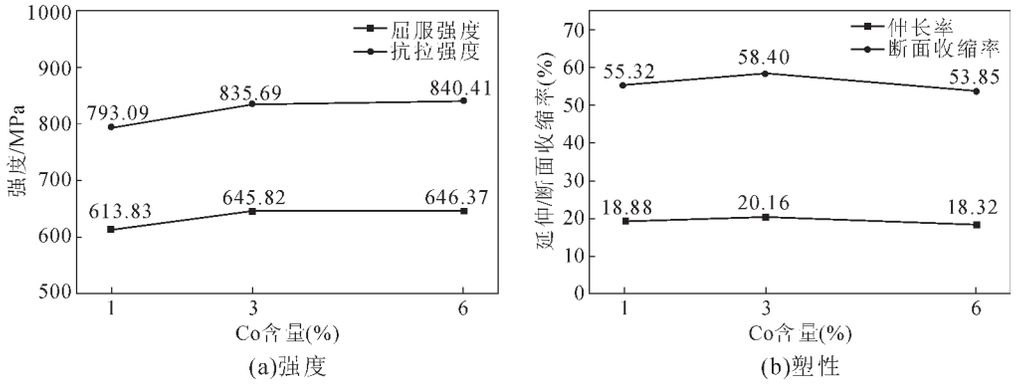
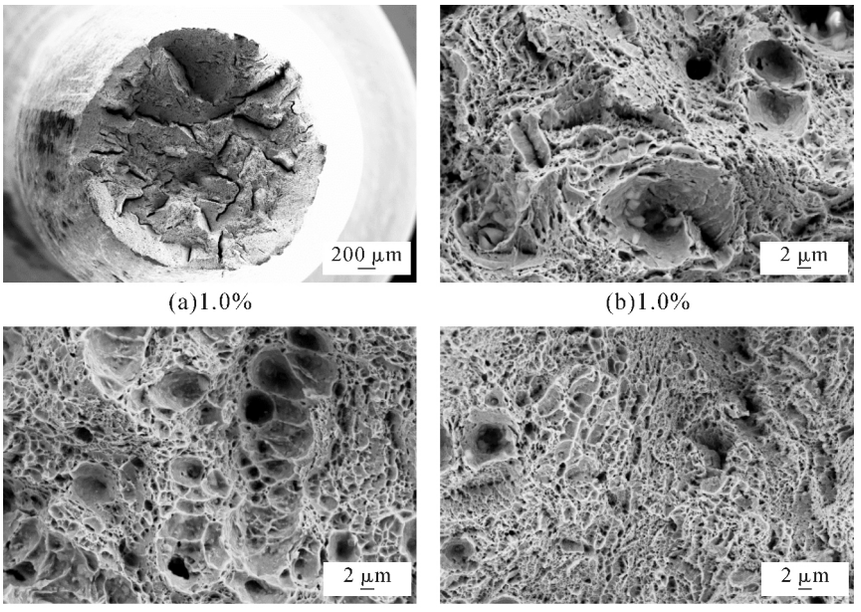


图 2 不同 Co 含量 CB2 钢室温拉伸性能
Fig.2 Tensile properties of CB2 steel with different Co content at room temperature



(a)1.0%　(b)1.0%　(c)3.0%　(d)6.0%

图 3　不同 Co 含量 CB2 钢的拉伸断口形貌

Fig.3　Tensile fracture morphology of CB2 steel with different Co content

以及分布有明显的差异。1.0%Co 试验钢中韧窝开口尺寸较大，深度较深，说明该试验钢塑性较好；当 Co 含量上升到 3.0%时，组织中韧窝开口尺寸虽有所减小，但是韧窝数量增加较多，对比拉伸试验结果可知，此时试验钢的塑性有少量的增加；继续增加 Co 含量至 6.0%，韧窝开口尺寸以及数量有明显的减少，这是由于该试验钢的强度较高，伸长率降低所导致的。

2.2　Co 含量对 CB2 钢布氏硬度的影响

图 4 给出了 CB2 钢的室温布氏硬度值随着 Co 含量的变化曲线。可见 Co 含量增加使得试验钢的硬度值逐渐增加，6.0%Co 试验钢硬度值高达 343 HB，比 1%Co 硬度值增加约 37%。硬度是衡量金属强度的重要指标，硬度越大，金属抵抗塑性变形的能力也就越大，强度也就增加。材料的硬度变化从一方面可以反映材料内部组织的变化。影响硬度的因素包括晶粒大小、固溶的合金含量等。Co 含量的增加对硬度的提高可能是其固溶于基体带来的固溶强化作用所造成的。

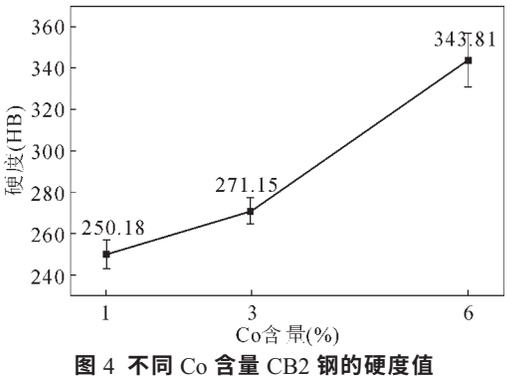


图 4　不同 Co 含量 CB2 钢的硬度值

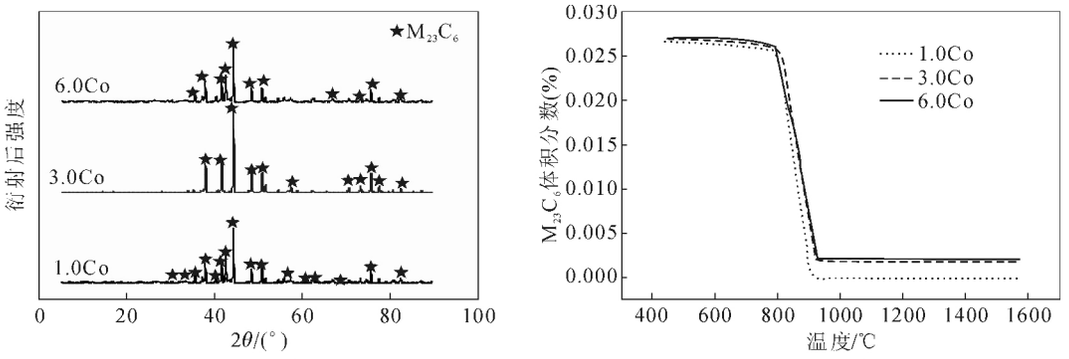
Fig.4　Hardness values of CB2 steels with different Co content

3　分析和讨论

Co 是已知的唯一一种能够提高钢的居里点的元素，有利于保持钢的铁磁性及较高的扩散能垒[10]，其强化作用主要是通过降低钢中固溶元素的扩散能力实现的。因此，钢中 Co 的加入能够显著影响析出相的析出行为，从而影响实验钢的力学性能。对不同 Co 含量的实验钢进行析出相的电解萃取，获得混合析出相粉末，并做 XRD 进行物相分析，分析结果如图 5（a）。在不同 Co 含量的实验钢中只检测到了 $M_{23}C_6$ 相对应的衍射峰。$M_{23}C_6$ 相是一种富含 Cr 的碳化物，其主要分布在原奥氏体晶界和板条界上，能够对晶界和板条界起到钉扎作用。借助 Thermo-Calc 热力学分析软件对不同 Co 含量的 CB2 钢中析出的 $M_{23}C_6$ 相的体积分数进行计算，结果如图 5（b）所示。可见，常温下 3 种 Co 含量的试验钢中的 $M_{23}C_6$ 总体积分数无较大差异。因此，可以认为 CB2 钢中 Co 含量的变化对钢中析出相的种类及体积分数影响较小。

对不同 Co 含量实验钢中析出相的平均尺寸进行统计，结果如图 6 所示。3.0%Co 试验钢析出相的尺寸分布最为集中且平均尺寸最小，1.0%Co 试验钢中析出相尺寸分布较为分散，大尺寸的析出相数量较多，平均颗粒尺寸也较大。通过对比发现，提高 CB2 钢中 Co 含量能够减小基体中的析出相尺寸，使 $M_{23}C_6$ 相分布的更加均匀和细小。

图 7 所示为不同 Co 含量的 CB2 钢的晶界腐蚀



(a)XRD谱图　　(b)$M_{23}C_6$相体积分数

图 5 不同 Co 含量 CB2 钢中的 XRD 谱图和 $M_{23}C_6$ 相体积分数

Fig.5 Volume fraction of $M_{23}C_6$ phase in CB2 steel with different Co contents

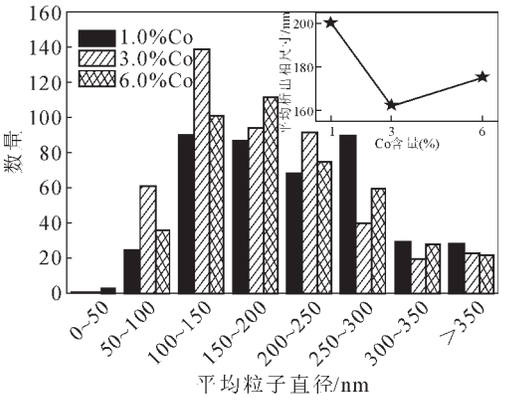
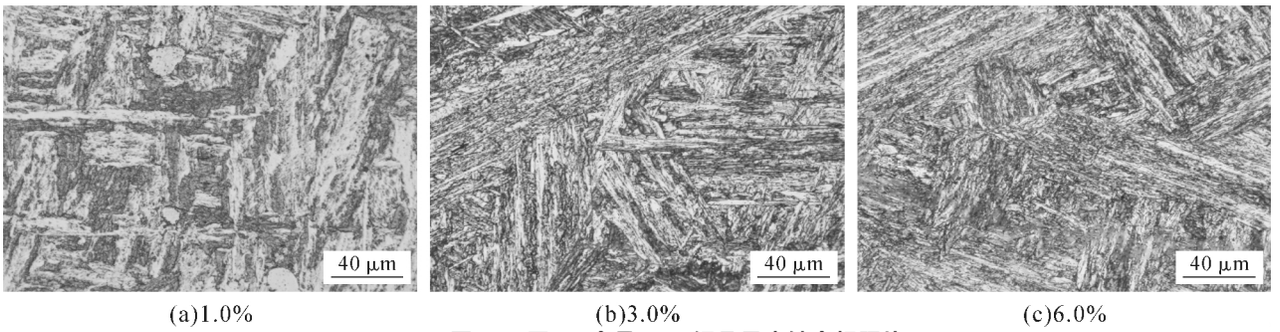


图 6 不同 Co 含量 CB2 钢析出相尺寸分布

Fig.6 Precipitation Size distribution of different Co Content CB2 Steal

金相照片，可以看出随 Co 含量的增加，板条数目随之增加。在 3%Co 的钢中，马氏体板条界面清晰，板条宽度适中。在析出相总体积分数恒定的情况下，马氏体板条为析出相的形核过程提供了更多的形核位点，因此析出相得以在尺寸较小的情况下，均匀弥散地分布于晶界和板条界；而在 6%Co 的钢中，马氏体板条过于细密，析出相会一定程度上因为形核点过于密集而共同形成较大的晶核，导致平均尺寸提高。结合以上分析，可以得出 3.0%Co 的添加使得 CB2 钢中析出强化效果有明显的增强，从而提高试验钢的力学性能。

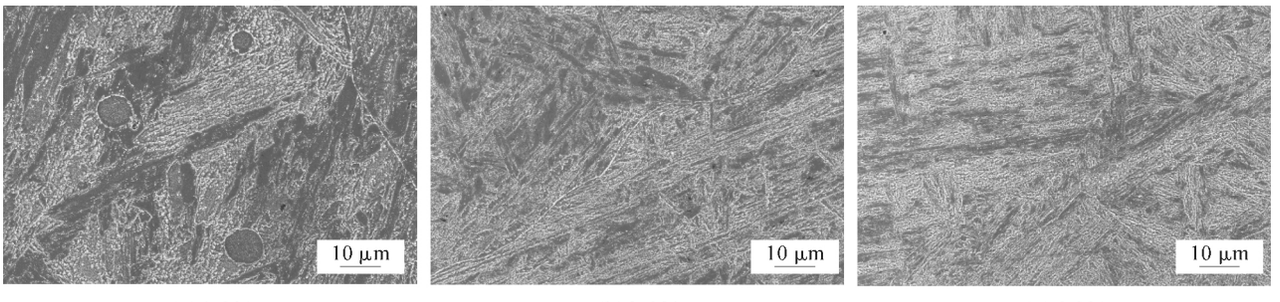
微观组织往往是决定钢性能的重要因素。图 8 是添加不同 Co 含量后 CB2 钢的微观组织，1.0%Co 钢中有大量的 δ-铁素体，其形貌大致呈圆形且周围有大量的析出相形成。当 Co 含量上升到 3.0%时，基体组织中 δ-铁素体全部消失，原因是 Co 的加入提高了钢中的铬当量。δ-铁素体是一种具有较低位错密度的组织结构，由于其周围有大量的析出相形成，必然会降低基体中的析出相含量，从而降低析出强



(a)1.0%　　(b)3.0%　　(c)6.0%

图 7 不同 Co 含量 CB2 钢晶界腐蚀金相照片

Fig.7 Microtsructure of grain boundary corrosion of CB2 steels with different Co contents



(a)1.0%　　(b)3.0%　　(c)6.0%

图 8 不同 Co 含量 CB2 钢的显微组织

Fig.8 Microstructure of CB2 steel with different Co content

化效果[11]。另外，δ-铁素体作为一种软相，其硬度与基体马氏体硬度相差较大，其存在会导致实验钢硬度值降低，因此，1.0%Co 试验钢的硬度较低。

3　结论

（1）CB2 钢中 Co 含量由 1%增加至 6%，抗拉强度由 793 MPa 增加至 840 MPa，屈服强度由 613 MPa 增加至 646 MPa，伸长率和断面收缩率先增加后降低。试验钢拉伸断口的断裂方式均为韧性断裂，3.0%Co 试验钢的综合力学性能较好。

（2）CB2 钢中 Co 元素的增加能够有效抑制 δ-铁素体的形成。当 Co 含量为 3%时，CB2 钢能够获得全马氏体组织；Co 含量的提高能够细化基体中 $M_{23}C_6$ 相的尺寸，提高析出相的析出强化效果，是提高材料力学性能的主要原因。

参考文献：

[1] 林伯强. 2010 中国能源发展报告 [M]. 北京：清华大学出版社, 2010.

[2] 田宇，彭建强，魏双胜，等. 我国超超临界汽轮机用高温铸件材料发展趋势[J]. 大型铸锻件, 2016(1): 1-5.

[3] Kasl J, Jandová D. Metallography of CB2 Steel Used for Cast Turbine Components [J]. Materials Science Forum, 2014,782: 179-185.

[4] 周斌，高振桓，李清松，等. 超超临界汽轮机转子 FB2 材料性能及蠕变组织演化规律研究[J]. 东方汽轮机，2016(1)：42-49.

[5] MikmekováŠ, Kasl J, Jandová D, et al. A new approach to studying cast CB2 steel using slow and very slow electrons [J]. TranferInovací, 2012, 22: 161-165.

[6] Wang S S, Chang L, Wang L, et al. Microstructural stability and short-term creep properties of 12Cr-W-Mo-Co steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015,622: 204-211.

[7] Masuyama F. 12Cr-2.6W-2.5Co-0.5Ni-V-Nb steel[M]. Creep Properties of Heat Resistant Steels and Superalloys. Springer Berlin Heidelberg, 2004: 200-203.

[8] Fujita T. Current progress in advanced high Cr ferritic steels for high-temperature applications [J]. ISIJ international, 1992, 32(2): 175-181.

[9] Helis L, Toda Y, Hara T, et al. Effect of cobalt on the microstructure of tempered martensitic 9Cr steel for ultra-supercritical power plants[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009,510: 88-94.

[10] Gustafson A, Agren J. Possible Effect of Co on Coarsening of $M_{23}C_6$ Carbide and Orowan Stress in a 9% Cr Steel[J]. ISIJ International, 2007,41(4):356-360.

[11] Maruyama K, Sawada K, Koike J. Strengthening mechanisms of creep resistant tempered martensitic steel [J]. ISIJ international, 2001, 41(6): 641-653.

2019年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志，月刊，1979年创刊，中国铸造协会会刊，国内外公开发行，国内邮发代号：52-64，国外发行号：M855，中国标准刊号：ISSN1000-8365/CN61-1134/TG。

报道范围：报道国内外铸造领域的先进科技成果、应用技术、生产管理经验及信息和铸造设备，覆盖铸铁、铸钢和有色合金等铸造领域，包括砂型铸造以及熔模铸造、金属型铸造、消失模铸造和压铸等特种铸造技术。

主要栏目：试验研究、工艺技术、生产技术、特种铸造、装备技术、实用成型技术、材料改性、材料开发、材料保护及表面工程、材料失效分析、应力控制与理化测试技术、今日铸造等。

发行对象：国内外铸造企业，科研院所，高等学校，铸造原辅材料厂商，设备、仪器厂商，铸件采购商等。

广告范围：刊登铸造原辅材料、铸造设备、熔炼设备、热处理设备、环保设备、检测仪器以及铸件生产、科研成果转让、企业形象宣传等相关广告。

订阅方式及价格：

请从当地邮局订阅，也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年12期，每期定价18元，平寄全年216元（含邮费），挂号全年252元，快递全年336元。中国香港、澳门：每期定价36HKD，全年432HKD。

海外：每期定价18美元，全年216美元。

银行汇款：

户　名：陕西铸造技术杂志社有限责任公司

账　号：3700 0235 0920 0091 309

开户行：中国工商银行西安市互助路支行

微信扫一扫 信息快知道

邮购地址：西安市金花南路5号西安理工大学608信箱（710048）

联系人：李巧凤　　电话/传真：029-83222071

网址：www.zhuzaojishu.net　　E-mail：zzjsyz@vip.163.com