

文章编号:1000-582X(2011)01-072-05

锋利度持久刀剪用 4Cr10Si2 马氏体不锈钢的研制

李远睿, 邓丽萍, 辉志强, 王书珍

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要:在简介了国内外刀剪材料的发展现状后,根据钢的合金化原理和 Schaeffler 图设计出了 4Cr10Si2 钢的化学成分。试验制备出 6 mm 厚的 4Cr10Si2 钢板材并进行了退火。在对此板材进行了硬度、金相组织、室温拉伸、EBSD 分析等测试后,进行了热处理工艺试验,确定了制作厨用切刀的热处理工艺参数范围。以其较佳热处理工艺制度处理出的试样作了抗弯强度及抗电化学腐蚀性能的对比试验,用该钢制成了厨用切刀。对刀具进行质量检测 and 试用结果表明,除抗电化学腐蚀性能指标 E_{corr} 和 I_{corr} 略低于 4Cr13 钢外,其余各项性能均优于此钢种。

关键词:锋利;持久;刀剪;马氏体;不锈钢

中图分类号: TG335.1

文献标志码: A

The development of martensitic stainless steel 4Cr10Si2 for durable knives and scissors

LI Yuan-rui, DENG Li-ping, HUI Zhi-qiang, WANG Shu-zhen

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: After introducing the development of knife and scissor materials at home and abroad, the chemical composition of 4Cr10Si2 steel is designed according to the steel alloying principle and Schaeffler diagram. Then 4Cr10Si2 steel sheet with the thickness of 6 mm is prepared. After the tests of hardness, microstructure, tensile property and EBSD, etc., heat treatment test of the steel sheet is carried out and the heat treatment parameters of making kitchen knives and scissors are confirmed. Then, after the bending strength and resistance electrochemical corrosion tests by using the samples treated with optimum heat treatment process, the steel is made into kitchen knives. The testing and trial show that 4Cr10Si2 steel has better performance than 4Cr13 except slightly lower E_{corr} and I_{corr} .

Key words: sharpness; durable; knives and scissors; martensite; stainless steel

为弥补 3Cr13 和 4Cr13 钢制作的刀剪锋利度持久性不及中碳及中碳低合金钢刀剪的不足, Calliari 等进行了研究^[1], 但其合金化思路均是以遵从 n/8 原理^[2]为前提, 在提高钢的含碳量的同时提高铬的含量, 并添加少量的 Mo、W 和 V 等强碳化物形成元素, 如法国澎湃奇斯钢铁公司的 T5Mo、T5MoV、

T6MoV、T7Mo 和 T9Mo, 国内黄山特钢厂生产的 4Cr13Mo、5Cr13MoV、6Cr13Mo、7Cr17Mo、8Cr13MoV 和 8Cr17Mo 等^[3]。显然, 这种合金化路线会消耗更多的铬资源并提高钢的成本。

Si 为铁素体形成元素, 能强化钢的基体, 提高钢的强度、硬度及耐蚀性^[4], 对钢的抗高温氧化有良好

收稿日期: 2010-08-16

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC 2006AC4021)

作者简介: 李远睿(1946-), 男, 重庆大学教授, 主要从事金属材料热处理、金属材料加工、表面工程等研究。

(Tel)023-65103625; (E-mail)65103625@163.com。

的作用,且资源丰富,价格低廉,对人体无害,是铁锅材料中不可缺少的合金元素之一。但 Si 含量超过 4%,将使热加工变得困难^[5]。再由 Schaeffler 图^[6]知,1%Si 相当于 1.5%Cr。于是,向 4Cr13 钢内添加约 2%的 Si,将 Cr 降至 10%,设计出了 4Cr10Si2 钢。

随后,制备出了 6 mm 厚的热轧退火 4Cr10Si2 钢板材。在对该材料做了全面的试验和分析后,进行了热处理工艺试验,确定了用以制作厨用切刀的热处理规范。最后,用 4Cr10Si2 钢制成了锋利度持久性显著优于 4Cr13 钢的厨用切刀。从而,开创了马氏体不锈钢合金化的新途径。

1 冶金过程

设计出 4Cr10Si2 钢的基本成分如表 1 所列,其余微量元素含量与 4Cr13 钢相同。

表 1 4Cr10Si2 钢的设计化学成分

元素	C	Cr	Si
质量分数/%	0.40~0.50	9.5~10.5	1.7~2.5
元素	Mn	P	S
质量分数/%	≤0.70	≤0.035	≤0.03

按下面技术路线制成 6 mm 厚的 4Cr10Si2 钢热轧退火板材:

配料 → 500 kg 中频炉熔炼 → 电渣重熔 → 精锻开坯 → 退火 → 热轧成 6 mm 的板材 → 退火。前 3 步工作在重庆钢研所完成,后 5 步则完成于重庆东华特钢厂。

2 材料试验与分析

2.1 化学成分

用直读光谱和碳硫自动分析仪,测定出制得的热轧退火板材的实际化学成分如表 2 所列。

表 2 制备的 4Cr10Si2 钢板材的实际化学成分

元素	C	Cr	Si	Mn
质量分数/%	0.43	10.2	2.10	0.52
元素	P	S	其余	
质量分数/%	0.021	0.012	微量	

对照表 1 知,所制备的材料成分符合设计要求。

2.2 金相组织

在 TD 方向取样,研磨抛光后用 4% HF + 4% HNO₃ + 92% H₂O 溶液侵蚀,获得该热轧退火 4Cr10Si2 钢的金相组织照片如图 1 所示,其组织为铁素体基体上分布着细粒状碳化物。

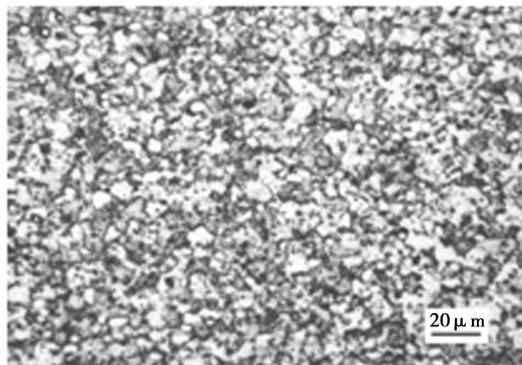


图 1 热轧退火 4Cr10Si2 扁钢的金相组织

2.3 EBSD 分析

用线切割切取待分析面(RD-ND),使其截面积为 1 cm²,研磨后,用 10% HClO₄ 酒精溶液电解抛光,制成 EBSD 分析样^[7]。分析得到 4Cr10Si2 钢的退火组织如图 2,取向差分布图如图 3。由图 2-3 可见,晶粒基本为细小等轴晶,平均尺寸 3.2 μm,位向差多在 15° 以上,取向无明显集中现象,故退火较充分^[8]。

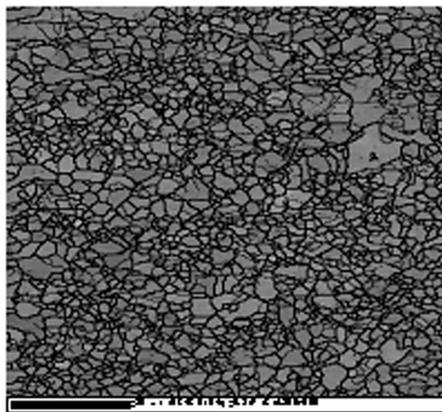


图 2 4Cr10Si2 钢的退火组织图

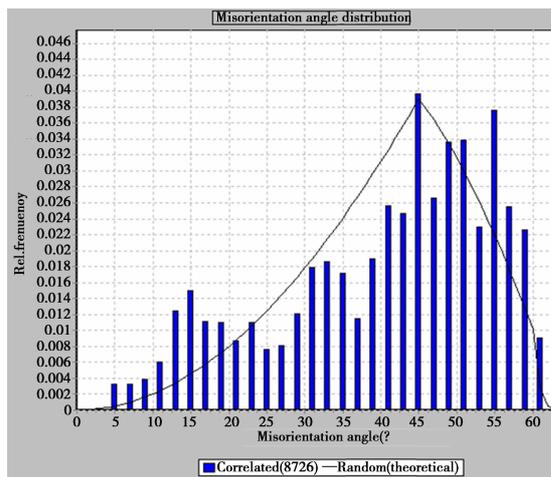


图 3 取向差分布图

2.4 力学性能

将退火 4Cr10Si2 板材按 GB/T2975—1998 标准规定加工成拉伸试样,在 CMT5105 型材料试验机上按 GB/T228—2002 标准进行拉伸试验,用 HB300B 型布氏硬度计测定其硬度,结果如表 3 所列。

表 3 6 mm 厚热轧退火 4Cr10Si2 钢板材拉伸性能及硬度

σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	ψ /%	硬度 HB
785.6	542.2	21.5	43.74	243

拉伸断口附近有颈缩现象,且 $\psi > \delta$,表明材料塑性较好^[9]。此外,该钢的强度指标和硬度值均较高,这与钢内含硅有关^[10]。

2.5 断口 SEM 分析

对拉伸试样的断口作了 SEM 分析。图 4-6 分别为剪切唇区、放射区和中部纤维区的 SEM 形貌,均呈现较好的韧性断裂特征,这与拉伸试验结果相符。

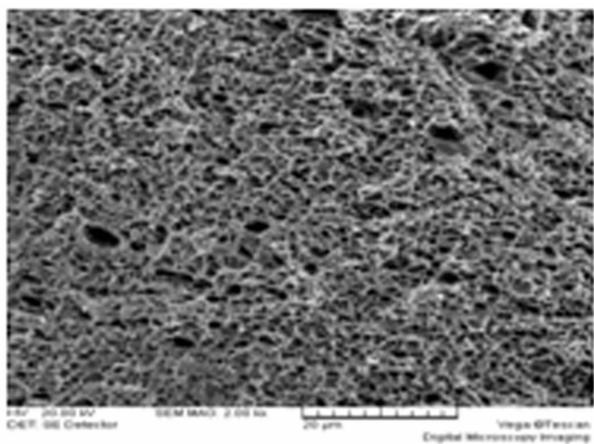


图 4 剪切唇区 SEM 形貌

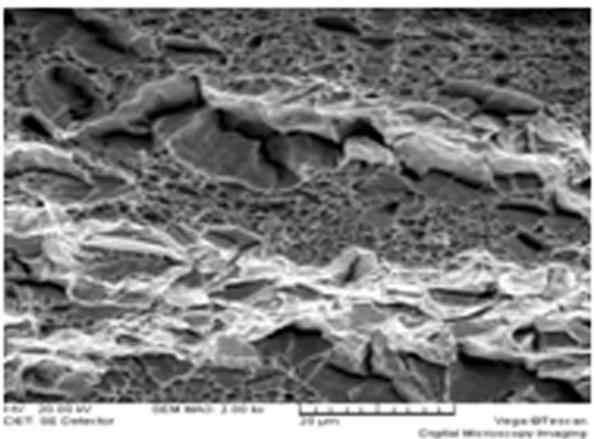


图 5 放射区 SEM 形貌

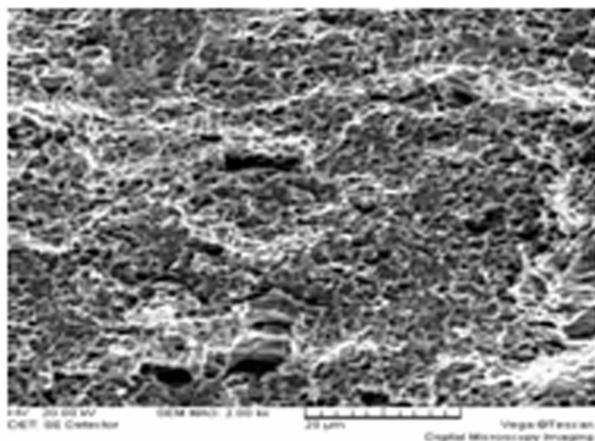


图 6 断口中部纤维区 SEM 形貌

2.6 高温氧化试验

将尺寸同为 40 mm × 40 mm × 6 mm 的 4Cr10Si2 钢和 4Cr13 钢试片磨光去脂并清洗干净,用万分天平称重后,在 800~1150 °C 的空气炉内每隔 50 °C 加热,并保温 15 min 后取出空冷至室温,对各加热试样称重,计算出各样品单位面积增重并将结果列于表 4 内。

表 4 4Cr10Si2 钢和 4Cr13 钢高温氧化增重试验结果 mg/mm²

加热温度/°C	800	850	900	950
4Cr10Si2	0.003 4	0.007 2	0.013 8	0.023 4
4Cr13	0.011 1	0.066 2	0.086 0	0.103 7
加热温度/°C	1 000	1 050	1 100	1 150
4Cr10Si2	0.078 3	0.113 8	0.273 9	0.329 5
4Cr13	0.358 6	0.508 0	0.095 0	0.739 6

由表 4 可知,4Cr10Si2 钢的抗高温氧化性能明显优于 4Cr13 钢。显然,这是该钢含有 Si 所致^[11-12]。

3 热处理工艺试验

3.1 淬火试验

参考 4Cr9Si2、4Cr10Si2Mo 和 4Cr13 3 种钢的物理常数,将 4Cr10Si2 钢的淬火温度区间定为 950~1 100 °C。用 6 mm 厚的小试样经 600~700 °C 预热后在高温箱式炉中加热 8 min 取出淬油,磨去表层约 0.15 mm,测其洛氏硬度(HRC),结果如表 5 所示。由表 5 可知,4Cr10Si2 钢在 1 060 °C 加热淬火后,硬度达到峰值。

表 5 4Cr10Si2 钢淬火温度与硬度关系

温度/℃	950	1 000	1 020	1 030	1 010
硬度(HRC)	46.5	55.6	56.8	58.4	59.2
温度/℃	1 050	1 060	1 070	1 080	1 100
硬度(HRC)	60.7	61.2	60.8	59.4	58.2

3.2 回火试验

用 1 060 ℃ 淬火试样作回火试验。回火温度范围定为 160~360 ℃,每隔 20 ℃ 取一个回火温度点,回火后空冷至室温,测其硬度并入表 6 内。显然,4Cr10Si2 钢有较好的回火稳定性。

表 6 4Cr10Si2 钢 1060℃ 淬火后回火温度与硬度关系

温度/℃	160	180	200	220	240	260
硬度(HRC)	61.0	60.7	60.2	59.8	59.1	58.6
温度/℃	280	300	320	340	360	
硬度(HRC)	57.8	57.4	56.8	56.2	55.8	

4 弯曲与电化学性能

4.1 弯曲试验

将 4Cr13 钢和 4Cr10Si2 钢均加工成 5 mm×7.5 mm×120 mm 的弯曲力学性能试样各 3 件,均于 1 060 ℃ 淬火+200 ℃ 回火后,在 CMT5105 型材料试验机上按 GB/T14452—1993 标准进行弯曲试验,结果如表 7 所列。

表 7 4Cr13 钢和 4Cr10Si2 钢弯曲力学性能试验结果

钢种	弯曲弹性模量	抗弯强度	断裂挠度
	E_b /MPa	σ_b /MPa	f_b /mm
4Cr13	260.4	3023	9.40
4Cr10Si2	318.3	3360	8.99

4.2 电化学试验

因厨用切刀需要高硬度、高耐磨性,一定的韧性和良好的耐蚀性能^[13],通常采用淬火+低温回火热处理^[14-15]。故将 4Cr10Si2 钢和 4Cr13 钢试片于 1 060 ℃ 加热淬火,再 200 ℃ 低温回火后制成腐蚀电极,用 AMETEK Princeton Applied Research 公司生产的 273A/5210 型电化学性能测试仪,测得这两种钢的腐蚀电位 E_{corr} 和腐蚀电流 I_{corr} 如表 8 所示。

表 8 4Cr10Si2 和 4Cr13 钢在 3.5% NaCl 水溶液中的 E_{corr} 值和 I_{corr} 值

钢种	E_{corr} (V/SCE)	I_{corr} ($\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)
4Cr10Si2	0.086	2.7×10^{-9}
4Cr13	0.194	1.3×10^{-9}

表 8 中的数据说明,4Cr10Si2 钢抗电化学腐蚀性能略逊于 4Cr13 钢。

5 锋利度持久性对比

将 4Cr13 钢和 4Cr10Si2 钢按重庆地方标准 DB50/T—2007(菜刀)制成相同型号的厨用切刀,热处理后刃口均开成 7.2N-7.5N 的锋利度,作切牛肉对比试验^[16]。结果显示:4Cr10Si2 钢刀平均每把切 48.4 kg 牛肉片后需修磨,而 4Cr13 钢刀每把平均仅切 8.6 kg 牛肉片后就需要修磨,这表明 4Cr10Si2 钢制厨用切刀的耐磨性能及锋利度持久性显著优于 4Cr13 钢。

6 结 论

1) 4Cr10Si2 钢抗高温氧化性能显著优于 4Cr13 钢,并具有良好的回火稳定性。

2) 4Cr10Si2 钢除电化学腐蚀性能略逊于 4Cr13 钢外,其余各项性能均能很好地满足制作刀剪对材料性能的需求。

3) 因硅对钢基体的强化作用,由 4Cr10Si2 钢制作的厨用切刀有优良的锋利度持久性。

参考文献:

- [1] CALLIARI I, ZANESCO M, DABALÁ M, et al. Investigation of microstructure and properties of a Ni-Mo martensitic stainless steel[J]. Materials & Design, 2007,29(1):246-250.
- [2] 肖纪美. 不锈钢的金属学问题 [M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
- [3] XI Y, LIU D, HAN D. Improvement of corrosion and wear resistances of AISI 420 martensitic stainless steel using plasma nitriding at low temperature[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202 (12):2577-2583.
- [4] FU R K Y, TANG D L, WAN G J, et al. Enhancement of corrosion resistance of AISI 420 stainless steels by nitrogen and silicon plasma immersion ion implantation[J]. Surface and Coatings Technology, 2007,201(9/11):4879-4883.
- [5] XI Y, LIU D, HAN D. Improvement of corrosion and wear resistances of AISI 420 martensitic stainless steel using plasma nitriding at low temperature[J]. Surface and Coatings Technology,2008, 202 (12):2577-2583.
- [6] YANG Y, YANG C, LIN S. Effects of Si and its content on the scale formation on hot-rolled steel strips [J]. Materials Chemistry and Physics,2008,112(2):566-571.
- [7] CRAIG C H, FRIEND C M, EDWARDS M R, et al. Mechanical properties and microstructure of platinum enhanced radiopaque stainless steel (PERSS) alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2003, 361 (1/2):

- 187-199.
- [8] 李华清,谢水生,阎允杰,等.取向成像电子显微术试样的制备[J].理化检测,2004,40(12):612-616.
LI HUA-QING, XIE SHUI-SHENG, YAN YUN-JIE, et al. Preparation of orientation imaging electron microscopy sample[J]. Physical and chemical testing, 2004, 40(12):612-616.
- [9] CHEN X H, LU J, LU L, et al. Tensile properties of a nanocrystalline 316L austenitic stainless steel [J]. Scripta Materialia, 2005, 52(10):1039-1044.
- [10] CAI M H, DING H, ZHANG J S. Transformation behavior of low carbon steels containing two different Si contents[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2009,16(2):55-60.
- [11] HUNTZ A M, BAGUE V, BEAUPLE G, et al. Effect of silicon on the oxidation resistance of 9% Cr steels[J]. Applied Surface Science, 2003, 207(1/4): 255-275.
- [12] YANG Y, YANG C, LIN S. Effects of Si and its content on the scale formation on hot-rolled steel strips[J]. Materials Chemistry and Physics, 2008, 112(2):566-571.
- [13] NAKAI M, NAGAI K, MURATA Y, et al. Improvement in steam oxidation resistance of Fe-10% Cr-0.08% C steel by suppressing hydrogen dissolution [J]. Corrosion Science, 2006, 48(11):3869-3885.
- [14] CALLIARI I, ZANESCO M, DABALÁ M, et al. Investigation of microstructure and properties of a Ni-Mo martensitic stainless steel [J]. Materials and Design, 2008, 29(1):246-250.
- [15] MACHADO I F. Technological advances in steels heat treatment [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 172(2):169-173.
- [16] MARSOT J, CLAUDON L, JACQMIN M. Assessment of knife sharpness by means of a cutting force measuring system [J]. Applied Ergonomics, 2007, 38(1):83-89.

(编辑 王维朗)

(上接第 59 页)

- [6] HARDIN R A, LIU K, BECKERMANN C, et al. A transient simulation and dynamic spray cooling control model for continuous steel casting [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2003, 34(3):297-306.
- [7] WENDELSTORF J, SPITZER K H, WENDELSRORF R. Spray water cooling heat transfer at high temperatures and liquid mass fluxes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(19/20): 4902-4910.
- [8] I HERNÁNDEZ C, F A ACOSTA G, A H CASTILLEJOS E, et al. The fluid dynamics of secondary cooling air-mist jets [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2008, 39(5): 746-763.
- [9] CHEN W, ZHANG Y Z, WANG B X. Optimization of continuous casting process parameters based on coupled heat and stress model[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2010, 37(2): 147-154.
- [10] HAUSER K, DITTENBERGER K, HAHN S, et al. Dynamic 3D heat transfer simulation of continuous casting [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2009, 22(1/4): 115-118.
- [11] EI-BEALY M. Monotonic and fluctuated cooling approaches in secondary cooling zones during continuous casting [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1997, 36(1): 49-56.
- [12] GUO W, ZHU M Y. Characteristic parameters for dendritic microstructure of solidification during slab continuous casting [J]. Journal of Iron Steel Research, International, 2009, 16(1): 17-21.
- [13] HA J S, CHO J R, LEE B Y, et al. Numerical analysis of secondary cooling and bulging in the continuous casting of slabs [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113(1): 257-261.
- [14] CHEN W, ZHANG Y Z, WANG B X. Optimization of continuous casting process parameters based on coupled heat and stress model [J]. Ironmaking and Steelmaking, 2010, 37(2): 147-154.
- [15] 靳星,陈登福,王青峡,等.板坯连铸二冷喷嘴性能测试及其应用[J].过程工程学报,2008,8(z1):161-165.
JIN XING, CHEN DENG-FU, WANG QING-XIA, et al. The testing of secondary cooling nozzle characteristics for slab continuous casting and its application [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(z1):161-165.
- [16] 仲博颖,王玲,张麦仓,等.冷却速度对 Waspaloy 合金凝固过程中偏析和液体密度的影响 [J]. 北京科技大学学报,2008,30(7):760-764.
ZHONG FU-YING, WANG LING, ZHANG MAI-CANG, et al. Effect of cooling rate on the segregation and liquid density of Waspaloy alloy during solidification process [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(7):760-764.

(编辑 王维朗)