

• 组织和性能 •

Si 对半高速钢 5Cr5WMoSiV 冶金质量、组织和性能的影响

张占普^{1,3} 牛旭斐^{1,3} 迟宏宵² 马党参² 何 宁^{1,3}

(1 河冶科技股份有限公司, 石家庄 052165; 2 钢铁研究总院特殊钢研究所, 北京 100081;

3 河北省高速工具钢工程技术研究中心, 石家庄 052165)

摘 要 试验用 5Cr5WMoSiV (HYRH12) 钢(/% : 0.53C, 0.30 ~ 1.10Si, 0.35Mn, ≤0.025P, ≤0.010S, 5.30Cr, 1.30Mo, 1.20W, 0.50V) 的冶金流程为 3 t 感应炉-780 kg ESR-退火-110 mm 方坯锻材-轧制 Φ42.5 mm 棒材-Φ14 mm 轧材。研究了 0.30% ~ 1.10% Si 和 1 010 ~ 1 070 °C 淬火 + 510 ~ 550 °C 回火处理对 5Cr5WMoSiV 钢冶金质量组织和力学性能的影响。结果表明, Si 明显促进碳化物析出, 显著提高钢的硬度; 0.3%, 0.7%, 1.1% Si 钢中含 0.7% Si 钢韧性和强度最低; 而含 0.3% Si 钢, 冲击韧性和抗弯强度最高。1 060 ~ 1 080 °C 淬火, 含 1.1% Si 钢的 HRC 硬度值可达 64。用于冷轧机中间辊时, 5Cr5WMoSiV 钢合适的 Si 含量为 1.0% ~ 1.2%, 5Cr5WMoSiV 钢传统推荐的热处理工艺为 1 030 ~ 1 070 °C 淬火, 520 ~ 540 °C 回火。

关键词 5Cr5WMoSiV 钢 Si 碳化物 硬度 冲击韧性 强度

Effect of Si on Metallurgical Quality, Structure and Properties of Semi-High-Speed Steel 5Cr5WMoSiV

Zhang Zhanpu^{1,3}, Niu Xufei^{1,3}, Chi Hongxiao², Ma Dangshen² and He Ning^{1,3}

(1 Heye Science and Technology Co Ltd, Shijiazhuang 052165;

2 Institute for Special Steels, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081;

3 Hebei High Speed and Tool Steel Engineering and Technology Research Center, Shijiazhuang 052165)

Abstract The metallurgical flowsheet for tested steel 5Cr5WMoSiV (HYRH12, /% : 0.53C, 0.30 ~ 1.10Si, 0.35Mn, ≤0.025P, ≤0.010S, 5.30Cr, 1.30Mo, 1.20W, 0.50V) is 3 t induction furnace-780 kg ESR- annealing-110 mm square billet forging-Φ42.5 mm rolled bar-Φ14 mm rolled products. The effect of 0.03% ~ 1.10% Si and 1 010 ~ 1 070 °C quenching + 510 ~ 550 °C tempering treatment on metallurgical quality, structure and mechanical properties of steel 5Cr5WMoSiV has been studied. Results show that the Si is obvious to promote the precipitation of carbides in steel and markedly to increase the hardness of steel; in steels containing 0.3%, 0.7% and 1.1% Si, the toughness and strength of 0.7% Si steel are lowest, but the toughness and bending strength of 0.3% Si steel is highest; the HRC hardness value of 1.1% Si steel quenched at 1 060 ~ 1 080 °C is up to 64. As service for cold-rolling mill middle roll, the suitable Si content in steel 5Cr5WMoSiV is 1.0% ~ 1.2%, the recommended heat treatment process for steel 5Cr5WMoSiV is quenching at 1 030 ~ 1 070 °C and tempering at 520 ~ 540 °C.

Material Index Steel 5Cr5WMoSiV, Si, Carbide, Hardness, Impact Toughness, Strength

5Cr5WMoSiV 钢(简称 HYRH12)属于 Cr5 系列,由 ASTM H12 钢提高 C、V 含量,或由 ASTM A8 钢添加 0.50% 左右的 V 改进而来,在 500 °C 以上高温回火有明显的二次硬化效应,又称为半高速钢。具有 Cr5 系列热作模具钢良好的韧性和抗冷热疲劳性能、也具备冷作模具钢的较高的硬度,主要用于森吉米尔等高精度钢带多辊冷轧机的中间辊^[1-2]。河冶科技股份公司研究了不同 Si 含量对该钢的冶金质量及热处理性能的影响,开发出河冶科技高档辊坯品牌钢号 HYRH12(5Cr5WMoSiV)。

1 试样制备及试验方法

HYRH12(5Cr5WMoSiV)钢(表 1)由 3 t 中频炉同一炉先后炼出,先按 1[#]钢目标值调好各成分及 Ac

点,具备出钢条件后,浇注 2 支 1[#]钢自耗电电极;再依次按照 2[#]、3[#]钢的 Si 含量要求分别加入 SiFe 合金调整到目标值,具备出钢条件后各浇注 2 支自耗电电极。电极退火后在同一电渣臂上进行重熔,电渣锭随正常生产工艺进行退火,相同条件下锻轧退火成材,对整个过程各环节进行跟踪、检验和对比分析,研究 Si 对钢冶金工艺性能的影响,同时制备热处理和性能对比试验用的方棒、圆轧材试料。

试验工艺为 3 t IF→上注 R120 电极(400 kg)→退火→ESR Φ315 mm 锭(780 kg)→退火、探伤、修磨→SX55 精锻成 110 mm 方坯→退火、探伤、精整→430 轧机轧制 Φ42.5 mm 棒材。退火之后,部分 Φ42.5 mm 棒材经 250 轧机轧制 Φ14 mm 棒材,部分经 200 轧机轧成 13.3 mm 方的棒材,作为试验料

备用。

2 试验结果与讨论

2.1 Si 对 5Cr5WMoSiV 冶金工艺特性的影响

(1)随着 Si 含量的增加,C、Si、Cr、Mo 的波动范围增大,而 W、V 偏差变化没有规律,Si 对其影响不明显。3 种钢的 C 及合金成分基本相同,由于碳化物随 Si 含量增加,凝固时晶界的共晶碳化物数量增多,相应地基体的奥氏体晶粒内的合金元素和 C 含量降低,偏析可能减轻。钢锭心部冷速比边缘慢,碳化物析出比例大,因此,宏观上合金元素随 Si 含量提高偏析加重。

(2)气体含量,按钢水→电渣锭→方坯→棒材的工序顺序,[H]显著降低,[O]略降低,而[N]略升高。随着 Si 含量的增加,初期钢水[O]明显降低,[N]略升高,而[H]变化不大。这主要是由于 Si 是脱氧剂,随 Si 含量的提高,脱氧效果更好。后序的加热、退火都可对 H 有扩散去除的作用。

(3)Si 对重熔钢锭补缩质量没有表现出明显影响,低 Si 钢表面渣沟波纹更多,重熔补缩的质量与渣系、工艺参数关系更大,要改善缩孔问题,应从电渣重熔工艺优化着手。

(4)3 种试验钢的凝固组织大体相同,但 Si 促进液析碳化物的析出,随 Si 含量的增加液析碳化物数量增多,由低 Si 钢薄的单片状向高 Si 钢复杂化发展,出现骨骼状液析碳化物(图 1)。Si 含量最高的 3# 钢局部区域连接成环,同时莱氏体团变厚,单个共晶碳化物颗粒尺寸更大。相反基体的奥氏体晶粒内的合金元素和 C 含量降低,偏析可能减轻。热力学计算的结果,随着 Si 含量的升高 MC 和 M₆C 共晶碳化物的析出温度也略微提高,促进液析碳化物析出与总量增加,这与试验检测结果一致。

表 1 HYRH12(5Cr5WMoSiV) 钢成分范围及试验钢成分 / %
Table 1 Range of chemical composition of steel HYRH12 (5Cr5WMoSiV) and analysis of tested steel / %

试验钢	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	V
HYRH12	0.50 ~ 0.55	0.80 ~ 1.20	0.30 ~ 0.50	≤0.025	≤0.010	5.00 ~ 5.50	1.20 ~ 1.50	1.10 ~ 1.40	0.40 ~ 0.60
1#	0.53	0.30	0.35	≤0.025	≤0.010	5.30	1.30	1.20	0.50
2#	0.53	0.70	0.35	≤0.025	≤0.010	5.30	1.30	1.20	0.50
3#	0.53	1.10	0.35	≤0.025	≤0.010	5.30	1.30	1.20	0.50

(5)Si 含量不同对钢锭和方坯低温去应力退火和余热退火的珠光体转变充分程度有影响,造成超声波探伤出现组织粗大或疏松的缺陷波形假象,110 mm 方坯的低倍组织见图 2(a),显微组织见图 2(b),试样通过相变球化退火后,退火组织正常化。

基体的奥氏体晶粒内部 C 与合金元素随 Si 含量增加而降低,可能会影响不充分退火过程(铸锭、方坯的余热退火)的组织转变,在相同的不充分退火工艺条件下,钢锭、中间坯转变成珠光体的比例不同,这将影响钢锭、方坯探伤造成类似组织粗大、疏松的缺陷波形,但通过充分退火这种缺陷波在 3 种钢中都会消失。

(6)不同 Si 含量的铸态组织中都存在液析碳化物。经 SEM 的能谱分析显示,液析碳化物为 MC 型和 M₆C 型共晶碳化物。钢中还有少量夹杂物,而液析碳化物经常以夹杂物为核心共生。

(7)试验钢材退火组织,均为球状珠光体。试验钢退火组织的 SEM 图像及碳化物的能谱分析得出,钢中存在的碳化物主要为 M₂₃C₆ 和 M₆C 碳化物^[3]。

从图 3 中可以看出,试验钢轧材上纵向心部经深腐蚀后一次碳化物的分布情况和铸态组织中的分析结果相对应,随着 Si 含量的增加,钢中的一次碳化物数量增加,颗粒增大,尤其是 3# 钢,能够发现尺寸较长的一次碳化物条带。

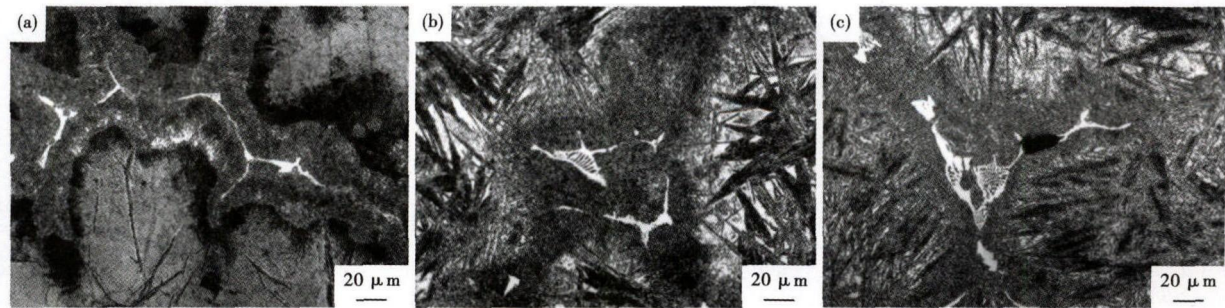


图 1 0.3% Si (a), 0.7% Si (b) 和 1.1% Si (c) 的 5Cr5WMoSiV 钢铸态液析碳化物形貌
Fig. 1 Morphology of as-cast liquid carbides in 0.3% Si (a), 0.7% Si (b) and 1.1% Si (c) steel 5Cr5WMoSiV

2.2 Si 对 5Cr5WMoSiV 热处理工艺、组织、性能的影响

采用上述制备的 1[#]、2[#]、3[#]不同 Si 含量的试验钢 13 mm 方、Φ13 mm 圆轧材,下料进行机加工,制作成淬火、淬回火、组织、硬度、晶粒度、相分析、抗弯、冲击等试样(淬火介质为油)。

(1)从图 4 中可以看出,淬火硬度随着 Si 含量的增加而逐渐增加,尤其是 Si

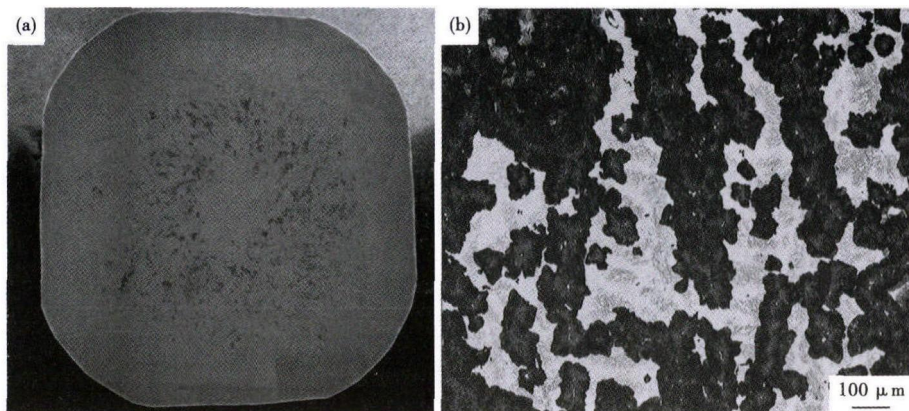


图 2 试验 5Cr5WMoSiV 钢 110 mm 方坯组织疏松低倍组织(a)和显微组织(b)形貌
Fig.2 Morphology of porosity macrostructure (a) and microstructure (b) of 110mm square billet of tested steel 5Cr5WMoSiV

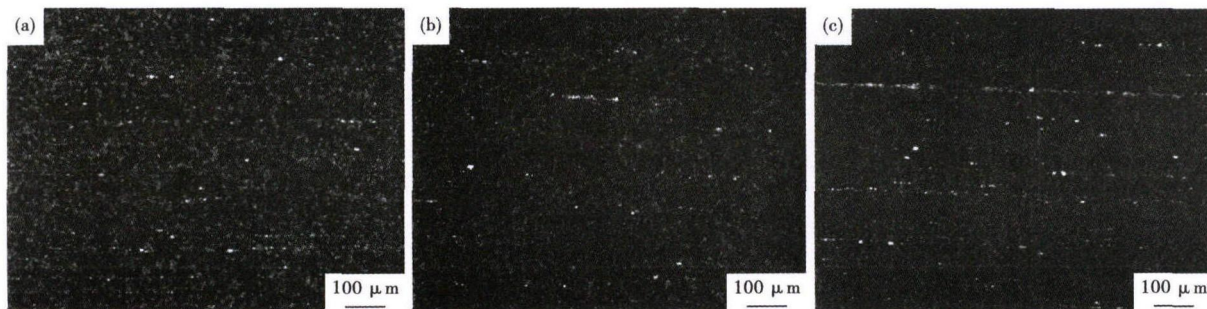


图 3 试验 0.3% Si,1[#](a),0.7% Si,2[#](b)和 1.1% Si,3[#](c)5Cr5WMoSiV 钢中一次碳化物分布
Fig.3 Distribution of primary carbides in 1[#]- 0.3% Si (a) 2[#]- 0.7% Si (b) and 3[#]- 1.1% Si (c) tested steel 5Cr5WMoSiV

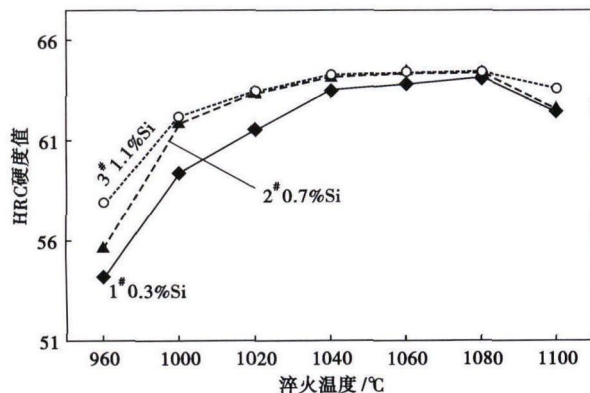


图 4 0.3% Si,0.7% Si 和 1.1% Si 5Cr5WMoSiV 钢淬火温度与硬度关系曲线

Fig.4 Relation curves of quenching temperature and hardness of 0.3% Si, 0.7% Si and 1.1% Si steel 5Cr5WMoSiV

含量较低的 1[#]钢淬火硬度明显低于 2[#]钢和 3[#]钢。在低温淬火阶段这一现象更明显,1[#]钢和 3[#]钢在 960 °C 的淬火硬度差达到 3.7 HRC。1060 ~ 1080 °C 达到淬火 HRC 硬度峰值 64 左右。淬火组织为马氏体 + 未溶碳化物,随着淬火温度的逐渐升高,溶解碳化物的含量逐渐增加,钢中固溶的合金元素含量

表 2 Si 含量对试验 5Cr5WMoSiV 钢晶粒度的影响 / 级
Table 2 Effect of Si content on rating of grain size of tested steel 5Cr5WMoSiV / rating

淬火温度/℃	1 [#] (0.3% Si) 钢	2 [#] (0.7% Si) 钢	3 [#] (1.1% Si) 钢
1 100	9	9	10
1 080	—	—	10.5
1 060	—	—	11

逐渐增加。1040 °C 淬火组织的金相和能谱显示,未溶碳化物随着 Si 含量的增加而增多。

(2)从表 2 中数据可以看出,1060 ~ 1100 °C 淬火的晶粒度均在 9 级以上,未发生混晶现象,能够保证使用条件下热处理工艺的实施。

(3)随着 Si 含量的升高,钢的回火硬度更高,二次硬化更明显。从图 5 中可以看出,当淬火温度在 1040 ~ 1080 °C 时,回火硬度峰值均出现在 500 ~ 520 °C 左右。随着淬火温度的提高,同一钢号的回火硬度逐渐增大。3[#]钢的回火硬度比 2[#]钢 HRC 值普遍提高 1.5,比 1[#]钢 HRC 值普遍提高 3.5,更容易达到轧辊要求的 HRC 硬度值 58 ~ 62,热处理范围宽。1[#]钢很难达到 HRC 值 58 以上,难以满足中间

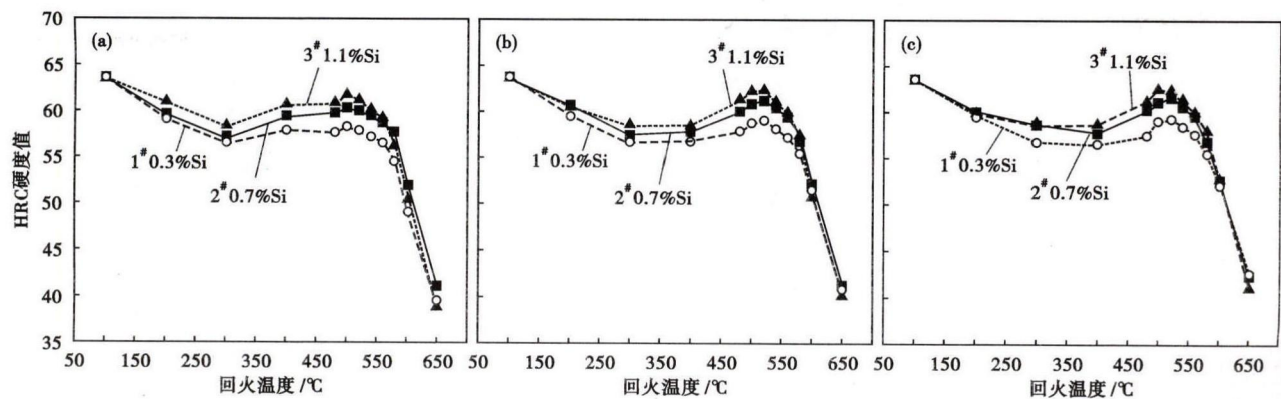


图5 (a)1040 ℃,(b)1060 ℃和(c)1080 ℃淬火时回火温度对 5Cr5WMoSiV 钢硬度的影响
Fig. 5 Effect of tempering temperature on hardness of steel 5Cr5WMoSiV quenched at 1040 ℃ (a) , 1060 ℃ (b) and 1080 ℃ (c)

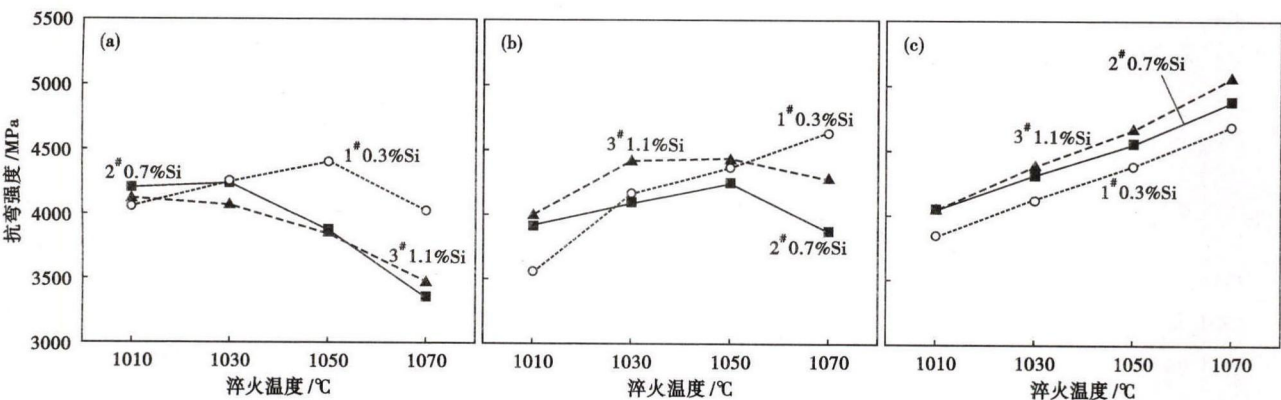


图6 淬火温度对 510 ℃(a) ,530 ℃(b)和 550 ℃(c)回火的 5Cr5WMoSiV 钢抗弯强度的影响
Fig. 6 Effect of quenching temperature on bending strength of steel 5Cr5WMoSiV tempered at 510 ℃ (a) , 530 ℃ (b) and 550 ℃ (c)

辊要求的 HRC 硬度值 58 ~ 62。当回火温度超过 580℃后,随着 Si 含量的升高硬度降低更显著,低 Si 钢显示了更好的抗回火软化性能^[4]。

(4)从图 6 中可以看出,Si 有利于提高高温回火的抗弯强度,在 530 ℃和 550 ℃回火,3[#](1.1% Si) 钢的抗弯强度明显高于 1[#]、2[#]钢。510 ℃回火,低 Si 钢显示了优异的抗弯强度性能,Si 含量增加抗弯强度降低。从图 7 中可以看出,在1010 ~ 1070 ℃淬火温度范围内,530 ℃回火可以使试验钢得到最高的强度。所有热处理制度的抗弯强度 2[#]钢最差。

(5)对不同钢号的冲击韧性进行了对比,采用 7 mm × 10 mm 无缺口试样进行冲击试验,获取冲击韧性数值,从图 7 中可以看出,1[#]钢的冲击韧性与 2[#]、3[#]钢相比有大幅提高,特别是淬火、回火温度越高越明显。综合可见,1[#]钢的冲击韧性最好,3[#]钢的韧性整体要比 2[#]钢高,且回火温度越高趋势越明显。

2.3 5Cr5WMoSiV 最优 Si 含量范围确定

研究结果表明,1[#]钢(0.03% Si) 很难满足中间辊 HRC 值 58 ~ 62 的硬度要求,2[#]钢(0.70% Si) 抗

弯强度和冲击韧性均表现最差;3[#]钢(1.1% Si) 促进液析碳化物析出,用于制作冷轧机的中间辊,热处理后硬度易达到 HRC 值 58 ~ 62 的要求,硬度最高,综合性能最佳,韧性条件对于中间辊已足够^[5]。

对缩孔缺陷的影响,并没有显示出预期降 Si 有明显改善的作用。虽然随着 Si 含量提高,钢的抗回火稳定性稍有变差,成分和组织均匀性不好,但经过加热、均质化、变形、热处理后,这些都会得到改善,差异消除。因此,最终优化的 5Cr5WMoSiV 成分 Si 的最佳范围选择为 1.0% ~ 1.2% Si。

通过研究 Si 对钢性能的影响,发现 1[#]钢的冲击韧性明显提高,抗高温回火能力好,热处理 HRC 硬度值为 54 ~ 58,适合于铝铜热挤模腔要求的硬度范围,工作温度在 500 ~ 550 ℃,可以保持高的硬度、强度和韧性,从而提高模腔使用寿命,可以解决通常 H13 硬度偏低(HRC 值 47 ~ 54)、耐磨性差的问题。

3 5Cr5WMoSiV 连续冷却曲线和热处理工艺

HYRH12(5Cr5WMoSiV) 钢 CCT 曲线,弹性模量和线膨胀系数分别见图8,表3和表4,其密度为

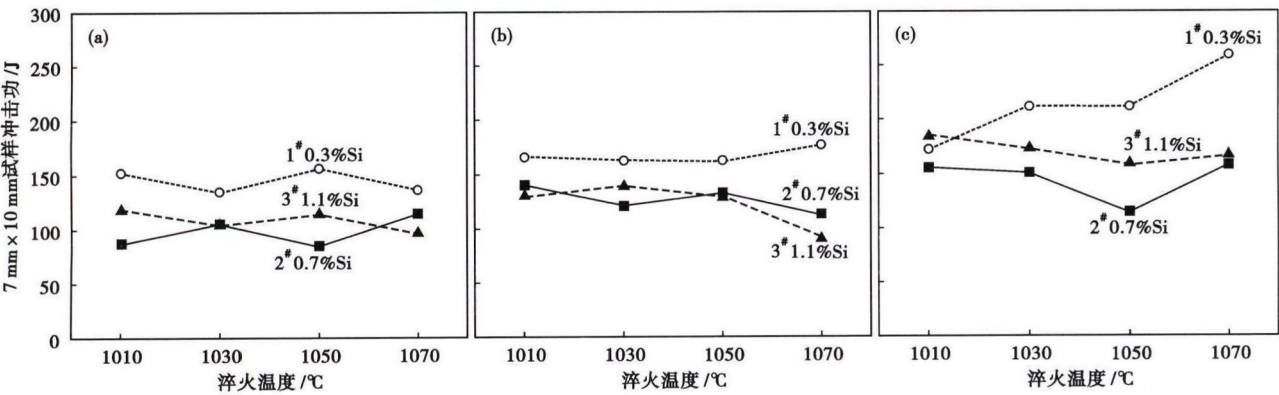


图 7 510 ℃ (a), 530 ℃ (b) 和 550 ℃ 回火淬火温度对 5Cr5WMoSiV 钢冲击韧性的影响

Fig. 7 Effect of quenching temperature on impact energy of steel 5Cr5WMoSiV tempered at 510 ℃ (a), 530 ℃ (b) and 550 ℃ (c)

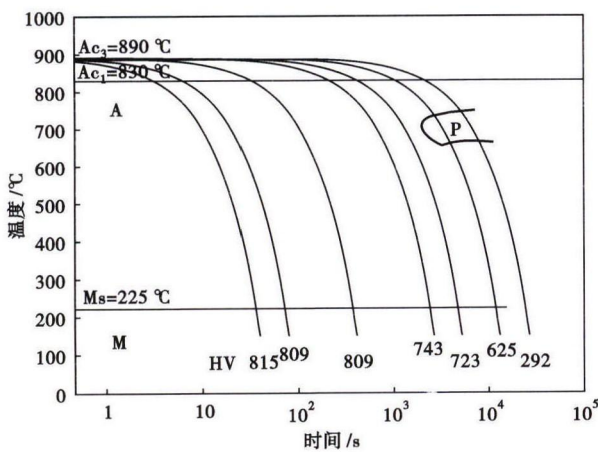


图 8 HYRH12 (5Cr5WMoSiV) 钢的 CCT 曲线

Fig. 8 CCT curves of steel HYRH12 (5Cr5WMoSiV)

表 3 HYRH12 (5Cr5WMoSiV) 钢的弹性模量

Table 3 Modulus of elasticity of steel HYRH12 (5Cr5WMoSiV)

温度 /℃	弹性模量 / (E · GPa ⁻¹)
23	219
100	219.5
200	210
300	199
400	198.5
500	196
600	174

表 4 HYRH12 (5Cr5WMoSiV) 钢的线膨胀系数 (α)

Table 4 Coefficient of linear expansion of steel HYRH12 (5Cr5WMoSiV) (α)

温度 /℃	线膨胀系数 / (10 ⁻⁶ · °C ⁻¹)
20 ~ 100	11.54
20 ~ 200	11.96
20 ~ 300	12.17
20 ~ 400	12.62
20 ~ 500	12.99
20 ~ 600	13.06

7.79 g/cm³, 推荐热处理工艺为 1 030 ~ 1 070 ℃ 淬火, 520 ~ 540 ℃ 回火。

4 结论

(1) 随着 Si 含量的增加, HYRH12 (5Cr5WMoSiV) 钢中 C、Si、Cr、Mo 合金元素的波动范围增大, Si 对 W、V 影响不明显。

(2) 随 5Cr5WMoSiV 钢中 Si 含量的增加液析碳化物数量增多, 由低 Si 钢 (0.3% Si) 薄的单片状向高 Si 钢 (1.1% Si) 复杂化发展, 出现骨骼状液析碳化物。

(3) 提高 Si 含量显著提高 5Cr5WMoSiV 钢的淬火及回火硬度, 中 Si 含量韧性和抗弯强度最差, 低 Si 含量显著提高韧性和抗弯强度。

(4) 推荐的 5Cr5WMoSiV 钢热处理工艺为 1 030 ~ 1 070 ℃ 淬火, 520 ~ 540 ℃ 回火。

参考文献

[1] 胡现龙, 章大健, 徐 钊, 等. 高速钢森吉米尔轧机工作辊的研制 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (23): 46-49.

[2] 章大健. 锻造半高速钢中间辊的研究 [J]. 江苏冶金, 2002, 30 (3): 17-19.

[3] 张占普, 牛旭斐. HYRH12 退火工艺及其退火组织 [J]. 物理检测, 2014, 32 (20): 1-5.

[4] 丁培道, 周守则, 潘复生. 硅对低合金高速钢二次硬化的影响 [J]. 钢铁, 1987, 22 (9): 37-41.

[5] 陈建礼. Cr5 型二中间辊失效分析及改进 [J]. 材料热处理技术, 2012, 41 (08): 218-220.

张占普 (1965-), 男, 正高级工程师, 1987 年武汉大学 (本科) 毕业, 高速钢模具材料及热处理研究。
E-mail: hy. zzp@163. com