



40Cr13 塑料模具钢连续冷却相变行为

苏蒙蒙¹, 陈炜², 唐佳丽², 钟亮美¹, 徐翔宇¹, 付建勋¹

(1 上海大学材料科学与工程学院先进凝固技术中心, 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444; 2 攀钢集团四川长城特殊钢有限责任公司, 江油 621700)

摘要:连续冷却相变行为对制定钢的热处理工艺具有重要指导意义, 采用热膨胀法开展了40Cr13模具钢不同冷却速率(0.5~20 °C/s)连续冷却相变曲线的测定, 利用扫描电镜和显微硬度仪分别对不同冷速下相变后的材料组织形貌和维氏硬度进行检测分析, 在高温共聚焦激光显微镜 (HTCLSM) 下对其相变行为进行原位观察, 结果表明, 40Cr13模具钢的临界转变点 A_{c1} 为 836 °C, A_{c3} 为 903 °C; 在 0.5~20 °C/s 的冷却速率范围内均出现马氏体相变, 随着冷速增加, 钢中碳化物的分布更加均匀。当冷速由 0.5 °C/s 增大到 3 °C/s 时, 样品平均硬度值由 417 HV 提高到 550 HV, 随着冷速继续增加, 样品平均硬度值最终稳定在 560~580 HV。对冷却速率 (v) 和维氏硬度 (H_v) 进行拟合, 拟合公式为 $H_v = 564.49 - \frac{185.78}{\exp(v - 1.88)}$ 。当冷却速率为 3 °C/s 时, HTCLSM 下观察到马氏体开始转变温度为 214.5 °C, 随着温度降低马氏体数量增加, 马氏体板条沿不同方向生长, 且同方向的板条厚度减小。

关键词:塑料模具钢; 40Cr13; 连续冷却转变曲线; 高温激光共聚焦; 马氏体相变

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00007 **中图分类号:**TG142

Continuous Cooling Phase Transformation Behavior of 40Cr13 Plastic Mold Steel

Su Mengmeng¹, Chen Wei², Tang Jiali², Zhong Liangmei¹, Xu Xiangyu¹, Fu Jianxun¹

(1 Center for Advanced Solidification Technology (CAST), State Key Laboratory of Advanced Special Steel, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2 Jiangyou Changcheng Special Steel Co., Ltd., Pangang Group, Jiangyou 621700, China)

Abstract: The continuous cooling phase transformation behavior has important guiding significance for formulating the heat treatment process of steel. In this paper, the thermal expansion method was used to measure the continuous cooling phase transformation curves of 40Cr13 mold steel at different cooling rates (0.5 °C/s-20 °C/s). The microstructure and Vickers hardness of the material after phase transformation at different cooling rates were analyzed using scanning electron microscopy and microhardness tester. The phase transition behavior of 40Cr13 mold steel was observed in situ under high-temperature confocal laser microscopy (HTCLSM). The results showed that the critical transition point A_{c1} was 836 °C and A_{c3} was 903 °C; Martensite transformation occurred in the cooling rate range of 0.5 °C/s-20 °C/s. As the cooling rate increased, the distribution of carbides in the steel became more uniform. When the cooling rate increased from 0.5 °C/s to 3 °C/s, the average hardness value of the sample increased from 417 HV to 550 HV. As the cooling rate continued to increase, the average hardness value of the sample finally stabilized at 560 HV-580 HV. The cooling rate (v) and Vickers hardness (H_v) were fitted with the formula $H_v = 564.49 - \frac{185.78}{\exp(v - 1.88)}$. When the cooling rate was 3 °C/s, it was observed under HTCLSM that the starting temperature of martensite transformation was 214.5 °C. As the temperature decreased, the number of martensite increased, and the martensite laths grow in different directions and the thickness of the laths in the same direction decreased.

Key Words: Plastic Mold Steel; 40Cr13; CCT Curve; HTCLSM; Martensitic Transformation

40Cr13 中含有 C、Mn、Si、Cr、Cu、Al 等元素, 在其基础上添加 Ni、V 等来提高其使用性能。钢中的 Cr 可以降低奥氏体向马氏体转变的临界冷却速度, 降低马氏体形成的起始转变温度, 增强淬火效果,

增加钢的强度、硬度; Ni 不仅提升钢的热稳定性, 此外, 还通过降低 δ 铁素体的含量, 提升钢的相变效果和硬度值; V 能使钢晶粒细化, 提高钢的高温持久强度和蠕变抗力^[1-2]。40Cr13 钢机加工性能优良, 经

作者简介: 苏蒙蒙(2001—), 女, 硕士; **E-mail:** jcsmm777@163.com; **收稿日期:** 2024-01-04

通信作者: 付建勋(1969—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** fujianxun@shu.edu.cn

淬火、回火使其耐蚀性、耐磨性和强度进一步提高^[3],主要用于耐腐蚀、高镜面的塑料模具件、轴承和阀门等^[1]。

连续冷却转变(CCT)曲线是合理制定生产工艺的重要依据^[4-5]。高温共聚焦激光显微镜(HTCLSM)通过保护气氛中的精确过程控制来模拟工业条件的热处理过程,快速扫描材料,并实时和连续观察高温相变^[6]。最近,一些基于 HTCLSM 的合金凝固^[7-9]、相变^[10-11]和晶粒生长取向^[12-13]的研究已经被广泛报道。Honda 等对 13Cr-2Ni-2Mo 不锈钢进行感应加热后淬火,通过 HTCLSM 观察到在原始奥氏体晶界和晶粒内出现了板条马氏体,不锈钢的硬度增加了约两倍^[14]。Terasaki 等原位观察了低碳钢在连续快速冷却下的贝氏体和马氏体转变,在连续快冷条件下,贝氏体板条呈三角形形态,在三角形内部,观察到具有细小板条形貌和嵌套显微组织的马氏体^[15]。Xu 等通过热膨胀试验定量记录了贝氏体转变,并利用过 HTCLSM 定性原位观察 Fe-C-Mn-Si 超级贝氏体钢中贝氏体在晶界和晶粒中形核,二次贝氏体铁素体在预制贝氏体层上共生形核,并通过贝氏体束的撞击长大,形成互锁的贝氏体微观结构^[16]。Komizo 等在 HTCLSM 下现场观察了相同冷却速率下不同 Al/O 质量浓度比的 Si-Mn-Ti-B-Al 焊接金属相变过程,发现在低质量浓度比时在原奥氏体中形成了针状铁素体,且随温度降低,初级铁素体中产生次级铁素体;在高质量浓度比时观察到从原奥氏体晶界处生长出整齐排列的铁素体板,且铁素体尺寸大于低质量浓度^[17]。尽管许多研究已经报道了各种合金的相变和晶粒长大,但目前还缺少 40Cr13 钢的原位研究。

因此,采用膨胀法结合 HTCLSM 研究旨在对 40Cr13 钢在连续冷却过程中的相变行为进行详细而系统的描述。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

40Cr13 塑料模具钢样品取自企业生产的锻造产品。冶炼工艺流程为:30 t 电弧炉冶炼→氩氧脱碳→钢包精炼炉→真空脱气→模铸→锻造。其化学成分测试结果见表 1。

表 1 40Cr13 模具钢化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical Compositions of 40Cr13 Die Steel %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	V
0.380	0.380	0.350	0.028	0.003	13.250	0.400	0.060	0.018	0.080

1.2 试验方案

1.2.1 CCT 曲线测定

将 40Cr13 钢加工成 $\phi 8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 标准圆柱试样,利用 DIL805L 高温相变热模拟仪测定试样在不同冷速的热膨胀曲线,以 $10 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的升温速率升温至 $950 \text{ }^\circ\text{C}$ 后保温 300 s,使其完全奥氏体化,最后以 0.5 、 1 、 2 、 3 、 5 、 7 、 10 、 $20 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 冷却至室温,根据相变点得出 40Cr13 钢的 CCT 曲线。

1.2.2 组织形貌和显微硬度测定

将热膨胀实验后的试样沿着中部剖开后磨抛制备金相样,用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀,利用扫描电镜(ZEISS GeminiSEM 500)对其组织进行观察。在 Wilson 硬度计(MH-5L 自动台式显微维氏硬度计)上测试冷却试样的显微硬度。金刚石正棱锥体压头相对面间夹角为 136° ,加载载荷为 200 gf,加载时间为 5 s。测试误差在 $\pm 0.75\%$ 以内,每个样本至少测试 10 个点。

1.2.3 HTCLSM 观察

将样品放入内径 8 mm、外径 9 mm、高 3.5 mm 的刚玉坩埚中,试样尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 。然后将坩埚放入 HTCLSM 炉(VL2000DX-SVF17SP Lasertec)中。实验前应抽真空,实验过程中应注入氩气保护。在热处理过程中,观察了实验钢种的马氏体相变演化行为。HTCLSM 的实物图、工作原理示意及样品的控温曲线如图 1 所示。为防止坩埚开裂,在升温初期($0.7 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 从室温加热至 $200 \text{ }^\circ\text{C}$)应采用缓慢升温的方式。然后通过快速加热($3 \text{ }^\circ\text{C/s}$)将样品加热到 $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ (1373 K),保温 300 s 后以 $3 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 速率冷却至室温。

2 结果与讨论

2.1 CCT 曲线

试验钢进行加热和冷却的过程中,相变会导致试样体积发生变化^[18]。通过膨胀计进行的热分析被广泛用于确定 CCT 图中的转变温度。应用切线法来表征膨胀曲线的拐点,膨胀曲线表示由于不同相的不同膨胀系数而产生的转变温度^[19]。

利用切线法即热膨胀曲线出现拐点前的切线与曲线相交数值得出相变发生时的温度^[20-21],得出 40Cr13 模具钢的 A_{C1} 为 $836 \text{ }^\circ\text{C}$, A_{C3} 为 $903 \text{ }^\circ\text{C}$ 。该结果与使用 Thermal-calc 软件计算出 40Cr13 模具钢平衡相析出图中的 A_{C1} 为 1097 K ($824 \text{ }^\circ\text{C}$), A_{C3} 为 1120 K ($847 \text{ }^\circ\text{C}$)结果基本一致,如图 2 所示。不同冷速下的温度-膨胀量曲线如图 3 所示,由切线法确定 $0.5 \text{ }^\circ\text{C/s}$

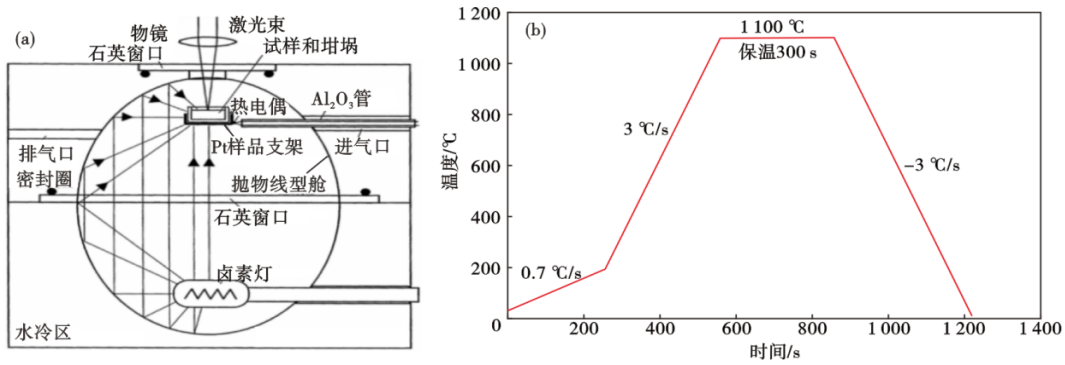


图 1 高温激光共聚焦显微镜:(a)工作原理示意图,(b)原位观察过程的热处理曲线

Fig. 1 High-temperature laser confocal microscope: (a) schematic diagram of working principle; (b) heat treatment lines for in-situ observations

下 40Cr13 模具钢的马氏体起始转变温度 M_s 和终止转变温度 M_f 分别为 383.1 °C 和 109.1 °C, 在冷速为 20 °C/s 下 40Cr13 模具钢的 M_s 和 M_f 分别为 321.3 °C 和 76.2 °C。采用切线法分别对 1、2、3、5、7、10 °C/s 下的热膨胀量曲线进行测定, 测量相变点温度见表 2。由表 2 结果可知, 随着冷却速度的升高, 试验钢的 M_s 和 M_f 逐渐下降。

表 2 40Cr13 模具钢在不同冷速下的相变点
Table 2 Phase transformation points of 40Cr13 mold steel at different cooling rates

冷却速率/(°C·s ⁻¹)	M_s /°C	M_f /°C
0.5	383.1	109.1
1	377.5	101.9
2	353.5	96.4
3	345.9	86.6
5	356.7	83.9
7	344.8	81.7
10	345.7	80.3
20	321.3	76.2

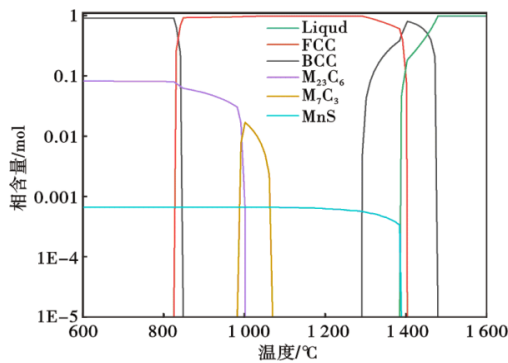


图 2 40Cr13 模具钢的相组成变化

Fig. 2 Phase composition variation of 40Cr13 die steel

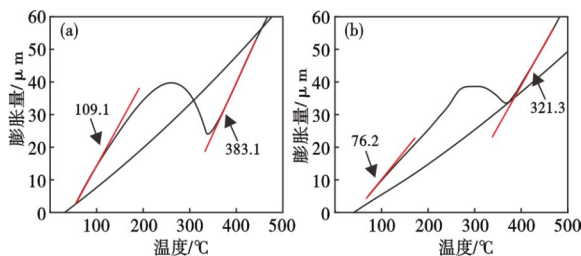


图 3 不同冷速下的温度-膨胀量曲线:(a)0.5 °C/s,(b) 20 °C/s

Fig. 3 Temperature-expansion curves at different cooling rates: (a) 0.5 °C/s, (b) 20 °C/s

了有用的用途^[22]。结合表 2 中的相变点温度, 对试验钢的连续冷却转变曲线进行绘制, 如图 4 所示。试验钢在冷速为 0.5~20 °C/s 仅发生由过冷奥氏体向马氏体的转变, 最终均得到单一马氏体组织。

维氏硬度与冷却速率的对数之间的关系曲线如图 5 所示。当冷速由 0.5 °C/s 增大到 3 °C/s, 样品

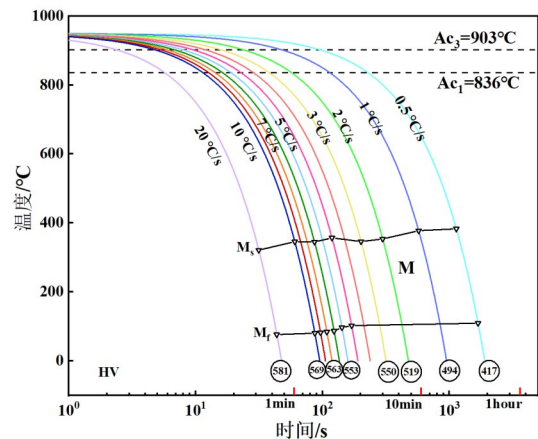


图 4 40Cr13 模具钢的连续冷却转变曲线

Fig. 4 Continuous cooling transformation curve of 40Cr13 die steel

CCT 图为表示非等温热处理的转变特征以及揭示合金元素在影响钢的微观结构中的作用提供

平均硬度值由 417 HV 提高到 550 HV, 硬度值增大速率较快, 在该冷速区间下, 钢中组织为逐渐增多的马氏体使得钢表面变硬; 当冷速由 5 °C/s 增大到 20 °C/s, 样品硬度值增大速率减缓, 平均硬度值为 560 ~ 580 HV。这是由于钢中马氏体不断增多, 马氏体板条在不同位向生长^[19], 硬度值最终逐渐趋于稳定。将冷却速率(v)和维氏硬度(H_v)之间的关系进行拟合, 如式(1)所示(拟合系数 $R^2=0.914$)。

$$H_v = 564.49 - \frac{185.78}{\exp(v - 1.88)} \quad (1)$$

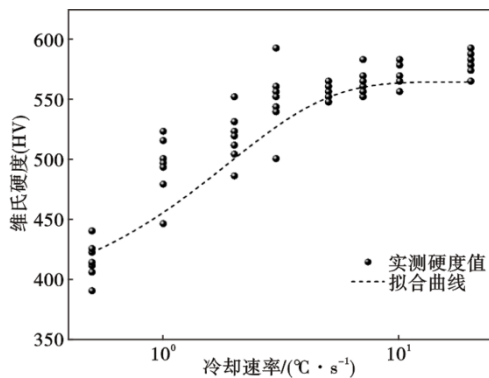


图 5 不同冷却速率下的试样硬度
Fig. 5 Hardness of samples at different cooling rates

2.2 组织观察

对热膨胀试验后的 8 个样品进行腐蚀后使用金相显微镜进行观察。经过不同冷速后试验钢的组织如图 6 所示, 从图 6 中可以看到明显原奥氏体晶界, 但是难以观察到其他组织, 如马氏体。

使用扫描电镜观察上述腐蚀后的样品, 不同

冷速下 40Cr13 模具钢的显微组织如图 7 所示, 从图 7 可以直观的看到碳化物在组织中的分布情况(白色区域)。图 7(a)在 0.5 °C/s 冷速时, 40Cr13 模具钢中的碳化物数量较多, 且分布不均匀, 有大量块状、网状、纤维状及长链状碳化物分布在基体中; 当冷速不断增加到 10 °C/s 时, 碳化物数量逐渐减少, 分布更加均匀; 随着冷速进一步增加到 20 °C/s, 碳化物的数量增加, 而整体碳化物分布均匀程度几乎不变。但是在该条件下, 仍然难以分辨组织形貌, 只能在基体中(黑色区域)隐约看到少量的板条马氏体痕迹, 无法辨别是否存在残余奥氏体。

2.3 马氏体相变原位观察

研究发现, 材料的最终性能受到马氏体转变过程的影响显著^[23], 因此, 采用 HTCLSM 来实时观察和分析奥氏体-马氏体转变过程, 如图 8 所示。

在 HTCLSM 加热到 1 100 °C 保温过程中, 奥氏体在 1 100.3 °C 形成, 如图 8(a) 所示。随着温度变化, 214.5 °C 时, 试验钢中奥氏体内部出现马氏体新相, 如图 8(b) 所示。

随着温度的进一步下降至 160.6 °C, 在已经形成的马氏体周围, 原奥氏体被激发形核并沿着平行方向逐渐增长。由图 8(e) 可知, 马氏体平行板条继续向晶内生生长; 相较于图 8(d), 在 160 °C 左右时马氏体相基本转变完成, 原奥氏体晶粒中马氏体板条数量较多, 形成板条束。

新形成的马氏体在温度继续下降后在原有的马氏体束上出现, 并以一定角度(96°或 105°)向晶内生生长, 如图 8(f) 和图 8(g) 所示。随着温度由

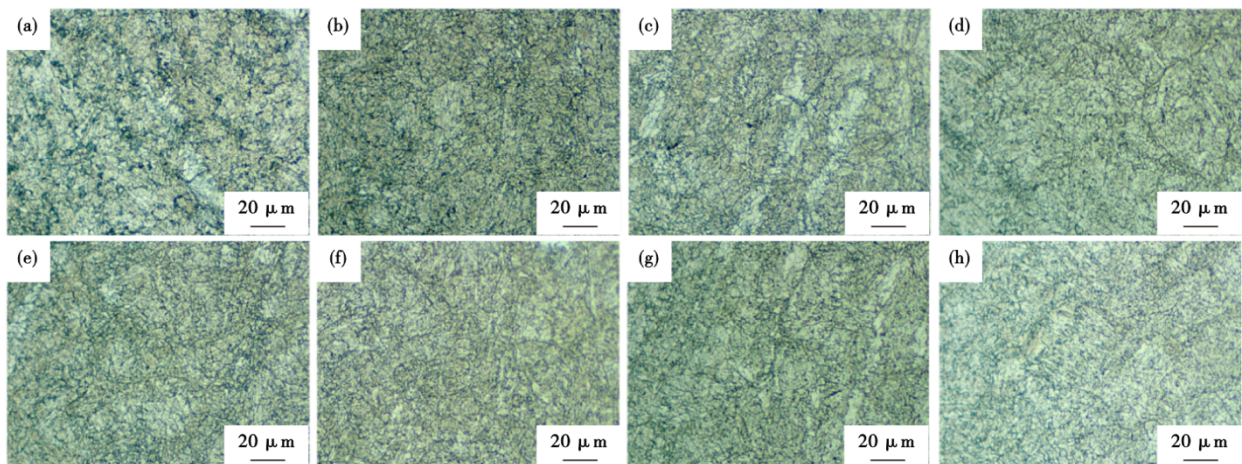


图 6 不同冷速下 40Cr13 模具钢腐蚀后的金相组织图: (a) 0.5 °C/s, (b) 1 °C/s, (c) 2 °C/s, (d) 3 °C/s, (e) 5 °C/s, (f) 7 °C/s, (g) 10 °C/s, (h) 20 °C/s

Fig. 6 Metallographic structure diagram of 40Cr13 mold steel after corrosion at different cooling rates: (a) 0.5 °C/s, (b) 1 °C/s, (c) 2 °C/s, (d) 3 °C/s, (e) 5 °C/s, (f) 7 °C/s, (g) 10 °C/s, (h) 20 °C/s

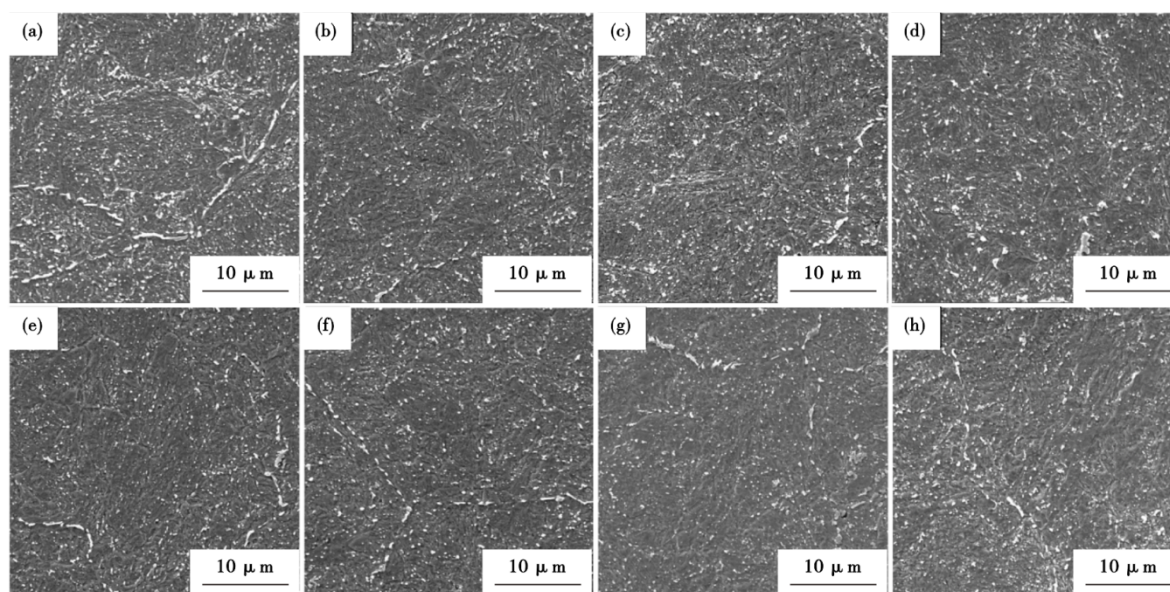


图7 不同冷速下40Cr13模具钢的显微组织图:(a) 0.5 °C/s, (b) 1 °C/s, (c) 2 °C/s, (d) 3 °C/s, (e) 5 °C/s, (f) 7 °C/s, (g) 10 °C/s, (h) 20 °C/s

Fig. 7 Microstructure diagrams of 40Cr13 mold steel under different cooling rates: (a) 0.5 °C/s, (b) 1 °C/s, (c) 2 °C/s, (d) 3 °C/s, (e) 5 °C/s, (f) 7 °C/s, (g) 10 °C/s, (h) 20 °C/s

149.0 °C下降到120.0 °C,同一位置的马氏体板条宽度从4.6 μm减小到4.2 μm(箭头所示),表明板条除了向其他方向延伸外,沿同方向即平行于板条束方向宽度也在同时减小。这是由于新形成的马氏体只能在原来形成基础上进行形核生长。受到有限空间的制约,马氏体相变的阻力增大导致形成的马氏体板条在同一方向上宽度减小;且分布在其周围未发生过相变的奥氏体的转变过程受到影响,进而

导致一些奥氏体残留下来^[18]。

温度下降到116.8 °C时在钢中观察到大量的马氏体组织,且大部分颜色较暗,如图8(h)所示。由于在较高温度下形成的板条状马氏体,在冷却过程中会发生自回火现象,导致在马氏体内部析出碳化物,因此,这种结构在电镜下容易表现出颜色较暗的形貌特征。此外,晶粒微观结构的转变而导致反射率发生变化也会使马氏体板条在HTCLSM下的观察颜

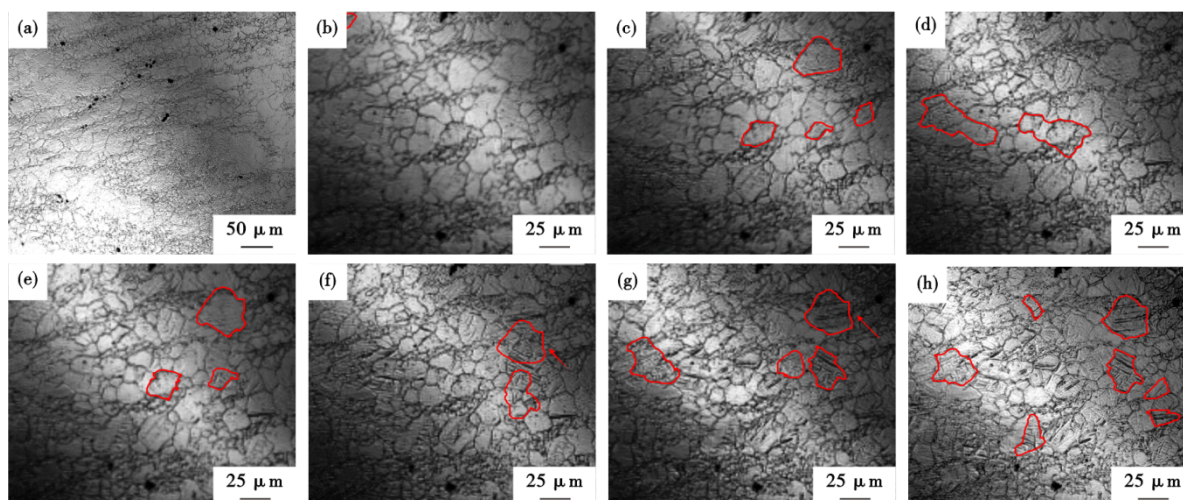


图8 40Cr13模具钢以3 °C/s冷速冷却到不同温度时的马氏体相变过程原位观察:(a) 1100.3 °C, (b) 214.5 °C, (c) 180.2 °C, (d) 169.8 °C, (e) 160.6 °C, (f) 149.0 °C, (g) 120.0 °C, (h) 116.8 °C

Fig. 8 In-situ observation of martensitic transformation process of 40Cr13 die steel cooled to different temperatures at 3 °C/s cooling rate: (a) 1100.3 °C, (b) 214.5 °C, (c) 180.2 °C, (d) 169.8 °C, (e) 160.6 °C, (f) 149.0 °C, (g) 120.0 °C, (h) 116.8 °C

色变暗^[4]。从降温过程可以观察到温度降低,马氏体数量逐渐增加且马氏体转变的速度极快。

3 结论

(1)通过 40Cr13 模具钢的热膨胀曲线,确定试验钢的临界转变点 Ac_1 为 836 °C, Ac_3 为 903 °C。

(2)CCT 曲线与计算相图显示,在 0.5 ~ 20 °C/s 的冷却速率内均出现马氏体相变,随着冷速增加, M_s 与 M_f 逐渐减小,0.5 °C/s 时 M_s 和 M_f 分别为 383.1 °C 和 109.1 °C,20 °C/s 时 M_s 和 M_f 分别为 321.3 °C 和 76.2 °C;

随着马氏体组织不断增加,样品硬度随之增大,最终趋于稳定在 560 ~ 580 HV,冷速 (v) 和维氏硬度 (H_v) 的拟合公式为 $H_v = 564.49 - \frac{185.78}{\exp(v - 1.88)}$ 。随冷速增加,碳化物的分布更加均匀,但在现有组织扫描图中难以精准观察到马氏体组织。

(3)在冷却速率为 3 °C/s 时,HTCLSM 观察到马氏体转变的开始温度为 214.5 °C,马氏体数量随温度降低而增加,板条沿多个方向生长且沿同方向宽度减小。

参考文献

- [1] 崔清. Q&P 工艺对 40Cr13 型马氏体不锈钢组织与性能影响的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [2] 相黎阳, 迟宏宵, 马党参, 等. 大截面 4Cr13V 耐蚀塑料模具钢的组织 and 性能[J]. 钢铁, 2015, 50(7): 92-99.
- [3] 许志刚, 叶林凤. 4Cr13 钢加工困难分析[J]. 模具制造, 2012, 12(12): 80-82.
- [4] Chen R C, Zheng Z Z, Li N, et al. *In-situ* investigation of phase transformation behaviors of 300M steel in continuous cooling process[J]. Materials Characterization, 2018, 144: 400-410.
- [5] 张念, 陈章明, 赵红强, 等. 38MnSiVS5 非调质钢的 CCT 曲线测定与分析[J]. 特殊钢, 2022, 43(1): 82-85.
- [6] Mu W Z, Hedström P, Shibata H, et al. High-temperature confocal laser scanning microscopy studies of ferrite formation in inclusion-engineered steels: A review[J]. JOM, 2018, 70(10): 2283-2295.
- [7] Niknafs S, Phelan D, Dippenaar R. High-temperature laser-scanning confocal microscopy as a tool to study the interface instability during unsteady-state solidification of low-carbon steel[J]. Journal of Microscopy, 2013, 249(1): 53-61.
- [8] Huang F X, Wang X H, Zhang J M, et al. *In situ* observation of solidification process of AISI 304 austenitic stainless steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2008, 15(6): 78-82.
- [9] Ma X G, Li Y L, Sang R L, et al. Study on process of SPHC steel solidification[J]. Advanced Materials Research, 2013, 750-752: 385-388.
- [10] Hechu K, Slater C, Santillana B, et al. A novel approach for interpreting the solidification behaviour of peritectic steels by combining CSLM and DSC [J]. Materials Characterization, 2017, 133: 25-32.
- [11] Moon S C, Dippenaar R, Lee S H. Solidification and the δ/γ phase transformation of steels in relation to casting defects[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2012, 27: 012061.
- [12] Du G, Li J, Wang Z B, et al. Effect of magnesium addition on behavior of collision and agglomeration between solid inclusion particles on H13 steel melts[J]. Steel Research International, 2017, 88(3): 1600185.
- [13] Hu Y, Zhou L, Ding H H, et al. Microstructure evolution of railway pearlitic wheel steels under rolling-sliding contact loading [J]. Tribology International, 2021, 154: 106685.
- [14] Honda T, Santos E C, Kida K, et al. Microstructural evaluation of 13Cr-2Ni-2Mo stainless steel quenched by induction heating [J]. Advanced Materials Research, 2012, 457-458: 525-530.
- [15] Terasaki H, Shintome Y, Takada A, et al. Visualization and analysis of variant grouping in continuously cooled low-carbon steel welds [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(8): 3554-3559.
- [16] Xu G, Liu F, Wang L, et al. A new approach to quantitative analysis of bainitic transformation in a superbainite steel [J]. Scripta Materialia, 2013, 68(11): 833-836.
- [17] Komizo Y, Terasaki H. Optical observation of real materials using laser scanning confocal microscopy Part 2 - direct observation of ferrite nucleation sites in weld metal and heat affected zone [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16(1): 61-67.
- [18] 蒋辉, 赵爱民, 裴伟, 等. 低合金耐磨钢的 CCT 曲线与马氏体相变原位观察[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(11): 143-150.
- [19] Liu M, Bernhard M, Kawuloková M, et al. Decomposition of γ -Fe in 0.4C - 1.8Si-2.8Mn-0.5 Al steel during a continuous cooling process: A comparative study using *in situ* HT-LSCM, DSC and dilatometry [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 3534-3547.
- [20] 葛琛, 赵洪山, 郑磊, 等. 900 MPa 级高强钢的连续冷却转变及组织调控分析[J]. 钢铁, 2023, 58(3): 128-134.
- [21] 江畅, 王子波, 王杨, 等. 冷作硬化非调质钢的连续冷却相变规律[J]. 钢铁, 2022, 57(3): 91-96.
- [22] Liu H H, Fu P X, Liu H W, et al. A novel large cross-section quenching and tempering mold steel matching excellent strength - hardness - toughness properties [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 737: 274-285.
- [23] Kleiner L M, Larinin D M, Spivak L V, et al. Phase and structural transformations in low-carbon martensitic steels [J]. The Physics of Metals and Metallography, 2009, 108(2): 153-160.