

碳工钢激光淬火时“自回火”现象的研究

李明生 姜维荣 李 佳

(安徽工学院材料工程系, 合肥 230069)

提要: 本文应用 TEM 仔细观察研究了碳工钢激光淬火时的“自回火”现象, 发现 T10A 经激光淬火后, 在激光峰值硬化区内存在大量细小弥散的碳化物 (Fe_3C) 沿位错线及孪晶界的析出, 它们的大小为几个 nm 至 10nm, 且与马氏体基体具有 Bhagaryatskü 取向关系。在实验的基础上, 分析讨论了碳化物析出的热力学和动力学条件。TEM 观察研究表明, 碳化物析出的“自回火”现象的存在, 是碳工钢激光淬火时, 在组织上区别于常规淬火的重要特征。

关键词: 激光淬火, 激光相变硬化

Study on self-tempering of laser-hardened carbon tool steels

Li Mingsheng, Jiang Weirong, Li Jia

(Anhui Institute of Technology, Hefei)

Abstract: This paper investigates the self-tempering of laser-hardened carbon tool steels by means of TEM. It has been found that there are a great deal of precipitation of boundaries in the maximum hardened region of T10A treated with laser hardening. The precipitated carbides, ranged from 1nm to 10nm, have the Bhagaryatskü's orientation relation with a matrix of martensite. Based on the results, thermodynamic and dynamic conditions of the precipitation have also been analysed. Many observations show that the characteristic difference in microstructures between T10A steels treated with laser hardening and those with traditional hardening indicates the existence of precipitation of carbides is a result of the self-tempering.

Key words: laser transformation hardening, laser heat treatment

一、引 言

近年来, 随着激光相变硬化在工业上得到成功的应用, 激光相变硬化机理的研究开始受到人们的重视。研究表明, 钢经激光淬火后, 在成分、组织和精细结构方面发生了不同于常规淬火的一系列变化^[1]。P. A. Molian^[2]在研究 AISI4340 钢的激光表面淬火时, 发现相变硬化区有细小弥散的碳化物 (Fe_3C) 的自回火析出, 其大小约 20 nm, 并且与马氏体具有 Bhagaryatskü 取向关系。Clark 和 Thomas^[3]发现在 0.2% C ~ 4% Mo 钢中, 存在 Fe_3C 沿板条马氏体 [110] 析出, 并观察到马氏体板条界上也有不连续的碳化物析出。

上述资料说明, 在低碳、中碳合金结构钢进行激光淬火时, 有可能与常规淬火时一样发生

“自回火”现象。但房为捷^[4]和 Jan Kusinsiri^[5]在分别研究 T8 钢和 T1 钢激光相变硬化区的硬度随回火温度的变化时,认为回火抗力的提高是高碳钢激光淬火时伴随有“自回火”过程发生的结果。可是这仅仅是一种推断,因此为了研究高碳钢激光淬火时“自回火”现象的真伪,我们应用透射电镜对 T10A 钢进行了仔细的观察研究。

二、实验过程

表 1 给出了实验用钢的化学成分。T10A 钢经机械加工成 $30 \times 15 \times 10 \text{ mm}^3$ 的金相试样、性能试样和加工成 $70 \times 15 \times 10 \text{ mm}^3$ 的分析试样,将上述样品分成两部分,分别给予球化退火和淬火+低温回火处理。激光处理前所有试样均进行了磷化处理。

Table 1 Chemical composition of T10A (wt%)

Elements	C	Mn	Si	S	P
T10A	1.03	0.22	0.30	0.03	0.035

Table 2 Processing parameters used in laser hardening of T10A steel range

Material states		Power density (W/cm ²)	Energy (J/mm ²)	Optimum energy density (J/mm ²)
T10A	Spheroidized annealing	5.44×10^3	7.66~16.27	11.00
T10A	Quenching+low temperature tempering	5.44×10^3	6.93~8.86	8.39

激光处理是在 HJ-3 型千瓦横流连续 CO₂ 激光器上进行的,光束波形为矩形,光斑尺寸为 $4.4 \times 4.6 \text{ mm}^2$,在激光器功率密度为 $5.44 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 的条件下,先选用能量密度 ($D_e = P/v \cdot a$) 在 $4.90 \sim 16.27 \text{ J/mm}^2$ 之间的 10 个参量,对 T10A 两种基体的金相和性能试样进行激光淬火,优化激光处理规范,再用最佳规范(见表 2)处理分析试样。分析试样主要用于透射电镜分析用。

透射电镜薄膜样品是从试样表面,沿着平行激光扫描线方向用线切割方法切下厚为 0.5 mm 的薄片,用砂纸先将表面磨去 $30 \sim 40 \mu\text{m}$,即磨至硬化区硬度最高区域——峰值硬化区,然后从切割面开始用不同粒度的砂纸依次单面减薄至 $50 \mu\text{m}$ 左右,在激光扫描区上截取 $\phi 3.0 \text{ mm}$ 圆片,将其放置在 GL-69X 型离子减薄机上继续单面减薄至穿孔制备而成。取样方法如图 1 所示。

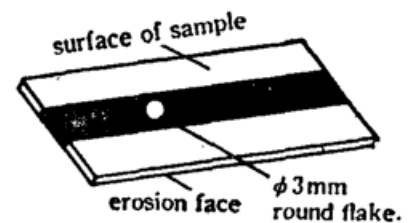


Fig. 1 Schematic illustration for making TEM samples

三、实验结果与讨论

借助于日立 H-800 型透射电镜,对 T10A 钢的常规淬火组织与激光淬火组织进行对比观

察, 结果发现, 激光峰值硬化区的马氏体内存在大量的析出碳化物, 而在常规淬火马氏体中未观察到这一碳化物的析出现象。图 2 为 T10A 钢经激光淬火后, 峰值硬化区内沿马氏体析出的碳化物 TEM 照片, 图 2(c) 是图 2(a) 的 SAD 衍射花样。由电子衍射花样标定的结果知, 这些细小弥散的碳化物是 Fe_3C , 其大小约几个 nm 至 10 nm 左右。并且初步验证表明, 它们与马氏体基体间具有 Bhagaryatskü 取向关系, 即

$$(100)_{\text{Fe}_3\text{C}} // (0\bar{1}1)_\alpha, [010]_{\text{Fe}_3\text{C}} // [\bar{1}11]$$

显然, 这些细小弥散碳化物的析出, 只能来源于“自回火”过程。

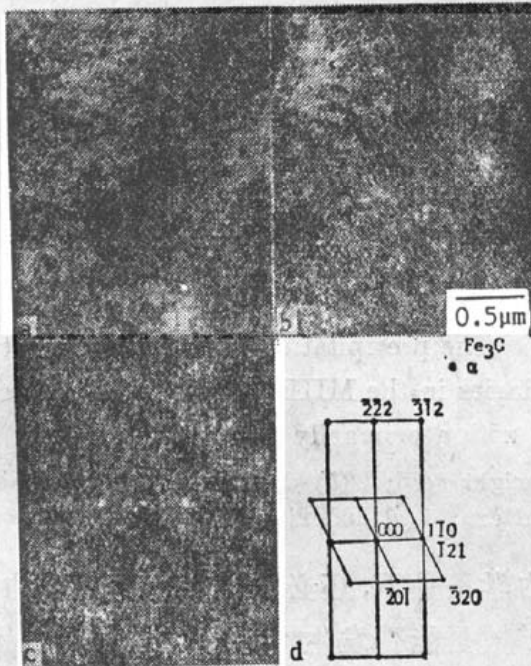


Fig. 2 The precipitated carbides on the martensite in the MHLH (maximum hardness laser hardened) areas of T10A steel with a primarily spheroidized matrix

(a) bright field; (b) drak field; (c) diffraction pattern; (d) indexing of diffraction parttern

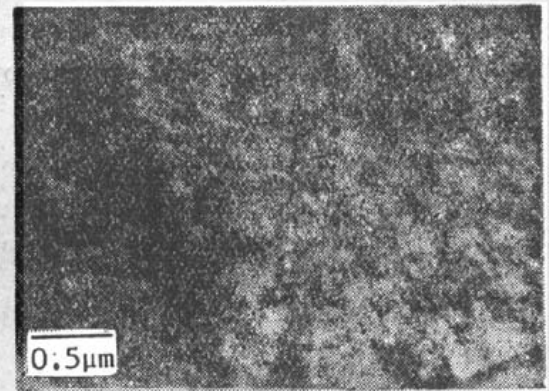


Fig. 3 The morphology of martensite in the MHLH areas of T10A steel with a matrix of spheroidized microstructure

常规淬火时, 高碳钢由于 M_s 点较低, 因此在淬火冷却过程中很难观察到碳化物析出的自回火现象, 并且根据高碳钢回火转变的特点, 在淬火冷却过程中, 因自回火引起马氏体分解的产物应是 $\epsilon\text{-Fe}_3\text{C}$, 而不会出现 Fe_3C 。但由电镜观察表明, 高碳钢激光淬火与常规淬火不同, 它不仅存在明显的自回火现象, 而且马氏体分解的产物是 Fe_3C , 而不是 $\epsilon\text{-Fe}_3\text{C}$ 。由激光淬火时的温度场分布特点和热传播的方式, 高碳钢激光淬火时自回火过程的发生, 不可能是在淬火冷却过程中, 由于热量的回传引起的, 而是同马氏体形态与亚结构的变化有着密切关系。

TEM 观察发现^[6], T10A 激光淬火后, 在峰值硬化区内出现了大量位错型板条马氏体, 板条内可见高密度位错网络, 有些部位的位错相互缠结形成胞状结构(见图 3)。无疑马氏体形态与亚结构的上述变化为碳的偏聚与碳化物析出形核提供了有利的形核位置。同时由于碳原子在位错线附近偏聚较稳定, 因而促成了碳化物以 Fe_3C 的形式直接析出。TEM 实际观察也证明了这一点。10 个电镜薄膜样品 100 个视域的观察中, 碳化物(Fe_3C)主要沿板条马氏体中位错线析出, 只是在某些区域才出现沿孪晶界析出。图 4 为球化退火基体的 T10A 钢经激光淬火后在峰值硬化区碳化物沿位错线析出的 TEM 照片, 图 5 是沿孪晶界析出的 TEM 照片。

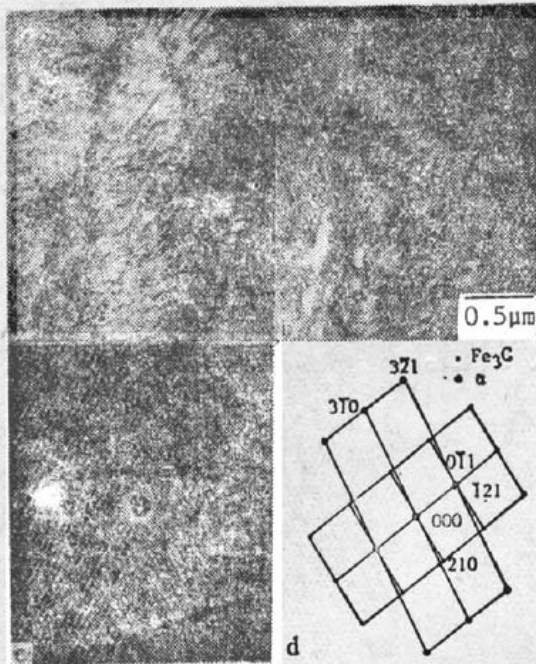


Fig. 4 The precipitation of carbides along dislocation lines inside the MHLH zone of T10A steel with a primarily spheroidized matrix

(a) bright field; (b) dark field; (c) diffraction pattern; (d) indexing of diffraction pattern

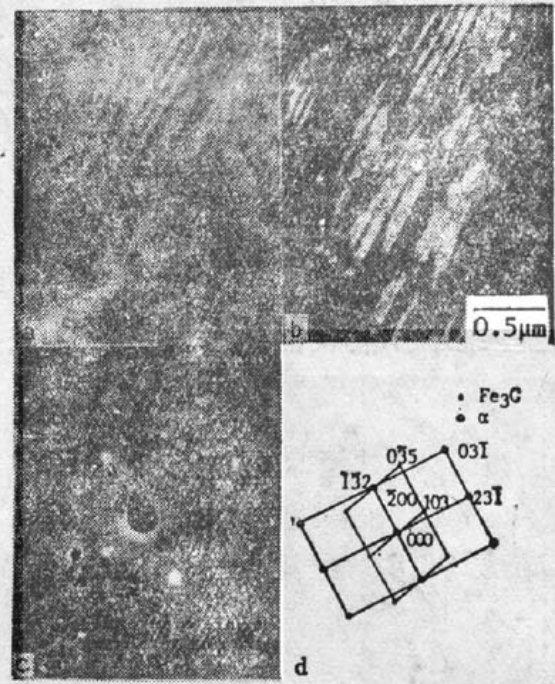


Fig. 5 The precipitation of carbides along twin boundaries in the MHLH areas of T10A steel with a primarily spheroidized matrix

(a) bright field; (b) dark field; (c) diffraction pattern; (d) indexing of diffraction pattern

激光淬火时自回火过程的发生, 在满足一定的热力学条件下, 还必需满足一定的动力学条件, 即在激光超快速加热-冷却的条件下, 有无碳原子扩散是能否发生“自回火”过程的关键。根据文献[6~8]计算结果表明, 即使在激光超快速加热冷却的相变条件下, 依然存在碳原子的扩散过程(计算结果见表3), 这就为碳化物的自回火析出提供了一定的动力学条件。

Table 3 Diffusion rule of carbon of T10A steel under the laser heating conditions

Diffusion time (s)	0.010	0.025	0.050	0.075	0.100	0.150
Diffusion distance (μm)	0.0536	0.0848	0.1199	0.1468	0.1695	0.2076

上述讨论说明, T10A 钢激光淬火时符合碳化物自回火析出的热力学和动力学条件, 而板条马氏体的 M_s 点较高更为碳化物的自回火析出提供了有利因素。因此, T10A 钢在激光淬火快速冷却中, 就同低、中碳钢常规淬火时一样, 会发生碳化物沿位错线析出的“自回火”过程。

参 考 文 献

1. 李明生, 姜维荣, 李佳, C-MRS'90 国际会议论文集, 1990, Vol. 4, 529~534
2. P. A. Molian, *Mater. Sci. Eng.*, **51**, 253~260 (1981)
3. R. A. Clark, G. Thomas, *Metall. Trans. A*, **6**, 969 (1975)
4. 房为捷, 金属热处理, (2), 12 (1982)
5. Jan Kusinsri, *Metall. Trans. A*, **9**, 377 (1988)
6. 李明生, 姜维荣, 李佳, 待发表
7. 刘国勋, 金属学原理, 冶金工业出版社, 1979, 259~282
8. 刘江龙, 金属热处理, (2), 39 (1988)