

4 GPa 压力处理对 T8 钢在加热过程中固态相变动力学的影响*

谌岩¹⁾²⁾ 李雅莉³⁾ 刘建华¹⁾ 张瑞军^{1)†}

1) (燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 秦皇岛 066004)

2) (燕山大学环境与化学工程学院, 秦皇岛 066004)

3) (唐山职业技术学院, 唐山 063000)

(2012 年 1 月 26 日收到; 2012 年 4 月 1 日收到修改稿)

本文通过差示扫描量热分析 (DSC) 法测试了经 4 GPa 压力处理前后, T8 钢在加热过程中固态相变温度和转变时间, 计算其相变激活能和 Avrami 指数, 并结合金相组织观察, 探讨了 4 GPa 压力处理对 T8 钢在加热过程中固态相变动力学的影响. 结果表明: 4 GPa 压力处理能使 T8 钢组织中形成奥氏体的温度向低温移动, 相变时间和 Avrami 指数减小, 相变激活能增大, 有利于形成尺寸细小的晶粒, 但对其相变机理的影响不大.

关键词: 高压处理, T8 钢, 固态相变

PACS: 62.50.-p, 81.05.Bx 64.70.kd

1 引言

碳素工具钢被广泛用于制造低速切削的刀具和简单的冷冲模具等^[1]. 然而, 这类钢的淬透性差, 淬层浅, 淬火时必须急冷才能淬硬, 且在淬火过程中极易发生变形和开裂^[2-3]. 因此, 提高碳素工具钢的淬硬性及减小变形和开裂一直为热处理工作者所重视^[4,5]. 我们近期的研究结果发现, T8 钢试样经高压处理后可获得马氏体组织, 硬度较高, 且试样变形和开裂倾向较小, 这为获得高硬度的碳素工具钢提供了新途径. 由于刀具在切削过程中, 刀刃和工件及切屑间强烈的摩擦而产生切削热, 使刀刃的温度升高, 当温度升高一定值时, 刀刃部位将发生固态相变, 从而影响其力学性能. 因此, 有必要对经高压处理后的 T8 钢在加热过程中的固态相变进行探讨. 再者, 高压具有促进形核和抑制晶粒长大的作用^[6-8], 采用高压来改善合金组织已成为这一领域的研究热点, 但这些研究工作主要集中在

高压应用在合金凝固过程^[9-11]. 由于金属材料的组织最终取决于固态相变, 而在其固态相变过程中施加高压具有温度低, 操作简单等优点. 为此, 本文在 T8 钢固态相变过程中施加高压处理, 并探讨了高压处理前后 T8 钢在加热过程中固态相变的变化, 所得结果对丰富高压在钢铁领域的应用提供一定的依据.

2 实验材料与方法

实验采用退火态 T8 钢, 其化学成分 (质量分数, %) 为 0.78C, 0.32Si, 0.37Mn, 0.026S, 0.031P. 高压处理在 CS-IIB 型六面顶压机上进行, 其方法为: 将尺寸为 $\phi 5 \times 8$ mm 的 T8 钢样品在 4 GPa 压力下加热至 900 °C, 保温 10 min 后, 断电保压冷却至室温. 将经 4 GPa 压力处理前后的样品在 STA449C 热分析仪上进行差示扫描量热分析, 加热至 900 °C, 其升、降温速率均分别为 5, 10 和 20 °C/min, 并对所得的 DSC 谱线进行分析.

* 河北省留学回国人员科研启动基金资助的课题

† E-mail: Zhangrj@ysu.edu.cn

用 Deloy 小泽大夫方程^[12] $\log B = \log AE[RF(X)]^{-1} - 2.315 - 04567E(RT)^{-1}$, 计算相变激活能 (E). 对于某一温度, 由 Ozawa 方程^[13] 可获得 Avrami 指数 (n), 其表达式 $n = -d\{\ln[-\ln(1 - X)]\}/d \ln B$, 上述两式中, B 为升温速度, $F(X)$ 为相变函数, T 为温度, R 为气体常数, A 为频率因子, X 为合金相变体积分数, 当 X 为常数时, $\log AE[RF(X)]^{-1}$ 为常数. 并用 Axiovert200MAT 型光学显微镜和 H-800 透射电镜 (TEM) 对经 4 GPa 压力处理前后 T8 钢的显微组织进行观察.

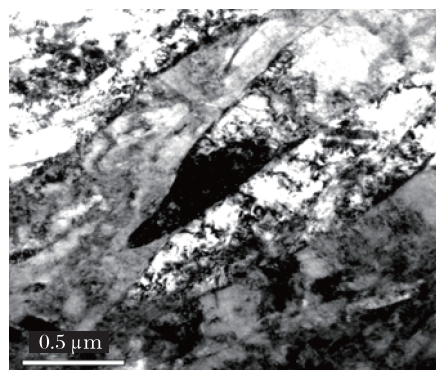


图2 4 GPa 压力处理后 T8 钢的透射照片

3 实验结果与分析

3.1 显微组织

图 1 为 4 GPa 压力处理前后 T8 钢的金相组织. 可以看出, 原始态试样的金相组织为珠光体, 经 4 GPa 压力处理后试样的组织较细, 硬度较高, 其值为 HRC52. 经 TEM 观察 (图 2) 发现, 经 4 GPa 压力处理后 T8 钢组织出现马氏体, 且内部位错密度较高.

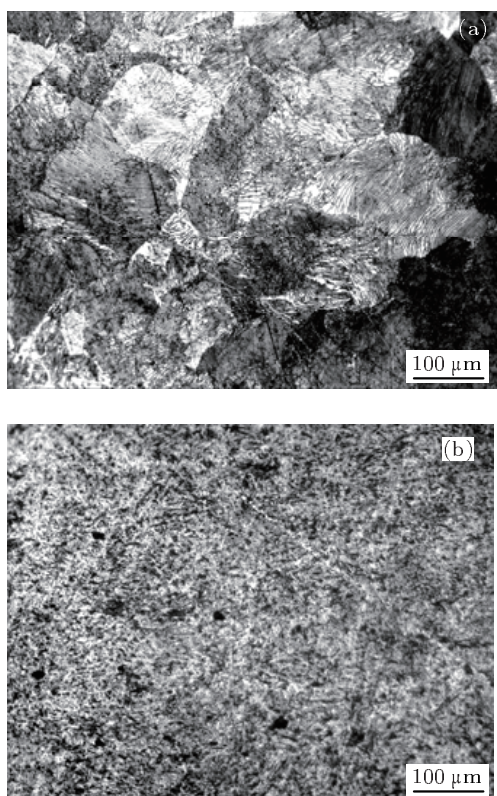


图1 T8 钢的金相组织 (a) 原始态; (b) 4 GPa 处理后

3.2 DSC 曲线分析

图 3 为经 4 GPa 压力处理前后 T8 钢在不同升温速率下的 DSC 曲线. 可以看出, 在两种状态 DSC 曲线上约 720—775 °C 范围内均有一个吸热峰. 经分析认为, DSC 曲线上的吸热峰是由 T8 钢组织中形成奥氏体所致. 由 3 种升温速率的 DSC 曲线, 可获得 T8 钢中形成奥氏体的温度以及相变时间, 见表 1.

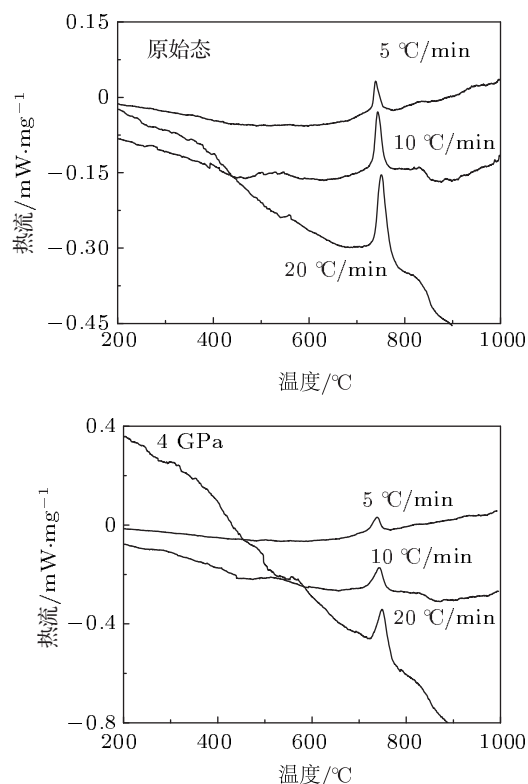


图3 不同状态下 T8 钢的升温 DSC 曲线

表 1 不同升温速率下奥氏体的形成温度和时间

升温速率 /(°C/min)	开始温度 /°C		峰值温度 /°C		结束温度 /°C		相变时间 /s	
	原始态	4 GPa	原始态	4 GPa	原始态	4 GPa	原始态	4 GPa
5	724.71	722.81	738.84	737.62	759.42	756.12	416.52	399.72
10	727.34	726.78	743.45	742.83	764.92	762.04	225.48	211.56
20	731.08	730.64	751.31	749.78	772.31	768.89	123.69	114.75

由表 1 可以看出,奥氏体的形成是在一个温度范围进行,加热速度越快,奥氏体的形成温度越高,转变所需时间越短. 4 GPa 压力处理能降低奥氏体的形成温度,缩短转变时间. 以 5 °C/min 的升温速度为例,其转变开始温度、结束温度及转变时间分别降低了 1.90 °C, 3.30 °C 和 16.80 s.

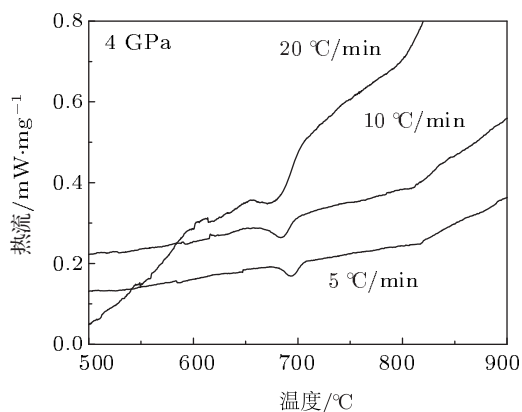
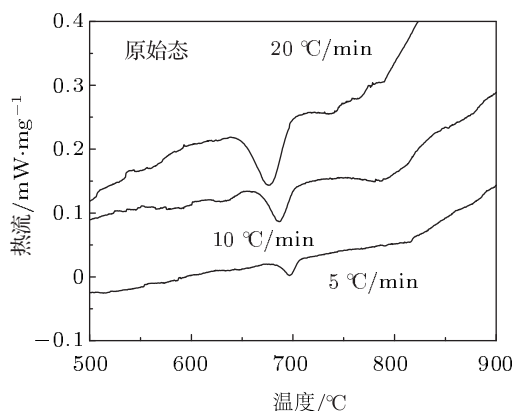


图 4 不同状态下 T8 钢的降温 DSC 曲线

表 2 不同降温速率下奥氏体分解的峰值温度

降温速率 / (°C/min)	原始态	4 GPa
5	696.34	694.12
10	685.95	683.33
20	676.31	674.78

由图 4 可见,在两种状态 T8 钢的降温 DSC 曲线约 670—720 °C 范围内均有一个放热峰,该放热

峰是由 T8 钢组织中奥氏体分解所致,且冷却速度越快,奥氏体分解温度越低,3 种降温速率下奥氏体分解的峰值温度见表 2. 上述 DSC 实验结果说明, T8 钢在加热或冷却过程中均存在相变的滞后现象.

奥氏体的形成包括成核和长大过程,是以原子扩散和原相晶体点阵向奥氏体的晶体点阵转移来完成,且奥氏体晶核易在相界、晶界及位错等晶体缺陷处形成^[14]. 4 GPa 压力处理能使试样产生高应变,造成晶格畸变和组织内部位错密度和界面缺陷增多,这为奥氏体晶核的形成提供更多的场所,也为原子扩散提供有利的通道. 再者,珠光体是由铁素体和渗碳体 (Fe₃C) 组成,而马氏体是亚稳结构,是 C 过饱和的 α 固溶体,与珠光体相比,马氏体在奥氏体的形成过程中减少了因珠光体中 Fe₃C 的溶解和改组所需的时间. 故 4 GPa 压力处理后 T8 钢在加热过程中形成奥氏体的温度较 4 GPa 压力处理前 T8 钢形成奥氏体的温度低,相变时间也缩短.

3.3 激活能

从 DSC 曲线可选择从 720 °C 到 775 °C 左右的区间来研究 T8 钢在加热过程中固态相变动力学. 由 DSC 曲线,可得出经 4 GPa 压力处理前后样品组织中相变体积分数与对应温度的关系曲线 (见图 5), 根据实验数据作出 log B-T⁻¹ 图 (见图 6), 基本呈直线关系,由直线的斜率可获得相变激活能,其结果示于图 7. 可以看出,在初期相变激活能较高,随相变体积分数的增加,激活能逐渐降低. 这意味着相变开始时,奥氏体形成消耗的能量较多,随着相变过程的进行,奥氏体形成消耗的能量减少,这可能是在相变初期新、母两相的成分、结构和能量差异较大的缘故. 4 GPa 压力处理未改变 T8 钢中的固态相变激活能随相变体积分数变化的趋势,但能增大相变激活能. 其原因可能是经 4 GPa 压力处理后 T8 钢组织的致密度加大,体积减小,而奥氏体的线膨胀系数较大,从而导致经 4 GPa 压力处理后 T8 钢在加热过程中奥氏体长大所受的阻力增大,使得相变激活能增大.

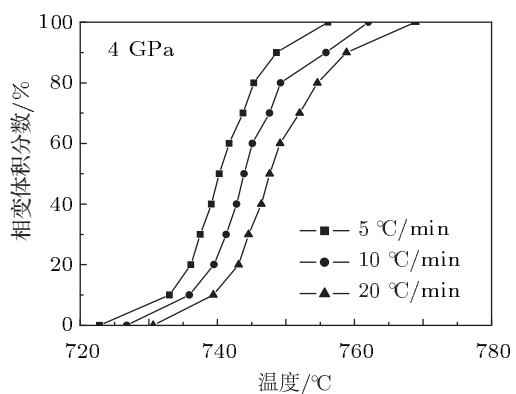
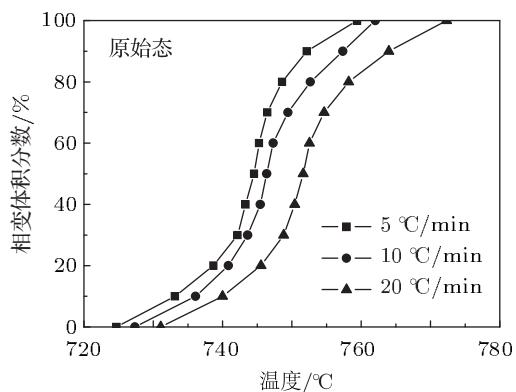


图5 不同升温速率下相变分数与温度的关系

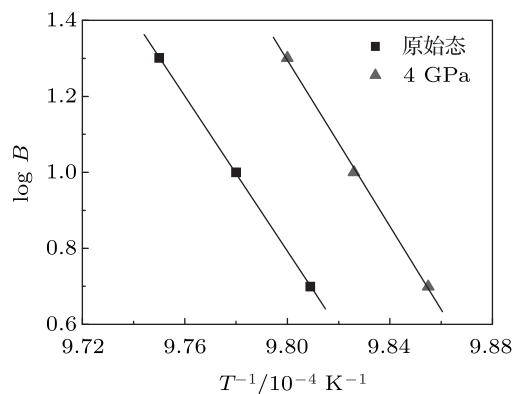


图6 相变体积分数为60%所对应的 $\log B$ 与 T^{-1} 的关系

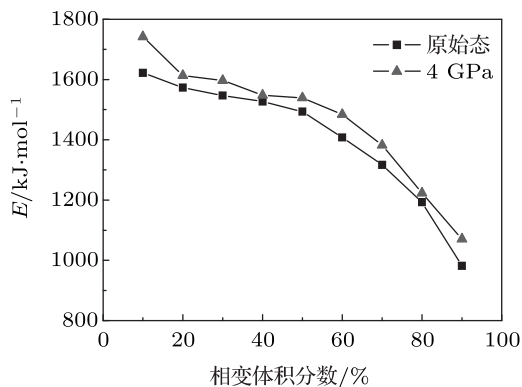


图7 相变激活能与相变体积分数的关系

3.4 Avrami 指数 n

由 DSC 曲线可得出经 4 GPa 压力处理前后样品的 $-\ln[-\ln(1 - X)]$ 与 $\ln B$ 的关系曲线 (图 8), 可见 $-\ln[-\ln(1 - X)] - \ln B$ 基本呈直线关系. 由 $\ln[-\ln(1 - X)] - \ln B$ 直线斜率可计算出 Avrami 指数 n 示于图 9. 可以看出, 经 4 GPa 压力处理前后样品中奥氏体形成的 n 值随温度的升高, 相变体积分数的增加而降低. 相比之下, 经 4 GPa 压力处理后样品的 Avrami 指数 n 小于原始态样品的 Avrami 指数 n .

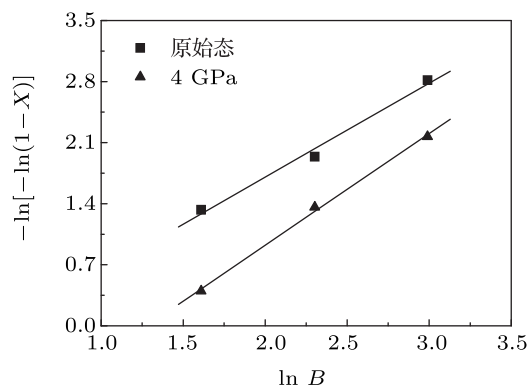


图8 $-\ln[-\ln(1 - X)]$ 与 $\ln B$ 的关系 (740 °C)

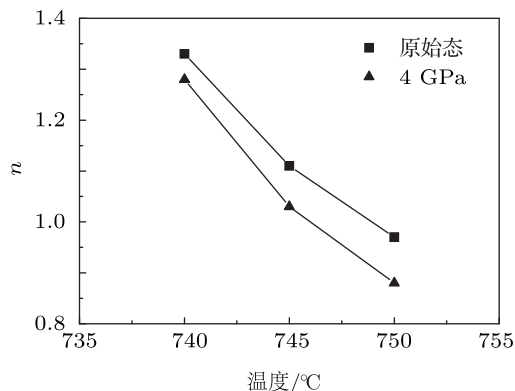


图9 Avrami 指数 n 与所对应温度的关系

从 Avrami 指数 n 来看, 4 GPa 压力处理前后样品的 Avrami 指数 n 均小于 2, 这表明两种状态下 T8 钢中奥氏体的形成过程是一个形核速率逐渐减少且晶粒生长为扩散控制的一维生长^[15,16], 高压处理未改变相变激活能随相变体积分数变化的趋势, 也未改变 Avrami 指数 n 随温度变化的趋势. 可断定 4 GPa 压力处理并未改变 T8 钢在加热过程中奥氏体的形成机理.

图 10 为两种状态 T8 钢经 DSC (冷速为 10 °C/min) 后的金相组织. 可以看出, 两种状态 T8

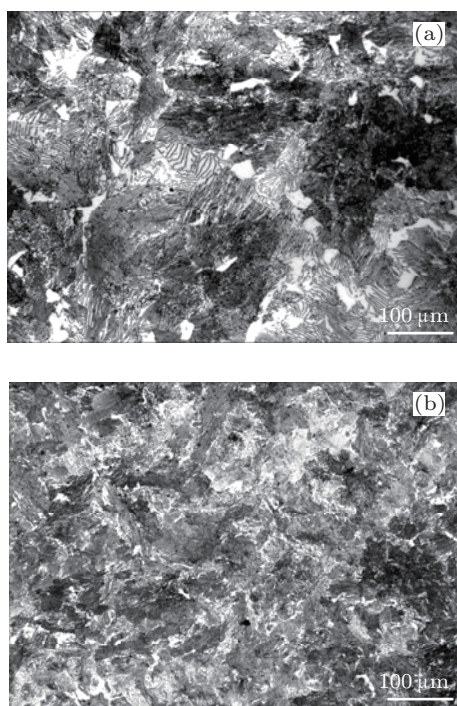


图 10 不同条件下 T8 钢的金相组织 (a) 原始态 + DSC (10 °C/min); (b) 4 GPa 处理后 + DSC (10 °C/min)

钢经 DSC 后的组织均为珠光体. 与 DSC 前相比, 原始态 T8 钢经 DSC 后的组织不变, 仅是经 DSC 后 T8 钢晶粒变小. 这是由于原始态 T8 钢为退火状态, 其相变过程中的冷却速度较慢, 相对比较, DSC

试验的冷却速度 (10 °C/min) 较大的缘故. 而 4 GPa 压力处理 T8 钢经 DSC 后的组织发生改变, 由 DSC 前的马氏体变为珠光体. 由图 10 还可以看出, DSC 试验后, 经 4 GPa 压力处理后试样组织中的晶粒尺寸均较 4 GPa 压力处理前试样组织中的晶粒尺寸小, 且珠光体的片间距也较 4 GPa 压力处理前试样的薄. 这意味着在相同加热条件下 4 GPa 压力处理有助于 T8 钢获得较细的组织结构. 其主要原因是经 4 GPa 压力处理后试样组织中晶界和位错等缺陷较多, 这些缺陷为新晶核的形成提供了有利部位, 致使新相的形核数目增多. 另一方面, 4 GPa 压力处理后试样的固体相变温度降低, 相变激活能增大, 造成原子的扩散阻力增大, 原子的扩散速度减慢, 加上相变时间又缩短, 导致形成的新晶核没有足够的时间长大, 最终形成的晶粒尺寸较小.

4 结论

采用差示扫描量热法能表征 T8 钢在加热过程中固体相变, T8 钢经 4 GPa 压力, 900 °C 保温 10 min 处理后在加热过程中能降低奥氏体的形成温度和 Avrami 指数 n , 缩短相变时间, 增大转变激活能, 有利于形成细小的组织结构, 但对奥氏体的形成机理的影响不大.

- [1] Kang X J, Li P N, Lu J 2011 *Mechanical Engineer* **10** 6 (in Chinese) [康小健, 李鹏南, 陆洁 2011 机械工程师 **10** 6]
- [2] Tan S J 2009 *Metal Working* **15** 35 (in Chinese) [谭诗金 2009 金属加工 **15** 35]
- [3] Tan S Y, Jiang Q 2008 *Materials for Mechanical Engineering* **32** 72 (in Chinese) [谈淑咏, 蒋穹 2008 机械工程材料 **32** 72]
- [4] Zhang Y M, Jie X H, Li Z H, Xu Z 2011 *Advanced Materials Research* **189-193** 1071
- [5] Zhang Y 2010 *Mechanical Engineer* **9** 54 (in Chinese) [张宇 2010 机械工程师 **9** 54]
- [6] Wang H Y, Cui H B, Li C Y, Li X S, Wang K F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5598 (in Chinese) [王海燕, 崔红保, 历长云, 李旭升, 王狂飞 2009 物理学报 **58** 5598]
- [7] Wang H Y, Liu J H, Peng G R, Wang W K 2010 *Chinese Physics B* **19** 096203
- [8] Chen Y, Liu L, Wang Y H, Liu J H 2011 *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **21** 2205
- [9] Li L X, Li M, Zhang L W 2011 *Advanced Materials Research* **320** 14
- [10] Jie J C, Zou C M, Wang H W, Wei Z J 2010 *Materials Letters* **64** 869
- [11] Jie J C, Zou C M, Wang H W, Wei Z J 2010 *Journal of Alloys and Compounds* **506** L12
- [12] Wang H Y, Chen Y, Liu Y W, Li F, Liu J H, Peng G R, Wang W K 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 106201
- [13] Ozawa T 1971 *Polymer* **12** 150
- [14] Liu Y X 1981 *The Principle of Metal Heat Treatment* (Beijing: Mechanical Industry Press) p81 (in Chinese) [刘云旭 1981 金属热处理原理 (北京: 机械工业出版社) 第 18 页]
- [15] Kappes B B, Shield J E 2003 *Journal of Non-Crystalline Solids* **317** 106
- [16] Sinha I, Mandal R K. 2009 *Journal of Non-Crystalline Solids* **335** 361

Effect of 4 GPa pressure treatment on the solid state transformation kinetics of T8 steel in heating process*

Chen Yan¹⁾²⁾ Li Ya-Li³⁾ Liu Jian-Hua¹⁾ Zhang Rui-Jun^{1)†}

1) (*State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

2) (*College of Environmental and Chemical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

3) (*Tangshan Vocational Technology College, Tangshan 063000, China*)

(Received 26 January 2012; revised manuscript received 17 February 2012)

Abstract

The transformation temperatures and durations of solid state transformation in T8 steel before and after 4 GPa pressure treatment are measured using differential scanning calorimetry, and the transformation activation energy and Avrami exponent are also calculate. Then the effects of 4 GPa pressure treatment on solid state transformation kinetics in T8 Steel are investigated based on the kinetic parameters and the observation of microstructure. The results show that the solid state transformation in T8 steel shifts toward the low temperature region after 4 GPa pressure treatment. The high pressure treatment can reduce the phase transformation time and Avrami exponent and enhance the phase transformation activation energy, which is favorable for refining the grains but has little effect on the phase transformation mechanism.

Keywords: high pressure treatment, T8 Steel, solid state transformation

PACS: 62.50.-p, 81.05.Bx 64.70.kd

* Project supported by the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars of Hebei Province.

† E-mail: Zhangrj@ysu.edu.cn