

固态相变强化合金球铁取代 40Cr 制造连杆*

吴 持 光

(华侨大学精密机械工程系, 泉州 362011)

摘要 介绍为取得更好的机械性能与经济效益, 探讨采用经稀土元素“铈(Ce)”改性的铜钼合金球墨铸铁(经固态相变工艺调质强化后), 取代 40Cr 合金锻钢制造 135 型高速柴油机斜剖式连杆。

关键词 连杆, 球墨铸铁, 固态相变

分类号 TG 166.9

连杆是柴油机的关键零件之一。在柴油机工作时, 杆身承受着按余弦规律周期性变化的大的压应力与小的拉应力, 以及按脉动规律周期变化的纵向弯曲应力。即: 连杆在工作中所承受的是急剧变化着的动载荷。因此, 135 型高速柴油机的主要生产厂——卡特彼勒上海发动机有限公司便采用 40Cr 合金钢锻造连杆坯料。该法强度指标固然可达到, 但生产工艺却较复杂: 须经切料、锻长、粗锻型、模锻、切飞边等多道工序, 经 4 至 5 次火锻成型, 其后还须经调质热处理, 始能制成连杆毛坯。而且整个制坯过程工序长、耗时耗能多、工人劳动强度大、劳动环境差。现采用经稀土元素“铈(Ce)”改性的铜钼合金球墨铸铁, 经固态相变改善与强化其性能后, 取代 40Cr 合金钢锻件制造 135 型斜剖式连杆。此举不仅实现“以铸代锻、以铁代钢”的技术革命, 而且可望大幅度降低材料成本、工时消耗。

1 连杆材料及制坯工艺的改革

该零件原来要求材料的性能指标为: $40Cr$ 钢模锻成型, 按“T265”工艺调质处理后, 性能参数为 $\sigma_b = 980 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$; $\sigma_s = 785 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$; $\delta_5 = 9\%$; $\psi = 40\%$; $\alpha_k = 59 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$; HB250~280。现拟采用上述合金球铁取代 40Cr 锻钢制造此斜剖式连杆。

在 17 种稀土元素中, 唯有“铈(Ce)”在合金球墨铸铁的浇铸温度范围(1370~1430℃), 具有最低的蒸气压($t = 1430^\circ\text{C}$ 时, 仅为 19.74 Pa)。铈(Ce)具有活泼的化学性质, 当将它加入铁水时, 可对球铁铁水产生以下 7 个作用: (1) 脱氧。(2) 去硫。(3) 消除锌、锡、铅、锑、铋、砷等有害杂质的反球化作用, 确保可靠的球化效果。(4) 细化石墨粒度、强化基体、促进合金化。(5) 减少铁水的含气量, 改善其流动性, 以提高铸造质量。(6) 提高球化剂的吸收率。(7) 降低共晶点、增加铁水过冷度。

本方案拟采用的合金球铁的生产流程图如图 1 所示。

* 本文 1994-07-22 收到; 福建省自然科学基金资助课题

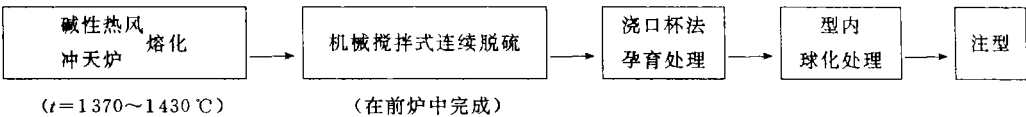


图 1 合金球墨铸铁的生产流程图

浇注时,控制铁水温度使其偏于上限,则既可补偿因脱硫、球化等反应过程中消耗的热能,又可提高合金球铁铁水的流动性,提高铸件质量.机械搅拌式连续脱硫,可提高脱硫剂 CaC_2 的脱硫效果,确保铁水中含硫元素的质量分数小于 0.0002,并可使铁水在脱硫过程中,温降值最少.因此,上述工艺的实施,可为制得高牌号的合金球铁铸件提供保证.

2 材料的化学成份及固态相变强化工艺

获得了高牌号的合金球铁铸件,还须靠及时恰当的热处理工艺改善与强化其性能,才能达到甚至超过 40Cr 锻钢制件的性能.稀土元素“铈(Ce)”改性的铜钼合金调质索氏体球墨铸铁的成分见表 1.

表 1 稀土改性的铜钼合金球铁所含元素的质量分数($\times 10^{-2}$)

C	Si ^①	Mn	Mo	Cu	S	P	Mg _{RE}	REO _{RE} ^②	Fe
3.2~3.5	2.2~3.0	0.2~0.35	0.35~0.41	0.7~0.9	≤0.018	≤0.07	≤0.035	≤0.010	余量

①欲得高强度时,控制 Si 含量趋于下限;欲得高冲击韧性时,控制 Si 含量趋于上限;②REO 指加入球铁铁水中用以改性处理的微量稀土元素,此处为铈(Ce).

上述合金球铁的热处理与冷加工工艺规程参见下图.

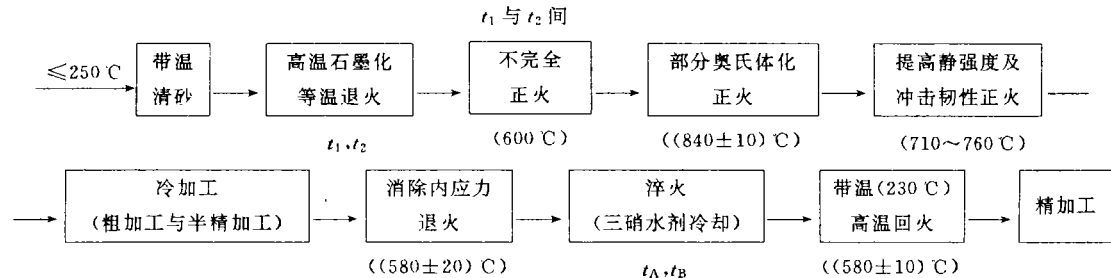


图 2 合金球铁的热处理与冷加工工艺规程

t_1 为 900~950℃; t_2 为 710~760℃; t_A 为 (860 ± 20) ℃; t_B 为 (825 ± 10) ℃

欲得到最大强度时取 t_A 值;欲得到最大冲击韧性时取 t_B 值.合金球铁的铸态金相组织组成为:少量铁素体与自由渗碳体弥散分布于以珠光体及球状石墨为主的基体中.其弹性模量为 $E_{\text{球}}=1.72\times 10^5\sim 1.79\times 10^5\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$; $\overline{E}_{\text{球}}=1.75\times 10^5\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$.而作为对比的灰口铸铁,其弹性模量仅为 $E_{\text{灰}}=0.79\times 10^5\sim 1.62\times 10^5\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$.因此,合金球铁铸件清砂后,应立即进行高温石墨化退火.合金元素对球铁的作用如下.(1)铜元素在球铁中的作用在于降低铁碳共析温度,促进珠光体的形成(铜钼球铁中的珠光体质量分数一般可达 0.9 以上),并促使珠光体晶粒细化.这将使铸件的铸态强度、硬度、屈服强度都显著提高.(2)钼元素对球铁性能的影响在于:钼(Mo)的熔点高($t=2623\text{℃}$),加入合金球铁后,可使其 S 曲线右移,即有利

于该材料进行各种热处理,并可细化球状石墨,使铸件组织致密.因而该元素能提高铸件的疲劳强度,稳定球铁中的奥氏体,提高淬透性,并扩大 γ 相的区域范围,使厚大断面的铸件得以良好球化.同时,钼元素也是促进珠光体生成的元素,其可增强热处理强化的效果.(3)硅含量对球铁共析转变温度的影响,如图3所示.图中 A_{c1} 为球铁加热时的临界温度范围起始线, A_{c2} 为球铁加热时的临界温度范围终止线; A_{r1} 为球铁冷却时的临界温度范围起始线; A_{r2} 为球铁冷却时的临界温度范围终止线.

从图3可看出,随着硅含量的增高,球铁的共析临界温度提高,共析临界温区加宽.而质量分数较高的硅含量(0.02~0.32)对热处理工艺的不利影响(在350~500℃温区内缓冷时,易出现回火脆性)为钼元素(质量分数为0.0035~0.0041)的作用所弥补而得以避免.

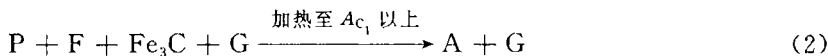
合金球铁的热处理工艺规程(见图2)详述如下.

(1) 带温清砂. 为避免铸态球铁的不稳定、高应力相区;同时亦为缩短铸造周期,改善铸件金相组织;采用“带温清砂”(半自动化清砂). 实施本工艺,可有效地防止铸态球铁件处于高应力不稳定相区— M_s 线以下的马氏体区,即当铸件表层温度 $t_{表} \leq 250^\circ\text{C}$ 时,便实施半自动化带温清砂. 随后,即由机械手将其置入盐浴I中,实施工序(2).

(2) 高温石墨化退火及部分奥氏体化正火. 本工序的温度及相变规律如图4所示. 实施铸件“带温清砂”的意义在于:当铸件表层温度 $\leq 250^\circ\text{C}$ 时,即实施半自动化带温清砂,可基本消除铸件内应力,防止开裂的发生. 此时,其铸态结构为:珠光体质量分数大于0.8+少量铁素体+球状石墨+极少量渗碳体. 铸件带温($\leq 250^\circ\text{C}$)投入盐浴I中, ($t_1=900\sim 950^\circ\text{C}$,即 $A_{c1}+100\sim 150^\circ\text{C}$),升温至 t_1 . 从铸件入盐浴I起,计时 $t_a=1.5+\delta/25 \geq 2.5\text{h}$. 铸件金相结构在此过程中发生固态相变,由上述铸态金相转变为奥氏体+球状石墨. 当铸件温度升至该合金球铁的共析反应转变温区($675\sim 780^\circ\text{C}$)时,铸态金相中的游离渗碳体和珠光体中的共析渗碳体发生分解反应,即其金相组织的转变过程如下



其固态相变的方程为



待 t_1 时限到,将工件从盐浴I中夹出,风冷或雾冷至 600°C (由附于夹持装置上的半导体点温计测控),使工件经历不完全正火,即部分奥氏体发生转变,成为珠光体、索氏体和球状石墨. 反应方程为

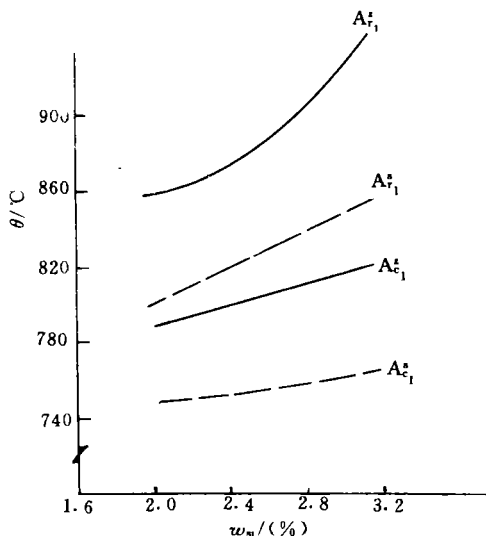


图3 硅含量对球铁共析转变温度的影响

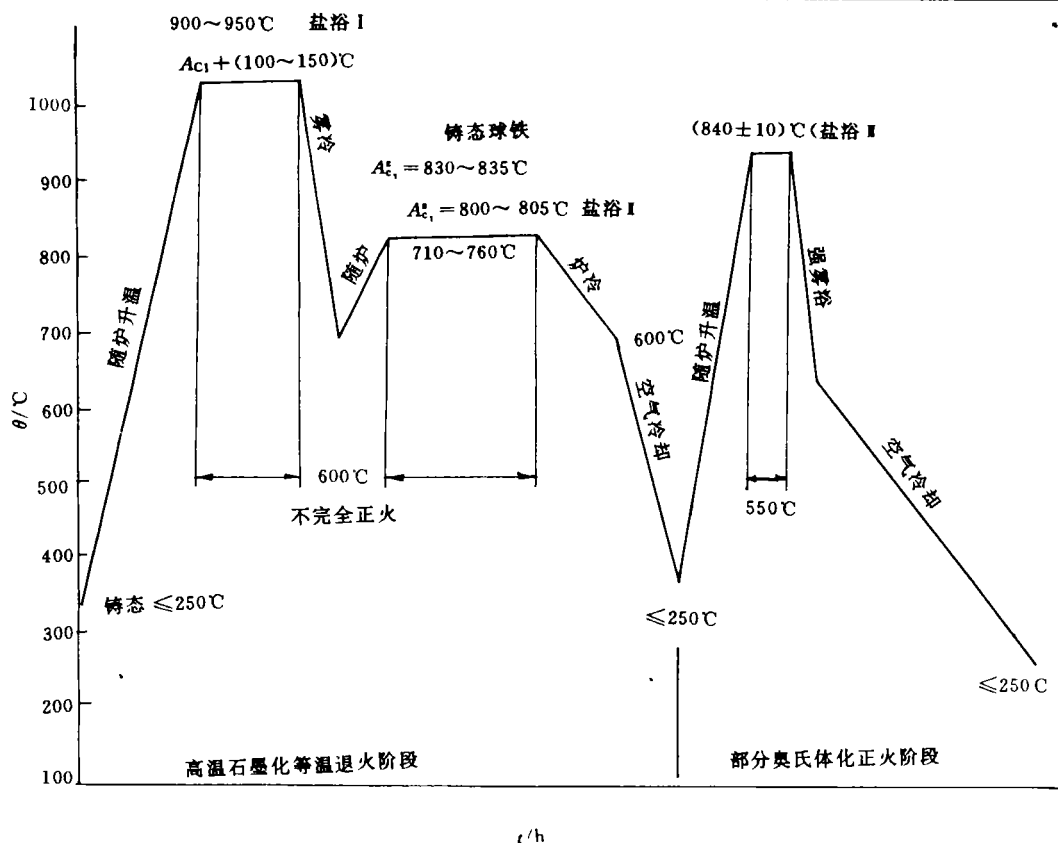
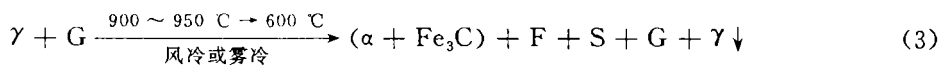
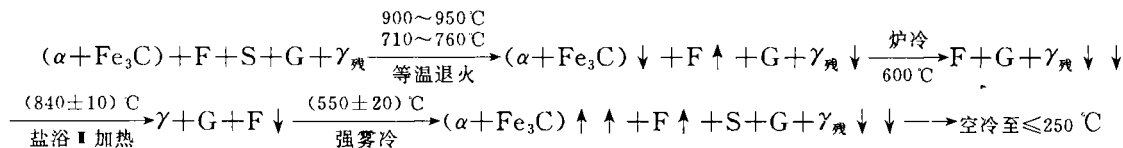


图4 高温石墨化退火不完全正火及部分奥氏体化正火



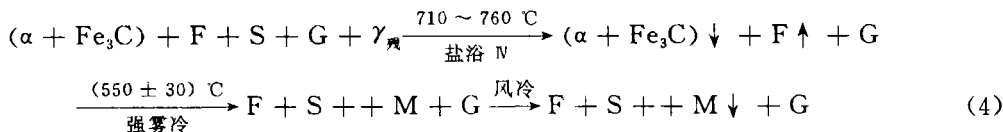
然后将工件转入盐浴Ⅰ中($t_1 = 710 \sim 760^\circ\text{C}$), 计时 $t_b = 2 + \delta/25 \geq 3\text{h}$, 实施等温退火. 在此过程中, 珠光体、奥氏体含量降低, 游离渗碳体消失而铁素体的含量提高. 合金球铁铸件经高温石墨化等温退火后, 既可促使珠光体的分解完全、充分, 又可彻底消除铸态工件内诸应力对工件的影响, 使工件从高应力状态转变为无应力状态. 等温退火工艺缩短了总的退火时间. 当 H_2 时限达标, 将工件连炉冷至 600°C (在此降温缓冷中, 珠光体完全转变为铁素体, 残余奥氏体量亦进一步降低至极小值). 再将工件自盐浴Ⅰ中取出转入“部分奥氏体化正火”盐浴(盐浴Ⅲ)进行正火处理($t_2 = (840 \pm 10)^\circ\text{C}$). 经1h保温后, 取出以强雾冷至 $500 \sim 600^\circ\text{C}$ (半导体点温计测控), 转风冷至 $\leq 250^\circ\text{C}$. 经上述热处理可使工件材料中的珠光体质量分数高达 $0.9 \sim 0.95$. “部奥”热处理过程的固态相变方程如下



与“完全奥氏体化正火”相比, “部奥”处理的工件具有较高的机械性能——较高的塑性、韧性、强度、冲击韧性、延伸率. 因此“部奥”处理更适合合金球墨铸铁的相变特点.

(3) 提高静强度及冲击韧性正火. 将上述空冷至 $\leq 250^\circ\text{C}$ 的工件, 转入盐浴Ⅳ($t_N =$

710~760℃, 经1h 保温后, 取出以强雾冷至(550±30)℃, 再转风冷至≤250℃, 相变方程如下



本工序的温度及相变规律如图5所示. 通过反应, 可进一步细化合金球铁的晶粒度, 改善合金偏析, 使组织均匀化, 并可使其静强度值及冲击韧性值皆得以显著提高. 更重要的是, 工序(3)的实施, 可使经调质处理后的工件, 性能参数更为稳定.

(4) 冷加工. 经工序(3)处理后的工件, 转入机加工车间进行粗、半精加工后, 再转回热处理车间实施工序(5).

(5) 消除内应力退火. 本工序的温度及相变规律如图6所示. 本工序目的: 消除工序(2)及工序(3)中正火冷却时形成的热应力及粗、半精冷加工后的形变应力, 以确保工件以无应力状态进入“工序(6)—调质”, 使调质淬火时可能产生的变形量减少到最低限度. 工序(5)的具体操作及固态相变规律为: 工件以

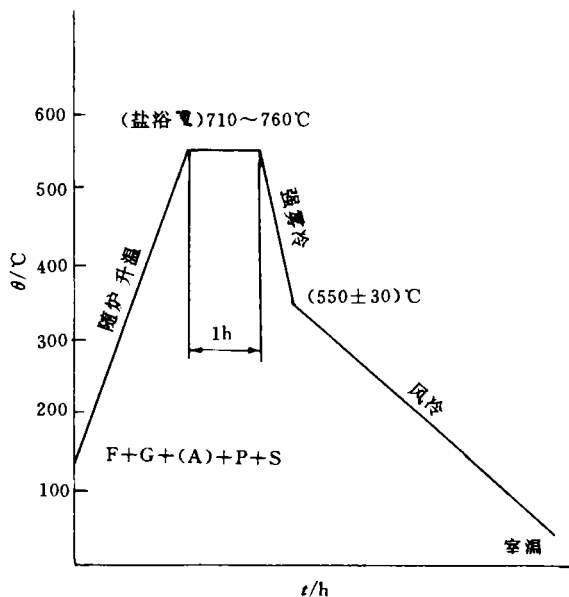


图5 提高静强度及冲击韧性正火

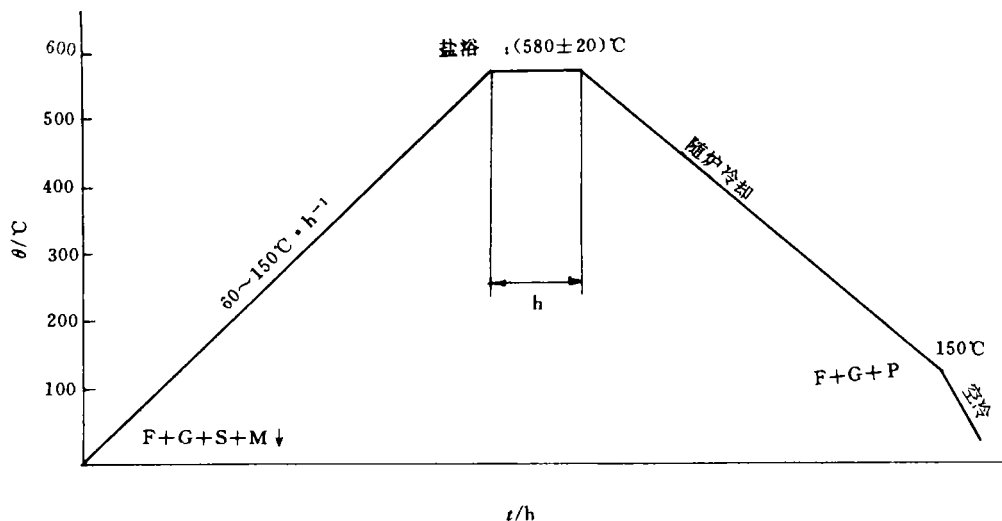
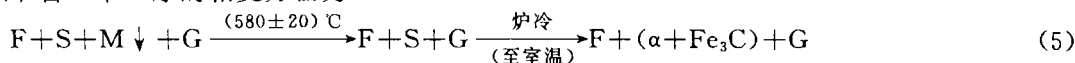


图6 消除内应力退火

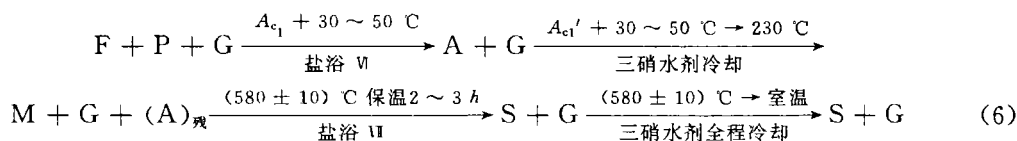
室温入炉, 以每小时60~150℃的加热速度升温至(580±20)℃, 保温 $t_5 = 2 + \delta/25$ h后, 连炉冷却至150~200℃, 出炉空冷至室温, 即可消除工件内部90%~95%的内应力, 为工序(6)作好

组织准备. 本工序的相变方程为



(6) 调质(淬火+带温高温回火). 铜钼合金球铁在调质淬火过程中的相变过程及规律与钢相似(参看图7), 即将工序(5)处

理完毕的合金球铁连杆, 置入调质淬火盐浴炉中(盐浴Ⅵ) $t_{\text{V}_6} = (860 \pm 20)^\circ\text{C}$ (常规, 强度可达最佳值); $t_{\text{V}_6} = (825 \pm 10)^\circ\text{C}$ (高冲击韧性: $\alpha_K > 49 \text{ Nm} \cdot \text{cm}^{-2}$), 使工件随炉升温至淬火温度($A_{c1}' + 30 \sim 50^\circ\text{C}$). 淬火温度的具体取值还须参考铜钼合金球铁中的含硅量. 高者, 取上限; 低者, 取下限. 保温时间以确保奥氏体达到碳饱和为度, 当然越短越好. 此统计值为每 mm 40~50 s. 务必防止因保温时间延长而导致奥氏体晶粒长大粗化. 当淬火保温时间已到(图7上部盐浴处的短水平线段), 将工件从盐浴Ⅵ中取出, 淬入三硝水剂(25% $\text{NaNO}_3 + 20\% \text{NaNO}_2 + 20\% \text{KNO}_3 + 35\% \text{H}_2\text{O}$), 并冷至 $t \leq 230^\circ\text{C}$ (此温度值由夹持器上所附半导体点温计测控)时, 即取出转入回火盐浴炉(盐浴Ⅶ)中, 实施带温高温回火, 即使工件随炉升温至盐浴Ⅶ的温度, 即 $(580 \pm 10)^\circ\text{C}$, 并保温2~3 h 后将工件淬入三硝水剂中(溶液温度 $< 25^\circ\text{C}$), 冷却至室温. 本工序的固态相变方程如下



务必注意: 切不可使经盐浴Ⅶ在 $(580 \pm 10)^\circ\text{C}$ 保温2~3 h 的工件随炉缓冷! 否则, 将导致其冲击韧性值剧减.

3 结束语

笔者认为, 经稀土元素“铈(Ce)”改性, 并通过浇口杯法孕育处理细化晶粒, 型内球化工艺浇铸出的铜钼合金球铁, 经上述诸工序的固态相变强化工艺获得的高性能索氏体铜钼合金球墨铸铁, 是可以取代40Cr 合金锻钢制造 135 型高速柴油机斜剖式连杆的. 此举将实现“以铸

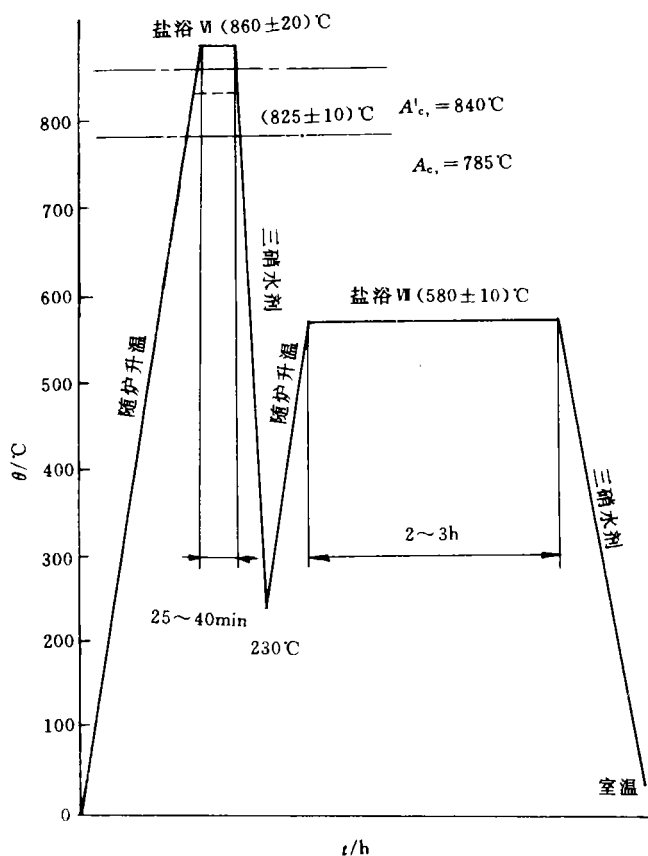


图7 合金球铁的调质

代锻”,在保证各有关性能指标的前提下,达到了既降低生产成本,又提高生产率;还可降低工人的劳动强度.此外,采用“以铸代锻”工艺改革后,可实现“钩型连杆”的“二合一”造型(连杆盖同样也可实现“二合一”造型),这样不仅可增大工件在加工中的刚性,改善加工条件;而且可提高加工质量和生产率.因此,本方案具有较大的实用意义.

参 考 文 献

- 1 安运静. 热处理工艺学. 北京:机械工业出版社,1982. 36~125
- 2 姚忠凯. 钢的组织转变. 北京:机械工业出版社,1980. 1~68
- 3 《热处理手册》编委会编. 热处理手册. 第2分册. 北京:机械工业出版社,1978. 220~234
- 4 依·依·诺维柯夫编. 金属热处理理论. 王子祐译. 北京:机械工业出版社,1987. 103~354

Replacing 40Cr with Solid-State Phase Change Intensified Alloy Nodular Cast Iron in Manufacturing Connecting Level

Wu Chiguang

(Dept. of Precis. Mech. Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract For manufacturing connecting level of 135 typed high speed diesel, the author proposes to replace 40 Cr forged steel with a new material-Cu Mo alloy -nodular cast iron by which a better mechanical performance and economic benefit will be ensued. As a pretreatment, this new material is modified by a rare earth element Ce at first, and then is tempered and intensified by solid-state phase change.

Keywords connecting level, nodular cast iron, solid-state phase change