

高碳钢盘条马氏体形成临界冷却速率的数值模拟

纪元 李亮 陆民刚 兰鹏 张家泉
(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

摘要 通过JMatPro软件和根据钢厂生产的70钢(0.67C,0.17Si,0.50Mn,0.010P,0.010S,0.10Cr)盘条,模拟对比高碳钢盘条中C(0.65%~1.00%),Si(0.20%~0.55%),Mn(0.50%~1.45%),Cr(0.10%~0.75%),S(0.010%~0.070%),P(0.010%~0.060%)和奥氏体晶粒度级别(5.0~8.0)对马氏体形成临界冷却速率(CCR_{Mf})的影响,建立了预测高碳钢CCR_{Mf}的表达式:CCR_{Mf}/(°C·s⁻¹)=4.088-9.88×[C]/%-3.58×[Si]/%-5.12×[Mn]/%-0.001×[P]/%+23.45×[S]/%-7.42×[Cr]/%+2×G_m,G_m-奥氏体晶粒度。结果表明,CCR_{Mf}随C、Mn、Si、Cr含量的增大而减小,随S含量和原奥氏体晶粒度的增大而增大,P对CCR_{Mf}几乎没有影响;C和Mn对CCR_{Mf}的影响最大;70钢马氏体形成临界冷却速率实测值8.51°C/s,计算值8.79°C/s,误差为0.28°C/s。建议高碳钢连铸过程应重点控制C、Mn偏析,并在轧制过程细化奥氏体晶粒尺寸,以减少马氏体组织的形成。

关键词 高碳钢盘条 马氏体 临界冷却速率 JMatPro软件 数值模拟

Numerical Simulation on Critical Cooling Rate of Formation of Martensite in High Carbon Steel Rod Coil

Ji Yuan, Li Liang, Lu Mingang, Lan Peng and Zhang Jiaquan
(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract By using JMatPro software and according to the 0.70C steel coil (0.67C, 0.17Si, 0.50Mn, 0.010P, 0.010S, 0.10Cr) produced at steel works, the effect of C (0.65% ~ 1.00%), Si (0.20% ~ 0.55%), Mn (0.50% ~ 1.45%), Cr (0.10% ~ 0.75%), S (0.010% ~ 0.070%), P (0.010% ~ 0.060%) and austenite grain rating (5.0 ~ 8.0) in high carbon steel rod coil on martensite formation critical cooling rate (CCR_{Mf}) has been simulate to get the predict high carbon steel CCR_{Mf} expression: CCR_{Mf}/(°C·s⁻¹)=4.088-9.98×[C]/%-3.58×[Si]/%-5.12[Mn]/%-0.001[P]/%+23.45×[S]/%-7.42×[Cr]/%+2×G_m, G_m-austenite grain size rating. Results show that with increasing the C, Mn, Si and Cr content in steel the CCR_{Mf} decreases, with increasing the S content in steel and original austenite grain size rating the CCR_{Mf} increases and the effect of P on CCR_{Mf} is minor; the effect of C and Mn on CCR_{Mf} is largest; and the measure value of martensite formation critical cooling rate (CCR_{Mf}) of the 70C steel is 8.51°C/s, and its calculated value is 8.79°C/s with error 0.28°C/s. It is suggested that during high carbon steel casting process the key point is to control C and Mn segregation and to fine austenite grain size during rolling process for decrease of formation of martensite structure.

Material Index High Carbon Steel Rod Coil, Martensite, Critical Cooling Rate, JMatPro Software, Numerical Simulation

盘条拉拔断裂的重要原因之一是出现马氏体异常组织^[1-6]。轧后冷却速率高于马氏体形成临界冷却速率(CCR_{Mf})是形成马氏体的根本原因。合理制定冷却制度可有效抑制马氏体的产生。

基于实验结果总结的经验公式有:

$$CCR_{Mf}/(°C \cdot s^{-1}) = 97 - 19 \times [Si]/\% - 70 \times [Mn]/\% - 50 \times [Cr]/\% - 224 \times [P]/\% \quad (1)^{[7-8]}$$

$$CCR_{Mf}/(°C \cdot s^{-1}) = 43.1 - 5.8 \times [C]/\% - 18 \times [Si]/\% - 14 \times [Mn]/\% - 14.8 \times [Cr]/\% - 47.5 \times [V]/\% - 0.2 \times (d\gamma) \quad (2)^{[9]}$$

式(1)忽略了奥氏体晶粒尺寸对CCR_{Mf}的影响,

计算结果有一定局限性。式(2)虽然考虑了奥氏体晶粒尺寸(d_γ)的影响,但结果仅适用于其实验钢种。本文通过材料性能软件JMatPro模拟典型高碳钢的CCT曲线,探讨各元素以及奥氏体晶粒度对CCR_{Mf}的影响,并提出预测高碳钢CCR_{Mf}的表达式。

1 马氏体形成临界冷却速率表达式的建立

1.1 成分对马氏体形成临界冷却速率的影响

1.1.1 C元素对马氏体形成临界冷却速率的影响

以钢厂生产的70钢为模拟对象(表1,后续CCT曲线计算中均参考此表中数值)。将C含量设为单一变量,其波动范围为0.67%~0.97%,其他元素含量不变。高碳盘条的终轧温度一般在840~860°C,因此将初始温度设定为850°C。

表 1 70 钢化学成分及晶粒度

Table 1 Chemical composition and grain size rating of 0.70C steel

化学成分 / %								晶粒度
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	(ASTM)/级
0.67	0.17	0.5	0.010	0.010	0.10	0.10	0.10	7.5

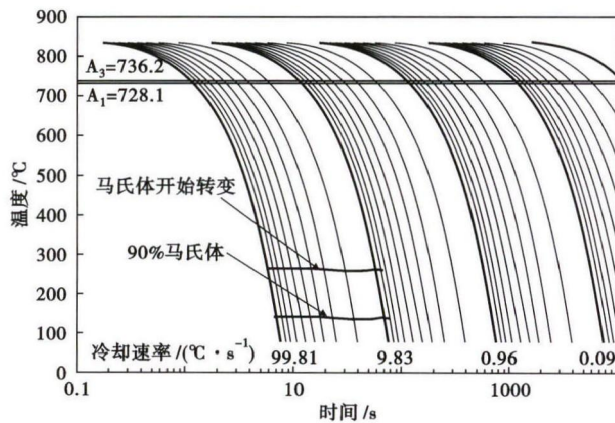


图 1 0.67% C 钢的连续冷却转变 (CCT) 曲线

Fig. 1 Curves of continuous cooling transformation (CCT) of 0.67% C steel

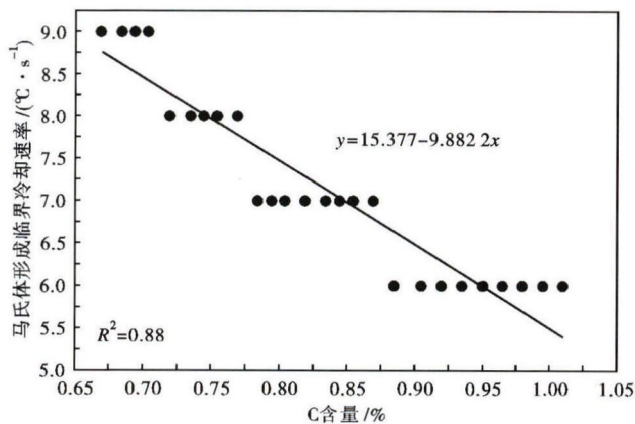


图 2 碳含量对高碳钢马氏体形成临界冷却速率的影响

Fig. 2 Effect of Carbon content on martensite formation critical cooling rate of high carbon steel

图 1 为模拟 C 含量为 0.67% 时, 70 钢的 CCT 曲线。马氏体形成临界冷却速率可由式(3)计算。

$$CCR_{Mf} = (T_s - T_t) \div t \quad (3)$$

式中: T_s - 盘条初始温度/°C; T_t - 马氏体开始转变温度/°C; t - 马氏体开始转变时间/s。

当 C 含量为 0.67% 时, 马氏体临界冷却速率 (CCR_{Mf}) 的模拟计算值为 9.01 °C/s。同理, 模拟不同 C 含量的 CCT 曲线, 按照式(3)计算 CCR_{Mf} , 并做出 CCR_{Mf} 随 C 含量变化的散点图, 如图 2 所示。拟合得到在其它条件 (其他元素的含量、晶粒度) 不

变, CCR_{Mf} (°C/s) 随 C 含量的线性变化直线, 关系式如式(4)所示。图 2 中 R^2 为线性回归拟合度, 其值越高 (越接近于 1), 拟合性越好。

$$CCR_{Mf} = -9.8822 \times [C] / \% + 15.377 \quad (4)$$

分析图 2 和式(4)可知:

(1) C 的比例系数为负数, 即在相同的工艺条件下, 碳含量高的盘条其 CCR_{Mf} 小, 淬透性高。

(2) 当其他成分不变, 如果 C 含量从 0.70% 增加到 0.80%, 即偏析指数为 1.143 时, CCR_{Mf} 从 8.46 °C/s 降低至 7.47 °C/s, 可减小 0.99 °C/s。

(3) 当盘条心部出现较严重的 C 偏析时, 心部的 CCR_{Mf} 远远小于表面, 这是马氏体更容易在盘条中心形成的原因之一。

1.1.2 其他元素对马氏体形成临界冷却速率的影响

通过模拟 CCT 曲线, 分别做出马氏体临界冷却速率 (CCR_{Mf}) 与 Si、Mn、Cr、P、S 含量变化的散点图, 如图 3 (a, b, c, d, e) 所示。拟合一次关系式, 如式(5)~(9), 计算过程与 C 相同。

$$CCR_{Mf} = -3.58 \times [Si] / \% + 9.674 \quad (5)$$

$$CCR_{Mf} = -5.118 \times [Mn] / \% + 10.91 \quad (6)$$

$$CCR_{Mf} = -7.428 \times [Cr] / \% + 9.237 \quad (7)$$

$$CCR_{Mf} = 23.45 \times [S] / \% + 8.721 \quad (8)$$

$$CCR_{Mf} = 0.001 \times [P] / \% + 8.999 \quad (9)$$

由式(5)~(9)可知, 关系式中 Si、Mn、Cr 的比例系数为负数, CCR_{Mf} 随 Si、Mn、Cr 含量的增高而减小, 表明 Si、Mn、Cr 可以使 CCT 曲线右移, 增加钢的淬透性, 利于马氏体形成。结合现场生产, 假设当 Mn 含量从 0.65% 增加到 1.00%, 即偏析指数为 1.538 时, CCR_{Mf} 从 7.587 °C/s 降低到 5.795 °C/s。又因为 Mn 元素极易在枝晶中产生微观偏析, 所以 Mn 对 CCR_{Mf} 的影响较大。当 Si 含量从 0.27% 增加到 0.37%, 即偏析指数为 1.37 时, CCR_{Mf} 从 8.71 °C/s 降低到 8.35 °C/s, 变化量仅为 0.36 °C/s。当 Cr 含量从 0.2% 增加到 0.3%, 即偏析指数为 1.5 时, CCR_{Mf} 从 7.752 °C/s 降低到 7.009 °C/s, 变化量仅为 0.743 °C/s。因此, Mn、Si 和 Cr 对 CCR_{Mf} 的影响有限。

由式(8)可知, S 的比例系数为正数, 表明增加盘条中 S 的含量, 在一定程度上增大 CCR_{Mf} , 不利于马氏体的形成。一般钢中 S 含量 $\leq 0.045\%$, 所以 S 对 CCR_{Mf} 的影响较小。由式(9)可知, P 的比例系数仅为 0.001, 对 CCR_{Mf} 几乎没有影响。

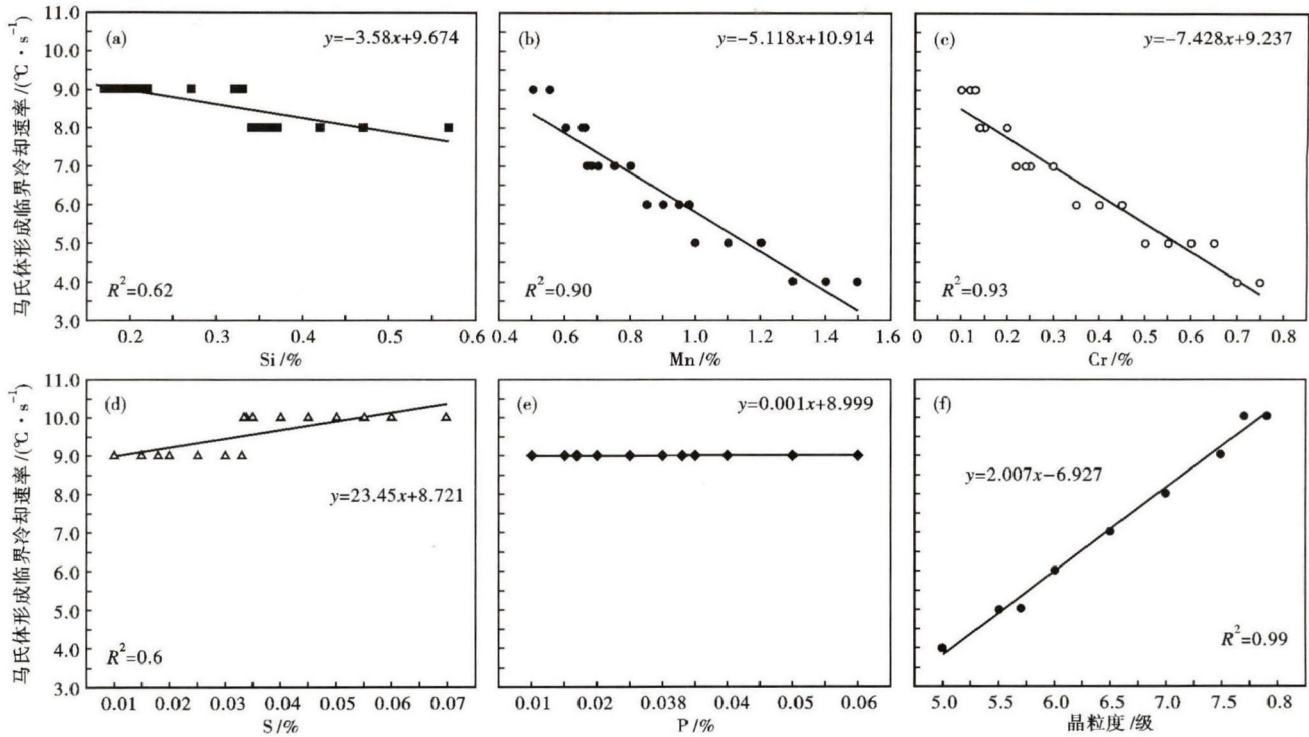


图3 Si(a), Mn(b), Cr(c), S(d), P(e)和奥氏体晶粒度(f)对高碳钢马氏体形成临界冷却速率的影响

Fig. 3 Effect of Si (a), Mn (b), Cr (c), S (d), P (e) and austenite grain size rating (f) on martensite formation critical cooling rate of high carbon steel

1.2 晶粒度对马氏体形成临界冷却速率的影响

为使高碳钢盘条具有良好的力学性能,要求其珠光体片层间距细小,这需要控制相变前奥氏体再结晶过程及其轧后晶粒尺寸^[10]。根据钢厂生产情况,模拟设定奥氏体晶粒度波动在5~8级,计算不同晶粒度时的CCT曲线,做出 CCR_{Mf} 随奥氏体晶粒度(G_m)变化的散点图,如图3(f)所示,并拟合其一次表达式:

$$CCR_{Mf} = 2.0 \times G_m - 6.927 \quad (10)$$

分析图3(f)及式(10)可知:

(1) CCR_{Mf} 与奥氏体晶粒度呈线性关系,且比例系数为正,即在相同的工艺条件下,奥氏体晶粒度级别小(即晶粒尺寸粗大)的盘条其 CCR_{Mf} 较小,在高冷却速率下易生成马氏体组织。

(2) 当奥氏体晶粒度级别从5.0增加到7.5时, CCR_{Mf} 从3.692 $^\circ C/s$ 增大到8.692 $^\circ C/s$,增加了5 $^\circ C/s$,变化量较大。可见奥氏体晶粒大小对 CCR_{Mf} 的影响很大。

2 马氏体形成临界冷却速率表达式的建立与验证

2.1 马氏体形成临界冷却速率表达式的建立

马氏体形成临界冷却速率与C、Si、Mn、P、S、Cr

等含量和晶粒度级别均近似为一次函数关系,其表达式为:

$$CCR_{Mf}/(^\circ C \cdot s^{-1}) = -9.88 \times [C]/\% - 3.58 \times [Si]/\% - 5.12 \times [Mn]/\% - 0.001 \times [P]/\% + 23.45 \times [S]/\% - 7.42 \times [Cr]/\% + 2 \times G_m + D \quad (11)$$

式中: G_m -奥氏体晶粒度级别; D -修正项。将模拟过程中的 CCR_{Mf} 计算值代入式(11)中,求得 D 的平均数为4.088。因此,建立预测高碳钢马氏体形成

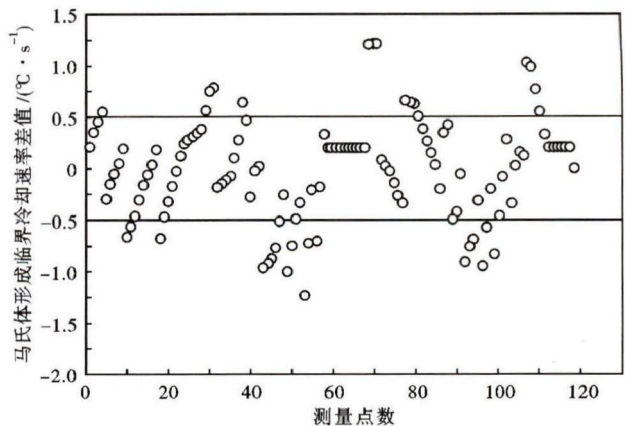


图4 表达式与模拟CCT曲线计算 CCR_{Mf} 的差值分布
Fig. 4 Distribution of difference between CCR_{Mf} calculated by formula and simulated by CCT curves

表 2 高碳钢马氏体形成临界冷却速率(CCR_{Mf})的实验值,计算值和差值

Table 2 Measure value, calculated value and difference of martensite formation critical cooling rate (CCR_{Mf}) of high carbon steels

文献	晶粒度/级	成分/%						临界冷却速率/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)		
		C	Si	Mn	P	S	Cr	实验值	计算值	差值
[11]	7.5	0.83	0.23	0.75	0.01	0.008	0.19	6.00	5.00	1.00
[12]	7.5	0.80	0.21	0.79	0.01	0.002	0.20	5.00	4.95	0.05
[13]	7.5	0.80	0.22	0.80	0.02	0.014	0.27	6.00	5.62	0.38
[14]	7.5	0.80	0.22	0.42	-	-	0.35	5.60	5.71	0.11
本文	7.5	0.67	0.17	0.50	0.010	0.010	0.10	8.51	8.79	0.28

表 3 70 钢中各元素偏析对马氏体形成临界冷却速率(CCR_{Mf})的影响

Table 3 Effect of segregation of each element on martensite formation critical cooling rate (CCR_{Mf}) of 0.70C steel

元素	初始含量/ %	偏析后 含量/%	偏析指数	CCR_{Mf} 变化量/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)
C	0.67	1.01	1.5	3.31
Si	0.10	0.15	1.5	0.18
Mn	0.65	0.98	1.5	1.66
P	0.01	0.02	1.5	0
S	0.01	0.02	1.5	0.12
Cr	0.10	0.15	1.5	0.37

临界冷却速率的表达式,如式(12):

$$CCR_{Mf}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}) = 4.088 - 9.88 \times [C]/\% - 3.58 \times [Si]/\% - 5.12 \times [Mn]/\% - 0.001 \times [P]/\% + 23.45 \times [S]/\% - 7.42 \times [Cr]/\% + 2 \times G_m \quad (12)$$

2.2 表达式计算值与 JMatPro 模拟值的对比

针对模拟过程中假定的钢种成分及晶粒度,将表达式(12)预测的 CCR_{Mf} 与 JMatpro 模拟 CCT 曲线计算出的 CCR_{Mf} 进行对比,做出 CCR_{Mf} 差值分布图,

参考文献

- [1] 金桂香,王福明,付军,等. 82B 高碳钢盘条中马氏体成因[J]. 材料热处理学报,2013,34(6):62-68.
- [2] 于庆波,孙莹,刘相华,等. 82B 盘条钢拉拔过程中显微组织及夹杂物的演变[J]. 中国机械工程,2012,22(22):2744-2748.
- [3] Sychkov A B, Zhigarev M A, Zhukova S Y, et al. Production of Wire Rod for High-Strength Reinforcing Cord[J]. Steel in Translation, 2010,40(1):78-81.
- [4] 孙杰,刘礼华,程晓农,等. 82B 盘条断裂形式及原因分析[J]. 金属制品,2012,38(1):61-64.
- [5] 王伯文,杭乃勤. 82A 钢高速线材控制冷却工艺的优化[J]. 特殊钢,2009,30(6):14-16.
- [6] 蒋波,张朝磊,刘雅政,等. 控轧控冷工艺参数对冷锻钢 10B21 组织影响的热模拟研究[J]. 特殊钢,2014,35(1):49-52.
- [7] Clarke B D, Melvor I D. Effect of Phosphorus on Microstructure and Strength of High-Carbon Steel Rod[J]. Ironmaking & Steelmaking, 1989,16(5):335-344.
- [8] Clarke B D, Melvor I D. Structure and Properties of Plain and Alloyed Ultrahigh Carbon-Steel Wire Rod[J]. Ironmaking & Steelmaking, 1991,18(5):331-341.
- [9] Stecken K, Pfenning M, Anelli E, et al. Optimising the Structure of High-Carbon Steel Wire [C]. Luxembourg, European Commission, 1998.
- [10] Aneli E. Application of Mathematical Modelling to Hot Rolling and Controlled Cooling of Wire Rods and Bars[J]. ISIJ International, 1992,32(3):440-449.
- [11] 帅习元,周勇,吴冬海. 高碳钢盘条中心偏析的控制[J]. 钢铁,2006,41(8):68-72.
- [12] 郝芳,王福明,金桂香,等. 吐丝温度对 82B 高碳钢动态 CCT 曲线的影响[J]. 金属热处理,2011,36(12):4-8.
- [13] 付军,王福明,柴国强,等. 82B 高碳钢盘条的动态连续冷却组织转变[J]. 金属热处理,2010,35(8):5-8.
- [14] 陈景涛. 中高碳合金钢薄板坯连铸连轧新工艺的研究[D]. 广州:广东工业大学,2011.

如图 4 所示。由图 4 可知,在 118 个对比钢样中,约 75% 的 CCR_{Mf} 差值集中在 $-0.5 \sim 0.5$ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 区域,表明式(12)能够准确表征 JMatPro 模拟的马氏体形成临界冷却速率。

2.3 表达式计算值与实验结果的对比

计算值与实验值及参考文献中的数据对比结果如表 2 所示。可知,式(12)计算的 CCR_{Mf} 与实验所测结果的差距较小。

由表 3 可知,70 钢盘条在相同偏析指数下,C、Mn 含量对马氏体形成临界冷却速率的影响最大。因此,生产过程更应注意控制 C、Mn 元素偏析。同时,须结合元素含量及其在轧材中的实际偏析情况等方面综合对比各元素对马氏体形成临界冷却速率的影响。

3 结论

(1) 预测马氏体形成临界冷却速率的表达式为: $CCR_{Mf}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}) = 4.088 - 9.88 \times [C]/\% - 3.58 \times [Si]/\% - 5.12 \times [Mn]/\% - 0.001 \times [P]/\% + 23.45 \times [S]/\% - 7.42 \times [Cr]/\% + 2 \times G_m$ 。验证表明该表达式预测结果较为准确,对高碳钢具有普适性。

(2) C、Mn、Cr 和 Si 等元素和细化奥氏体晶粒可降低 CCR_{Mf} , 提高淬透性,其中 C、Mn 的影响最大。连铸过程应重点控制 C、Mn 元素偏析,在轧制过程注意细化奥氏体晶粒尺寸,以提高马氏体形成临界冷却速率,避免形成马氏体缺陷。

纪元(1991-),男,博士研究生(北京科技大学),2012 年北京科技大学(本科)毕业,连铸坯质量、过程控制工艺研究。E-mail:goodjiyuan@hotmail.com

收稿日期:2016-06-10