

Application of JMatPro in the Process Design of 45 Steel Hot Rolled Rod

Jiarong Liu Shuxin Tian

Tianjin Iron and Steel Group, Tianjin, 300301, China

Abstract

Analyze 45 # steel using the metal material phase diagram and performance calculation software JMatPro. The equilibrium phase composition, undercooled austenite isothermal transformation curve (TTT), undercooled austenite continuous transformation curve (CCT), and TTA diagram describing time, temperature, and degree of austenitization during the austenitization heating process of 45 steel were calculated through software. The liquid phase temperature of hypoeutectoid steel 45 is 1493°C, and the temperature at which high-temperature ferrite begins to precipitate is below 1493°C. When the temperature drops to 1480 °C, the first drop of liquid phase transforms into austenite at a temperature between 1480 °C and 1415 °C. The liquid phase continuously transforms into austenite, and the liquid phase composition decreases continuously. When the austenite content increases to the solid phase line at 1415 °C, all the liquid phase alloys used transform into austenite without undergoing phase transformation. The solubility of carbon in austenite decreases at 774°C, and the austenite begins to transform into ferrite. At temperatures between 774°C and 727°C, the solubility of carbon in austenite gradually decreases, and ferrite will first eutectoid from austenite. When the temperature drops to 727°C, the remaining austenite undergoes eutectoid transformation into ferrite, pearlite, and a small amount of cementite. At 727°C to room temperature, ferrite will precipitate from ferrite, and the final room temperature structure will be composed of ferrite and cementite. Based on the simulation results, a rolling process for bar 45 steel was developed. After testing, the matrix structure was found to be ferrite+pearlite, with a grain size of 8.5, a yield strength of ≥ 375 MPa, a tensile strength of ≥ 620 MPa, and an elongation at break of $\geq 15\%$.

Keywords

45 steel; Bar; Thermodynamics; Phase transition; JMatPro

JMatPro 在 45 钢热轧棒材工艺设计中的应用

刘家荣 田淑沁

天津钢铁集团, 中国 · 天津 300301

摘 要

利用金属材料相图与性能计算软件JMatPro对45号钢进行分析。通过软件计算得到了45号钢不同温度下的平衡相组成、过冷奥氏体等温转变曲线(TTT)、过冷奥氏体连续转变曲线(CCT)以及奥氏体化加热过程中描述时间、温度和奥氏体化程度的TTA图。铁碳合金相图结合计算结果亚共析钢45号钢的液相线温度为1493°C, 高温铁素体开始析出的温度是在低于1493°C, 温度降至1480°C时第一滴液相转变为奥氏体温度在(1480°C—1415°C)液相不断向奥氏体转变, 液相成分不断减少, 奥氏体成分增多达到1415°C固相线时所用液相合金全部转变为奥氏体温度降低奥氏体不发生相变。奥氏体中碳的溶解度降低在774°C时奥氏体开始向铁素体转变, 温度在(774°C—727°C)碳在奥氏体中溶解度逐渐下降将从奥氏体中析出先共析铁素体, 降到温度727°C时剩余奥氏体发生共析转变为铁素体、珠光体和少许渗碳体, 在727到常温时将铁素体中析出铁素体最终室温组织为铁素体和渗碳体。依据模拟结果, 制定了棒材45号钢轧制工艺, 经检测基体组织为铁素体+珠光体, 晶粒度8.5级, 屈服强度 ≥ 375 MPa, 抗拉强度 ≥ 620 MPa, 断后伸长率 $\geq 15\%$ 。

关键词

45钢; 棒材; 热力学; 相变; JMatPro

1 引言

45 号钢为中碳钢含碳量在 0.42%-0.5% 之间的优质碳素结构钢, 具有高强度、良好的韧性、优良的加工性能和一定的耐磨性、耐腐蚀性及耐热性, 广泛用于机械制造、汽车工

业、建筑及石油化工领域, 如齿轮、齿条、轴承、连杆等核心部件。45 号钢一般需要热处理调质后, 具有较高的屈服强度和抗拉强度, 能够满足大部分机械零件的强度要求。针对特定用途工件的热加工工艺设计, 需兼顾不同加工阶段的性能需求, 具体要求如下:

2 热轧阶段性能要求

在工件处于热轧状态时, 其需具备优良的加工成型性能。该性能需满足后续产品加工制造环节对材料可塑性、可

【作者简介】刘家荣(1988-), 男, 中国陕西汉中, 助理工程师, 从事轧钢工艺技术和产品研发研究。

切削性等指标的基础要求，确保加工过程顺利进行，避免因材料加工性能不足导致工件成型缺陷或加工效率下降。

3 成型后热处理与性能调控

待工件完成加工成型工序后，需通过特定热处理工艺实现性能优化：

采用调质处理结合高温淬火的复合工艺方案，对成型工件进行后续处理；

经工艺处理后，工件需达到表面与芯部的差异化性能指标：表面需形成较高硬度，以保障工件服役过程中的优良耐磨性能，延长使用寿命；芯部则需保留良好的冲击韧性，确保工件在承受冲击载荷时不易发生断裂，满足复杂工况下的结构安全性需求。我厂生产的 45 号圆钢也多用于轧制无缝钢管。

JMatPro 计算软件是一款计算金属材料性能和金属铁碳合金相图性能功能软件，用来计算多种材料的各项力学性能以便建立各项理论模型，主要有热力学性能例如热导率和表面张力等等；金属材料力学性能包括强度、硬度、冲击韧性、塑性、应力应变曲线等等；相转变温度动力学包括亚共析钢和共析钢的 TTT 曲线、奥氏体连续冷却转变 CCT 曲线和析出相等温时效等。近年来 JMatPro 软件在国内金属材料研究方面的应用逐渐增多，软件的预测精度得到广泛认可。研究对象为 45 号钢，热力学性能和相转变的计算结果依赖于 JMatPro 7.0 软件，根据计算结果而制定加热和轧制工艺制度。

4 研究对象

钢种生产工艺为：转炉冶炼→LF 炉精炼→连铸方坯（185mm×185 mm×12m）→热坯直装→加热→棒材轧机轧制→精整→检验、打捆→入库。

5 合金平衡相计算和分析

45 号钢液相线计算温度为 1493℃，在液相线温度下液相中体心立方结构的铁素体 F 开始少量析出，计算铁素体含量在温度为 1489℃时的含量为 9.18%，体心立方结构的铁素体 F 发生相变转变为面心立方结构的奥氏体 A 的温度是低于 1480℃，液相成分减少奥氏体 A 成分增多，达到固相线温度 1 415℃时，所有液相全部转变为奥氏体 A，并析出极少量 MnS 相，温度降低奥氏体 A 不断发生相变，奥氏体 A 中的碳溶解度逐渐降低在 774℃奥氏体 A 开始向铁素体 F 转变析出先共析铁素体，到达温度 727℃奥氏体 A 发生共析转变为铁素体和渗碳体，达到温度 715℃时剩余奥氏体 A 全部转化为珠光体和少量碳化物；45 号钢在常温下的稳定相由铁素体相 93.44 %、渗碳体相 5.48% 和少许碳化物以及其它相，其中碳化物主要是 0.86 %M₇C₃，其它相 0.04 %M₂P + 0.02 %MnS + 0.1 %Cu + 0.06 %G-Phase。

6 合金相转变参数模拟和分析

6.1 等温奥氏体化转变曲线（TTA 图）

奥氏体化是指钢加热至临界点以上是形成奥氏体的过

程，温度达到共析温度以上，在室温下将铁素体和渗碳体转变为奥氏体。奥氏体化过程涉及奥氏体核的形成和生长；渗碳体的溶解和奥氏体成分的均匀化导致珠光体转变为奥氏体，奥氏体成分均匀化。图 1 显示了 JMatPro 软件计算的 45 号钢的 TTA 曲。

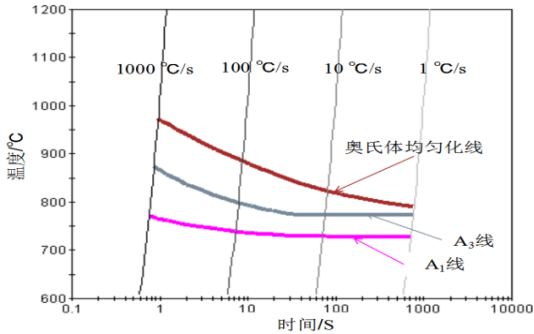


图 1 45 钢 TTA 图

表 1 为加热速率对 45 钢奥氏体均匀化和时间的影响。由表 1 可知，随着加热速率的增加钢材的 A₁、A₃ 及奥氏体均匀化临界温度均升高，奥氏体均匀化所需时间快速下降，这有利于钢坯加热时减少氧化、脱碳的影响，抑制奥氏体晶粒粗化，使晶粒变得更加细小从而改善钢材的力学性能。因此，在实际生产中常采用高温快速加热的方式来减少钢坯氧化烧损和限制奥氏体原始晶粒过度长大。

表 1 为加热速率对 45 钢奥氏体均匀化和时间的影响

加热速度 / (°C/s)	A ₁ /°C	A ₃ /°C	奥氏体均匀化 温度 /°C	奥氏体均匀化 时间 /s
1000	771	916	973	0.95
100	739	874	886	8.66
10	729	775.2	823	80.3
1	728	773	791	771

6.2 过冷奥氏体等温转变曲线（TTT 曲线）

TTT 曲线是反映过冷奥氏体等温冷却时，转变产物类型以及转变量与时间、温度之间的关系曲线。图 2 为通过软件计算得到的 45 钢的 TTT 曲线。

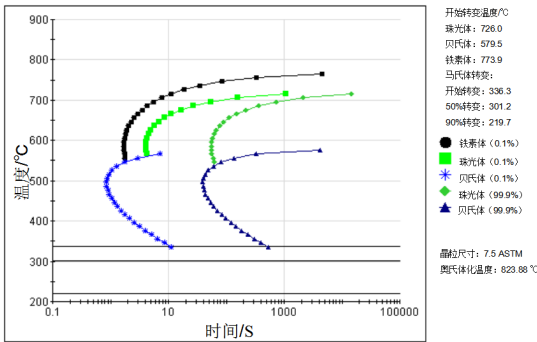


图 2 通过软件计算得到的 45 钢的 TTT 曲线

合金经奥氏体化后冷却过程中铁素体、珠光体和贝氏

体可析出最高温度依次是 773.9℃、726.0℃和 579.5℃。其中珠光体“鼻尖”温度为 596℃，过冷奥氏体在此温度下保温 4.15 s 开始析出珠光体，贝氏体“鼻尖”温度为 496℃，过冷奥氏体在此温度下保温 0.85 s 开始析出贝氏体，马氏体开始析出温度为 336.3℃。

6.3 过冷奥氏体连续冷却转变曲线（CCT 曲线）

45 号钢过冷奥氏体连续冷却转变图中不仅出现了先共析铁素体析出区，而且还出现了贝氏体转变区，过冷奥氏体连续冷却开始出现马氏体时速度为 8℃/s 时，温度为 302.8℃马氏体开始转变。

表 2 显示了不同冷却速率下 45 钢的相组成含量。表 2：铁素体和珠光体的显微组织是在以 0.01℃/s 的速度冷却至室温后获得的。随着冷却速度的增加，珠光体的数量增加，铁素体的数量减少。随着冷却速度的持续增加，铁素体和珠光体的形核量减少，过冷度增加，导致奥氏体转变为贝氏体。室温下，铁素体含量为 19.58%，珠光体含量为 80.42%，冷却速度为 2℃/s；在室温下组织中铁素体含量 18.06 %、珠光体含量 64.92 % 和贝氏体含量 17.02 % 冷却速度为 3℃/s，发生贝氏体转变是在冷却速率 2~3℃/s 时析出；在室温下组织中贝氏体含量 75.94 % 冷却速度为 7℃/s；随着冷却速率的再次增加，达到冷却速度为 8℃/s 时室温下组织中出现马氏体含量 7.35 %，过冷奥氏体转变马氏体在冷却速度为 7~8℃/s 之间时出现。

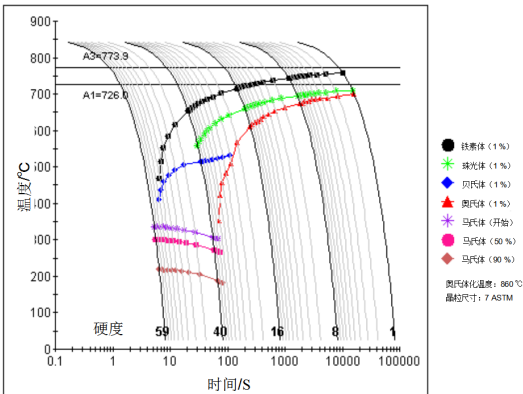


图 2a 45 钢的 CCT 曲线（温度 - 时间）

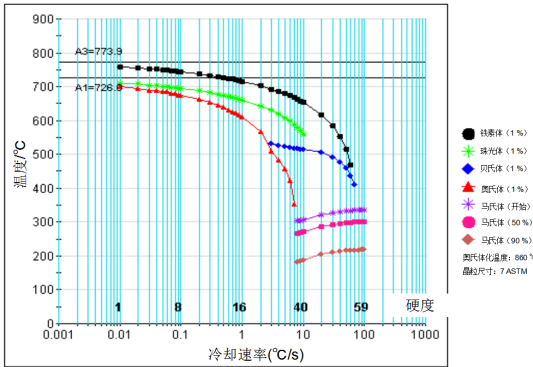


图 2b 45 钢的 CCT 曲线（温度 - 冷却速率）

表 2 为 45 钢在不同冷却速度下的相组成含量。由表 2 可见，以 0.01℃/s 冷却速度降至室温后获得铁素体和珠光体组织，随冷却速度的增加，铁素体含量减少、珠光体含量增多，随着冷速继续增加铁素体、珠光体来不及形核或形核量减少，同时导致过冷度增大，促使奥氏体向贝氏体转变。当冷却速度为 2℃/s 时室温下组织中为 19.58 % 铁素体 +80.42 % 珠光体；当冷却速度为 3℃/s 时室温下组织中为 18.06 % 铁素体 +64.92 % 珠光体 +17.02 % 贝氏体，说明在冷却速率 2~3℃/s 发生了贝氏体转变；当冷却速度为 7℃/s 时室温下组织中贝氏体质量分数为 75.94 %；随着冷却速率的进一步增加，贝氏体也开始逐渐减，当冷却速度为 8℃/s 时室温下组织中出现马氏体，质量分数为 7.35 %，说明冷却速度在 7~8℃/s 之间时出现了过冷奥氏体马氏体转变。

表 2 45 钢在不同冷却速度下的相组成含量

冷却速度 / (℃/s)	0.01	0.1	1	2	3	7	8
铁素体 /%	41.77	32.36	20.98	19.58	18.06	17.51	17.38
贝氏体 /%					17.02	75.94	70.84
珠光体 /%	58.23	67.64	79.02	80.42	64.92	6.52	4.4
马氏体 /%							7.35

7 热连轧工艺制度

根据 JMatPro 软件计算模拟得到的热力学及相变数据，制定 45 号钢热加工工艺和热连轧轧制工艺制度流程。

8 测试结果

经热连轧棒材产线批量生产 45 钢，规格范围 $\phi 18\text{ mm} - 26\text{ mm}$ ，成分满足设计要求。力学性能检测如表 3 所示，可以看出，所生产的 45 钢的力学性能完全满足标准要求，且富余量较大。

表 3 45 钢力学性能

标准及实际值	下屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	断后伸长率 / %	断面收缩率 / %
内控标准	≥ 375	≥ 620	≥ 15	≥ 40
最大值	449	680	23	48
最小值	385	655	20	43
平均值	428.1	667.6	22.7	44.6

9 结论

1) 45# 钢在室温下的稳定相组织由 93.44% 的铁素体相、5.48% 的渗碳体相和少量的碳化物和其他相组成。碳化物主要为 0.86%M7C3，其他相为 0.04%M2P+0.02%MnS+0.1%Cu+0.06%G 相。

2) 45 号钢奥氏体化后的低温转变特性 45 号钢经奥氏体化处理后，其过冷奥氏体在不同冷却温度下会发生不同类型的相变，具体转变规律如下：当 45 号钢完成奥氏体化

后, 若将其冷却至 774℃并维持该温度条件, 其内部的过冷奥氏体将发生相变并转变为铁素体组织; 而当冷却温度控制在 726℃时, 该钢种的相变过程与产物则会呈现出与 774℃下不同的特征(注: 原文此处表述不完整, 若需补充 726℃下的具体相变产物, 可结合实验数据进一步完善, 此处基于现有信息明确温度与相变的对应关系)。

上述不同温度下的相变差异, 本质是热力学条件对 45 号钢相变路径的调控作用, 该规律可为后续制定合理的冷却工艺、调控材料显微组织提供关键依据。

3) 根据热力学和相变数据, 可以开发 45 钢的热加工和热轧工艺, 生产出符合使用要求的 45 钢。

参考文献

- [1] 谷召坤,路晨龙.45Mn2热轧圆钢中心裂纹产生原因分析[J].天津冶金,2020,(02):64-66.
- [2] 刘颖.45#圆钢顶锻裂纹形成原因及改善[J].河北冶金,2023,(10):77-82.
- [3] 李华强,张正波,廖美华.45#钢圆钢心部缺陷分析[J].江西冶金,2023,43(05):415-419.
- [4] 代玉杰.JMatPro在42CrMo4钢热处理工艺设计中的应用[J].热处理技术与装备,2023,44(04):58-61+73.