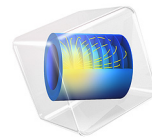


在 COMSOL Multiphysics 6.3 版本中创建



# 相变图计算

## 简介

在钢的淬火过程中，奥氏体分解成目标相，例如铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体。所得的相组成在很大程度上取决于温度历史，也取决于化学成分和奥氏体团粒大小。说明相变特性的常用方法是使用相变图，其中两种最常用的图类型是 CCT（连续冷却转变）和 TTT（时间 - 温度转变）图。在前者中，奥氏体化材料以恒定的温度速率冷却，而在后者中，材料保持在恒定温度。图 1 显示一个示例 CCT 图，垂直轴为温度，水平轴为对数时间。 $F_s$ 、 $P_s$  和  $B_s$  分别表示在给定冷却速率下分别形成铁素体、珠光体和贝氏体的开始温度。示例 CCT 图显示 10 K/s 的冷却速率足以抑制珠光体的形成，而 1 K/s 则不能。

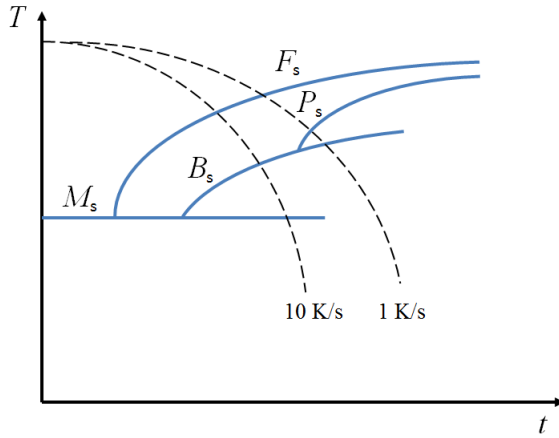


图1: CCT 图。

TTT 图与 CCT 图的不同之处在于奥氏体被快速冷却到给定的初始温度  $T_0$ ，然后保持在该温度，见图 2。这是针对一系列开始温度执行的，根据形成给定相所需的不同时间构建相变曲线。在实际淬火情况下，材料点不太可能经历 CCT 和 TTT 图所用的两个温度

历史中的任何一个，而是经历变化的温度速率。不过，这些图可以提供对某种材料相变特性的有用见解。

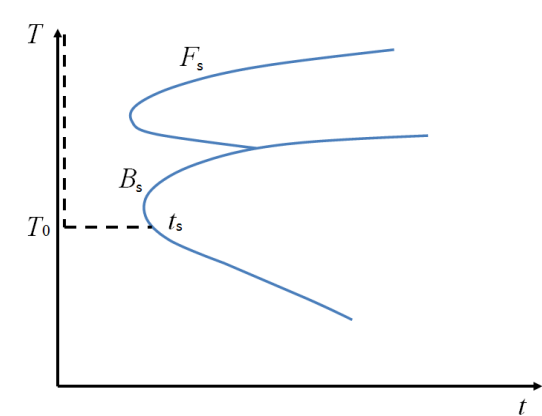


图2：TTT 图。

在本模型中，使用上述方法根据一组相变模型数据构建 CCT 和 TTT 图。

### 模型定义

为了计算相变图，不需要几何形状，并且可以在不需要完整传热分析的情况下完成合适的温度历史。温度是分析中的一个参数。许多参数用于在以最低和最高温度为界的温度范围内计算 CCT 和 TTT 图。在 CCT 图计算的情况下，冷却速率还受到最低和最高速率的限制。当给定的相达到定义的（极小）分数时，即可获得描述 CCT 图和 TTT 图中相变开始的时间 - 温度组合。[表格 1](#) 显示这些参数。

表格 1：模型定义中使用的参数。

名称	值	描述
highT	900°C	最高转变温度
lowT	100°C	最低转变温度
startFraction	0.01	表示变换开始的相分数
highRate	100 K/s	CCT 的最高冷却速率
lowRate	0.01 K/s	CCT 的最低冷却速率

### 相变

为简单起见，本模型仅分析奥氏体分解为铁素体和贝氏体的组合，但它也可以直接扩展到包含其他目标相。

奥氏体到铁素体

使用 Leblond-Devaux 相变模型对相变进行建模。[表格 2](#) 给出了描述这种相变的温度相关函数。

表格 2：奥氏体到铁素体，温度相关函数。

温度 (°C)	K (1/s)	L (1/s)
550	0	
600		0
620	0.002	0.0002
700	0.001	
750	0	
800		0.002
1000		0.002

奥氏体到贝氏体

使用 Leblond-Devaux 相变模型对相变进行建模。与铁素体相变相比，贝氏体相变在较低温度下较为活跃。[表格 3](#) 给出了描述贝氏体相变的温度相关函数。

表格 3：奥氏体到贝氏体，温度相关函数。

温度 (°C)	K (1/s)	L (1/s)
380	0	
400	0.0005	0
490	0.005	
500		0.0002
580	0.00005	0.002
600	0	0.002

请注意，列表值是定义铁素体和贝氏体相变的示例值。钢中合金元素的变化会导致函数不同。

结果与讨论

计算出的 CCT 如[图 3](#) 所示，其中显示三条冷却曲线，对应于冷却速率 100 K/s、10 K/s 和 1 K/s 的冷却速率。CCT 图显示在给定冷却速率的情况下开始形成相的时间和温度。本例中，10 K/s 的冷却速率导致贝氏体在约 40 秒后在 520°C 的温度下形成。在 100 K/s 的速率下，既不形成铁素体也不形成贝氏体。请注意，在实践中，这种非常快速的冷却将用于获得马氏体结构，原因是马氏体相变仅取决于低于马氏体开始温度的过冷度，而不取决于时间。这里不考虑无扩散马氏体相变。

如果存在通过实验获得的 CCT 图，可以将其与计算版本进行比较，以校准和验证描述每个相变的温度相关函数。使任何校准过程复杂化的是，一个目标相（例如铁素体）的形成减少了源相（奥氏体）的可用部分，以形成其他目标相（例如贝氏体）。相变本质上是耦合的，很难将一个相变与另一个相变分开处理。因此，实验获得的 CCT 图最好与包含所有相关相变的计算 CCT 图相比较。

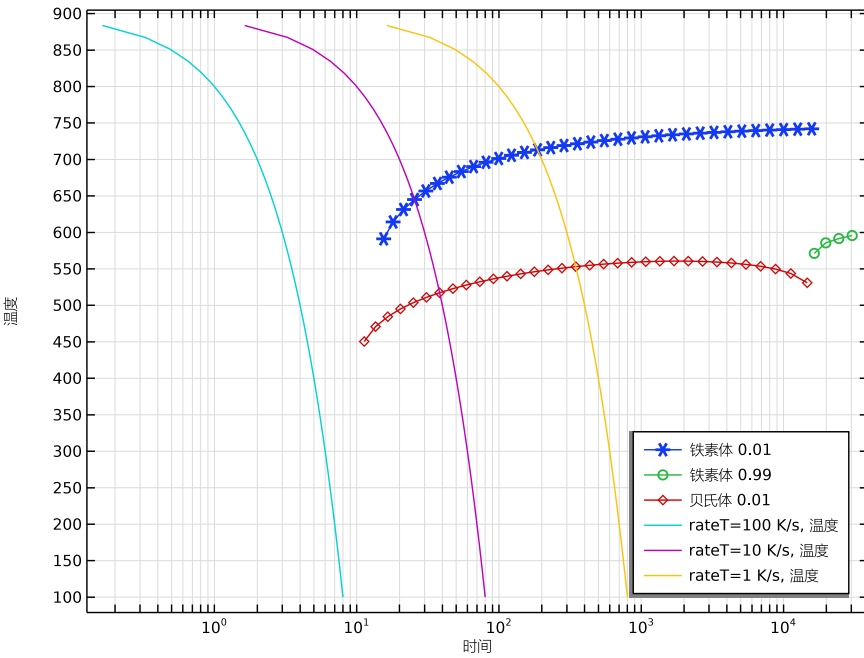


图3：显示铁素体和贝氏体形成比例为1%的计算 CCT 图。

计算出的 TTT 图如图 4 所示。与 CCT 图不同，TTT 图更直接地用于校准相变模型。相比之下，CCT 图更可能真实地表示淬火过程。在恒温过程中，由于表格 2 和表格 3 中的温度相关函数变为常数，因此可以更容易地校准某个相变。CCT 图和 TTT 图采用所涉及的相变的同一组数据集计算。

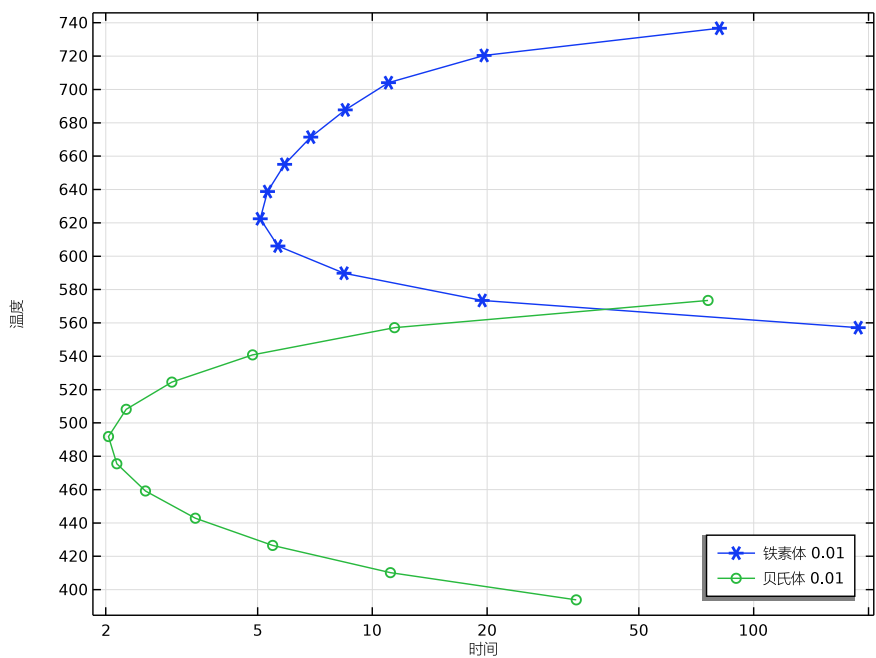


图4：显示铁素体和贝氏体形成比例为1%的计算TTT图。

## 参考资料


1. B. Liscic, H.M. Tensi, L.C.F. Canale, and G.E. Totten (Eds.), “Quenching theory and technology,” *CRC Press, Taylor & Francis Group*, 2010.

案例库路径: Metal\_Processing\_Module/Transformation\_Diagrams/  
transformation\_diagram\_computation




## 建模操作说明

从文件菜单中选择**新建**。

### 新建


在**新建**窗口中，单击  **模型向导**。

模型向导

- 1 在模型向导窗口中，单击  零维。
- 2 在选择物理场树中选择传热 > 金属加工 > 奥氏体分解 (audc)。
- 3 单击添加。
- 4 单击  研究。
- 5 在选择研究树中选择一般研究 > 瞬态。
- 6 单击  完成。

全局定义

参数 1

- 1 在模型开发器窗口的全局定义节点下，单击参数 1。
- 2 在参数的设置窗口中，定位到参数栏。
- 3 单击  从文件加载。
- 4 浏览到该 App 的“案例库”文件夹，然后双击文件 transformation\_diagram\_computation\_parameters.txt。

定义

为 CCT 和 TTT 计算中使用的温度添加两个定义。

CCT

- 1 在模型开发器窗口中展开组件 1 (comp1) > 定义节点。
- 2 右键单击定义并选择变量。
- 3 在变量的设置窗口中，在标签文本框中键入 “CCT”。
- 4 定位到变量栏。在表中输入以下设置：

名称	表达式	单位	描述
T	T0-rateT*t	K	CCT 温度


TTT

- 1 右键单击定义并选择变量。
- 2 在变量的设置窗口中，在标签文本框中键入 “TTT”。
- 3 定位到变量栏。在表中输入以下设置：

名称	表达式	单位	描述
T	T0	K	TTT 温度

插值 1 (int1)

- 1 在主屏幕工具栏中单击  函数，然后选择局部 > 插值。



- 2 在**插值**的**设置**窗口中，定位到**定义**栏。
- 3 在**函数名称**文本框中键入 “K\_Austenite\_to\_Ferrite”。
- 4 单击  **从文件加载**。
- 5 浏览到该 App 的 “案例库” 文件夹，然后双击文件 transformation\_diagram\_computation\_K\_Austenite\_to\_Ferrite.txt。
- 6 定位到**内插和外推**栏。从**插值**列表中选择**分段三次**。
- 7 定位到**单位**栏。在**变元**表中，输入以下设置：

变元	单位
t	degC

- 8 在**函数**表中，输入以下设置：

函数	单位
K_Austenite_to_Ferrite	1/s

#### 插值 2 (int2)


- 1 在**主屏幕**工具栏中单击  **函数**，然后选择**局部 > 插值**。
- 2 在**插值**的**设置**窗口中，定位到**定义**栏。
- 3 在**函数名称**文本框中键入 “L\_Austenite\_to\_Ferrite”。
- 4 单击  **从文件加载**。
- 5 浏览到该 App 的 “案例库” 文件夹，然后双击文件 transformation\_diagram\_computation\_L\_Austenite\_to\_Ferrite.txt。
- 6 定位到**内插和外推**栏。从**插值**列表中选择**分段三次**。
- 7 定位到**单位**栏。在**变元**表中，输入以下设置：

变元	单位
t	degC


- 8 在**函数**表中，输入以下设置：

函数	单位
L_Austenite_to_Ferrite	1/s

#### 插值 3 (int3)

- 1 在**主屏幕**工具栏中单击  **函数**，然后选择**局部 > 插值**。
- 2 在**插值**的**设置**窗口中，定位到**定义**栏。
- 3 在**函数名称**文本框中键入 “K\_Austenite\_to\_Bainite”。





- 单击  从文件加载。
- 浏览到该 App 的“案例库”文件夹，然后双击文件 transformation\_diagram\_computation\_K\_Austenite\_to\_Bainite.txt。
- 定位到内插和外推栏。从插值列表中选择分段三次。
- 定位到单位栏。在变元表中，输入以下设置：

变元	单位
t	degC

- 在函数表中，输入以下设置：

函数	单位
K_Austenite_to_Bainite	1/s

插值 4 (int4)

- 在主屏幕工具栏中单击  函数，然后选择局部 > 插值。
- 在插值的设置窗口中，定位到定义栏。
- 在函数名称文本框中键入 “L\_Austenite\_to\_Bainite”。
- 单击  从文件加载。
- 浏览到该 App 的“案例库”文件夹，然后双击文件 transformation\_diagram\_computation\_L\_Austenite\_to\_Bainite.txt。
- 定位到内插和外推栏。从插值列表中选择分段三次。
- 定位到单位栏。在变元表中，输入以下设置：

变元	单位
t	degC

- 在函数表中，输入以下设置：

函数	单位
L_Austenite_to_Bainite	1/s

奥氏体分解 (AUDC)

- 在模型开发者窗口的组件 1 (comp1) 节点下，单击奥氏体分解 (audc)。
- 在奥氏体分解的设置窗口中，定位到温度栏。
- 在 T 文本框中键入 “T”。

### 铁素体

- 1 在模型开发器窗口的组件 1 (comp1) > 奥氏体分解 (audc) 节点下，单击铁素体。
- 2 在金相的设置窗口中，定位到转变时间栏。
- 3 选中计算转变时间复选框。

### 贝氏体

- 1 在模型开发器窗口中，单击贝氏体。
- 2 在金相的设置窗口中，定位到转变时间栏。
- 3 选中计算转变时间复选框。

### 奥氏体到铁素体

- 1 在模型开发器窗口中，单击奥氏体到铁素体。
- 2 在相变的设置窗口中，定位到相变栏。
- 3 在  $K_{s \rightarrow d}$  文本框中键入 “K\_Austenite\_to\_Ferrite(audc.T)”。
- 4 在  $L_{s \rightarrow d}$  文本框中键入 “L\_Austenite\_to\_Ferrite(audc.T)”。

### 奥氏体到贝氏体

- 1 在模型开发器窗口中，单击奥氏体到贝氏体。
- 2 在相变的设置窗口中，定位到相变栏。
- 3 在  $K_{s \rightarrow d}$  文本框中键入 “K\_Austenite\_to\_Bainite(audc.T)”。
- 4 在  $L_{s \rightarrow d}$  文本框中键入 “L\_Austenite\_to\_Bainite(audc.T)”。

### 奥氏体到珠光体

在模型开发器窗口中，右键单击奥氏体到珠光体并选择禁用。

### 珠光体

在模型开发器窗口中，右键单击珠光体并选择禁用。

### 奥氏体到马氏体

在模型开发器窗口中，右键单击奥氏体到马氏体并选择禁用。

### 马氏体

在模型开发器窗口中，右键单击马氏体并选择禁用。

## CCT

- 1 在模型开发器窗口中，单击研究 1。
- 2 在研究的设置窗口中，在标签文本框中键入 “CCT”。

### 参数化扫描

- 1 在研究工具栏中单击  参数化扫描。
- 2 在参数化扫描的设置窗口中，定位到研究设置栏。

3 单击  添加。

4 在表中输入以下设置：

参数名称	参数值列表	参数单位
rateT ( 冷却速率参数 )		K / s

5 在表格中，单击以选择列号为 2、行号为 1 的单元格。

6 单击  范围。

7 在范围对话框中，从定义方法列表中选择对数。

8 在起始文本框中键入 “highRate”。

9 在停止文本框中键入 “lowRate”。

10 在每十倍频率的步数文本框中键入 “nRates”。

11 单击添加。

步骤 1：瞬态

1 在模型开发者窗口中，单击步骤 1：瞬态。

2 在瞬态的设置窗口中，定位到研究设置栏。

3 单击  范围。

4 在范围对话框中，从定义方法列表中选择值数。

5 在停止文本框中键入 “(T0-lowT)/rateT”。

6 在值数文本框中键入 “50”。


7 单击替换。

8 在瞬态的设置窗口中，定位到物理场和变量选择栏。

9 选中修改研究步骤的模型配置复选框。

10 在模型树中选择组件 1 (comp1) > 定义 > TTT。

11 右键单击并选择禁用。

12 在研究工具栏中单击  计算。

添加研究

1 在主屏幕工具栏中，单击  添加研究以打开添加研究窗口。

2 转到添加研究窗口。

3 找到研究子栏。在选择研究树中选择一般研究 > 瞬态。



4 单击窗口工具栏中的添加研究。

5 在主屏幕工具栏中，单击  添加研究以关闭添加研究窗口。


TTT

在研究的设置窗口中，在标签文本框中键入“TTT”。


参数化扫描

- 1 在研究工具栏中单击  参数化扫描。
- 2 在参数化扫描的设置窗口中，定位到研究设置栏。
- 3 从扫描类型列表中选择所有组合。
- 4 单击  添加。
- 5 在表中输入以下设置：

参数名称	参数值列表	参数单位
T0 ( 冷却温度参数 )		K

- 6 在表格中，单击以选择列号为 2、行号为 1 的单元格。
- 7 单击  范围。
- 8 在范围对话框中，从定义方法列表中选择值数。
- 9 在起始文本框中键入“highT”。
- 10 在停止文本框中键入“lowT”。
- 11 在值数文本框中键入“nTemps”。
- 12 单击添加。

步骤 1：瞬态


- 1 在模型开发器窗口中，单击步骤 1：瞬态。
- 2 在瞬态的设置窗口中，定位到研究设置栏。
- 3 在输出时步文本框中键入“range(0,maxTime/99,maxTime)”。
- 4 定位到物理场和变量选择栏。选中修改研究步骤的模型配置复选框。
- 5 在模型树中选择组件 1 (comp1) > 定义 > CCT。
- 6 右键单击并选择禁用。
- 7 在研究工具栏中单击  计算。

结果

设置默认的结果显示单位。

首选单位 1

- 1 在模型开发器窗口中展开结果节点。
- 2 右键单击结果并选择首选单位。
- 3 在首选单位的设置窗口中，定位到单位栏。

- 4 单击  添加物理量。
- 5 在物理量对话框中，选择模型树中的常规 > 温度 (K)。
- 6 单击确定。
- 7 在首选单位的设置窗口中，定位到单位栏。
- 8 在表中输入以下设置：

物理量	单位	首选单位
温度	K	°C

- 9 单击  应用。

全局 5

- 1 在模型开发者窗口中展开结果 > 相变图 (audc) 节点。
- 2 右键单击相变图 (audc) 并选择全局。
- 3 在全局的设置窗口中，定位到数据栏。
- 4 从数据集列表中选择 CCT/ 参数化解 1 (sol2)。
- 5 从参数选择 (rateT) 列表中选择来自列表。
- 6 从参数值 (rateT (K/s)) 列表中选择 100。
- 7 定位到 y 轴数据栏。在表中输入以下设置：


表达式	单位	描述
audc.T	°C	温度

- 8 单击以展开标题栏。从标题类型列表中选择无。

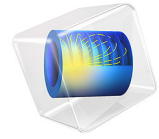
全局 6

- 1 右键单击全局 5 并选择复制粘贴。
- 2 在全局的设置窗口中，定位到数据栏。
- 3 从参数值 (rateT (K/s)) 列表中选择 10。

全局 7

- 1 右键单击全局 6 并选择复制粘贴。
- 2 在全局的设置窗口中，定位到数据栏。
- 3 从参数值 (rateT (K/s)) 列表中选择 1。
- 4 在相变图 (audc) 工具栏中单击  绘制。





# Transformation Diagram Computation

## Introduction

During quenching of steel, the austenite decomposes into destination phases such as ferrite, pearlite, bainite, and martensite. The resulting phase composition depends to a large extent on the temperature history, and also on the chemical composition and austenite grain size. A common way to illustrate the phase transformation characteristics is to use transformation diagrams. Two of the most commonly used diagram types are the CCT (continuous cooling transformation) and the TTT (time-temperature transformation) diagrams. In the former, the austenitized material is cooled at a constant temperature rate, while in the latter, the material is kept at a constant temperature.

Figure 1 shows an example CCT diagram, with temperature on the vertical axis, and logarithmic time on the horizontal.  $F_s$ ,  $P_s$ , and  $B_s$  represent the start temperatures, at a given cooling rate, for the formation of, respectively, ferrite, pearlite, and bainite. The example CCT diagram shows that a cooling rate of 10 K/s is sufficient to suppress the formation of pearlite, whereas 1 K/s is not.

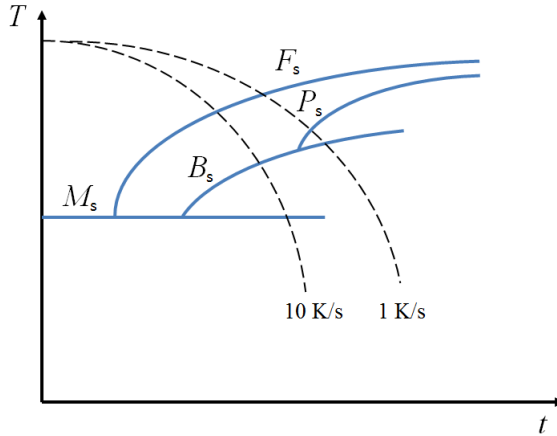


Figure 1: A CCT diagram.

A TTT diagram differs from a CCT diagram in that the austenite is rapidly cooled to a given initial temperature  $T_0$ , and then kept at that temperature, see Figure 2. This is performed for a range of start temperatures, and the transformation curves are constructed from the different times required to form a given phase. In a practical quenching situation, it is unlikely that material points will experience either of the two temperature histories that the CCT and TTT diagrams use, and instead experience varying temperature rates.



Nevertheless, the diagrams can give useful insights into the phase transformation behavior of a certain material.

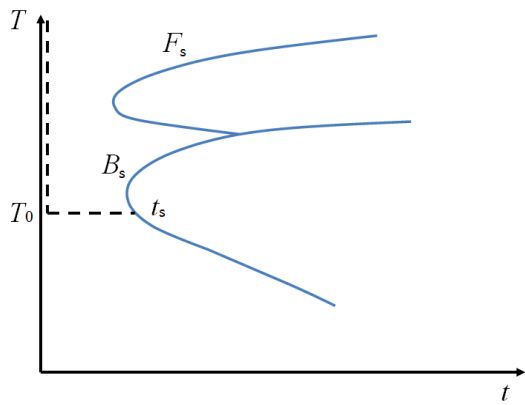


Figure 2: A TTT diagram.

In this model, CCT and TTT diagrams are constructed from a set of phase-transformation model data using the methods described above.

### Model Definition

In order to compute transformation diagrams, no geometry is required, and suitable temperature histories can be accomplished without the need for a full heat-transfer analysis. The temperature is imposed as a parameter in the analysis. A number of parameters are used to compute the CCT and TTT diagrams. The diagrams are computed over a range of temperatures bounded by a lowest and a highest temperature. In the case of the CCT diagram computation, the cooling rate is additionally bounded by a lowest and a highest rate. The time-temperature combinations that illustrate the start of transformation in the CCT and TTT diagrams are obtained when a given phase reaches a defined (small) fraction. [Table 1](#) shows these parameters.

TABLE 1: PARAMETERS USED IN THE MODEL DEFINITION.

Name	Value	Description
highT	900 °C	Highest transformation temperature
lowT	100 °C	Lowest transformation temperature
startFraction	0.01	Phase fraction indicating transformation start

TABLE 1: PARAMETERS USED IN THE MODEL DEFINITION.

Name	Value	Description
highRate	100 K/s	Highest cooling rate for CCT
lowRate	0.01 K/s	Lowest cooling rate for CCT

## PHASE TRANSFORMATIONS

For simplicity, the model only considers austenite decomposition into a combination of ferrite and bainite, but it can straightforwardly be extended to include other destination phases as well.

### *Austenite to Ferrite*

The phase transformation is modeled using the Leblond-Devaux phase transformation model. The temperature dependent functions describing this transformation are given in [Table 2](#).

TABLE 2: AUSTENITE TO FERRITE, TEMPERATURE DEPENDENT FUNCTIONS.

Temperature (°C)	K (1/s)	L (1/s)
550	0	
600		0
620	0.002	0.0002
700	0.001	
750	0	
800		0.002
1000		0.002

### *Austenite to Bainite*

The phase transformation is modeled using the Leblond-Devaux phase transformation model. Compared to the ferritic transformation, the bainitic transformation is active at lower temperatures. The temperature dependent functions describing the bainitic transformation are given in [Table 3](#).

TABLE 3: AUSTENITE TO BAINITE, TEMPERATURE DEPENDENT FUNCTIONS.

Temperature (°C)	K (1/s)	L (1/s)
380	0	
400	0.0005	0
490	0.005	
500		0.0002

TABLE 3: AUSTENITE TO BAINITE, TEMPERATURE DEPENDENT FUNCTIONS.

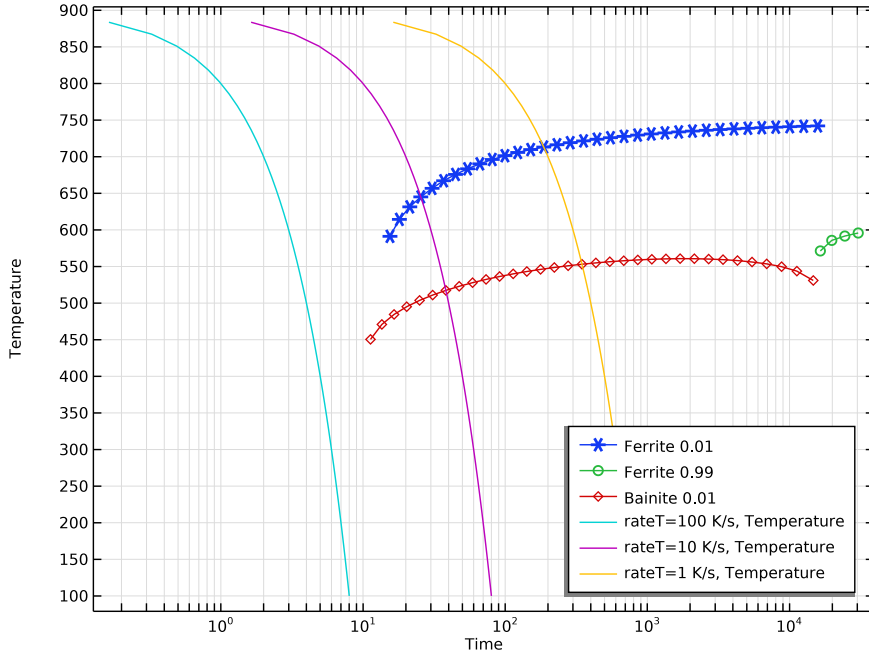
Temperature (°C)	K (1/s)	L (1/s)
580	0.00005	0.002
600	0	0.002

Note that the tabulated values are example values that define ferritic and bainitic transformations. Variations in alloying elements of the steel would cause the functions to be different.

### *Results and Discussion*

The computed CCT is shown in [Figure 3](#). Three cooling curves are shown, corresponding to the cooling rates 100 K/s, 10 K/s, and 1 K/s. The CCT diagram shows the time and temperature when a phase begins to form, given a cooling rate. In this example, a cooling rate of 10 K/s causes bainite to form after about 40 seconds, and at a temperature of 520 °C. At a rate of 100 K/s, neither ferrite nor bainite form. Note that in practice, this type of very rapid cooling would be used to obtain a martensitic structure, because the martensitic transformation only depends on the undercooling below the martensite start temperature, and not on time. The diffusionless martensitic transformation is not considered here.

If an experimentally obtained CCT diagram exists, it can be compared to the computed version to calibrate and verify the temperature dependent functions that describe each phase transformation. What complicates any calibration procedure is that the formation of one destination phase (such as ferrite) reduces the available fraction of source phase (austenite) to form other destination phases (such as bainite). The phase transformations are intrinsically coupled, and it is difficult to treat one phase transformation separate from another. An experimentally obtained CCT diagram is therefore best compared to a computed CCT diagram that includes all relevant phase transformations.



*Figure 3: Computed CCT diagram showing the curves for 1% formed fraction of ferrite and bainite.*

The computed TTT diagram is shown in [Figure 4](#). Unlike the CCT diagram, the TTT diagram is more straightforwardly used to calibrate phase transformation models. In contrast, the CCT diagram is more likely to realistically represent a quenching process. During a process of constant temperature, a certain phase transformation can be calibrated more easily, as the temperature dependent functions in [Table 2](#) and [Table 3](#) become constants. The CCT and TTT diagrams are computed using the same set of data for the phase transformations involved.

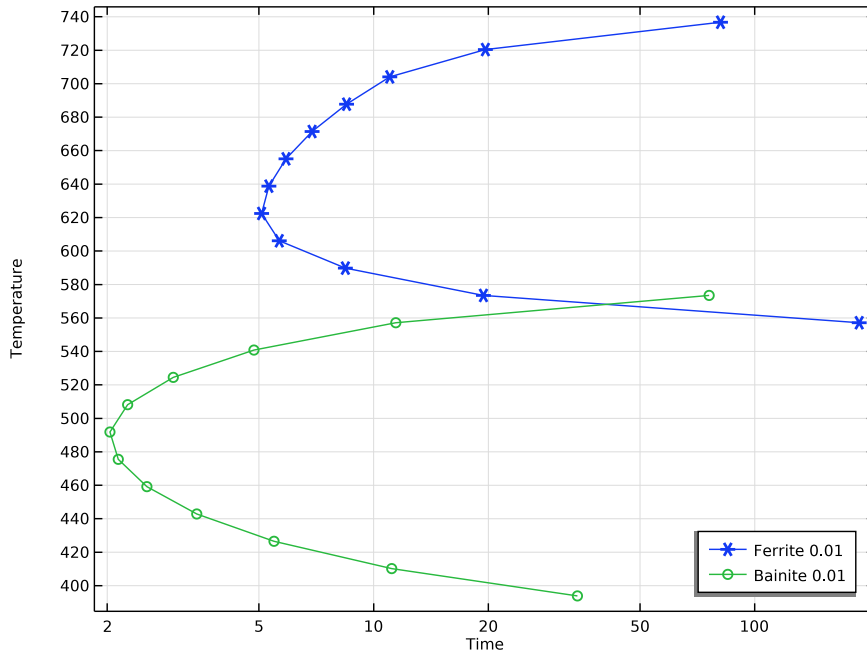


Figure 4: Computed TTT diagram showing the curves for 1% formed fraction of ferrite and bainite.

## Reference


1. B. Liscic, H.M. Tensi, L.C.F. Canale, and G.E. Totten (Eds.), “Quenching theory and technology,” *CRC Press, Taylor & Francis Group*, 2010.

**Application Library path:** Metal\_Processing\_Module/Transformation\_Diagrams/transformation\_diagram\_computation




## Modeling Instructions

From the **File** menu, choose **New**.

### NEW


In the **New** window, click  **Model Wizard**.

**MODEL WIZARD**

- 1 In the **Model Wizard** window, click  **OD**.
- 2 In the **Select Physics** tree, select **Heat Transfer > Metal Processing > Austenite Decomposition (audc)**.
- 3 Click **Add**.
- 4 Click  **Study**.
- 5 In the **Select Study** tree, select **General Studies > Time Dependent**.
- 6 Click  **Done**.

**GLOBAL DEFINITIONS**

*Parameters I*

- 1 In the **Model Builder** window, under **Global Definitions** click **Parameters I**.
- 2 In the **Settings** window for **Parameters**, locate the **Parameters** section.
- 3 Click  **Load from File**.
- 4 Browse to the model's Application Libraries folder and double-click the file transformation\_diagram\_computation\_parameters.txt.

**DEFINITIONS**

Add two definitions for the temperature used in the CCT and TTT computations.

*CCT*

- 1 In the **Model Builder** window, expand the **Component 1 (comp1) > Definitions** node.
- 2 Right-click **Definitions** and choose **Variables**.
- 3 In the **Settings** window for **Variables**, type CCT in the **Label** text field.
- 4 Locate the **Variables** section. In the table, enter the following settings:



Name	Expression	Unit	Description
T	T0-rateT*t	K	Temperature for CCT

*TTT*

- 1 Right-click **Definitions** and choose **Variables**.
- 2 In the **Settings** window for **Variables**, type TTT in the **Label** text field.
- 3 Locate the **Variables** section. In the table, enter the following settings:

Name	Expression	Unit	Description
T	T0	K	Temperature for TTT

### Interpolation 1 (int1)



- 1 In the **Home** toolbar, click  **Functions** and choose **Local > Interpolation**.
- 2 In the **Settings** window for **Interpolation**, locate the **Definition** section.
- 3 In the **Function name** text field, type K\_Austenite\_to\_Ferrite.
- 4 Click  **Load from File**.
- 5 Browse to the model's Application Libraries folder and double-click the file transformation\_diagram\_computation\_K\_Austenite\_to\_Ferrite.txt.
- 6 Locate the **Interpolation and Extrapolation** section. From the **Interpolation** list, choose **Piecewise cubic**.
- 7 Locate the **Units** section. In the **Argument** table, enter the following settings:

Argument	Unit
t	degC

- 8 In the **Function** table, enter the following settings:

Function	Unit
K_Austenite_to_Ferrite	1 / s

### Interpolation 2 (int2)



- 1 In the **Home** toolbar, click  **Functions** and choose **Local > Interpolation**.
- 2 In the **Settings** window for **Interpolation**, locate the **Definition** section.
- 3 In the **Function name** text field, type L\_Austenite\_to\_Ferrite.
- 4 Click  **Load from File**.
- 5 Browse to the model's Application Libraries folder and double-click the file transformation\_diagram\_computation\_L\_Austenite\_to\_Ferrite.txt.
- 6 Locate the **Interpolation and Extrapolation** section. From the **Interpolation** list, choose **Piecewise cubic**.
- 7 Locate the **Units** section. In the **Argument** table, enter the following settings:

Argument	Unit
t	degC

- 8 In the **Function** table, enter the following settings:

Function	Unit
L_Austenite_to_Ferrite	1 / s

### Interpolation 3 (int3)



- 1 In the **Home** toolbar, click  **Functions** and choose **Local > Interpolation**.
- 2 In the **Settings** window for **Interpolation**, locate the **Definition** section.
- 3 In the **Function name** text field, type K\_Austenite\_to\_Bainite.
- 4 Click  **Load from File**.
- 5 Browse to the model's Application Libraries folder and double-click the file transformation\_diagram\_computation\_K\_Austenite\_to\_Bainite.txt.
- 6 Locate the **Interpolation and Extrapolation** section. From the **Interpolation** list, choose **Piecewise cubic**.
- 7 Locate the **Units** section. In the **Argument** table, enter the following settings:

Argument	Unit
t	degC

- 8 In the **Function** table, enter the following settings:

Function	Unit
K_Austenite_to_Bainite	1 / s

### Interpolation 4 (int4)

- 1 In the **Home** toolbar, click  **Functions** and choose **Local > Interpolation**.
- 2 In the **Settings** window for **Interpolation**, locate the **Definition** section.
- 3 In the **Function name** text field, type L\_Austenite\_to\_Bainite.
- 4 Click  **Load from File**.
- 5 Browse to the model's Application Libraries folder and double-click the file transformation\_diagram\_computation\_L\_Austenite\_to\_Bainite.txt.
- 6 Locate the **Interpolation and Extrapolation** section. From the **Interpolation** list, choose **Piecewise cubic**.
- 7 Locate the **Units** section. In the **Argument** table, enter the following settings:

Argument	Unit
t	degC

- 8 In the **Function** table, enter the following settings:

Function	Unit
L_Austenite_to_Bainite	1 / s



## AUSTENITE DECOMPOSITION (AUDC)

- 1 In the **Model Builder** window, under **Component 1 (comp1)** click **Austenite Decomposition (audc)**.
- 2 In the **Settings** window for **Austenite Decomposition**, locate the **Temperature** section.
- 3 In the  $T$  text field, type  $T$ .

### *Ferrite*

- 1 In the **Model Builder** window, under **Component 1 (comp1)** > **Austenite Decomposition (audc)** click **Ferrite**.
- 2 In the **Settings** window for **Metallurgical Phase**, locate the **Transformation Times** section.
- 3 Select the **Compute transformation times** checkbox.

### *Bainite*

- 1 In the **Model Builder** window, click **Bainite**.
- 2 In the **Settings** window for **Metallurgical Phase**, locate the **Transformation Times** section.
- 3 Select the **Compute transformation times** checkbox.

### *Austenite to Ferrite*

- 1 In the **Model Builder** window, click **Austenite to Ferrite**.
- 2 In the **Settings** window for **Phase Transformation**, locate the **Phase Transformation** section.
- 3 In the  $K_{s \rightarrow d}$  text field, type  $K_{\text{Austenite\_to\_Ferrite}}(\text{audc}.T)$ .
- 4 In the  $L_{s \rightarrow d}$  text field, type  $L_{\text{Austenite\_to\_Ferrite}}(\text{audc}.T)$ .

### *Austenite to Bainite*

- 1 In the **Model Builder** window, click **Austenite to Bainite**.
- 2 In the **Settings** window for **Phase Transformation**, locate the **Phase Transformation** section.
- 3 In the  $K_{s \rightarrow d}$  text field, type  $K_{\text{Austenite\_to\_Bainite}}(\text{audc}.T)$ .
- 4 In the  $L_{s \rightarrow d}$  text field, type  $L_{\text{Austenite\_to\_Bainite}}(\text{audc}.T)$ .

### *Austenite to Pearlite*

In the **Model Builder** window, right-click **Austenite to Pearlite** and choose **Disable**.

### *Pearlite*

In the **Model Builder** window, right-click **Pearlite** and choose **Disable**.

### *Austenite to Martensite*

In the **Model Builder** window, right-click **Austenite to Martensite** and choose **Disable**.



*Martensite*

In the **Model Builder** window, right-click **Martensite** and choose **Disable**.


**CCT**

- 1 In the **Model Builder** window, click **Study 1**.
- 2 In the **Settings** window for **Study**, type CCT in the **Label** text field.


*Parametric Sweep*


- 1 In the **Study** toolbar, click  **Parametric Sweep**.
- 2 In the **Settings** window for **Parametric Sweep**, locate the **Study Settings** section.
- 3 Click  **Add**.
- 4 In the table, enter the following settings:

Parameter name	Parameter value list	Parameter unit
rateT (Cooling rate parameter)		K/s



- 5 In the table, click to select the cell at row number 1 and column number 2.
- 6 Click  **Range**.
- 7 In the **Range** dialog, choose **Logarithmic** from the **Entry method** list.
- 8 In the **Start** text field, type highRate.
- 9 In the **Stop** text field, type lowRate.
- 10 In the **Steps per decade** text field, type nRates.
- 11 Click **Add**.

*Step 1: Time Dependent*

- 1 In the **Model Builder** window, click **Step 1: Time Dependent**.
- 2 In the **Settings** window for **Time Dependent**, locate the **Study Settings** section.
- 3 Click  **Range**.
- 4 In the **Range** dialog, choose **Number of values** from the **Entry method** list.
- 5 In the **Stop** text field, type  $(T_0 - lowT) / rateT$ .
- 6 In the **Number of values** text field, type 50.
- 7 Click **Replace**.
- 8 In the **Settings** window for **Time Dependent**, locate the **Physics and Variables Selection** section.
- 9 Select the **Modify model configuration for study step** checkbox.

- 10 In the tree, select **Component 1 (comp1) > Definitions > TTT**.
- 11 Right-click and choose **Disable**.
- 12 In the **Study** toolbar, click  **Compute**.



**ADD STUDY**

- 1 In the **Home** toolbar, click  **Add Study** to open the **Add Study** window.
- 2 Go to the **Add Study** window.
- 3 Find the **Studies** subsection. In the **Select Study** tree, select **General Studies > Time Dependent**.
- 4 Click the **Add Study** button in the window toolbar.
- 5 In the **Home** toolbar, click  **Add Study** to close the **Add Study** window.


**TTT**

In the **Settings** window for **Study**, type TTT in the **Label** text field.

*Parametric Sweep*


- 1 In the **Study** toolbar, click  **Parametric Sweep**.
- 2 In the **Settings** window for **Parametric Sweep**, locate the **Study Settings** section.
- 3 From the **Sweep type** list, choose **All combinations**.
- 4 Click  **Add**.
- 5 In the table, enter the following settings:

Parameter name	Parameter value list	Parameter unit
T0 (Cooling temperature parameter)		K

- 6 In the table, click to select the cell at row number 1 and column number 2.
- 7 Click  **Range**.
- 8 In the **Range** dialog, choose **Number of values** from the **Entry method** list.
- 9 In the **Start** text field, type highT.
- 10 In the **Stop** text field, type lowT.
- 11 In the **Number of values** text field, type nTemps.
- 12 Click **Add**.

*Step 1: Time Dependent*


- 1 In the **Model Builder** window, click **Step 1: Time Dependent**.

- 2 In the **Settings** window for **Time Dependent**, locate the **Study Settings** section.
- 3 In the **Output times** text field, type `range(0,maxTime/99,maxTime)`.
- 4 Locate the **Physics and Variables Selection** section. Select the **Modify model configuration for study step** checkbox.
- 5 In the tree, select **Component 1 (comp1) > Definitions > CCT**.
- 6 Right-click and choose **Disable**.
- 7 In the **Study** toolbar, click  **Compute**.

## RESULTS

Set preferred units for result presentation.

### *Preferred Units 1*

- 1 In the **Model Builder** window, expand the **Results** node.
- 2 Right-click **Results** and choose **Preferred Units**.
- 3 In the **Settings** window for **Preferred Units**, locate the **Units** section.
- 4 Click  **Add Physical Quantity**.
- 5 In the **Physical Quantity** dialog, select **General > Temperature (K)** in the tree.
- 6 Click **OK**.
- 7 In the **Settings** window for **Preferred Units**, locate the **Units** section.
- 8 In the table, enter the following settings:

Quantity	Unit	Preferred unit
Temperature	K	°C

- 9 Click  **Apply**.

### *Global 5*

- 1 In the **Model Builder** window, expand the **Results > Transformation Diagram (audc)** node.
- 2 Right-click **Transformation Diagram (audc)** and choose **Global**.
- 3 In the **Settings** window for **Global**, locate the **Data** section.
- 4 From the **Dataset** list, choose **CCT/Parametric Solutions 1 (sol2)**.
- 5 From the **Parameter selection (rateT)** list, choose **From list**.
- 6 In the **Parameter values (rateT (K/s))** list, select **100**.

7 Locate the **y-Axis Data** section. In the table, enter the following settings:


Expression	Unit	Description
audc.T	°C	Temperature

8 Click to expand the **Title** section. From the **Title type** list, choose **None**.

#### Global 6

- 1 Right-click **Global 5** and choose **Duplicate**.
- 2 In the **Settings** window for **Global**, locate the **Data** section.
- 3 In the **Parameter values (rateT (K/s))** list, select **10**.

#### Global 7

- 1 Right-click **Global 6** and choose **Duplicate**.
- 2 In the **Settings** window for **Global**, locate the **Data** section.
- 3 In the **Parameter values (rateT (K/s))** list, select **1**.
- 4 In the **Transformation Diagram (audc)** toolbar, click  **Plot**.

