

MTS 与 TRUMPF 就夹具和加热线圈多物理场仿真开展精诚合作，为感应加热法热机械疲劳测试解决方案提供支持

2023 年 3 月

Christoph Leser¹、Jens-Uwe Mohring²、Steve Lemmer¹

1 MTS 系统公司

14000 Technology Drive, Eden Prairie, MN 55344, USA
www.mts.com

2 TRUMPF Hüttinger GmbH + Co. KG

Bötzingen Straße 80, 79111 Freiburg, Germany
www.trumpf.com

1. 引言

本白皮书介绍机械夹持和感应加热解决方案的仿真研究结果，该解决方案用于测试因机械变形和叠加温度影响而处于组合疲劳载荷之下的小型试样。

受增材制造应用以及不断发展的标准的推动，相关行业对在高温下测试小型试样的需求日益增长，意在验证对增材制造材料和组件的预测并确保它们的质量。

十多年以来，MTS 与 TRUMPF 一直在合作开发适用于要求结合机械和温度影响的先进材料测试的加热解决方案。这种测试通常称为“热机械疲劳”测试，即 TMF。

MTS 和 TRUMPF 对试样、夹具和加热线圈的详细 CAD 几何结构进行了建模研究。在预测达到所需温度、加热速率和试样测试（标距）部分长度上温度分布的能力方面，多物理场模型展现出很高的置信度。

对于在较高测试力之下对小型试样进行的这项特殊研究，MTS 和 TRUMPF 设想了一种新颖的夹具设计，而该设计也需要对加热线圈加以创新设计。对达到的最高温度、加热和冷却速率以及整个测试截面上的温度分布均匀性提出了要求。除此之外，还要求支持接触式引伸计，同时还支持可能使用的非接触式光学引伸计来观察试样。

双方提出的解决方案包括一个拉-压疲劳载荷下额定值为 5 kN 的机械夹具和一个敞开叉形感应线圈。

2. 夹具

MTS 已经开发出小型试样测试专用夹具，其静态载荷能力为 2.2 kN，动态载荷能力为 1.1 kN，分别适用于拉伸和拉-压疲劳应用。

MTS 的这款夹具组具有独特的设计特点，可以将试样安装在夹具内，并通过“治具”将夹具安装到载荷框架上，因此已被授予专利。

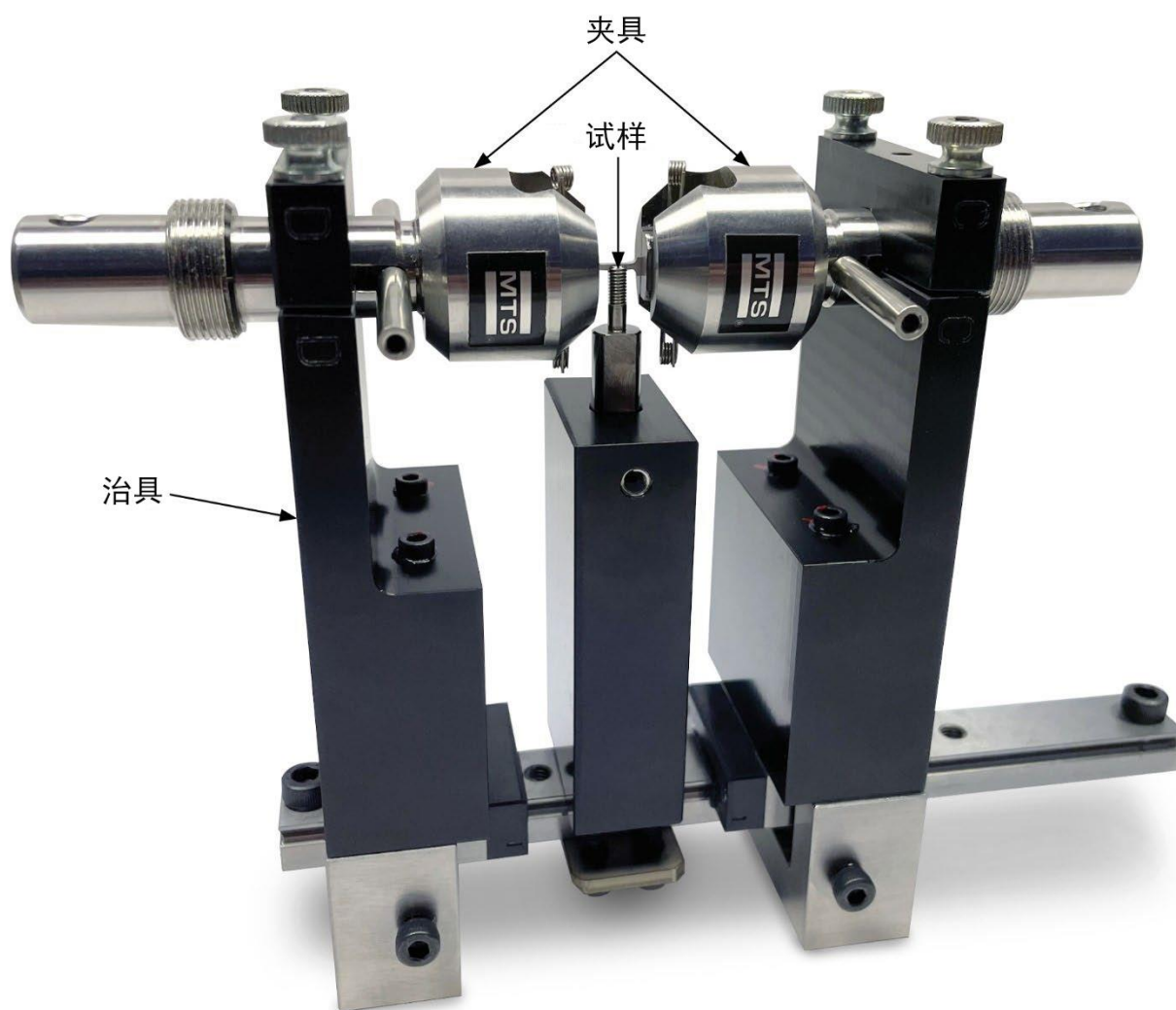


图 1：迷你夹具和配套“治具”

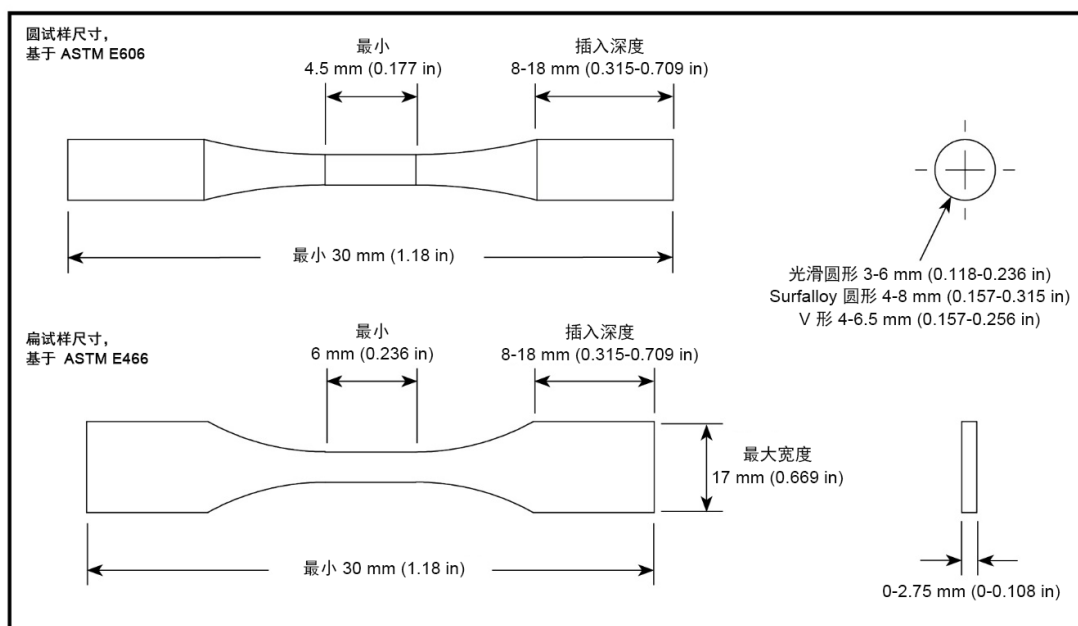


图 3：扩展性能版迷你夹具和支持的试样尺寸

本研究中研讨的具体几何结构和载荷案例是一个扁平试样，其总长度为 32 mm，标距部分的宽度为 2 mm，端部宽度为 6 mm，标距长度为 8 mm，整体厚度为 1 mm。

拉-压疲劳中施加的最大载荷为 5 kN，温度范围为室温至 900℃。

此性能包络预计将满足小型试样测试的新兴测试标准。Udimet 是 MTS 为夹具所选择的材料，可从载荷和温度承载能力方面最佳地满足这些要求。

3. 加热子系统

感应加热系统用于在试样内部产生温度。由于感应加热的性质，可以实现温度的快升快降，典型的斜坡速率为每秒 30 K 或更快。具有矩形横截面的空心铜管缠绕在试样周围，通电电压高达 1400 V，电流高达 560 A，激励频率范围为 50-800 kHz。

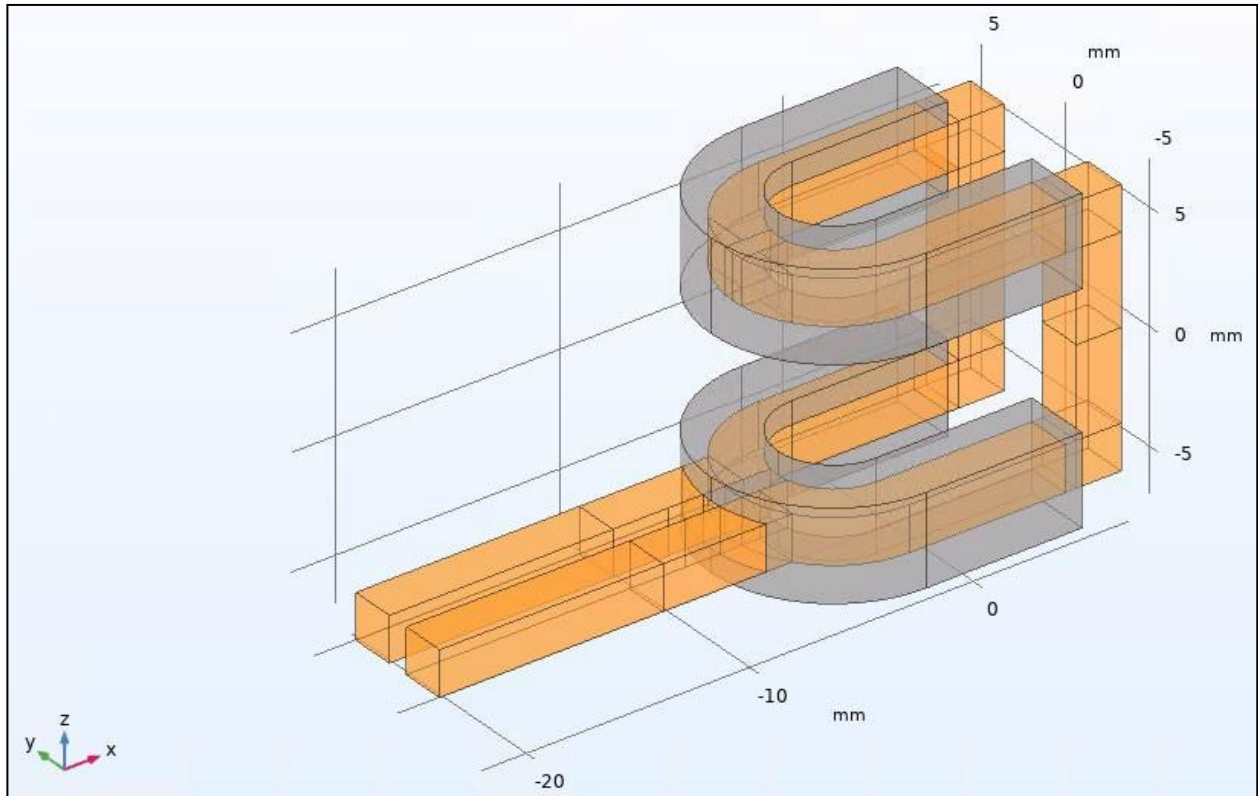


图 4: 建议的加热线圈几何结构

4. 加热仿真

由于小型试样几何结构、同时施加载荷和温度的复杂性，以及需要找到相互依赖的最佳夹具和加热线圈设计，双方选择了一种仿真方法来解决这个多变量优化问题。以下所有计算和图示均假设所用试样围绕标距长度中部的中心线对称。

线圈设计（见图 4）为应对以下挑战而量身定制：

- 测量设备（热电偶、引伸计）对试样的可达性
- 夹具之间为感应线圈留出的可用空间（见图 5）
- 具有允许内部水冷的最小直径的线圈的尺寸
- 取决于电流和激励频率的试样加热速率和相关感应功率水平
- 整个测试截面上的均匀温度分布，同时因夹具而在试样端部调节散热器，即力求最大限度地减小试样标距长度的温度偏差 ΔT
- 整个温度范围内的温度控制
- 试样材料性能在加热过程中的变化，其中铁磁钢的居里温度最为关键

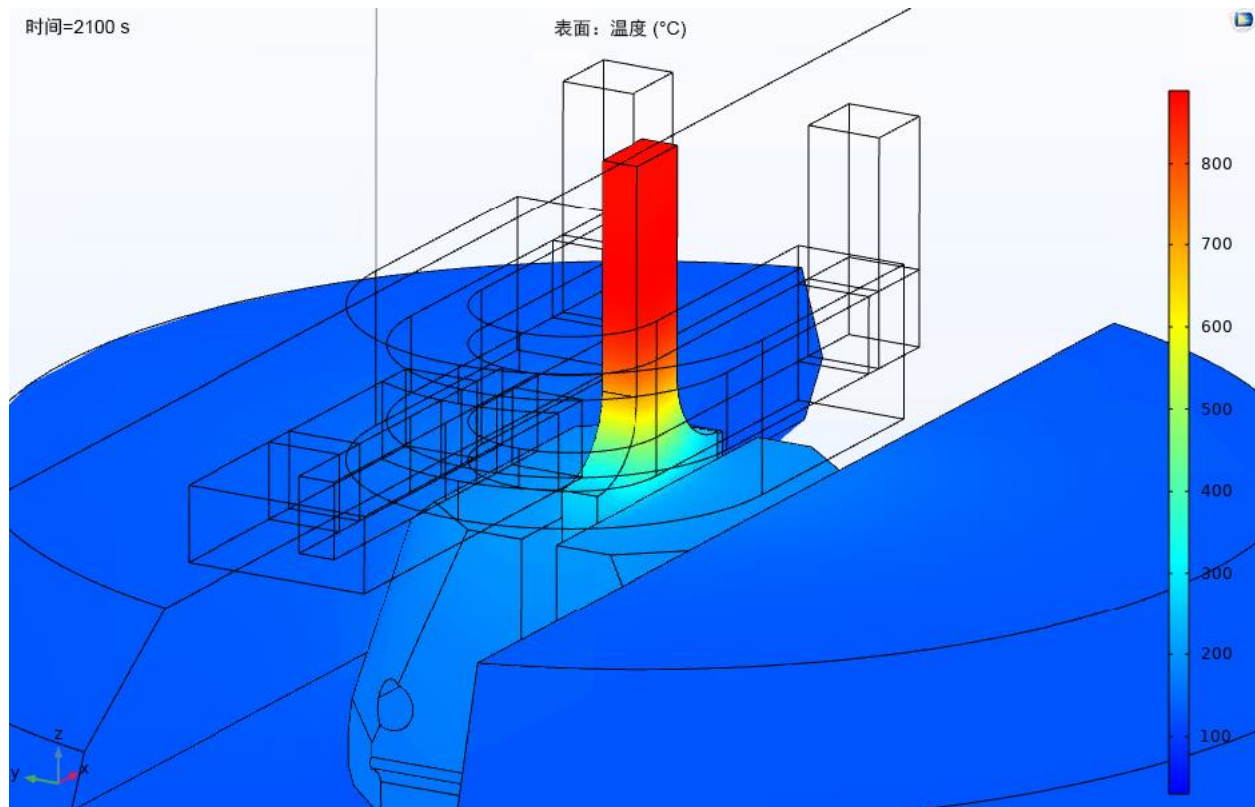


图 5: 以 30 K/s 的速度从 300°C 快速加热到最高 900°C 后的温度分布

加热应用的具体要求为:

- 最高可达到温度: 900 ° C
- 加热和冷却的斜坡速率: 30 K/s
- 整个标距长度上的均匀温度分布: 10 K 以内

对夹具进行了初步设计，并就几何结构、强度、刚度和耐久性方面的配合和功能通过有限元方法分析了设计。

布置了感应线圈，以确保对试样的均匀加热。可以使用物理接触式应变片型引伸计，同时还支持使用的非接触式光学引伸计来观察试样。安装在试样上的热电偶可执行温度控制。

使用 COMSOL Multiphysics 软件进行了多物理场仿真。这种方法具有如下特点：

- 能够根据试样和线圈的几何形状做 2D 和 3D 仿真
- 通常将感应线圈的电磁场模拟为频域问题
- 可以将试样内部的温度场模拟为静态或瞬态
- 可以通过与温度相关的材料性能（例如导电性、相对导磁率、导热性、比热容）将温度场与磁场进行耦合
- 考虑通过辐射、对流和传导进行热传递
- 考虑由于使用潜在的水冷夹具而对试样产生的端部效应

最佳线圈设计所考虑的主要参数包括：

- 400 kHz 的激励频率
- 高达 460 A (rms) 的线圈电流水平
- Inconel 718 合金试样的温度相关材料性能
- 30°C 的夹具冷却通道内冷却水的温度
- 试样与夹具之间 COSMOL 的热接触模型
- 试样表面对环境辐射
- 双向耦合的磁场和温度场

最终设计迭代和结论

- 前部敞开的叉形线圈满足大多数加热要求以及所有可达性要求
- 加热速率高达 30 K/s（见图 6）
- 温度均匀型低于封闭/环绕线圈的温度均匀性
 - 在整个标距长度上实现的 ΔT 为 14.8 K（见图 7）
 - 通过更新线圈设计有可能得到更高的温度均匀型
- 冷却速率（不考虑主动式空气冷却）很大程度上取决于夹具处的温度值（目前不考虑夹具冷却，采用“温热”夹具）
- 功率为 10 kW 的标准 TRUMPF 发射器
- 建议在最终线圈设计之前进行追加仿真
- 达到的温度：高达 900°C

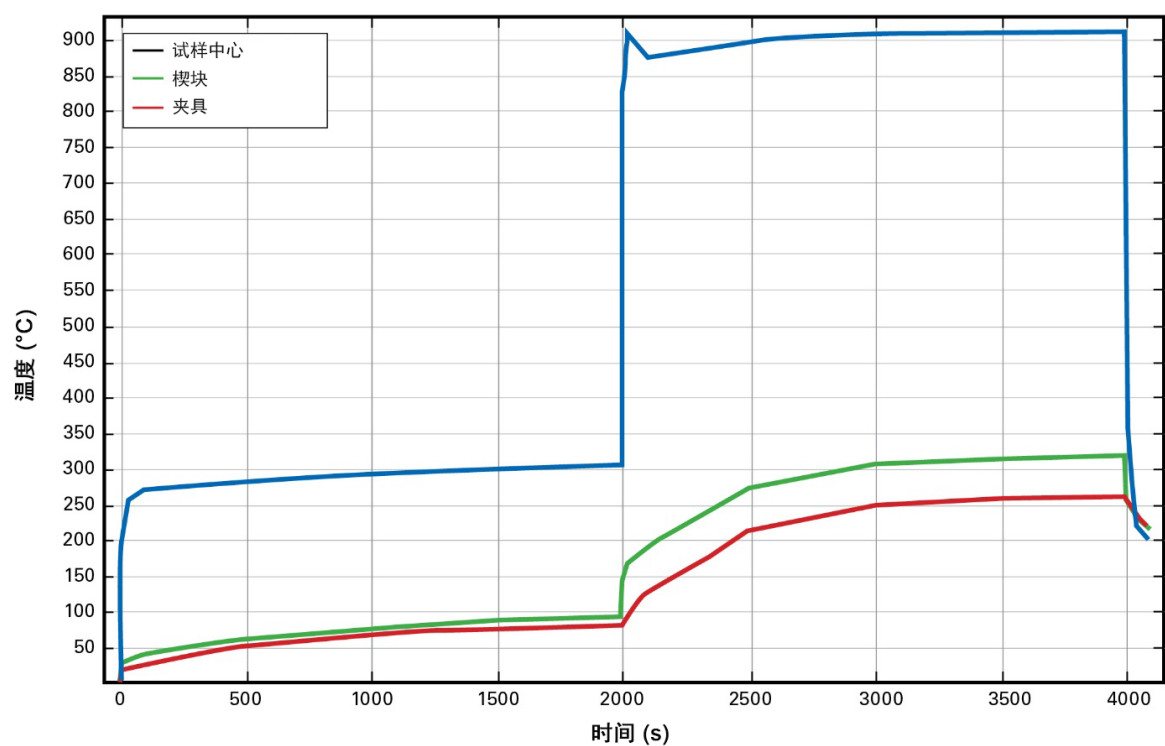


图 6: 专用加热程序在不同位置的温度与时间对比

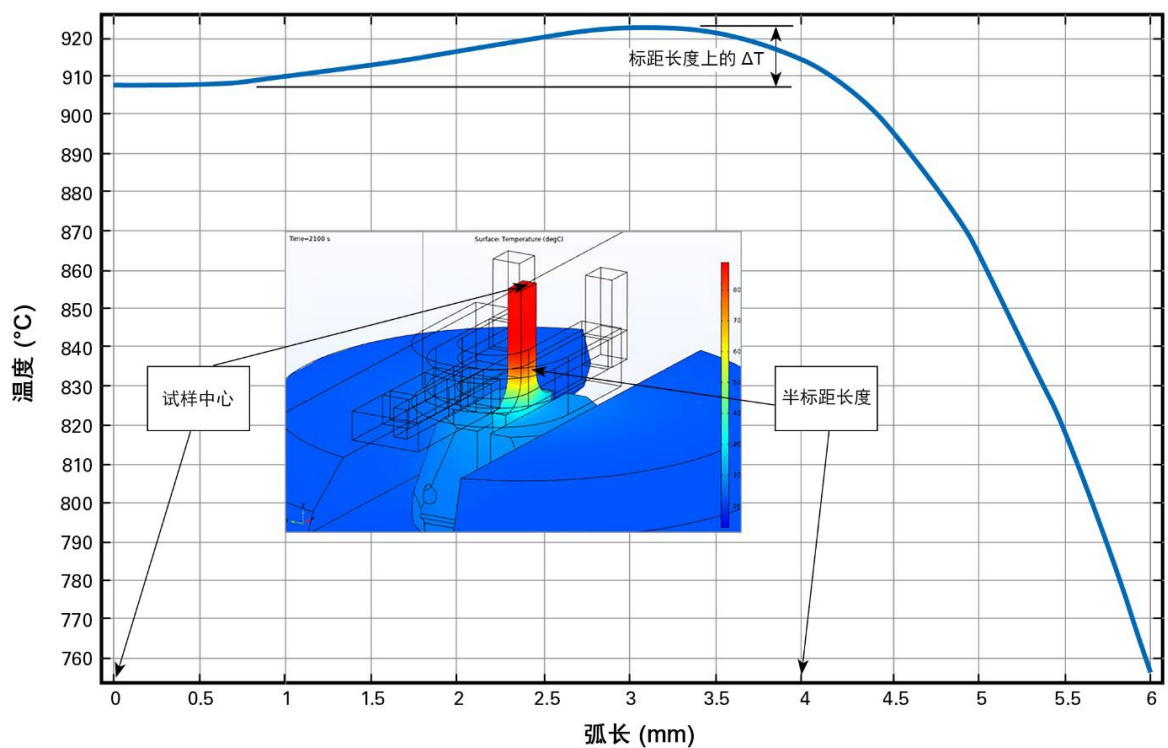


图 7: 1500 秒保温时间后, 在稳定状态下沿试样的温度。ΔT = 14.8 K, 中心位置在 0 mm 处, 标距长度为 8 mm。

5. 总结

受益于本研究中获得的经验，MTS 和 TRUMPF 能够在构建实际硬件之前，通过提供仿真研究来减少不满足要求的风险。

应用要求已通过迭代设计在很大程度上得到满足，并在最高温度条件下的实现温度分布上达成了一定妥协。

但是，由于一些因素并未加以考虑，因此建模仍存在不确定性，这些因素包括：

- 引伸计接触到试样上
- 受测试样的最终材料性能
- 试样的几何公差

因此，MTS 和 TRUMPF 均认为，此方法为在构建任何原型之前专门评估给定设计的所需性能提供了一个良好的开端。仿真是确定具体设计总体性能的适宜低成本前期步骤，而且作为一种基于模型的设计方法，它有助于识别风险领域并为改进提供指导。在签署批准任何具体设计的多个版本之前，建议通过物理原型进行最终验证。