

ANSYS

在材料工程中的应用

胡红军 黄伟九 杨明波 编著



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

ANSYS 在材料工程中的应用

胡红军 黄伟九 杨明波 编著



机械工业出版社

本书结合基本物理场数值模拟的理论基础与大量实例,全面系统地介绍了材料工程中基于 ANSYS 的数值模拟技术,包括铸造、焊接、板料成形、体积成形、轧制成形、热处理、失效分析、复合材料设计等领域,涉及温度场、应力场、流场、电磁场的多场耦合的数值模拟与应用。

本书将材料工程中的计算机模拟理论与实践相结合,使读者在学习 ANSYS 软件的同时,可以不断提高专业领域的理论修养。为了便于练习,本书在每章后提供了习题,可以通过改变问题的求解条件,分析评价计算结果的正确性和准确性,以达到举一反三的目的。

本书可作为高等院校相关专业本科生和研究生以及教师学习 ANSYS 软件的教材,也可以供从事材料科学与工程分析和设计的相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 在材料工程中的应用/胡红军,黄伟九,杨明波编著.

—北京:机械工业出版社,2012.12

ISBN 978-7-111-40289-3

I. ①A… II. ①胡… ②黄… ③杨… III. ①材料科学—有限元分析—应用程序 IV. ①TB3②O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 311890 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:孔 劲 责任编辑:孔 劲 杨明远 版式设计:霍永明

责任校对:陈立辉 封面设计:姚 毅 责任印制:乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2013 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·19.25 印张·484 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-40289-3

定价:48.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

策划编辑:(010)88379772

电话服务

网络服务

社 服 务 中 心:(010)88361066 教 材 网:<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面防伪标均为盗版

前 言

ANSYS 软件是目前应用最广的有限元软件之一，其用户遍布世界各国。该软件从 20 世纪 90 年代进入中国，目前在国外的用户多达 5000 余家，遍及机械制造、航空航天、汽车、铁道、石油化工、能源等行业。当前，许多介绍 ANSYS 等有限元软件的书籍是从软件应用的角度出发，主要介绍软件命令的操作规则，很少介绍工程的背景知识和有限元相关的概念，这使得有限元知识欠缺的读者只知仿照书中提供的例题进行类似问题的分析。为此，本书从有限元在材料工程中的实际应用出发，结合专业基础理论利用 ANSYS 软件分析问题，使读者能在较短的时间内，既知其然，又知其所以然，真正掌握有限元的分析方法，并在工程实际中灵活运用。

本书简要介绍了 ANSYS 软件在一些物理场中的应用理论及操作步骤，全面系统地阐述了 ANSYS 软件在材料科学与工程中的应用，内容由浅入深，循序渐进。全书共分 13 章，第 1 章~第 5 章结合详细的实例和操作步骤分别介绍了 ANSYS 软件在材料科学与工程的温度场、应力场、流场、电磁场以及耦合场等方面的基础知识。第 6 章~第 13 章分别介绍了 ANSYS 软件在板料成形、体积成形、轧制成形、焊接、热处理、材料工程失效分析、复合材料设计、铸造方面应用的理论和实际操作。书中每章都配有例题，同时，为配合读者的学习，还编写了一定数量的练习题。

本书可作为理工科特别是材料科学与工程学科高等院校高年级本科生、研究生及教师学习使用 ANSYS 软件的教材和参考书，也可供工程技术人员参考。

本书在编写中参考了国内外出版的一些书籍以及网络资料，在此特向作者致谢。本书收录了国家自然科学基金青年基金(51101176)和国家自然科学基金(50975302)的相关研究内容，在此向国家自然科学基金委员会表示感谢。

由于篇幅所限，未能将 ANSYS 软件在材料工程中的应用全部包括进来，还有相当大的补充空间。鉴于作者水平所限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 基于 ANSYS 软件的温度场数值模拟	1
1.1 温度场的基本理论与 ANSYS 基础	1
1.2 ANSYS 软件在温度场模拟中的应用实例	7
1.3 本章总结	21
1.4 练习题	22
第 2 章 基于 ANSYS 软件的应力场数值模拟	27
2.1 应力场的基本理论及 ANSYS 应用基础	27
2.2 ANSYS 软件在应力场模拟中的应用实例	29
2.3 本章总结	52
2.4 练习题	52
第 3 章 基于 ANSYS 软件的流场数值模拟	57
3.1 流场的基本理论与 FLOTTRAN CFD 基本知识	57
3.2 ANSYS 软件的流体动力学分析实例	60
3.3 本章总结	71
3.4 练习题	71
第 4 章 基于 ANSYS 软件的电磁场数值模拟	73
4.1 电磁场分析基本理论与 ANSYS 电磁场分析的基本知识	73
4.2 ANSYS 软件在电磁场模拟中的应用实例	77
4.3 本章总结	92
4.4 练习题	92
第 5 章 基于 ANSYS 软件的耦合场数值模拟	94
5.1 耦合场分析的基本理论与操作	94
5.2 ANSYS 软件在耦合场模拟中的应用实例	96
5.3 本章总结	122
5.4 练习题	122
第 6 章 基于 ANSYS 软件的板料成形数值模拟	126
6.1 板料成形过程数值模拟基本理论	126
6.2 ANSYS 软件在板料成形模拟中的应用实例	128
6.3 本章总结	154
6.4 练习题	154
第 7 章 基于 ANSYS 软件的体积成形数值模拟	155
7.1 体积成形工艺及 ANSYS 非线性接触技术	155
7.2 ANSYS 软件在体积成形模拟中的应用实例	157

7.3 本章总结	173
7.4 练习题	173
第8章 基于 ANSYS 软件的轧制成形数值模拟	174
8.1 轧制成形的基本理论	174
8.2 ANSYS 软件在轧制成形模拟中的应用实例	174
8.3 本章总结	189
8.4 练习题	189
第9章 基于 ANSYS 软件的焊接过程数值模拟	190
9.1 焊接过程模拟的基本理论及 ANSYS 软件模拟基础	190
9.2 ANSYS 软件在焊接工艺模拟中的应用实例	191
9.3 本章总结	220
9.4 练习题	220
第10章 基于 ANSYS 软件的热处理过程数值模拟	223
10.1 热处理工艺及计算机模拟	223
10.2 ANSYS 软件在热处理工艺模拟中的应用实例	224
10.3 本章总结	236
10.4 练习题	236
第11章 基于 ANSYS 软件的材料工程失效分析数值模拟	240
11.1 基于 ANSYS 失效分析基础	240
11.2 ANSYS 软件在材料工程疲劳分析模拟中的应用实例	243
11.3 本章总结	266
11.4 练习题	266
第12章 基于 ANSYS 软件的复合材料数值模拟	268
12.1 复合材料设计的基本理论与 ANSYS 有限元方法	268
12.2 ANSYS 软件在复合材料设计上的应用实例	270
12.3 本章总结	281
12.4 练习题	281
第13章 基于 ANSYS 软件的铸造成形数值模拟	283
13.1 铸件凝固过程数值模拟概况	283
13.2 ANSYS 软件在铸造过程模拟中的应用实例	284
13.3 本章总结	303
13.4 练习题	303
附录	305
参考文献	307

第 1 章 基于 ANSYS 软件的温度场数值模拟

1.1 温度场的基本理论与 ANSYS 基础

在材料的加工、成形过程中常常会遇到与温度场有关的问题，如金属材料的热加工、高分子材料的成型以及陶瓷材料的烧结等。这些问题的温度场分析对材料工艺的研究、工艺质量的提高和工艺过程的控制，相变过程和机理的研究，节能以及新技术的开发和应用非常重要。但这些过程常伴随相变潜热的释放、复杂的边界条件等，所以很难得到温度场分布的解析解，只能采用各种数值计算方法进行求解。因此，应用计算机技术解决传热问题已成为材料科学与工程技术发展中的重要课题。

温度场是指在各个时刻物体内各点温度分布的总称。由傅里叶定律知：物体导热热流量与温度变化率有关，所以研究物体导热必涉及物体的温度分布。一般来说，物体的温度分布是坐标和时间的函数。即： $T=f(x,y,z,t)$ ，其中 x 、 y 、 z 为空间坐标， t 为时间坐标。

根据能量守恒定律与傅里叶定律，建立导热物体中的温度场应满足的数学表达式

$$\rho c \frac{\partial (T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1-1)$$

式中， ρ 是材料的密度 (kg/m^3)； c 是材料的比热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)； t 是时间 (s)； λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别是材料沿 x 、 y 、 z 方向的热导率 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)； $Q=Q(x,y,z,t)$ 是材料内部的热源密度 (W/kg)。

式(1-1)称为导热微分方程，是笛卡儿坐标系中三维非稳态导热微分方程的一般表达式，它是目前温度场数值模拟中普遍使用的描述方程，不仅适用于固体，也适用于流体。

通过导热微分方程可知，求解导热问题，实际上就是求解导热微分方程。预知某一导热问题的温度分布，必须给出表征该问题的附加条件。导热微分方程的定解条件是指使导热微分方程获得适合某一特定导热问题的求解的附加条件。

(1) 初始条件 初始条件是指求解问题的初始温度场也就是在零时刻温度场的分布。它可以是均匀的，此时有 $T|_{t=0} = T_0$ ，也可以是不均匀的，各点的温度值已知或者遵从以下关系式。

$$T|_{t=0} = T_0(x,y,z) \quad (1-2)$$

(2) 边界条件：边界条件是指物体表面或者边界与周围环境的热交换情况，通常有三类重要的边界条件。不同边界条件下的导热情况及表达式。

1) 第一类边界条件，第一类边界条件是指物体边界上的温度分布函数为已知，表示为

$$T|_s = T_w \text{ 或 } T|_s = T_w(x,y,z,t) \quad (1-3)$$

2) 第二类边界条件，第二类边界条件是指边界上的热流密度已知，表示为

$$q|_s = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = q_w \text{ 或 } q|_s = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = q_w(x,y,z,t) \quad (1-4)$$

式中, n 为物体边界的外法线方向, 并规定热流密度的方向与边界的外法线方向相同。

3) 第三类边界条件。第三类边界条件又称为对流边界条件,是指物体与其周围环境介质间的表面传热系数 k 和介质的温度 t_f 已知,表示为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = k(T - t_f) \quad (1-5)$$

稳态温度场是指在稳态条件下物体各点的温度分布不随时间的改变而变化的温度场,其表达式为 $T=f(x,y,z)$ 。

在分析稳态热传导问题时，不需要考虑物体的初始温度分布对最后的稳定温度场的影响，因此不必考虑温度场的初始条件，而只需考虑换热边界条件。计算稳态温度场实际上是求解偏微分方程的边值问题。由于实际工程问题中的换热边界条件比较复杂，在许多场合下也很难进行测量，如何定义正确的换热边界条件是温度场计算的一个难点。

如果系统的净热流率为 0, 即流入系统的热量加上系统自身产生的热量等于流出系统的热量: $q_{\text{流入}} + q_{\text{生成}} - q_{\text{流出}} = 0$, 则系统处于热稳态。在稳态热分析中任一节点的温度不随时间变化。稳态热分析的能量平衡方程为(以矩阵形式表示)

$$[K]\{T\} = \{Q\} \quad (1-6)$$

式中, $[K]$ 是传导矩阵, 包含热导率、对流系数及辐射率和形状系数; $\{T\}$ 是节点温度向量; $\{Q\}$ 是节点热流率向量, 包含热生成。ANSYS 利用模型几何参数、材料热性能参数以及所施加的边界条件, 生成 $[K]$ 、 $\{T\}$ 以及 $\{Q\}$ 。

稳态传热用于分析稳定的热载荷对系统或部件的影响。通常在进行瞬态热分析以前,用稳态热分析确定初始温度分布。稳态热分析可以通过有限元计算确定由于稳定的热载荷引起的温度、热梯度、热流率、热流密度等参数。

在 ANSYS 中, 温度场的模拟主要是应用在热分析模块。热分析用于计算一个系统或部件的温度分布及其他热物理参数, 例如热量的获取或损失、热梯度、热流密度(热通量)等。热分析在许多工程应用中扮演重要角色, 例如内燃机、涡轮机、换热器、管路系统、电子元件等。在 ANSYS/Multiphysics、ANSYS/Mechanical、ANSYS/Thermal、ANSYS/FLOTRAN、ANSYS/ED 五种产品中包含热分析功能, 其中 ANSYS/FLOTRAN 不含相变热分析。ANSYS 热分析基于能量守恒定律的热平衡方程, 用有限元法计算各节点的温度, 并导出其他热物理参数。ANSYS 热分析包括热传导、热对流及热辐射三种热传递方式。此外, 还可以分析相变、有内热源、接触热阻等问题。ANSYS 热分析分为①稳态传热: 系统的温度场不随时间变化; ②瞬态传热: 系统的温度场随时间明显变化; ③耦合分析: 有热—结构耦合、热—流体耦合、热—电耦合、热—磁耦合、热—电—磁—结构耦合等。

1.1.1 稳态传热分析

如果系统的净热流率为0，即流入系统的热量加上系统自身产生的热量等于流出系统的热量： $q_{\text{流入}} + q_{\text{生成}} - q_{\text{流出}} = 0$ ，则系统处于热稳态。在稳态热分析中任一节点的温度不随时间变化。

1. 稳态热分析的单元

热分析涉及的单元大约有 40 种，其中纯粹用于热分析的有 14 种：

线性单元: LINK32 二维二节点热传导单元

	LINK33	三维二节点热传导单元
	LINK34	二节点热对流单元
	LINK31	二节点热辐射单元
二维实体单元:	PLANE55	四节点四边形单元
	PLANE77	八节点四边形单元
	PLANE35	三节点三角形单元
	PLANE75	四节点轴对称单元
	PLANE78	八节点轴对称单元
三维实体单元:	SOLID87	六节点四面体单元
	SOLID70	八节点六面体单元
	SOLID90	二十节点六面体单元
壳单元:	SHELL57	四节点
点单元:	MASS71	

2. ANSYS 稳态热分析的基本过程

(1) 建模

- 1) 确定 jobname、title、unit。
- 2) 进入 PREP7 前处理, 定义单元类型, 设定单元选项。
- 3) 定义单元实常数。
- 4) 定义材料热性能参数, 对于稳态传热, 一般只需定义热导率, 其它可以是恒定的, 也可以随温度变化。

(2) 施加载荷计算

1) 定义分析类型。如果进行新的热分析: 命令: ANTYPE, STATIC, NEW; 如果继续上一次分析, 比如增加边界条件等: 命令: ANTYPE, STATIC, REST。

2) 施加载荷, 可以直接在实体模型或单元模型上施加以下五种载荷(边界条件)。

① 恒定的温度。通常作为自由度约束施加于已知的边界上。命令: D。

② 热流率。热流率作为节点集中载荷, 主要用于线单元模型中(通常线单元模型不能施加对流或热流密度载荷), 如果输入的正, 代表热流流入节点, 即单元获取热量。如果温度与热流率同时施加在一节点上, 则 ANSYS 读取温度值进行计算。命令: F。

注意: 如果在实体单元的某一节点上施加热流率, 则此节点周围的单元要密一些, 在两种热导率差别很大的两个单元的公共节点上施加热流率时, 尤其要注意。此外, 尽可能使用热生成或热流密度边界条件, 这样结果会更精确些。

③ 对流。对流边界条件作为面载荷施加于实体的外表面, 计算与流体的热交换, 它仅可施加于实体和壳模型上。命令: SF。

④ 热流密度。热流密度也是一种面载荷。当通过单位面积的热流率已知或通过 FLOT-RAN CFD 计算得到时, 可以在模型相应的外表面施加热流密度。如果输入的正, 代表热流流入单元。热流密度也仅适用于实体和壳单元。热流密度与对流可以施加在同一外表面, 但 ANSYS 仅读取最后施加的面载荷进行计算。命令: F。

⑤ 生热率。生热率作为体载荷施加于单元上, 可以模拟化学反应生热或电流生热。它的单位是单位体积的热流率。命令: BF。

3) 确定载荷步选项。

① 普通选项。

时间选项：虽然对于稳态热分析时间选项并没有实际的物理意义，但它提供了一个方便的设置载荷步和载荷子步的方法。命令：TIME。

每载荷步中子步的数量或时间步大小：对于非线性分析，每一载荷步需要多个子步。命令：NSUBST 或 DELTIM。

递进或阶跃选项：如果定义阶跃 (stepped) 选项，载荷值在这个载荷步内保持不变；如果为递进 (ramped) 选项，则载荷值由上一载荷步值到本载荷步值随每一子步线性变化。命令：KBC。

② 非线性选项。

迭代次数：本选项设置每一子步允许的最多的迭代次数。默认值为 25，对大数热分析问题足够。命令：NEQIT。

自动时间步长：对于非线性问题，可以自动设定子步间载荷的增长，保证求解的稳定性和准确性。命令：AUTOTS。

收敛误差：可根据温度、热流率等检验热分析的收敛性。命令：CNVTOL。

求解结束选项：如果在规定的迭代次数内，达不到收敛，ANSYS 可以停止求解或到下一载荷步继续求解。命令：NCNV。

③ 输出控制。

控制打印输出：本选项可将任何结果数据输出到 *.out 文件中。命令：OUTPR。

控制结果文件：控制 *.rth 的内容。命令：OUTRES。

4) 确定分析选项。

① Newton-Raphson 选项。命令：NROPT。

② 选择求解器。可选择求解器中的一个进行求解。命令：EQLV。

注意，热分析可选用 Iterative 选项进行快速求解，但如下情况除外：热分析包含 SURF19、SURF22 或超单元；热辐射分析；相变分析；需要 restart an analysis。

③ 确定 OK。在进行热辐射分析时，要将目前的温度值换算为热力学温度。如果使用的温度单位是℃，此值应设定为 273；如果使用的是°F，则为 460。命令：TOFFST。

5) 求解，命令：SOLVE。

(3) 后处理 ANSYS 将热分析的结果写入 *.rth 文件中，它包含如下数据：基本数据有节点温度；导出数据有节点及单元的热流密度，节点及单元的热梯度，单元热流率，节点的反作用热流率。进入 POST1 后，读入载荷步和子步：命令：SET。

可以通过如下三种方式查看结果：

1) 彩色云图显示，命令：PLNSOL, PLESOL, PLETAB 等。

2) 矢量图显示，命令：PLVECT。

3) 列表显示，命令：PRNSOL, PRESOL, PRRSOL 等。

1.1.2 非稳态传热分析

瞬态热分析用于计算系统随时间变化的温度场和其他热参数。即在工程中一般用瞬态热分析计算温度场，并找到温度梯度最大的时间点，将此时间点的温度场作为热载荷进行应力

计算与分析。瞬态热分析的基本步骤与稳态热分析类似。主要的区别是瞬态热分析中的载荷是随时间变化的。

1. 建模

确定 jobname、title、units，进入 PREP7；定义单元类型并设置选项；如果需要，定义单元实常数；定义材料热性能，一般瞬态热分析要定义热导率、密度及比热容；建立几何模型；对几何模型划分网格。

2. 加载求解

定义分析类型。如果第一次进行分析，或重新进行分析，命令：ANTYPE, TRANSIENT, NEW；如果接着上次的分析继续进行（例如增加其他载荷），命令：ANTYPE, TRANSIENT, REST。

获得瞬态热分析的初始条件。

① 定义均匀温度场。如果已知模型的起始温度是均匀的，可设定所有节点初始温度，命令：TUNIF。如果不在对话框中输入数据，则默认为参考温度，参考温度的值默认为零，但可通过如下方法设定参考温度：命令：TREF。初始均匀温度仅对分析的第一个子步有效；而设定节点温度将保持贯穿整个瞬态分析过程，除非通过下列方法删除此约束：命令：DDELE。

② 设定非均匀的初始温度。在瞬态热分析中，节点温度可以设定为不同的值，命令：IC。如果初始温度场是不均匀的且又是未知的，就必须首先作稳态热分析确定初始条件：设定载荷（如已知的温度、热对流等）；将时间积分设置为 OFF，命令：TIMINT, OFF；设定一个只有一个子步的、时间很小的载荷步（例如 0.001），命令：TIME。写入载荷步文件，命令：LSWRITE；求解，命令：SOLVE。

3. 设定载荷步选项

1) 普通选项。时间：本选项设定每一载荷步结束时的时间，命令：TIME，每个载荷步的载荷子步数，或时间增量。对于非线性分析，每个载荷步需要多个载荷子步。时间步长的大小关系到计算的精度，步长越小，计算精度越高，同时计算的时间越长。根据线性传热传递，可以按如下公式估计初始时间步长

$$ITS = \delta^2 / 4\alpha$$

式中， δ 是沿热流方向热梯度最大处的单元的长度； α 是热扩散率，它等于热导率除以密度与比热容的乘积（ $\alpha = k/\rho c$ ）。命令：NSUBST 或 DELTIM。

如果载荷在这个载荷步是恒定的，需要设为阶跃选项；如果载荷值随时间线性变化，则要设定为渐变选项。命令：KBC。

2) 非线性选项。

迭代次数：每个子步默认的次数为 25，这对大多数非线性热分析已经足够。命令：NEQIT。

自动时间步长：本选项为 ON 时，在求解过程中将自动调整时间步长。命令：AUTOTS。

时间积分效果：如果将此选项设定为 OFF，将进行稳态热分析。命令：TIMINT。

3) 输出选项。控制打印输出：本选项可将任何结果数据输出到 *.out 文件中，命令：OUTPR。

控制结果文件：控制 *.rth 的内容，命令：OUTRES。

4) 存盘求解。单击 ANSYS 工具条中的 SAVE_DB, 命令: SOLVE。

4. 后处理

ANSYS 提供两种后处理方式。

1) 用 POST1 进行后处理。进入 POST1 后, 可以读出某一时间点的结果, 命令: SET。采用与稳态热分析类似的方法, 对结果进行彩色云图显示、矢量图显示、打印列表等后处理。

2) 用 POST26 进行后处理。首先定义变量, 命令: NSOL 或 ESOL 或 RFORCE; 然后就可以绘制这些变量随时间变化的曲线, 命令: PLVAR; 列表输出, 命令: PRVAR。

1.1.3 热辐射

辐射是一种通过电磁波传递能量的方式。电磁波以光速传播且无需任何介质。热辐射仅为电磁波谱中的一小段。因为由于热辐射引起的热流与物体表面绝对温度的四次方成正比, 因此热辐射分析是高度非线性的。ANSYS 提供了三种方法分析热辐射问题: 用 LINK31 辐射线单元分析两个点或多对点之间的热辐射; 用表面效应单元 SURF19 或 SURF22 分析点对面的热辐射; 用 AUX12 热辐射矩阵生成器分析面与面之间的热辐射。

1. 定义辐射面

1) 在 PREP7 中建模、划分网格。

2) 在辐射表面用 SHELL57(3-D)单元或 LINK32(2-D)单元划分网格。最好的方法是先选择辐射表面的节点, 然后用如下方法创建 SHELL57 单元或 LINK32 单元。命令: ESURF。

3) 如果所分析的系统是开放的, 即一个面所辐射的热能未被模型中其他的面吸收, 则必须定义一个空间节点, 用于吸收损失的辐射热量。这个节点的位置是任意的。对于封闭的系统, 不应定义空间节点。

2. 生成辐射矩阵

1) 进入 AUX12。命令: /AUX12。

2) 选择组成辐射面的节点和单元。比较方便的方法是根据单元类型选择单元, 并选择单元上的节点。

3) 确定模型是 3-D 还是 2-D, 命令: GEOM, AUX12 用不同的算法计算 2-D 或 3-D 模型的形状系数。

4) 定义每个辐射面的辐射率(默认为 1)。命令: EMIS。

5) 定义斯蒂芬-玻耳兹曼(Stefan-Boltzmann)常数。命令: STEF。

6) 确定用什么方式计算形状系数。命令: VTYPE。

7) 如为开放系统, 定义空间节点。命令: SPACE。

8) 计算辐射矩阵并写入 jobname. sub 文件。命令: WRITE。

9) 选择所有的节点和单元。

3. 在热分析中使用辐射矩阵

1) 重新进入 PREP7, 定义一个新的单元类型 MATRIX50(超单元)。

2) 将单元类型指向超单元。命令: TYPE。

3) 读入超单元矩阵。命令: SE。

4) 不选择或删除用于生成辐射矩阵的 SHELL57 单元或 LINK32 单元。命令: EDELE。

5) 进入/SOLUTION 施加其他热载荷并求解。

1.2 ANSYS 软件在温度场模拟中的应用实例

1.2.1 实例 1—电阻加热的稳态三维温度场模拟

一导线的半径为 1.015mm ，电阻率为 $8 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ，热导率为 $19.03\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，电能产生的功率为 $1.718 \times 10^9\text{W}/\text{m}^3$ 。求加热到稳态后的温度分布情况。

命令流如下：

/clear	! 清理数据库
/filename,ex1 - 1	! 定义隐式热分析文件名
/prep7	! 进入前处理器
et,1,solid70	! 选择单元类型
mp,KXX,1,19.03	! 定义电阻丝的热导率
cylind,0.001015,0,0,0.0015,0,90	! 建立 1/4 电阻丝三维几何模型
esize,0.00025,0,	! 设置单元划分尺寸
mshkey,1	! 设置映射划分单元类型
vmesh,1	! 划分网格
bfv,1,hgen,1.718e9	! 施加热生成载荷
da,1,temp,0	! 施加温度边界条件
/solu	! 进入求解器
antype,static	! 设置为稳态求解
time,2	! 定义求解时间
solve	! 求解
/post1	! 进入后处理器
set,last	! 读入最后子步结果
plnsol,temp,,0,	! 显示温度分布云图
/expand,27,axis,,10	! 设置 270° 三维周期扩展选项 (见图 1-1)

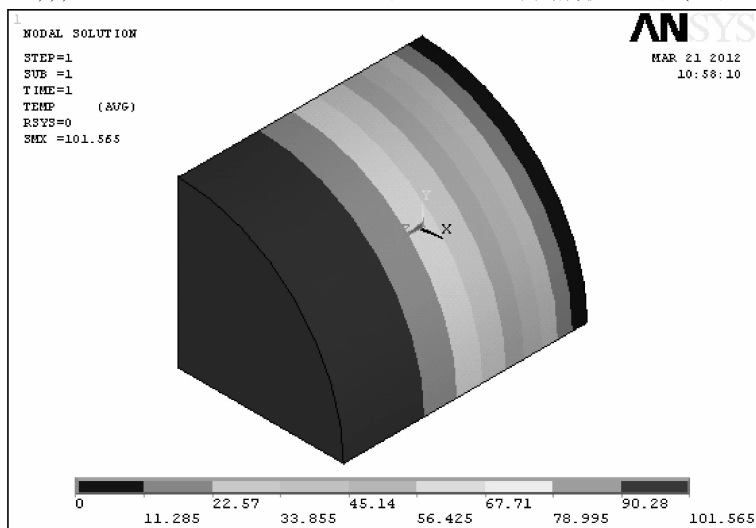


图 1-1 三维温度分布云图

```
plnsol,temp,,0,
```

! 显示温度分布云图

```
/exit,nosav
```

! 退出 ANSYS

1.2.2 实例 2—稳态热辐射温度场模拟

内、外两个圆形环彼此辐射，内环外表面的辐射率为 0.9，其内表面温度为 1500℃。外环内表面辐射率为 0.7，其外表面温度为 100℃，环境温度为 70℃。计算 1s 后的温度分布，如图 1-2 所示。

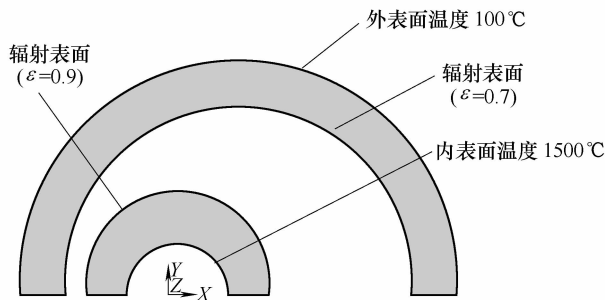


图 1-2 双圆环

命令流如下：

```
/clear
```

```
/filename,ex1-2
```

! 定义隐式热分析文件名

```
/title,radiation between circular annulus
```

! 使用二维辐射的实例分析

```
/prep7
```

```
cyl4,0,0,,.5,0,,.25,180!
```

内环

```
cyl4,0.2,0,1,0,,.75,180!
```

外环

```
et,1,plane55
```

! 2-D 热单元

```
lsel,s,line,,1
```

```
sfl,all,rdsf,.9,,1,
```

! 内环辐射边界条件

```
lsel,s,line,,7
```

```
sfl,all,rdsf,.7,,1,
```

! 外环辐射边界条件

```
lsel,s,line,,3
```

```
dl,all,,temp,1500,1
```

! 内环温度

```
lsel,s,line,,5
```

```
dl,all,,temp,100,1
```

! 外环温度

```
allsel
```

```
stef,0.119e-10
```

! 常数

```
toffst,460
```

! 温度补偿

```
radopt,0.5,0.01,0,
```

! 求解选项

```
spctemp,1,70
```

! 外层壳的温度

```
v2dopt,0.0,0,0,
```

! 2-D 视图

```
esize,0.05,
```

```
amesh,all
```

```
mp,KXX,1,,1
```

! 热导率

```

finish
/solu
time,1
deltim,.5,.1,1
neqit,1000
solve
finish
/post1
asel,s,area,,1
nsla,s,1
prnsol,temp
finish

```

! 温度分布(见图 1-3)

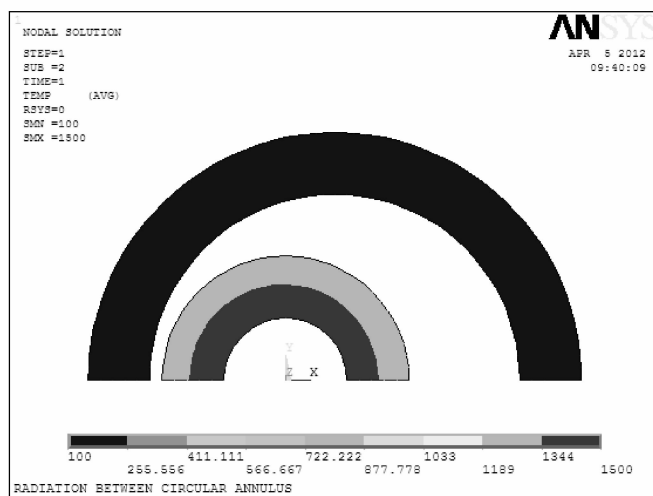


图 1-3 温度分布图

1.2.3 实例 3—电磁感应加热进程的温度场分布

工件的外半径为 0.015m，线圈内外半径分别为 0.0175m 和 0.02m。感应加热频率为 150000Hz。计算稳定加热时的温度场分布。

命令流如下：

```

/clear
/filename,ex1-3
/title,induction heating
/prep7
row=.015
ric=.0175
roc=.0200
ro=.05
t=.001
freq=150000

```

! 定义分析文件名

! 进入前处理器

! 工件的外半径

! 线圈内半径

! 线圈外半径

! 空气模型的外半径

! 模型的轴向高度

! 加热频率(Hz)

```

pi = 4 * atan(1)                ! 定义圆周率参数
cond = .392e7                    ! 最大热导率
muzero = 4e-7 * pi              ! 自由空间的磁导率
mur = 200                        ! 最大相对磁导率
skind = sqrt(1/(pi * freq * cond * muzero * mur)) ! 集肤效应深度
ftime = 3                        ! 计算时间
tinc = .05                       ! 谐响应分析时间步
time = 0                         ! 初始计算时间
delt = .01                       ! 最大时间间隔
                                ! 电磁场分析模型

et,1,53,,1                      ! 选择单元类型并设置为轴对称分析
et,2,53,,1
emunit,mks                      ! 设置电磁场分析单位
mp,murx,1,1                     ! 定义空气相对磁导率
mp,murx,3,1                     ! 定义线圈相对磁导率
mptemp,1,25.5,160,291.5,477.6,635,698 ! 定义与磁导率对应的温度
mptemp,7,709,720.3,742,761,1000
mpdata,murx,2,1,200,190,182,161,135,104 ! 定义钢坯料相对磁导率
mpdata,murx,2,7,84,35,17,1,1
mptemp
mptemp,1,0,125,250,375,500,625    ! 定义与电阻对应的温度
mptemp,7,750,875,1000
mpdata,rsvx,2,1,184e-6,.272e-6,.384e-6,.512e-6,.656e-6,.824e-6
mpdata,rsvx,2,7,1.032e-6,1.152e-6,1.2e-6 ! 定义钢坯料电阻
mptemp
mptemp,1,0,730,930,1000           ! 定义与热导率对应的温度
mpdata,KXX,2,1,60.64,29.5,28,28   ! 定义钢坯料热导率
mptemp                            ! 定义与坯料焓值对应的温度
mptemp,1,0,27,127,327,527,727
mptemp,7,765,765.001,927
mpdata,ENTH,2,1,0,91609056,453285756,1.2748e9,2.2519e9,3.3396e9
mpdata,ENTH,2,7,3.548547e9,3.548556e9,4.3520e9 ! 定义坯料焓值
mp,emis,2,.68                    ! 定义热辐射系数
rectng,0,row,0,t                 ! 建立坯料的几何模型
rectng,row,ric,0,t               ! 建立坯料和线圈间的几何模型
rectng,ric,roc,0,t              ! 建立线圈的几何模型
rectng,roc,ro,0,t               ! 建立坯料外面空气的几何模型
aglu,all                         ! 粘接各矩形
numcmp,area                      ! 压缩面编号
ksel,s,loc,x,row                 ! 选择坯料外圆的关键点
kesize,all,skind/2               ! 设置关键点附近单元划分尺寸
ksel,s,loc,x,0                  ! 选择中心的关键点
kesize,all,40 * skind            ! 设置关键点附近单元划分尺寸

```