

零件加工后
物理机械性能和
使用性能的研究

[苏联] A. B. 波德杰主编



国防工业出版社

21

5

2

78.21
305
2

零件加工后物理机械性能 和使用性能的研究

[苏联] A. B. 波德杰 主編

馮紹周譯 刘騰校

国防工业出版社

061960
內容簡介

本文集詳細地闡述了在磨削金屬時對熱現象的研究結果。敘述了在侵透加熱和冷卻時對零件中殘余應力的計算方法。列舉了耐熱合金和鈦合金疲勞試驗的結果，並介紹了用理論分析法和實驗法直接測量加工後零件表面溫度和殘余應力的問題。理論分析從研究溫度場入手，實驗方法則利用電阻絲及其他相應的儀器。此外，還介紹了如何控制零件表面質量的方法。

本文集不僅可供工廠的工程師、技術員和科學研究部門的工作人員閱讀，同時對於有關的大專院校的師生也頗有裨益。

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ
ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ

под редакцией [Сов. А. В. Подзвеза
ОБОРОНГИЗ 1960

*

零件加工后物理机械性能和
使用性能的研究

馮紹周譯 劉騰校

*

國防工業出版社出版

北京市書刊出版業營業許可證出字第 074 號

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印裝

*

850×1168 1/32 印張 4 1/2 114 千字

1964年9月第一版 1964年9月第一次印刷 印數：0,001—5,700册

統一書號：15034·744 定價：(科八-1)0.95 元

目 录

磨削时被加工金屬中温度場的研究.....	5
磨削时零件內温度場的确定.....	42
在对衬套快速穿透加热和冷却时产生的热应力的計算.....	57
磨制鈦合金零件表面层残余应力的研究.....	74
用ВИУ-1 МАИ-ВИАМ設備在高頻載荷下对鈦合金和耐热合 金持久強度的研究	94
磨制零件残余应力的研究	115

78.21
305
2

零件加工后物理机械性能 和使用性能的研究

[苏联] A. B. 波德杰 主编

馮紹周譯 刘騰校



机械工业出版社

061960
內容簡介

本文集詳細地闡述了在磨削金屬時對熱現象的研究結果。敘述了在侵透加熱和冷卻時對零件中殘余應力的計算方法。列舉了耐熱合金和鈦合金疲勞試驗的結果，並介紹了用理論分析法和實驗法直接測量加工後零件表面溫度和殘余應力的問題。理論分析從研究溫度場入手，實驗方法則利用電阻絲及其他相應的儀器。此外，還介紹了如何控制零件表面質量的方法。

本文集不僅可供工廠的工程師、技術員和科學研究部門的工作人員閱讀，同時對於有關的大專院校的師生也頗有裨益。

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ
ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ

под редакцией [Сов. А. В. Подзевя

ОБОРОНГИЗ 1960

*

零件加工后物理机械性能和
使用性能的研究

馮紹周譯 劉騰校

*

國防工業出版社出版

北京市書刊出版業營業許可證出字第 074 號

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印裝

*

850×1168 1/32 印張 4 1/2 114 千字

1964年9月第一版 1964年9月第一次印刷 印數：0,001—5,700册

統一書號：15034·744 定價：(科八-1)0.95 元

目 录

磨削时被加工金屬中温度場的研究.....	5
磨削时零件內温度場的确定.....	42
在对衬套快速穿透加热和冷却时产生的热应力的計算.....	57
磨制鈦合金零件表面层残余应力的研究.....	74
用ВИУ-1 МАИ-ВИАМ设备在高頻載荷下对鈦合金和耐热合 金持久強度的研究	94
磨制零件残余应力的研究	115



磨削时被加工金屬中溫度場的研究

工程师 H. H. 諾維柯夫

在現代机械制造工艺中，影响产品使用性能的零件表面层质量及其加工精度，愈来愈具有重大的意义。

目前，磨削是为获得精确的零件表面而最广泛采用的精加工工序之一。在航空发动机制造中，由于在生产中引用了鎳基和鈦基合金及高級优质鋼，加工时难以使用刀具切削，因此，磨削就具有了特別重要的意义。

但是，在某些情况下，磨削会使表面层的质量发生重大地改变。这种现象的原因之一是磨削生热，因为消耗于磨削过程的功的主要部分均变成热。这部分热向零件内部傳播，沿截面急驟地改变零件溫度，因而在其表面层内会产生殘余应力和組織变化，甚至在許多情况下，还会改变零件的几何尺寸和破坏其加工精确度。要想研究上述现象，必須首先研究切削时在金屬内部发生的热过程。

为了正确地編制零件的机械加工工艺規程和选择最佳的切削用量，工艺人員必須对加工过程中，由于发热而在金屬中引起的量和质的变化，具有明确的概念。因此，建立切削过程热现象計算的科学基础，是现代机器制造工艺学的迫切任务之一。

鉴于切削过程的复杂性和多样性，显然，不可能仅通过任何一个研究者来同时解决与发热有关的全部問題。这个問題要求切削、物理、数学，以及热傳导等学科的为数众多的专家都作出努力。只有对各种热现象进行分別的研究，才能对它作更深入的探討。

首要任务是确定溫度的关系，因为在金屬切削时，对热效应的质和量的估計，不是根据零件的总热焓来确定的，而是根据加

11000009

工过程中引起我們关注的一段时间內被研究点（或区域）的溫度变化的特性。在这种情况下，溫度場的图形就是最重要的特性之一。利用它可以对加工过程中金屬内部的热傳导过程，获得一个几乎完整的概念，而且还能对下列問題給出答案：在零件中傳热的热流特性如何，沿零件深度各个点的溫度变化規律如何，在哪一点（或区域）上和什么时候将达到最高溫度，以及热源的能量有多大等。

此外，溫度場还可以作为由各种不同方法获得的热过程的相似准則。例如，在研究切削加工中金屬内部所发生的热现象时，在許多情况下，总是希望抛开机械加工过程中的其他因素的影响（如切削力、摩擦力、系統的剛性等）。为此目的，利用高频电流、电阻絲或其他方法将金屬加热，以模拟金屬内部的热状态。这时，可以根据溫度場相似原理，对被模拟的热过程和被研究的热过程的类似程度作出极准确的評价。为了作到这一点，还必须要有若干較簡單的計算方程式，以使用它們来迅速、而在实用上又足够准确地計算和比較几种被对比的热过程的溫度場。

鉴于在这方面所进行的工作还十分不够，特别是对于被磨削金屬溫度場的研究几乎沒有，故本文就平面磨削时被加工金屬內溫度場的研究結果作了闡述。研究金屬加工时的溫度場的課題，和其他任何实用性质的課題一样，可以用两种方法解决：1) 实验方法，即选择一些經驗公式来确定溫度的关系；2) 解析計算法，用以解决給定加工过程的热傳导問題。这时，全部近似值（这在用解析方法解决类似的实用課題时是許可的，因其只能获得近似值）都要仔細地用实验所得的結果加以鉴定。

純实验研究的严重缺点是它所获得的經驗关系，只适用于具体的、曾經做过試驗的工艺因素，因此概括性小。

解析—实验法的优点是有可能概括所获得的各种关系和研究結果。

对解决本課題（确定磨削金屬的溫度場）而言，最可取的研

究方法是解析—实验法。因为这项工作的最终目的是要求出简单易计算的溫度計算关系。它们可以向从事相近的机器制造工艺问题（残余应力、相和组织的变化、加工硬化、烧伤、裂纹和翘曲等）的研究人员提供有关金属在磨削时受热状态的科学的、有根据的数据。

研究工作的步骤如下：

1. 拟定解析确定溫度場的方法，即拟定磨削过程中每一时刻被加工金属的任意点（或区域）上的溫度計算方法。
2. 寻求用实验确定溫度場的方法，用以检验由解析計算法所求得的结果。
3. 对根据不同磨削工艺参数所获得的被加工金属内溫度場的实验数据，进行综合概括。

溫度場的解析研究

溫度場研究方法的一般原理

为了解析确定溫度关系，必须找出溫度在載热体内的空间一时间分布情况。换言之，必须求出用数学公式表示的，作为座标和时间函数的溫度場，即：

$$T = f(x, y, z, \tau), \quad (1)$$

式中 T ——某一点的溫度；
 x, y, z ——物体某一点的座标；
 τ ——時間。

表达热现象的物理量和物体某一点座标位置間的数学关系，通常用数学物理的微分或积分式来表示，以说明每一瞬間在溫度場任意点上所发生的物理现象的过程。金属的加热过程与热傳导过程有极密切的关系，并可以在解出表达溫度場各参数間相互关系的经典的热傳导微分方程式（傅利叶方程式）的基础上，对加热过程进行解析研究：

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

式中 $a = \lambda/c\gamma$ ——导温系数;

λ ——导热系数;

c ——比热;

γ ——比重。

同时，方程式 (2) 中的所有热物理参数，对工程计算足够的准确度来说，可以认为，在研究的范围内，与温度无关，因此避免了一般形式微分方程式的非线性性质，即：

$$c(T)\gamma(T)\frac{\partial T(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T)\frac{\partial T(r,\tau)}{\partial r} \right], \quad (3)$$

式中 r ——半径向量。

上述方程式，至今尚没有适于实际使用的解法。

解方程式 (2)，就是要求出每一瞬间和被研究物体任意点上的温度分布。这个解法是利用数学物理方法，根据选定的发热状态，通过选择热传导方程解的途径来实现的。上述发热状态应能够满足该加工过程所规定的边缘和边界条件。

虽然，对热传导理论 [1] 和 [2] 已作了充分的数学研究，其原理早在 200 年前就为法国科学家傅利叶所建立，但是，除了最简单的课题外，大多数课题的严格求解都是非常复杂的，并且需要数学家们作出极大的努力。

在最近几年，苏联科学院通讯院士 H. H. 雷卡林研究出了一种以热源的方法为基础的、极有普遍性的对热课题求解的方法 [3]。这个方法的实质是：以分布在时间和空间内的单元（点、线、平面）热源所形成的很多过程的当量总和，代替被研究的热传播过程。

在三度无限大物体内，单元点源的作用可用格林函数表示如下：

$$T(R, \tau) = \frac{q}{c\gamma(4\pi a\tau)^{3/2}} e^{-\frac{R^2}{4a\tau}}, \quad (4)$$

式中 R ——半徑向量;
 q ——热源能量。

此方程是一般热传导微分方程式的特解。所有綫源和面源的其他解，都可以通过求此方程式的总和而获得。

在焊接领域中，利用热源的方法分析热现象，已经解决了这一领域中大部分急待解决的课题。而近年来这种方法在其他领域内也解决了许多问题。解析算法既灵活又简便，而且具有广泛的可能性，因此这就引起人们一种想法，利用它分析磨削时金属内部的热现象。

磨削过程的分析和选择计算发热状态的根据

下面我们观察一下，在笛卡尔坐标系内的平面磨削的运动示意图（图1）。零件沿 z 轴方向以速度 v_n 作匀速往复运动。金属磨削到规定深度 t (y 轴)，

磨削速度等于砂轮的圆周速度和零件往复运动速度的代数和，即 $v_{kp} \pm v_n$ 。为了磨削零件上新的一层金属，机床台面在完成每一双行程或单行程后，都要沿 x 轴方向作横向移动，其进给量为

s_{no} 。

用磨料工具切削金属的过程具有下列特点[4]: 1)

砂轮没有连续的切削刃; 2) 砂轮颗粒的几何形状不正规，而且排列次序零乱; 3) 在切入金属之前，砂轮颗粒和金属之间具有强烈的滑动; 4) 砂轮一个颗粒几乎是一瞬间的切削过程。因此，对磨

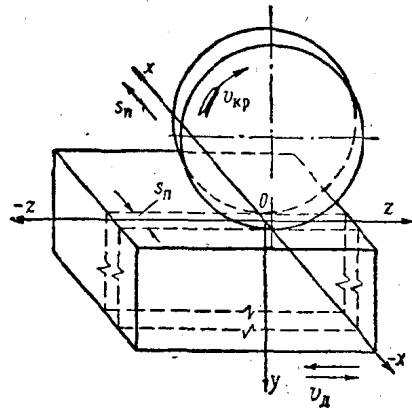


图1 平面磨削时的坐标轴位置示意图。

● 鉴于式中 v_n 项的值相对的小，故在计算中略而不计。

削过程中的任何一个被研究的值，都应当作为許多变数（过程的运动、切削规范、砂輪和被加工金屬的特性，和其他因素等）的函数来研究。

在具有如此之多的变量参数的情况下，尽管对磨削过程的理論和实验研究給以相当大的注意，要得出热傳导基本方程式（2）的直接解法，仍是一个很难完成的解析課題。

可以通过以下两个途徑利用簡化解析題解，解决类似的实用性质的課題：

1. 对所发生現象的真实特性作精确的統計，并通过它得出一个十分近似的解析題解。利用此方法可以得出更准确的结果，但所得数据的概括性小。

2. 对所发生現象的特性作出近似估計，并在拟定課題时作各种簡化，但是可能得出更精确的解析題解。这个方法可以概括所得的结果，并有可能在設計不太复杂的計算装置的条件，考虑到实验材料。

对所提出的課題作解析解法时，第二种方法最为适用。

因此，把磨削过程当作变相的薄层高速切削[4]来研究，将不致有太大出入。在这种情况下，砂輪与零件接触区的大量的高温热源，可以作为高度集中的单一热源来研究。这时，热傳播过程的特点如下：1) 发生的热均集中在零件表面上的小单元上（与零件尺寸相比），即集中在砂輪与零件接触区域内；2) 热源連續地起作用，并在零件表面上以等速移动。

由于这些特点，可以选择热源的方法，来解析研究被磨削金屬内部的温度关系。在热傳导理論中，这种方法用来便于解答与叠加原理和随热源移动而移动的座标系相结合的問題。这样，如果热源集中于极小的单元上，并且可以簡化认为是点的、綫的或面的，而热傳播区域則是无限大的或半无限大（一端是有限的）的物体，在此物体的整个体积內，热傳播过程完全服从于傅利叶方程式，那么采用热源的方法来处理热傳导課題，就可获得形式

最简单的解析题解。类似简化的可能性只有在确定热源的大小，及将其与载热体的大小进行比较时，才可以看到。

热源的形状和大小是由砂轮和零件接触表面的大小规定的。它们取决于机床台面横向进给量 s_n 和接触弧长 L_k 的比例(图2)。横向进给量的大小是根据给定的加工工艺条件，以砂轮宽度的百分率来表示，按手册选取。一般进给量要比由解析计算[4]得出的接触弧长大许多倍。接触弧以曲线 OB 表示，其长度可按下式计算：

$$L_{Tp} = \left(1 \pm \frac{v_n}{60v_{kp}} \right) \sqrt{Dt}, \quad (5)$$

式中 D ——砂轮直径；

t ——切削深度。

由于因数 $\frac{v_n}{60v_{kp}}$ 之值甚小，可以忽略不计[⊙]，因此计算公式可以简化为：

$$L_k = \sqrt{Dt}, \quad (6)$$

即接触弧长大致上可以认为等于 OA 弧长。

由于机床—夹具—工具—零件系统存在着弹性，而它们取决于加工规范。故热源的尺寸大大缩小了，这一点从图3中可以清楚地看出。图中的上半部是解析计算的结果；而下半部是在试验室和工厂条件下，对各种合金大量的磨削工序所作的实验研究结果。这样说明为了简化类似的解析题

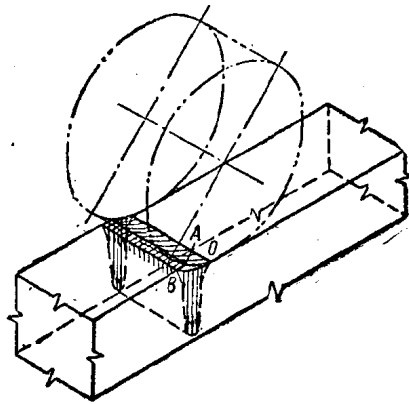


图2 接触区内的热流示意图。

⊙ 原书认为因数 $\left(1 \pm \frac{v_n}{60v_{kp}} \right)$ 之值很小，可忽略不计，显然有误。——校者

解，接触区平均尺寸的极限比例，可以用强度相同，但几何形状更为简单的当量热源，来代替实际热源的作用。在这些解法中，可以用位于砂輪和零件接触区中的綫热源（在精加工工序中甚至用点热源）作为这种单元热源。

在工厂条件下，工艺人員經常必須对厚壁零件(或实心零件)作溫度关系的解析計算，这样有可能在首次近似中把載热体視为半无限大体。这样的簡化是允許的，因为根据已知热源参数比例得知，与零件尺寸相比，热源尺寸相当小；而与热源所占的区域相比，距观察点的距离又相当大。早期的研究結果表明，对壁厚

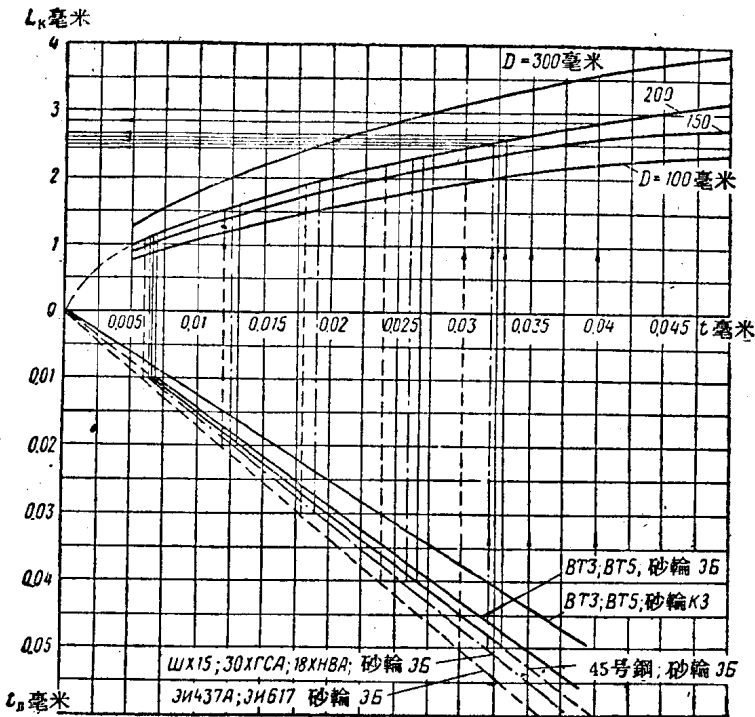


图 3 在下列切削规范下，接触弧实际长度 L_k ，随磨削深度 t 和砂輪直径 D 不同而变化的曲线：

$v_{kp}=30$ 米/秒； $v_d=7.2$ 米/分； $s_n=10$ 毫米/每行程（ t_n —按分度盘确定的切削深度）。箭头表示求解路线。

不小于 3 ~ 5 毫米的零件來說，这样的假設是允許的。

进一步簡化这类課題的解析題解，就是要選擇計算发热状态图。在平面磨削时（考虑到整个过程运动的复杂性），選擇計算图要求十分严格的态度。

为了使在每一具体情况下的給定課題，都可以選擇一个既能簡化計算、又能最正确地找出加工过程各主要参数影响的发热状态图，必須在載热体上划分和分类表明其热效应結果相同的区域。

在接触区内，瞬时溫度可达到最大的值（为 A_{c_3} 点級，和更高级[4]，[7]），但它产生在被磨削金屬的极薄的表面层中。在此溫度作用下，某些金屬会产生微觀組織裂紋、烧伤，甚至会使表面层发生相位組織变化。

在变形区内（一般來說，此区域与热源的大小成正比），溫度可以用所謂的热循环来衡量。热循环的特点是，溫度突然上升到頂点，随之几乎立刻下降到最低点，这样就造成很大的溫度梯度，并在表面层中产生殘余应力，特别是对于导热系数低的合金來說，情况更为显著。

在磨削过程中，在零件体内由于热量以极高的速度放出的結果，故保持平均溫度。此溫度导致零件加工发生誤差，特别是对于用导热系数和綫膨脹系数高的合金制成的零件，誤差就更大。

所以，在一种情况下，在与热源尺寸大小成正比的区域内所产生的热現象，主要取决于一次热循环所起的作用。在另一种情况下，当产生热現象的区域位于远远超过热源尺寸的距离以外时，这里的热現象应作为多次热循环的作用来研究。

对第一种情况而言，鉴于距研究点（或区域）的距离比較地小，而且热源是綫形的，所以，計算用的发热状态图可以看作是沿半无限大平板（犹如从載热体中分出的）端面移动的活动綫源的作用形式。这种发热状态图，在本文中被称为一次切削，利用它有可能制定出一种确定切削区内溫度場的解析方法，并且能算出接触区内的溫度，此溫度在研究加工质量时是必須知道的。