

〔苏〕 О.И.沙布里恩 著

机 器 零 件
变 热 处 理
工 艺 及 设 备

机 械 工 业 出 版 社

本书论述了机器零件形变热处理强化工艺的基本原理，并着重阐述了机器零件最佳定向强化与工艺条件之间的关系。还对机器的不同零件进行形变热处理的工艺过程及设备做了详细地描述。

本书可供机器制造厂工作的工程技术人员使用，亦可供有关专业的大专院校师生参考。

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ

Термомеханической
Обработки

Деталей Машин

О. И. Шаврин

МОСКВА «МАШИНОСТРОЕНИЕ»

1983

机器零件形变热处理工艺及设备

〔苏〕О. И. 沙布里恩 著

何世禹 刘北兴 于少奎 译

冯晓曾 校

责任编辑：韩会民 责任校对：孙志筠

封面设计：田淑文 版式设计：乔玲

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32·印张 5 3/8·字数 115 千字

1988年11月北京第一版·1988年11月北京第一次印刷

印数 0,001— ·定价：2.30 元

ISBN 7-111-00658-5/TG·163

译 者 的 话

形变热处理工艺是近代问世的先进热处理强化的方法。它能使材料在不降低塑性的情况下，提高材料的断裂韧性，疲劳断裂抗力，接触疲劳抗力，磨损抗力及静载下的屈服强度和抗拉强度。同时，巧妙地应用形变热处理工艺后还能缩短工序，提高生产效率及具有重大的经济价值。因此，目前在国内外正进行大量的研究工作。

本书作者O.И.沙布里恩收集了近二十年的最新研究成果，对机器零件形变热处理强化工艺的物理基础，定向形变热处理强化工艺与使用条件下的相互关系，形变热处理对常用的45，40Cr，30CrMnSiA，60Si2A，9Cr，GCr15等钢的组织与性能的影响做了系统地、详细地介绍。更为可贵的还对冷轧辊，弹簧、高精度的棒材，渗碳零件以及长杆等零件如何进行形变热处理的工艺过程及设备也做了全面的阐述，无疑，这些内容对推广和应用形变热处理工艺会有重要的指导意义。译本书的目的就在于期望形变热处理工艺早日在我国开花结果。

本书由何世禹副教授、刘北兴讲师、于少奎工程师翻译。

全书由冯晓曾教授审校。

由于译者水平有限，译文中缺点及错误在所难免，敬请读者指正。

译者

1987年1月12日 于哈尔滨

前 言

机器的可靠性取决于每一个零件的质量和性能，也就是它的工作能力。提高机器零件工作能力是一个综合性问题，其中包括有最佳设计以及采用使每个零件保证有最高使用性能的工艺方法。

在“1981~1985年和直到1990年前苏联经济和社会发展基本方针”中指出，为了减少机器和装备的重量，提高它们的工作能力，用热处理方法强化的轧制产品产量将会大幅度增加，高效能强化金属和合金的方法将会得到研究和应用。

表面塑性变形 (ППД) 的强化方法是提高机器寿命广泛使用的工艺方法之一。由于表面塑性变形的结果，大大的提高了零件的疲劳抗力，减少了各种表面应力集中的有害作用。但所使用的这种方法，并没有挖掘出整个材料的强度潜力。在В.Д.沙道夫斯基 (Садовский)，М.Л.别尔什金 (Бернштейн)，Д.А.普洛科申 (Прокошкин)，А.Г.拉赫施坦特 (Рахштам)，А.П.古里亚也夫 (Гуляев)，К.Ф.斯大洛杜包夫 (Смародубов)，В.С.依万诺娃 (Ивановой)，Л.И.屠申斯基 (Тущинский)，О.Н.拉曼尼夫 (Романив) 以及其他学者的大量有成效的研究工作中，制定了把热-力作用于金属的综合强化方法，也就是形变热处理 (ТМО)，机械-热处理 (МТО)，这些方法使金属具有最佳使用状态的组织和性能。钢经过形变热处理后，可提高它的断裂韧性，疲劳断裂抗力，接触疲劳和磨损抗力，同时还可提高静载条件下的屈服强度和抗拉强度。

无论是工艺的可行性，还是对金属综合性能的影响，高温形变热处理（BTMO）是各种形变热处理方法中最有前途的一种。但是，轧制形变热处理只适用于制造不需要很大切削加工量的零件。而利用高温形变热处理可改善结构钢的强度，提高零件的使用寿命，同时还可解决毛坯成型问题，使它获得所需要的尺寸。这样一来，为了降低金属消耗，增加机器的承载能力，除可采用改变截面上化学成分（如表面涂层或表面化学热处理）强化零件的方法外，也可对毛坯或机器零件进行高温形变热处理来实现。但是，利用高温形变热处理的强化效果来提高机器零件的使用性能，必须解决一系列工艺上的复杂问题，它涉及到高温形变热处理与获得优质、高可靠性零件的成型工艺之间的相互关系。高温形变热处理强化的方向性问题的研究也属于这一任务之中，它是高强度状态钢的强化理论中的组成部分。在高温形变热处理时，如果不能从理论上了解零件最佳各向异性的形成条件，就不可能预测和获得在承受最大载荷的区域中机器零件所必须具有的强度水平，同时也不可能提出形变热处理时，进行整体变形强化或表面变形强化所必须的工艺装备的设计原则。

本书主要解决下列问题：

1. 探讨应用于圆柱形机械零件的高温形变热处理方式及工艺方法，并讨论在该条件下强化的物理原理，揭示出在不同的变形方式中强化过程的规律性。

2. 研究工艺和组织因素对零件强化质量，强化的各向异性的影响。同时研究在重复加热及力的作用后，提高静载及循环加载时结构强度水平的遗传性。

- 3 研究毛坯及零件的高温形变热处理综合工艺过程和设备。

目 录

前 言

第一章 机器零件形变热处理强化工艺的

物理基础 1

第一节 形变热处理强化的各向异性 1

第二节 机器零件形变热处理的强化方法 10

第二章 定向形变热处理强化工艺对钢的

组织与性能的影响 19

第一节 用滚压及拉拔对60Si2A钢进行高温形变

热处理后的性能 21

第二节 用扭转和滚压及螺旋拉伸对钢进行高温

形变热处理后的性能 30

第三节 用滚压变形对钢进行高温形变热处理后

钢的组织 37

第四节 形变热处理后钢的各向异性的本质 62

第五节 高温形变热处理对承受周期性载荷钢的

性能影响 78

第六节 高温形变热处理工艺对接触疲劳抗力的

影响 105

第三章 机器零件形变热处理强化的工艺

及设备 111

第一节 冷轧辊的形变热处理 111

第二节 弹簧的形变热处理 116

第三节 高精度棒材的形变热处理 131

第四节	渗碳零件的形变热处理	146
第五节	长杆零件高温形变热处理的设备	149
第六节	用冲击振动变形方法对具有复杂外形零件进行高温形变热处理的设备	151
参考文献		158

第一章 机器零件形变热处理 强化工艺的物理基础

第一节 形变热处理强化的各向异性

高温形变强化的效果取决于下列的工艺参数：奥氏体化温度及加热速度，塑性变形的温度及形变量，形变后的冷却特性（形变后保持时间及冷却速度），回火温度。

上述列举工艺参数的各种配合可形成多种形变热处理工艺方案。在文献〔3〕的工作中对形变热处理进行了分类。根据形变热处理的形变温度的不同，可分为高温形变热处理（BTMO），低温形变热处理（HTMO）和预形变热处理（ΠTMO）。高温形变热处理的形变温度高于再结晶温度，而低温形变热处理的温度低于再结晶温度，但高于马氏体转变的开始温度。预形变热处理是在最终热处理之前的常温下进行的。

在高温形变热处理和低温形变热处理时，在变形金属的冷却过程中必须避免中间转变的发生。

从对钢及合金综合性能的影响和实际实现的可能性来看，各种形变热处理方案是不同的。譬如，低温形变热处理虽然能使钢获得很高的性能，但由于在相当低的温度下，需要进行很大程度的变形（90%），因而在实际生产中是很难实现的。虽然高温形变热处理强化效果较小，但它在实际生产中易于实现。

在生产中实现高温形变热处理可有两种途径。

1. 高温形变热处理可在冶金工厂生产半成品阶段来进行。此途径是在冶金厂生产工艺过程中预先进行高温形变热处理的，也就是在轧制板材，棒材，拉拔丝，型材等过程中来实现。实际上这些半成品可广泛用于制造不需要进行大量机械加工的形状简单的零件上。

2. 在机器零件和毛坯的制造过程中用高温形变热处理来代替常规的热处理。采用这条途径需要深入研究形变热处理的方案与方法，使它适用于不同种类的机器零件。可采用不同的变形方案来实现高温形变热处理。

在许多不同的研究工作中反复分析了形变热处理的工艺参数对钢的强度性质的影响^[8]。

高温形变热处理后，钢和合金性能水平的提高不仅取决于形变热处理过程中的工艺参数，而且还取决于它们的试验条件。正如由一系列的工作中所证实：断裂应力的增长取决于试验条件的苛刻程度及试验温度。还揭示了钢的性能的各向异性，它必然对强化方法的选择有影响。

但是，文献资料主要涉及了低温形变热处理后钢的各向异性。在文献[63]中，研究了含碳为0.47~0.58%结构钢，采用轧制变形进行低温形变热处理后其组织与性能的各向异性。研究结果表明，钢在垂直于轧制方向上的强度明显高于平行轧制方向的强度，而塑性低50~100%。

在文献[33]中也得到了类似的结果。在垂直于轧制方向上切下的横向试样的强度特性（抗拉强度和屈服强度）比沿着轧制方向切下的纵向试样高很多，在所有温度回火后其延伸率都低。经200和300℃回火后可得到最高抗拉强度和屈服强度，在这种情况下，垂直于轧制方向和平行于轧制方向上

的强度差是300~500MPa。

在试样的三个互相垂直的平面上测量了(110)和(220)衍射线的物理宽化值^[30]，它可以显示出马氏体晶体的精细结构，这是因为不同晶面反射的具有相同指数的干涉线条相互间差别很大。

Л.Я.康切尔(Контер)研究了滚珠轴承钢经高温形变热处理后机械性能的各向异性^[61]。对低温回火试样进行试验时，它们显示了一般热变形钢所具有的各向异性。当实际作用力的方向与流线的方向一致时(试样分层)其弯曲强度比垂直于流线方向低(切断流线的方向)。

И.Н.德尔尤柯娃(Дрюкова)也得到了类似的结果^[30]。在这些工作中同样确定，经低温形变热处理(HTMO)和高温形变热处理(BTMO)(变形度为30%的高温形变热处理+变形度为35%的低温形变热处理)之后钢的最低强度出现在载荷作用下试样分层处。在轧制的40Cr2MnNi2MoSi和42Cr2MnWSi钢的板材上，沿着三个方向加工成试样，也就是沿纵向，横向以及垂直轧板方向取样，然后进行压缩试验。

О.Н.拉曼尼夫(Романив)研究了60Si2A和T8A钢经高温扭转形变热处理后的机械性能各向异性。在扭转试验时通过改变扭转方向来保证纵向加载或横向加载(相对于流线方向)。对于纵向加载是高温形变热处理扭转方向与试验时的方向一致，而横向加载则相反。试验结果指出，在纵向加载时，当相对切变量 γ (高温形变热处理的变形程度)增大到0.8前，可看到60Si2A钢的强度和塑性增高，在横向加载时强度和塑性急剧减少，当高温形变热处理的变形量较小时(γ 为0.8)最为明显。

T8A钢经高温形变热处理后在纵向加载时的强度显著增

高(当 $\gamma=1.5$, 回火温度 $t=125^{\circ}\text{C}$ 时 淬火后的切变强度 τ 为 1960 MPa , 高温形变热处理后的切变强度 τ 为 2700 MPa), 塑性增加 5 倍。

横向加载时试样的强度与塑性比纵向加载时低, 但是, 在整个被研究的变形范围内, 这些性能指标均高于常规淬火的试样。

在纵向和横向加载的条件下, 表现出的性能差异与常规热加工变形后所表现的各向异性也有联系。在扭转试验时按相反方向加载会导致沿着螺旋线出现早期断裂即沿扭转强化产生的流线方向断裂。随着回火温度的升高断裂特征发生变化由脆性拉断转变为韧性切断, 同时正向与反向加载(扭转)时的性能差异也减少了。

钢在正向和反向扭转时所表现的各向异性, 在钢试样作非对称循环加载的循环扭转时也可显示出来。在这种情况下, 与高温扭转形变热处理方向相吻合的非对称循环扭转显示了高的疲劳极限, 然而常规淬火和高温形变热处理(扭转变形)试样在对称循环加载时的疲劳极限是相同的。

由上述研究资料可得到如下结论, 形变热处理后的金属是各向异性的, 它的各向异性类似于常规热变形金属的各向异性, 形变热处理本身的影响表现在增高了强度的绝对值。但是, 这个结论只是一方面, 因为确定各向异性的传统方法是按流线的横向或纵向进行试验。很难预料高温形变热处理以及低温形变热处理后金属的宏观组织(流线方向)发生明显变化。尤其是在绝大多数的研究工作中, 形变热处理和先前加工方向是一致的, 即使方向不同, 但也不能改变流线的方向(在形变热处理时板的轧制和拉伸)。在文献[71]中也指出, 在高温形变热处理后钢的性能的各向异性, 在很大的

程度上取决于在前面的压力加工时所造成的原始各向异性。

用纵向和横向试样研究钢的性能的各向异性其结果表明，在金属基体与杂质交界处的强度较低，但是这不可能说明在形变热处理时钢的性能变化过程的各种特点。流线的方向并不完全决定形变热处理后所达到的性能水平。在文献〔4〕中指出，尽管轧制与挤压流线方向相同，但有种钢经高温形变热处理后获得不同的强化效果。

阐述流线方向对钢的性能各向异性影响的理论是立足于钢中的内部缺陷在断裂过程中起的主要作用，例如钢中的孔洞或夹杂物，在大量塑性变形后具有方向性。在这种情况下可以假定在机械性能试验和使用中承受载荷的材料行为决定于杂质周围的应力集中和应变集中，以及取决于这些质点破裂或与基体分离的可能性。

但是，这个理论不能说明所有情况下经过预先加工和形变热处理后钢的各向异性，因为钢的纤维状组织影响的机理决定于断裂形式（纤维状组织不可能对所有的断裂产生影响，如晶间断裂，韧性剪切断裂等等）。钢的断裂形态由钢的组织特征所决定的。

上述所列举的文献中得到的试验结果，一般仅是宏观组织因素对形变热处理后钢的强度各向异性影响的个别情况，而不能确定形变热处理后钢的性能变化的一般规律。仅可证实经形变热处理强化后钢的性能取决于在试验时加载的方向和变形方法。但是变形方法与钢的性能的关系仅是发生在金属内部的复杂的塑性变形过程的表面现象而已。

现有的资料指出，不注意钢的各向异性和高温形变强化的方向性，机器零件就不可能获得最佳的形变热处理工艺。

象其它加工一样，在形变热处理时，钢出现各向异性的

原因，与塑性变形有关，大多数研究者认为是由组织组成物和第一类内应力按晶体学，几何学定向分布的结果〔58〕〔62〕。但是，这种看法没有考虑到形变热处理过程的特点，即强化钢的亚结构特征，由于温度和力的综合作用而形成的多边化亚结构晶界网，成为阻碍位错运动的主要原因。这些多边化亚结构晶界的出现是晶粒内部多余位错重新排列的结果，在这些亚晶界所包围的极微小体积中其晶格的位相是一样的。在钢中形成亚结构后，晶界和第二相质点或非金属夹杂物与基体交界面对断裂过程的影响应当减少。

在如果不考虑亚结构特点时，就不能对钢的性能的各向异性和形变热处理后钢的强化的方向性进行评价。这就要改变过去的一个概念，这就是为了使零件具有最佳的使用性能而要控制钢的各向异性。

在研究发育完善的亚结构的钢的各向异性时，可以将亚结构取向和机械织构取向的影响分开。问题在于，如果在大变形量时，金属的流动方向规定了机械织构的方向，则根据斯密特（Шмидта）定律，与滑移系有关的亚结构或单个位错的方向性将由最大切应力的方向性所规定，当变形量较小时，切应力不会产生和改变机械织构的方向性。在这种情况下，必须考虑到由上述因素在钢中产生了亚结构，这就不能排除亚结构的方向性对钢的各向异性的影响。可以把各向异性分成两种类型——塑性变形抗力的各向异性和脆性断裂抗力的各向异性。对于后一种各向异性机械织构所起的作用是不用怀疑的。而在塑性变形开始阶段，亚结构方向性所起的作用应该是很大的。

形变热处理强化方向性的理论可建立在这样的假说基础上，在高温下变形时，在最大切应力作用的方向上发生滑移

和淬火后固定了大量的位错使这部分晶体系统发生了强化。在随后的机械性能试验时，材料的塑性变形抗力和断裂抗力是由强化了晶体系统方向性的程度和最大作用应力所决定的。

在此假说的基础上，如果能证实，随着最大切应力作用方向的变化，晶体定向滑移所造成的强化被保存在材料中，就可以建立高温形变热处理后钢获得显微各向异性的理论。

A.Г.腊赫施坦特 (Рахштадт) 及他的同事在研究工作中指出^[67, 68]：在冷变形情况下，不同方向塑性变形可能减少各向异性。

在研究轧制变形后的铝青铜 (7.04% Al) 微塑性变形抗力 (弹性极限) 时指出，弹性极限与轧制方向有关。在这种情况下，纵向轧制压下量为50%时，其弹性极限的各向异性的特征取决于最终塑性变形的压缩程度和方向。在垂直于第一次轧制方向进行第二次少量变形 (压下量为8%) 后，弹性极限的各向异性的特征发生明显的变化。弹性极限的方向性与试样切取方向之间的关系图似乎转动了90°角。轧制方向的影响主要表现在塑性变形抗力指标上 (其中包括抗拉强度)。

由于附加了横向轧制，使材料机械性能各向异性特征发生了变化，这就有可能更多的利用材料。例如，青铜经第一次轧制以后 (纵向轧制)，在横向其弹性极限和抗拉强度最大，而在纵向韧性最大 (弯曲次数)。再经少量横向轧制以后，在纵向方向上的弹性极限和韧性均最大。

金属中的总应力大于其弹性极限后，将使它处于塑性变形状态，如果再向零件施加不同方向的载荷 (例如拉-压和不同方向的扭转)，也可能在高温形变热处理后获得各向同

性。这种情况仅在每一个变形阶段都达到稳定的强化状态时才能实现。例如，在整个循环变形时，其变形温度，变形速度能保证不发生强烈的动态软化就能达到稳定的强化状态。

在常规的热压力加工时，由于发生再结晶就不可能看到变形的明显方向性和强化的积累以及组织的记忆性。在这种情况下，所形成的机械的和晶体的织构表征了塑性变形的最终结果，即金属的流动方向。在形变热处理过程中应抑制再结晶，并通过冷却来固定塑性变形后的显微组织。由此可以推测，高温形变热处理时，在不同的滑移系中将发生切变积累，这些滑移系的取向随切应力作用方向连续不断地变化而变化。

强化方向性的理论可以根据各种高温形变热处理方案的实验规律来确定。为了研究强化方向性现象，必须建立变形图，这种变形图能控制主应力的作用方向，并且能评定机械性能试验时的强化方向。

为了进行这样的研究，无论从重要性还是从用不同方法进行变形可能性来看，最适合的研究对象是圆柱形零件如轴、传动轴、管子等。也可以利用螺旋弹簧，这种弹簧是由棒材卷起来的，因为弹簧的性能在许多情况下取决于棒材和线材本身的各向异性。控制滑移方向性的基本因素是金属变形中心内的变形——外力图，以及变形工具的尺寸和形状。因为改变工具的尺寸和形状可保证得到规定的不均匀变形，也可以保证得到金属在任何方向上优先滑移。在多晶材料中相邻晶粒的位向差对有效滑移系和滑移方向有影响。但是，尽管有不同的晶粒位向，且变形时每一个晶粒中存在数个易滑移面和易滑移方向，仍可统计地区分出与最大切应力的方向一致的最优滑移方向上的滑移带^[26, 27, 28, 85]，在这种情况下

下，紧靠最大切应力作用方向其滑移面集中区存在某种交角〔26, 29〕。

在大多数变形方式下，当变形是由拉伸或压缩载荷引起时，所得到的滑移线原则上是按同一型式分布，在表面由于接触载荷的作用滑移线分布可能发生改变。在拉伸形成颈缩阶段，颈缩部分的滑移线方向与均匀拉长部分滑移线方向不同，它是上述规律中的例外。被变形的毛坯上附加扭矩可以使滑移方向发生重大变化。加上扭矩，例如，从拉-压向附加扭矩的拉-压过渡可以有规律的改变滑移方向。拉-压载荷与扭矩组合最简单的原则是能允许整体变形的金属获得不同的变形状态，由于应力状态和最大切应力方向的变化就不可避免地发生滑移面的更换，因此就出现了起作用的新滑移面和位错运动的新方向。柯埃诸莫 (КОЭНОМ) 对单晶铜的研究指出，由于位错滑移的结果使它在最大切应力作用的方向上有排列成队形的趋势。在依次拉伸与旋转试样而变换变形方向时，可显示出新滑移系统的萌生。

根据已有的试验资料可以证明，在拉伸或压缩时其滑移线将被集中在与滑移方向成 $\pm 10^\circ \sim 15^\circ$ 的区域中，其易滑移方向与作用力方向成 45° 倾角。在随后施加扭矩时，在最大切应力 $\tau_{m,x}$ 作用的方向即试样的横向和纵向，形成另外的滑移线。

在比较小的变形程度下，可以清楚地把滑移方向性的特征显示出来。随着滑移进展第一个滑移系内位错运动的阻力增加，从而为过渡到第二个滑移系创造了条件，横向滑移是靠螺旋位错向平行的滑移过渡进行的〔77〕。

由于塑性变形导致钢的强化，那么可以认为滑移方向的改变与定向强化的可能性直接相关。因此可以控制金属各向

异性的程度，在需要的方向上得到最高的塑性变形抗力和断裂抗力。

第二节 机器零件形变热处理的强化方法

为了实验证实已得到的理论和确定机器零件进行高温形变热处理的工艺过程及装备的原则，对经综合载荷（即拉伸-压缩-扭转）作用下变形的圆柱形零件的强化方向进行了研究。

当在研究拉伸、压缩载荷及扭矩三者之间不同组合下，使零件强化的变形方法时，应该保证不仅对载荷有必要的选择，而且还必须有一套基本变形机构。通过带孔的工具来拉拔零件和毛坯的变形过程就满足这个要求。同样由滚压轮、轧辊、锤头等组成的机构也可满足这一要求。

为了进行研究，制定了塑性变形的工艺方案，这种变形工艺方案是横向-螺旋轧制的一种，但是它们的动态特性有区别〔86，93，94，95，A.C.No322378CCCP〕。

变形工艺方案可分为下面三种类型：

1. 用滚压轮对毛坯的整体-表面进行滚压和拉拔。
2. 用滚压轮对毛坯的整体-表面进行滚压和螺旋拉伸。
3. 用滚压轮对毛坯的整体-表面进行滚压和具有支承滚压。

这三种类型的变形方案都有许多共同的特点：1）变形方案都是由从滚压轮而产生的横向压力和从拉拔毛坯的机构产生的纵向拉力决定的。2）通过控制滚压轮的张开角度来控制拉力。3）借助于零件的旋转和分段运动来不断地实现加工过程。

变形方案由毛坯的扭转特征来区分。此时可通过改变传