

# 热轧钢板的工艺润滑

〔苏联〕维·依·梅列什柯主编

太原钢铁公司编译

# 前 言

“热轧钢板的工艺润滑”一书为1982年苏联莫斯科冶金出版社出版。本书叙述了工艺润滑剂的分类及其使用系统，详细地介绍了工艺润滑剂的主要系统及配制方法、向轧辊喷射润滑剂、车间内全系统及单体装置调整及使用制度，还列出了热轧钢板采用工艺润滑剂的技术经济效果。

当前轧钢生产技术的根本问题之一是提高生产效率及改善产品质量。采用工艺润滑是完善和提高热轧钢材质量的有效方法。近年来，世界各国对采用润滑剂的热轧工艺广泛地进行了试验室及工业性研究，其中许多润滑剂已应用于生产。作者在叙述采用润滑剂的不同观点中，把综合选择润滑剂成份及供给系统作为提高使用润滑剂效果的决定性因素给予特别的注意。

热轧采用工艺润滑是一项新技术，在实践中还有不少问题尚待研究与开发。本书可供冶金企业、科研机构和设计院的工程技术人员以及大专院校师生参考。

参加本书翻译人员有：鞍山钢铁学院耿申初同志（第一至第四章）及太原钢铁公司的孙定荣、梁自聘、张宗轼同志（第五至第七章），总校审为张宗轼同志。科质处情报科组织了这本书的编译与出版工作。

太原钢铁公司

一九八四年二月

# 目 录

第一章	热轧钢的工艺润滑剂	( )
第二章	热轧钢时润滑剂的作用机理	( )
第三章	轧辊上喷涂工艺润滑剂的条件	( )
第四章	工艺润滑剂对钢板轧制过程效果的影响	( )
第五章	热轧工艺润滑系统	( )
第六章	关于热轧工艺润滑油的生态观点	( )
第七章	工艺润滑油的技术经济效果	( )

# 第一章 热轧钢的工艺润滑剂

## 1. 工艺润滑剂的使用特性

工艺润滑剂在热轧宽带钢及普通钢板轧机上得到最广泛的推广。虽然这些轧机在结构上极不相同，可是它们在润滑工艺和润滑剂供给系统的结构上有许多共同之处。在宽带钢轧机的粗轧机上如同在普通钢板轧机上一样，轧制的都是短而宽的轧件。这就使普通钢板轧机和宽带钢轧机上采用工艺润滑剂的问题可一并加以研究。与此同时这些轧机之间又有许多区别。例如，具有立辊的万能式粗轧机、和连续布置的精轧机，在许多情况下其粗轧机，能对宽带钢轧机采用润滑剂的轧制工艺在更广的方面加以研究。

轧辊特性，压下及张力制度，轧制温度制度，轧辊冷却系统特性，循环水系统的存在与否，工艺润滑剂的成份，工艺润滑剂的配制以及喷涂系统，应被认为是钢板和宽带钢轧机的参数和轧制工艺参数。这些参数对工艺润滑剂的效果影响特别大。

在通常的轧制情况下工艺润滑剂的作用及意义是众所周知的。工艺润滑剂作为强化生产和提高产品质量的一个因素已在钢板冷轧工艺中得到了广泛的应用。在冷轧机上，由于确认了工艺过程的良好情况和效果，工艺润滑剂早已成为轧制过程不可分割的部份。对冷轧工艺润滑剂的研究过程中已经制定了对润滑剂的一些基本要求和对它们进行选择、处理、使用的原则。当然这是从冷轧过程的具体条件出发才得出的，并且这些结论反映了在这些条件下使用润滑剂的规律性。

在冷轧加工高变形抗力金属时润滑剂的效果最为明显。而由于小的咬入角在无损伤轧制过程稳定性的条件下可把摩擦系数降低到最小值。轧件厚度的增加和变形区温度提高到180—200℃时差不多所有有机润滑剂的效果会明显降低。由于轧材表面的摩擦显著减少，工艺润滑剂对冷轧机轧辊寿命的提高没有明显影响。

热轧时应用润滑剂可能性效果的研究，由于受到冷轧时润滑剂作用规律性的影响，一定程度上使热轧工艺润滑剂研究工作的进展受到阻碍。因为这时完全没有考虑能够改变已知规律性的热轧过程条件的特性。

把现代宽带钢轧机轧制过程的工艺参数与冷轧参数相对照，可得出关于热轧时采用工艺润滑剂无效的结论。诚然，热轧钢的屈服限比冷轧钢的屈服限小 $2/3$ — $6/7$ ；热轧机上轧件的厚度在绝大多数情况下都大于2毫米，也就是说这样的厚度，在冷状态下应用润滑剂的效果也是很小的：润滑剂与变形区金属表面的接触温度大大超过了润滑剂润滑作用的临介温度；咬入角与摩擦角几乎相等。这种理论长期以来在采用工艺润滑剂的一般理论与实践占据着统治地位。

热轧时采用工艺润滑剂的尝试早已众所周知。开始作为润滑剂试验采用了不能燃烧的材料，如玻璃、石墨、矿物盐等等。但是由于遇到一些困难和轧件表面质量不好，这些润滑剂没有得到推广。由于冷轧高效率润滑剂的出现，使之重新提出了在较高水平及

较广范围使用热轧工艺润滑剂的问题。

在我国采用工艺润滑剂无论在理论方面，还是在实践方面发生较大变化还是在六十年代后半期，那时第聂伯尔彼得洛夫斯克冶金学院及乌克兰金属科学研究所的研究工作者在工业条件下用有机工艺润滑剂实现了型钢的轧制工艺。当时采用的就是许多年在冷轧机上所用的润滑剂。那时在外国的轧机上亦有采用热轧工艺润滑剂的趋向。

轧制金属与轧辊表面接触区中的高温是热轧的基本特点。应当特别指出：这种特征影响的主要不是润滑剂本身的性质，而是影响到决定应用润滑剂效果的轧制过程的其它工艺参数。许多对热轧时润滑剂效果的研究工作者首先注意到轧辊磨损的实际降低。宽带钢生产是属于对轧制产品的表面质量有特高要求的过程。钢板表面系用轧辊轧制而成，正因为如此，采用工艺润滑剂的合理性首先取决于润滑剂能够减少轧辊磨损和改善轧件表面质量的能力。

在热轧宽带钢轧机上产品本身的成本中，轧辊的成本占很大部份，而轧辊的消耗在一吨产品中占1~2公斤。现代宽带钢热轧机的精轧机组仅仅轧辊一项每年就要花费1.5—2百万卢布。

与摩擦密切相关的因素直接影响到轧辊的寿命和产品质量。热轧时由于磨损而使辊型发生变化并使轧辊表面质量变坏从而破坏了轧辊的正常工作。在工作辊同轧件和不传动的支持辊的相互作用时工作辊表面被磨坏，这是由于发生了支持辊和工作辊的相对滑动而造成的。

金属对轧辊的总压力和单位压力，轧辊材质，轧件钢号，轧制速度，轧辊表面的加工精度和轧辊硬度等许多因素对轧辊表面的磨损量有影响。对钢板轧机最不利的影响是沿轧辊辊身磨损不均匀。轧辊不均匀磨损的特征与轧制钢板的宽度和轧辊断面形状有关。

相对磨损的外表特征亦就是轧制金属质点粘在工作辊表面上的过程，对轧辊表面状态有很大的影响。粘附的可能性与轧制材料的性质有关。对粘附较严重的有不锈钢。轧制沸腾钢时轧辊磨损量的提高同样是由于这个现象。

采用润滑剂使轧辊寿命提高的原因有三个：减少磨损，降低轧辊负荷，防止金属粘附在轧辊上。热轧时大部份接触弧上发生金属与轧辊表面的相对滑动。轧件愈薄，沿接触弧的滑动愈大。轧辊表面的磨损量很大程度上是磨擦过程的函数，而这个过程首先与接触的表面状态有关。轧辊与金属接触面的高温使表面层急剧活化，降低了已经破坏了的表面层的抗力，滑动时促进了金属质点的脱离。用工艺润滑剂使接触表面分开是直接减少机械磨损的方法。油膜的存在改善了滑动条件，减少了磨擦系数，因而减少轧辊与金属间的磨损。

用大压下量轧制时，例如在宽带钢轧机精轧机组的第一个轧机中，轧辊与轧件的接触面积较大，相互间接触很紧密，因此接触压力很大。在这些条件下，由于较低的轧制速度使炽热的轧件加热轧辊，并使轧辊表面温度较高。热轧时轧辊的磨损量比冷轧辊的磨损量高九倍，这在很大程度上取决于上面所指出现象。用工艺润滑剂轧制时，轧辊上形成一层油膜，使变形区中从轧件传给轧辊的热量受到阻碍，防止了轧辊炽热。在充分有效的润滑剂条件下，精轧机上通常不存在轧辊炽热。

在高接触压力下，由于轧辊表面的显微不均匀性而产生金属质点的移动现象，内部不氧化的金属质点转到表面的现象和金属质点焊合在轧辊表面的现象是金属质点粘结在轧辊上现象的基础。轧辊表面这样的破坏导致了轧件表面的破坏和轧辊的强烈磨损。工艺润滑剂是一种与粘结现象作斗争非常有效的介质，它的采用经常能完全消除这种缺陷。

在谈到高温对润滑剂的性质和行为影响的估计时，应该注意，为了改变反映润滑剂工艺性质基本原理的润滑剂的物理——化学性质，必须要有较长时间的温度作用。对于具有高于500—700℃熔点的润滑剂，轧制温度的影响是很小的，尽管润滑剂的性质发生一定的变化。

高温对矿物及油脂型有机润滑剂的影响是很大的。当没有空气进入的条件下加热到高温时，这些润滑剂就能蒸发和分解，这时分解出炽热的煤气和含有超过95% C的焦炭。在与润滑剂成份一起的自由空气中进行加热时，则发生一系列的连续变化，这种变化先由碳氢化合物氧化，随后又分解，蒸发和部份焦炭化。在充分的氧化条件下，金属表面上发生改变润滑剂成份的反应，从而减少了形成焦炭的数量。润滑剂的结焦能力是一种本质特征，并且确定于焦炭的数量，亦就是在高温没有空气进入的条件下，燃烧过油中的焦炭百分比数。

润滑剂能保持在轧辊上甚至在通过变形区的高温的金属上，这一点已被引证的研究所证明。直到形成焦炭以前所形成的新的有机化合物对润滑均被认为是有益的。高温对润滑剂的作用可能对金属表面的质量、工作场所的卫生状况，从残余的润滑剂中净化废水的可能性有较坏的影响，而直接对润滑和抗磨效果这种高温作用并不像以前予想的那么大。与此同时高温对润滑剂性能变化的影响需要进一步仔细研究。

热金属有较低的机械性能而具有较高的摩擦系数这是热轧工艺的第二个特征，摩擦系数值证明需要化费极大的功以克服摩擦力。从这个观点出发，利用润滑剂降低摩擦是减少能耗的有效方法。它可减少金属对轧辊的压力同时可提高轴承和轧辊的使用寿命，也有利于获得更薄的产品。

减少热轧的摩擦系数与第三个过程的特征——轧辊咬入金属和建立轧制过程时较大的摩擦角密切相关。为了保证轧制过程的稳定性，应当保证轧辊可靠地咬入轧件和轧辊不打滑地轧制。大的咬入角限制了明显地降低摩擦系数的可能性，而这种可能性终究是存在的。在建立轧制过程中供给工艺润滑剂能够最充分地反映实际轧制过程的可能性。在全部轧制过程中必须调正润滑剂分阶段的供给量，因为润滑剂可能破坏轧制过程的稳定性。

因此在制定采用热轧工艺润滑剂的综合工艺时，与采用热轧工艺总的原则相一致应该考虑热轧的特点（高温对摩擦过程的影响；消耗在克服摩擦力的实际变形功；金属总变形功和较大的咬入角）。

## 2. 工艺润滑剂对接触摩擦和变形条件的影响

热轧及最明显地反映出变形区中摩擦力的双重作用。一方面较大的咬入角要求有较

大的摩擦系数。在许多情况下，为了保证稳定地咬入，利用使轧辊表面粗糙和刻痕人为增加摩擦系数。另一方面摩擦直接影响到轧辊的工作能力和轧件质量。在这种情况下要求降低摩擦系数。

热轧机的轧辊在非常繁重的条件下工作，因此使轧辊表面遭受强烈破坏。工艺润滑剂是能够改变摩擦系数，并能调节轧辊咬入能力和轧辊磨损关系的唯一参数。

为了说明金属压力加工过程中摩擦的规律性，必须明确地提出在该种过程中具有何种摩擦类型。根据现在的各种看法可以分为三种基本摩擦类型：干摩擦，边界摩擦，液体摩擦。通常同时可以分为混合摩擦类型：半干和半液体摩擦。一般在生产条件下，没有润滑物质的摩擦称为干摩擦。如果接触表面上有极薄的油膜，这种摩擦称为边界摩擦。

在物体间存在有较厚的润滑层是液体摩擦。半干摩擦可以是边界摩擦与干燥摩擦的组合，亦就是在工作表面间存在较少的润滑剂，有时把边界摩擦称为半干摩擦。液体摩擦与干摩擦或边界摩擦的组合可以认为是半液体摩擦，即由润滑剂完全分开接触物体的同时，存在有边界或干摩擦区域。

在金属压力加工的过程中，到目前为止通常不叙述摩擦机理。冷轧时应当认为主要是边界摩擦。在一定的冷轧条件下，边界摩擦可以过渡到半液体甚至液体摩擦。

在没有工艺润滑剂的热轧条件下，通常来讲，摩擦具有复杂的特征，所以难以回答关于摩擦的性质问题。而通常在特定的情况下，工艺润滑剂可以认为是一种处在被加工金属与工具间的接触表面上能改变摩擦条件的任何的物质。热轧时金属表面上总是复盖着一层氧化铁皮，另外变形区中还有落下的轧辊冷却水。由于变形区中水的蒸发，使水产生局部的水气隔层。

研究结果指出，在一定程度上水本身是对轧制参数有影响的工艺润滑剂。特别是在轧制钢板时，水能降低轧制力 3—8%，并增加金属的延伸系数，降低摩擦系数。氧化铁皮的成份和性质对轧制金属的表面有很大影响。由许多的研究和生产的观察可以证明，加热炉中形成厚的氧化层明显降低变形区中的摩擦，而在空气中形成的再生氧化铁皮则会增加一些摩擦力。

热轧时金属和轧辊间的总的摩擦关系可以由各个特殊关系所构成，亦可以由下面几种的每一种所占占有不同程度的摩擦类型：液体摩擦；有润滑膜的边界摩擦；不具有液体流动摩擦而表面有机械相互作用的干摩擦。

金属在采用工艺润滑剂进行热轧时，因为金属塑性变形抗力低应当促进液体摩擦过程扩大，但是轧制的高温度和轧辊与轧件上润滑层的形成条件却使生产条件下不能实现这个过程。

在轧制过程类似的叙述中，把摩擦认为是液体摩擦是很有意义的，尽管金属的结构有一些复杂性，但是必须完全估计液体的流变性质。这种摩擦类型不仅可以进行确切的描述，而且对润滑剂的选择可以给予简单的回答。润滑剂的粘度和它与温度及压力的关系是润滑作用的唯一标准。

但是根据热轧时流体动力学理论所得到的计算值与实际不符合迫使在选择润滑剂

和估计它的作用时采用液体摩擦理论要谨慎。另外，用实验室和工业性的研究结果表明，热轧时润滑剂的粘度不是固定的参数。根据工艺方案，液体摩擦不总是合适的。

润滑剂厚度的不稳定性使轧件沿宽度和长度上产生不同的摩擦力，并且使轧件形状扭变。另外热轧润滑层太厚，会使润滑剂强烈燃烧並造成轧辊打滑，从而使轧辊损坏。

因此，在考虑流体力学现象的情况下，为了说明轧辊的润滑咬入，应该优先从边界摩擦的观点出发研究热轧时的润滑作用。这一点用同边界吸附层 $\Pi AB$ 厚度有等量关系的较薄润滑膜厚度（0.1—0.8微米）所证实。热轧时边界摩擦不仅是可能存在的，而且大概是唯一允许存在的。可以表明，热轧时润滑层很薄是非常有效的，而进一步增加厚度並不能很大的提高过程的有效性。采用通常的边界摩擦的规律性，用来解决润滑剂的选择，力能参数的计算，解释各种轧件缺陷形成的问题等等是有很有效的。

边界摩擦规律包括在通常的摩擦理论中，根据这个理论，摩擦力等于

$$\tau_{TP} = \tau_0 + fP$$

式中  $\tau_0$ —组成摩擦力常数；  $P$ —压力；  $f$ —摩擦系数。

为了说明变形区中的摩擦力和计算轧制力参数，通常在实际中采用简化的表达式。在没有润滑剂的热轧时，摩擦系数经常采用条件摩擦系数 $f_{ycy}$ ，它等于边界摩擦力 $T_{TP}$ 与轧件材料屈服限 $\sigma_T$ 的比值

$$f_{ycyTP} = \tau / \sigma_T$$

冷轧时经常采用阿孟顿——库仑定律

$$\tau_{TP} = f \cdot P$$

考虑到冷轧和热轧过程中采用工艺润滑剂有许多共同的规律性，应当认识到热轧润滑时利用阿孟顿——库仑摩擦定律是有可能性的。这时应当考虑变形区中润滑剂的行为特征，它的高温寿命和高温作用条件下保持润滑效果的能力。很明显，润滑层的润滑效果沿变形区不是恒定的。随着进入变形区，润滑层的性质将恶化，而且可能完全消失。因此轧制速度对过程的效果应当有较大的影响。

用工艺润滑剂的热轧是比较新的工艺过程，它还没有充分的理论根据。这就要求一方面研究工作者应从基本方向上对实现这个过程从实践和理论上很快地解决问题，因为不解决将很难实现这个过程。另一方面是需要研究轧件咬入时的摩擦系数 $f_s$ 和稳定轧制过程的摩擦系数 $f$ 的关系。

根据现代轧制理论，为了弄清咬入条件，必须研究沿X轴方向作用在轧件上全部外力的力平衡方程式：

$$\Sigma X = Q - 2P \sin \varphi + 2P \cos \varphi f = 0 \quad (1)$$

式中  $Q$ ——轧件向轧辊的推力；  $P$ ——轧制力；  
 $\varphi$ ——轧辊上金属的合力作用角。

在开始咬入的一瞬间， $P$ 作用在咬入弧的开始处， $\varphi = \alpha_s$ 。在自由咬入时，这是宽带钢轧机精轧机组第一个轧机的特点，可认为 $Q = 0$ ，由关系式（1）得到公认的咬入条件 $\operatorname{tg} \alpha_s = f_s$ ，式中 $\alpha_s$ ——咬入角。对于用立辊的粗轧机，立辊对水平辊的咬入条件有影



响，这时根据立辊和水平辊的速度关系，QX既可以是推力又可以是阻力。如果立辊速度小于水平辊速度，那么立辊就有阻碍作用，甚至在开始咬入实现以后，引起水平辊打滑，特别是 $\alpha_3$ 与摩擦系数相等时。这种现象更为严重，因此在粗轧机上采用工艺润滑剂时，必须考虑立辊速度与水平辊速度之比对稳定轧制过程的影响。

轧件被轧辊咬入后轧制过程应当稳定地进行，不发生打滑现象。从(1)式的分析中得出，对于完全自由的咬入轧件以前发生打滑，必须满足轧制过程建立时的摩擦系数比咬入时的摩擦系数小一半的条件，即是 $f_{y,cr} \leq f_3 / \alpha$ 。轧钢机的实际工作表明，在极大多数情况中最困难的任务是轧辊咬入轧件，因为轧件咬入以后就能被轧辊拖入。

如果沿咬入弧压力均匀分布，并且轧制建立过程中的摩擦系数等于咬入时的摩擦系数，那末用小于或等于两倍摩擦角的咬入角的轧制过程将能够进行〔18〕。这实际上表明金属充满变形区后采用润滑剂减少摩擦系数一半的可能性。但是实际的轧制情况和许多研究表明，这种关系不是随时都是明显的。原因是正压力的合力作用点位置由咬入弧上压力分布所确定，并且咬入过程中的摩擦条件与轧制过程中的摩擦条件是不同的，因而摩擦系数 $f_3$ 与 $f_y$ 是不同的。许多研究工作者都关心确定咬入一瞬间和建立轧制过程中的摩擦系数问题。通常的结论是，轧制过程中的摩擦系数 $f_3$ 小于咬入时的摩擦系数 $f_3$ 。根据A、JI、格鲁吉夫的资料，轧制条件下的 $f_3 / f_y$ 之比在1.66—2.85范围内。

根据实验室的研究结果和工业轧机上研究结果所得到的摩擦系数的计算数据可以认为，用润滑剂轧制的建立过程时的摩擦系数比通常轧制的要小；供给矿物油乳化液（u—20）时小20%，供给废棉子油乳化液时小40%，供给矿物油（u—20）的水—油混合物时小31%，供给废矿物油时小36%，供给QXM时小50%。

从最大压下量（不超过允许的压下量）条件，金属对轧辊的压力，轧制力矩，咬入条件出发计算宽带钢轧机上的压下规程。工艺润滑剂降低了轧制过程中的摩擦系数，因而尤其对轧制轧件的压下规程给了附加限制。在生产轧机上，通常不采用 $\alpha_3 \approx f_3$ 。因为各种因素（氧化铁皮成份，轧辊工作时间，轧制速度等）能够改变摩擦系数。在连续式热轧机上根据轧制速度所确定的咬入角值如下：

平辊上的咬入角，弧度 0.44 0.42 0.40 0.35 0.28 0.22 0.21

轧辊圆周速度，米/秒 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 74

在粗轧机和第一架精轧机上热轧时，咬入角接近极限值（表1）。因此在这些轧机上采用有高效率润滑作用的润滑剂是不合适的。在精轧机上，沿机列的轧辊直径实际上是相同的。随着轧制轧件厚度的减薄，咬入角降低。因此在建立轧制过程时，允许降低摩擦系数的程度，从 $f_y > \text{tg} \alpha_3 / \alpha$ 条件出发，沿精轧机列是可以不同的。这就指明了沿机列改变工艺润滑剂效果的可能性和合理性。为了防止工艺润滑剂影响到咬入条件，并且排除打滑现象，只有在咬入以后，才把润滑剂供给到轧辊上，并且为了烧尽轧辊上剩余的润滑剂并恢复轧辊的咬入能力，在轧件完全从轧辊中出来以前一点儿就停止供给润滑剂。为了排除咬入以后的打滑，应当调节润滑剂的供给量。

用润滑剂热轧时，必须研究建立轧制过程中的摩擦系数。

没有润滑剂热轧时的摩擦系数已详细地研究过。用润滑剂的轧制过程是很复杂的，

※ 原书中 $(f_{y,cr} \leq f_3) / \alpha$ 有误。

表1 热轧2000轧机上金属咬入过程参数

参 数	粗 轧 机 组				
	1	2	3	4	5
允许相对压下量	25	35	43	46	46
最小工作辊直径 毫米	1100	1100	1100	1100	1100
最大压下量 毫米	70	62	56	46	20
最大咬入角度 度	0.36	0.34	0.32	0.28	0.19
轧制速度(无加速)米/秒	1.25	1.54	1.92※	2.5	3.2
对速度所允许的咬入角度	0.41	0.4	0.35	0.28	0.22

※原书为0.92有误

参 数	精 轧 机 组						
	1	2	3	4	5	6	7
允许相对压下量	55	53	45	40	35	25	25
最小工作辊直径 毫米	750	750	750	750	750	750	750
最大压下量 毫米	18	13.4	3.6	2.6	1.4	1.2	0.8
最大咬入角 度	0.22	0.19	0.10	0.084	0.062	0.057	0.047
轧制速度(无加速)米/秒	1.4	2.8	4.0	5.5	6.7	8.6	10.0
对速度所允许的咬入角度	0.4	0.22	0.21	0.2	0.2	0.2	0.2

并且试验资料暂时还很少。这个过程还应当继续研究，就是已有的资料还是可以回答某些基本问题。

摩擦系数 $f_y$ 与轧制金属温度的变化是关系最重要的规律之一。温度不是直接的而是间接的摩擦因素。它的影响基本上同氧化铁皮的成份和性质的变化，沿轧件厚度上机械性质的梯度，工艺润滑剂的存在和特征有关。已有的资料证明温度大于700℃时，无润滑剂的摩擦系数下降，这种关系具有线性特征〔4〕：

$$f_y = K_n \cdot K_v (0.84 - 0.0004t)$$

式中  $K_n$ ——考虑轧辊和轧件的表面状态系数；

$K_v$ ——考虑轧件速度系数。

但是应当指出，还有相反特征关系的资料，其摩擦系数随温度的增加而增加。

温度对有润滑剂轧制时摩擦系数影响的研究最近才开始。已有的论文资料和本国的研究※定性地指出了相反的特征。可以看出，采用工艺润滑剂能在很大程度上减弱温度因素对摩擦系数的影响。特别是当温度在700—1000℃范围内变化时，摩擦系数会从0.32减小到0.26。很明显，由于润滑剂有隔离作用，在变形区中没有粘着区时润滑剂促进了金属沿轧辊滑动的稳定条件的建立。

工艺润滑剂的成份对摩擦系数的绝对值影响很大。表 2 所给出的资料表明，在实验室条件下所得出的摩擦系数值远较大生产情况为低。在实验室条件下摩擦系数是在最大可能的润滑层厚度，即润滑剂过剩的情况下获得的，因此，这一特点就可能使该种润滑剂具有最大的润滑效果，而在实际轧制条件下轧辊上要想保证同样的润滑层厚度是比较困难的，这是因为实际生产中，由于轧辊冷却水的强烈冲刷作用，很难形成足够厚度的润滑层。

对于这种情况的图解在图 1 上引出了摩擦系数与水中润滑剂浓度的关系。增加浓度时，轧辊上吸附润滑层厚度增加，因此摩擦系数相应地降低。从图 1 中可以看出，水—油混合物比同类油的乳化液更有效。

表2 用工艺润滑剂热轧时的摩擦系数 (t≈1000℃)

润滑剂成份	不同条件下的摩擦系数值	
	实验室的	工业的
水	0.302	0.4
油(N—20)	0.192	—
从镀锡板机组来的糜棉子油	0.157	0.32
从热轧机沉淀池来的离心离析油	0.23	0.37
三甲荃丙烷混合酯肪酸复合醚和烯族烃	0.155	0.28
重油	0.187	—
5%的N—20的乳化液	0.29	—
5%的N—20的水—油混合物	0.24	—
钠皂	0.24	—
锂皂	0.21	—

热轧时对轧辊打止供给润滑剂并不意味着很快终止润滑剂的作用。我们认为，对润滑效果来说，润滑剂在轧辊上留下很长时间。为了确定润滑剂作用的延续时间，在实验室2000轧机的轧辊上喷涂过剩的润滑脂层，在1000℃时进行多次轧制。用轧制力的反推法确定摩擦系数。甚至在金属与轧辊三次接触以后在最后的表面上还保持着低摩擦的润滑层(图2)。类似的结果亦为日本的研究工作者所证实(图3)。

在恒定地供给润滑剂时，摩擦系数并不变化。但是随着停止供给润滑剂，摩擦系数则逐渐增加。对于润滑材料，不仅应该保证低摩擦的要求，而且在打止供给润滑剂以后，摩擦系数要缓慢增加。从这个观点出发，研究中得出最合适的润滑剂是牛油和某些植物油。例如聚合棉子油。看来润滑剂的后效不仅与保持在轧辊上的润滑剂有关，而且与轧辊上形成的能改变轧辊表面性质，降低摩擦系数的氧化薄膜有关。很大程度上是由于

※依凡诺夫K、A、用工艺润滑剂热轧钢过程的研究；第聂伯尔彼得洛夫斯克付博士学位论文摘要 1974。

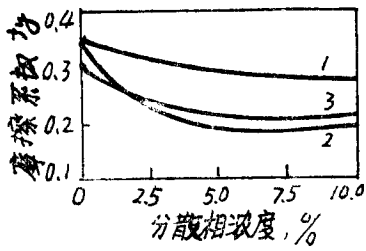


图1 热轧的摩擦系数  
 1. 矿物油乳化液  
 2. 聚合棉子油  
 3. ИС—203的水—油混合物[19]

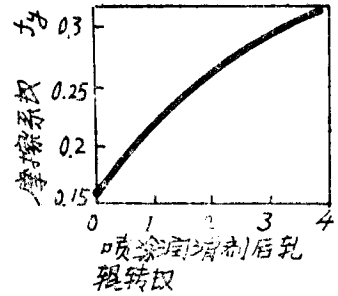


图2 轧制速度为0.2米/秒, 轧机上一次性喷涂过剩的润滑剂(润滑脂)后热轧(1000°C)摩擦系数

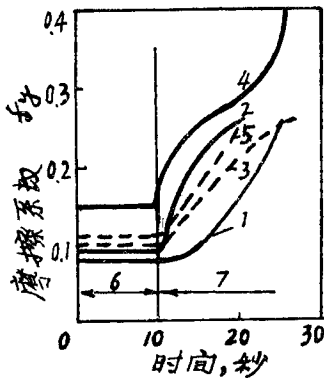


图3. 不同时间热轧时摩擦系数的变化(22)  
 1. 牛油  
 2. 汽缸油与(40%)菜子油的混合物  
 3. 菜子油  
 4. 气缸油  
 5. 豆油  
 6. 用润滑剂油轧制  
 7. 不用润滑剂轧制

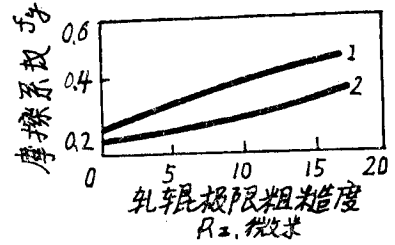


图4. 建立轧制(980°C)过程时摩擦系数与轧辊极限粗糙度 $R_z$ (轧制速度为0.35米/秒)的关系[20]  
 1. 干辊  
 2. 用И—20和И—28油轧制。

用工艺润滑剂轧制为特征的更光滑的轧辊表面促进了这种情况。在停止供给润滑剂时, 这种磨光的表面不立刻变成粗糙的表面, 因此使摩擦系数缓慢提高。分析了图4上提出的轧辊粗糙度影响材料表明, 用低粘度矿物油轧制时, 摩擦系数的变化特征与干辊相同。摩擦系数同样与所轧制轧件的粗糙度有关。正是因为这个因素的影响, 除了用炽热的轧件转移润滑剂外, 一定程度上可以说明在没有供给润滑剂的精轧机组后几架轧机上的润滑剂的效果。研究证明, 用润滑剂轧制时金属表面上显微不均匀程度比往轧辊上仅供给水的普通轧制时要小。在后几架轧机上更光滑的轧件使摩擦系数和轧制力降低, 同时亦使轧辊磨损和力能消耗降低。

影响摩擦系数最重要的因素之一是轧制速度。随着轧制速度的提高, 摩擦系数增加(图5)。不过轧辊表面的微观几何状态在这情况下起着决定性的影响。

根据实验资料可以分出一系列影响摩擦系数最重要的参数：润滑剂成份、润滑剂的吸附特性、润滑层厚度、轧制速度、轧辊参数等等。润滑层厚度是影响轧制过程参数的基本因素。

摩擦系数与润滑层厚度的关系曲线（图6）可以分为三段。在第一段上润滑膜厚度增加不大时摩擦系数急剧下降。随后一段润滑膜厚度增加时摩擦系数相对平稳。这两段适合于边界层范围的润滑层厚度。第三段是过渡到液体摩擦状态，由此摩擦系数明显下降。这一段在热轧时适合于轧辊沿轧件打滑的不稳定过程，从工艺观点看是不允许的，因为打滑可能是轧辊损坏的原因。矿物油的作用通常限制在第一段和第二段。对于用有效添加剂的植物油和矿物油全部三段都可能存在。

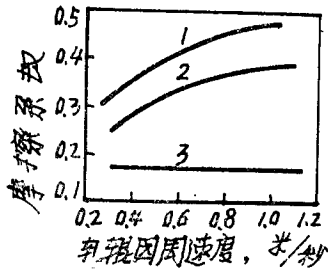


图5. 热轧时的摩擦系数与轧辊速度的关系  
1——高速轴润滑油(轧辊5级光洁度)  
2——气缸润滑油  
3——高速轴润滑油(轧辊11光级光洁度)。

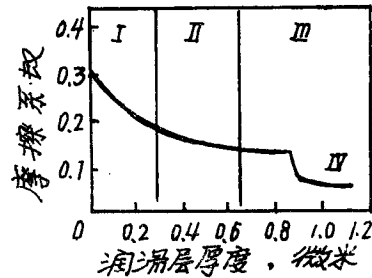


图6. 热轧时的摩擦系数 $f_y$ 与润滑层厚度的关系  
I—— $f_y$ 急速下降阶段  
II—— $f_y$ 稳定阶段  
III——向流体动力学的摩擦状况过渡阶段。

热轧摩擦系数的降低首先影响到轧制过程的力能参数，也就是使轧制力和力矩降低，主电机电能节省。总轧制力通常可按公式确定：

$$P = F \cdot P_{cp}$$

式中  $F$ ——金属与轧辊接触面积的投影；  
 $P_{cp}$ ——平均单位压力。

轧制时为了使轧辊转动，对每一个轧辊辊身应当施加扭转力矩 $M$ ，等于

$$M = P \cdot a$$

式中  $a$ —— $P$ 力相对于轧辊中心的力臂。

摩擦力既对 $P$ 力有影响，又对力臂 $a$ 有影响。这是由于合力作用点的位置与沿咬入弧的压力分布特征有关。但是摩擦系数的减小由于力臂 $a$ 的减小而对轧制力矩的影响较小。这时轧制力的减小起主要作用。因而，采用工艺润滑剂一定程度上既影响到轧制力的减小，又影响到二辊轧机的轧制力矩。在四辊轧机上，支持辊和工作辊间的滚动摩擦对轧制力矩有影响。支持辊和工作辊间润滑剂的情况由于改变了滚动阻力而改变了轧制力与轧制力矩的关系。

### 3. 润滑剂的一般特性和分类

热轧钢板工艺过程的各种条件既对无机工艺润滑剂又对有机工艺润滑剂提出很广泛的要求。尽管热轧工艺润滑剂的全面研制工作发展得较迟，但是在科学技术文献方面近十年来推荐的润滑剂是很多的，而润滑剂的组成成份根据其多样性并不比冷轧润滑剂少。到目前为止，已经得知多种成份的润滑剂。只是在复杂的温度条件下，润滑剂的作用到目前为止还研究得不够，另外轧辊上润滑层形成的不利条件极大地限制了许多润滑剂的应用范围和效果。对热轧润滑剂分类时，基本上应该以其物理——力学和化学性质的综合性能来分。根据物理——力学性质确定供给和喷涂润滑剂的方法；根据化学性质确定边界润滑膜的形成，确定轧制金属表面上新形成氧化铁皮过程的特征。

润滑剂可以是有机润滑剂和无机润滑剂。广泛应用高效率无机润滑剂的可能性极大地扩大了应用润滑剂的范围。

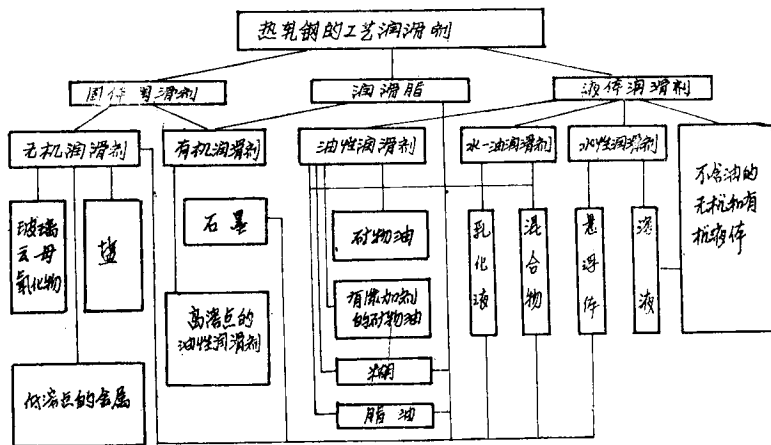


图7 热轧钢的工艺润滑剂分类

图7提出了热轧时应用工艺润滑剂的分类情况。应当指出这些分类的某些条件，由于许多性质互相交错，在每一个具体情况中它们的关系可能是很复杂的。首先必须把全部工艺润滑剂明显地分成两类（固体和液体），根据润滑剂的状态采用不同的润滑工艺，但是它们在变形区中的作用机理是相同的。

如果润滑剂的熔点等于或大于其所喷涂的表面的温度，这种润滑剂属于固体工艺润滑剂。润滑剂在较低的熔点时，由于固体润滑剂与轧辊的热表面常期接触，使润滑剂变成液体状态。从变形区中出口处轧辊的表面温度可达600—650℃，而变形区进口处为80—100℃。

根据喷涂润滑剂的部位，不同成份的润滑剂既有固体润滑剂，又有液体润滑剂。例如，合成脂酸C20的残渣，其熔点大于50℃，把这种润滑剂涂在支持辊上时，是属于固体润滑剂。在接触更高的温度时，这些酸软化、熔化变成液体润滑剂，因此不可能保持其原始状态，虽然这种状态确定了喷涂的方法。用熔点低于轧辊表面温度的金属，同样根据喷涂的部位可能属于固体润滑剂和液体润滑剂。把固体润滑剂涂到轧辊表面上是利

用润滑剂与轧辊的机械接触依靠研磨来实现。

主要的液体润滑剂通常是石油产品的矿物油。按其成份，根据其烃的组织结构，矿物油中含有石蜡，环烷属烃，芳香族基体。液体润滑剂比固体润滑剂更能满足轧制工艺的要求。

所用油的成份需预先确定其物理——化学性质。芳香族和沥青基化合物促使氧化过程很快的发展，因而致使金属表面上污斑点的形成。正常结构的石蜡有最好的性质。它有较高的粘度，它比同样分子量的其它烃属有较高的熔点，对于热轧应用石蜡成份的油是合适的。例如用工业油代替17—28油（烃属化合物中石蜡含量应为80—91%和35%）。除工业油以外，还可以应用更高粘度的气缸油。

为了估计作为工艺润滑剂的矿物油的合适性，必须知道它的物理性质：粘度；闪光点，沸点和凝固点；吸附性。综合这些性质就可以了解分子量、分馏成份和温度提高时物理性质可能发生变化的各种情况。对于估计润滑剂的工艺和使用性能，粘度是最重要的特性之一，粘度可以确定变形区中润滑膜的厚度，润滑剂在水中所需的分散度，运输方便条件等等。油的粘度根据确定方法可以分为动力粘度，运动粘度，单位粘度和条件粘度，并且用相应的单位表示。

对于矿物油来说，粘度与温度间的变化特性是很重要的。通常随温度的提高，油的粘度明显下降。最好是这种降低不太明显。这种特性可以用两种温度时（例如20和100℃）的粘度关系来评定或者用粘度的温度关系来评定。粘度的温度系数是两种温度时的粘度差值与这两种温度中较高温度的粘度的比值。

为了提高油的粘度性质，可以采用专门的粘度添加剂。这种添加剂可以提高粘度，而实际上不改变凝固点。聚氯乙烯，聚异丁烯，优里托利，聚甲基丙烯酸甲脂就是这种添加剂。聚异丁烯添加剂在凝固点的提高不超过15%时，粘度可以增加7—9倍。但是应当指出，热轧时的粘度不完全是确定工艺润滑剂综合效果的参数。油的吸附特性是更重要的，这种吸附特性对纯净油在某种程度上与粘度有关。

采用加入抗酸的、抗磨的、润滑的和其它添加剂的方法可以提高矿物油的综合效果。由于热轧时考虑到提高了表面的磨损，应该较详细的讨论抗磨添加剂。它们是含有极少量磷、硫、氯的有机化合物。添加剂与金属表面起反应，并且在金属表面上形成高熔点的，与轧辊表面有隔离性质的铁的硫化物、磷化物、氯化物形态的相互作用产物。

作为综合的多功能的矿物油添加剂广泛地应用了油脂。这种油脂是复杂的乙醇醚和脂肪酸。根据其来源，这种油脂可以是动物性的，植物性的和合成性的。油脂有较大的吸附金属表面的能力。以不饱和排列脂肪酸为基体的植物油呈液体，饱和排列的脂肪酸的植物油是高于30℃熔点的固体。在天然植物油中含有饱和和不饱和的酸脂肪。在向日葵油，棉子油，蓖麻子油，洋油菜油，油菜子油中基本为含有不饱和的脂肪酸。因此决定了它们的凝固点较低（ $\leq -15^{\circ}\text{C}$ ）。关于不饱和酸的量根据它的碘值评定，高碘值其特性易于氧化和树脂化。醚具有不饱和的排列和较差的润滑性能。

各种蜡均属于油脂，其中包括显示单原子高分子量的复杂醚合成物。蜡的特性是熔点高（ $\geq 70^{\circ}\text{C}$ ），它比大多数的油脂的熔点还要高，润滑性能好，因此它作为各种润滑

剂的有效添加剂而得到应用。

型钢轧机上为了减少孔型磨损，历来就应用猪油和牛油。关于这方面本国首次公布的资料是在30年代。但是在轧制金属时应用高浓缩的食用油却没有得到广泛的推广。合成油脂的性能并不亚于天然油另外较便宜且较多。所有被推荐的无水润滑油成份在其基体中包含有总量不超过20—30%掺入物品时用脂肪酸，醚和其它化合物复合化的矿物油。未含矿物油而仅有活性成份的化合物是众所周知的。采用昂贵而稀缺的纯净产品是不合理的，因为采用这样的润滑剂不符合实际的技术经济要求。

矿物油中掺加一些稠化剂时就能够得到塑性性能。根据采用的稠化剂，把塑性润滑剂可分成四类：低塑润滑剂、烃类塑性润滑剂、有机物塑性润滑剂和无机物塑性润滑剂。塑性润滑剂有较高的咬住接触表面的能力。作为工艺润滑剂较合适的是钙性和钠性润滑剂。钙性润滑剂在通常所称的润滑脂中不溶于水是众所周知的。钠性润滑剂（康司太林油）容易溶解在水中。在研究实践中，很少采用纯净状态的塑性润滑剂，而是用石墨、滑石、聚合物、硅酸盐使之进一步稠化，并用活性物使表面复合化，然后再用作润滑剂。

在热轧生产实践中，水油工艺润滑剂得到最广泛的推广。这时水是用来作为油的运载物使油达到轧辊表面。水作为油的运载物而应用不仅对有机润滑剂的热保护有利，而且能够很精确地检查和调节被供给到接触区中的活性润滑剂成份的数量。

水性润滑剂可以是乳化液、悬浮体、糊剂、研磨溶液。互不溶解的两种物质的混合物，且此时物质被粉碎到最小质点，这种混合物是胶体系统（分散系统）。粉碎的质点称为分散相，而分布分散相的介质也是分散的。热轧时应用的乳化液是非单相（多相）系统，在多相系统中水是分散的介质，而油是分散相。在悬浮体中固体是分散相，而分散介质可能是任何液体，其中包括油。浓缩的悬浮体被称为糊剂。

确定某种润滑剂属性的最好的特征参数是分散相质点的尺寸。一般认为分散系统中分散相质点的尺寸在0.002—2微米范围内，虽然有时较大质点的系统同样可能是分散的。具有大于1微米质点的系统称为粗分散系统。破碎的质点如小于0.002微米则可使其分散到分子甚至离子程度，这样的系统是均匀系统，而不属于胶体溶液（表3）。

**表3 水性润滑系统的某些物理——化学特性**

系统特性	分散相质	分光显微镜	完全分化	吸附
	点尺寸，微米	下导点的能见度	时间，分	能力
悬浮体	1—50	好	0.01—0.5	高
水—油混合物	750	好	0.05—0.5	高
乳化液	0.1—50	弱	30—1200	充分
真实溶液	≤0.001	看不见	不分化	最小

根据分散方法分类，水——油乳化液（水和油的分散系统）可分为稳定的乳化液和



不稳定的乳化液。根据抗分化相的程度，乳化液可能是稳定的，半稳定的和不稳定的。在轧制生产中应用乳化液的性质及其特性在苏联学者的研究中〔5,19,25〕已有详细的叙述。

在分散相的浓度达到0.1—0.15%时，乳化液可能是稳定的和不稳定的，但是这种性能远不是所有的油所具有的。为了保证分散相质点的均匀分布，或者必须要有保证得到稳定乳化液的乳化剂，或者必须有备制和供给润滑剂的特殊条件。

虽然矿物油和水在机械搅拌的条件下可以得到乳化液，但是它们并不互相混合。在停止搅拌时，由于油与水的密度不同这种乳化液就很快地分解。

水—油混合物的形成和稳定性是温度为60—80℃时在搅拌机中仔细进行搅拌和使供给系统中有充分的流动速度（ $Re \geq 1000$ ）来得到保证的。

为了便于循环必须保证乳化液的高度稳定性，且应避免在储油器中的分离和起泡沫。但是实验表明，不稳定的乳化液容易在金属表面形成油层。关于热轧时乳化液和机械的水—油混合物的确切作用人们知道的还很少：或是油膜经常地沉积和吸附在轧辊表面上，或是润滑剂通过轧辊接触区时，由于热和机械的作用，促使水—油联系破坏，并且形成润滑层。人们力图根据更好的润滑性能使混合物的稳定性在润滑剂成份复杂化和工艺润滑剂基本油的复合化的条件下反映出来。

油的性质和微粒成份影响到油与水的混合性和乳化性。用矿物油容易乳化为低粘度和不易洗清的物质。而且这种性质甚至在没有乳化剂时还存在。较大粘度的高净化的油，例如气缸油，乳化得很坏。油脂通常比低粘度的矿物油乳化得差，但是存在有自由的脂肪酸时，与水的混合性能要优于矿物油。

水的硬度也有很大的影响。当水的硬度超过15克当量/米<sup>3</sup>，甚至在采用乳化剂时，亦很难得到稳定的乳化液。这种水在停止搅拌以后或者降低混合物的水流速度以后，即很快会分化并使其成为紊流。用超声波处理混合物能有效的调节水与油的混合性能。超声波处理还可提高混合物的稳定时间。

热轧时采用直接型的水—油混合物，即是把油放在水中。油在水中的浓度和其在直接型的混合物中的上限由油相的特性和成份来确定。在油的浓度提高到允许的限度时，混合物的性质明显变化，它的粘度增加，润滑剂失去其工艺性能。这样的混合物不可能沿管道运输。

悬浮体与以上所述的情况相同。虽然固相的化学成份很少影响到与水的混合特性，又很少影响到与油的混合特性。但是应当考虑到被分散物质的疏水性和亲水性，以及它对油的湿润能力。强烈地机械分离能够在任何湿润程度下达到很好的混合。

分散介质（水）中分散相（油）的破碎程度指的是水—油混合物的分散度。水—油混合物的分散度是确定混合物性质的主要特性。它用乳化质点的直径 $d$ 或通常被称为分散度的直径的倒数 $D = \frac{1}{d}$ 来测定，或用占有分散相的单位体积的单位相间表面表示。分散系统很少由一种尺寸的质点（单一分散的）组成。通常乳化液和悬浮体是研磨分散系统。沉淀分析法是最简单和最可靠的确定乳化液和悬浮体分散度的方法。质点的直径（米）按公式确定