

刀具动态 强度计算

AOJU DONGTAI
JIANGDU JISUAN

[苏] B. A. 奥斯塔费耶夫 著

机械工业出版社

刀具动态强度计算

[苏] B.A. 奥斯塔费耶夫 著

喻怀仁 译

机械工业出版社

本书论述了在冲击与周期性的机械和热负载作用下刀具强度的计算及其工作的可靠性。书中阐述了金属切削理论和固体变形与断裂力学的最新成就，介绍了借助于电子计算机采用数字计算方法计算刀具切削部分在弹-塑性变形下的应力-应变状态，以及在各种切削条件下的温度场与热应力。书中还介绍了为试验刀具动态强度所必需的新仪器、设备及试验装置。

本书可供从事金属切削刀具设计和使用的工程技术人员参考。

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ
ПРОЧНОСТИ РЕЖУЩЕГО
ИНСТРУМЕНТА

В. А. Остафьев

Москва, «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1979

• • •

刀具动态强度计算

[苏] В. А. 奥斯塔费耶夫 著

喻怀仁 译

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

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 6 $\frac{3}{8}$ · 字数 140 千字
1982年11月重庆第一版 · 1982年11月重庆第一次印刷

印数 0,001—8,900 · 定价 0.70 元

*

科技新书目: 36—90

统一书号: 15033·5392



译者的话

在刀具切削过程中，切削力及切削热总是变化的。间断切削时尤其如此。在变化的切削力和切削热作用下，刀具切削部分很容易因机械应力和热应力的冲击而产生裂纹，从而导致破坏。关于这个问题，以往研究甚少。但随着实际生产的需要及金属切削机理研究的逐渐深入，已开始成为广泛重视的问题。

目前，国内外对刀具强度和切削性能的研究，大多尚处于试验研究阶段，不仅试验工作量大，费用贵，而得到的数据则又往往具有很大的局限性。

《Расчет Динамической прочности Режущего инструмента》(刀具动态强度计算)一书的作者，在固体物理、弹塑性力学、热物理、断裂力学、有限元计算法等基础科学的基础上，提出了一整套用计算机辅助计算刀具切削部分的应力、切削区温度场和热应力的方法，并且用光弹性试验和自然热电偶测试了切削部分的应力和温度。试验所得的数据及规律，与计算方法所得到的很接近。

因此，本书的特点是，在刀具和切削机理的研究中，较好地引用了上述基础科学的成果，在计算方法上采用了有限元法和计算机辅助设计，这对读者了解基础科学以及计算机在刀具和切削科学中的应用，有很好的指导意义。而在工程技术科学中广泛地引用基础科学和计算机技术，又是当前国际上极为重视的问题。我国和国际先进水平相比较，这方面差距还很大。

本书是一本专著性质的读物。译者相信，通过这本书的介绍，对从事金属切削机理与刀具研究和实践的工程技术人员、高等院校师生以及研究人员，会有一定的指导意义。

本书译好后，承清华大学周家宝副教授仔细审校，并提出了修改意见，使译文尽量作到忠实于原文，又力求文句通顺，在此谨致深切谢意。

译 者

目 录

译者的话

引言..... 1

第一章 在变化的切削力作用下刀具切削部分

的强度..... 4

1. 断裂力学和刀具材料强度标准..... 4
2. 刀具的接触负载..... 34
3. 计算方法..... 52
4. 刀具切削部分强度的分析和实验研究..... 84

第二章 在周期性热负载作用下刀具切削部分

的强度..... 118

1. 不稳定温度场的计算方法..... 118
2. 温度场的分析及实验测定方法..... 160
3. 刀具的热应力..... 179

结论..... 196

参考文献..... 197

引 言

金属切削加工，是为保证零件高质量和提高劳动生产率所广泛采用的工艺过程。为了完成第十个五年计划所规定的任务，预定要广泛地采用各种类型的自动机、自动线和程序控制机床。它们的使用效果，与刀具工作的可靠性有密切的关系。金属加工企业的统计资料表明，大约有30~50%的刀具，特别是硬质合金刀具，系由于破坏而导致不能继续使用。

刀具强度的基本理论，过去基本上是靠积累和分析大量的试验资料来建立的。为了整理切削过程中的大量资料，建立了好多个资料中心，这些中心借助于电子计算机处理和选择必要的资料。但切削理论的进一步发展，不可能仅仅依靠收集和分析得来的试验资料，因为它所推荐出来的加工规范（或用量），远远落后于机器和仪器所采用的新材料的发展。因此，以各种基础科学的成就作为根据，按照零件加工条件提出加工参数，便日益成为迫切需要解决的问题。

金属切削理论是以材料的强度和断裂理论、固体物理、热物理、应用数学等基础科学为根据的，它们的发展，使金属切削过程中的许多参数之间能够建立起函数关系。要精确而有分析地描述金属切削过程，特别是金属切削时的边界条件，是复杂的。因此，直到不久以前，还只能建立带有大量假设条件的函数关系。借助于电子计算机采用数字计算方法，可以精确地解决很多的工程问题。目前，由于电子计算机的广泛应用，已经可以进行精确的数字计算。甚至为研究

工艺过程所采用的昂贵的试验研究方法，也正在被比较经济的计算方法所替代。用这种方法所得到的数学关系，不仅可以显著地减少计算刀具强度所必需的试验数据，还可以加深对工艺过程物理本质的了解，开辟了刀具强化的新途径。

要研究刀具切削部分的强度问题，首先要确定它在切削过程中负载作用下的应力-应变状态。

经过多年的研究，已制订出了简单形状刀具切削部分应力的计算方法，并创立了利用光弹性试验的方法和装置来估算刀具切削部分的强度和应力分布。但是，尽管在这方面进行了大量工作，仍有许多问题没有得到解决。例如，采用数字方法计算复杂形状刀具(带加强棱边，带卷屑槽和断屑槽)切削部分的应力状态问题，还没有获得解决。这些计算方法，既要考虑到在不均衡温度场作用下刀具材料性质的变化，还要考虑到刀具成形表面所承受的接触负载分布的各种规律，它们会使刀具不仅产生弹性变形，而且还会产生塑性变形。用这种计算的方法及试验验证，应当可以估算刀具在各种使用条件下的强度。

硬质合金刀具的使用实践表明，在多数情况下，正是热负载决定了它的强度和耐磨性。因此，必须拟订在连续或间断加工形式下计算刀具热负载的方法。

首先开始研究切削区温度的我国学者有 Я. Г. 乌萨乔夫，Н. Н. 萨文。接着有 А. М. 达尼耶梁，М. Ф. 谢姆柯，А. Н. 列兹尼柯夫，А. А. 阿瓦柯夫，Т. Н. 洛拉泽，А. Я. 马尔金，М. И. 克卢申，А. И. 伊萨耶夫，С. С. 西林，Б. И. 柯斯捷茨基，А. В. 波德捷，П. И. 波布里克，А. В. 捷姆尼柯夫，Н. В. 塔兰托夫等。特别应该指出的是，在 А. Н. 列兹尼柯夫领导下根据金属切削

的热物理所作的基础研究工作。在国外，对切削区温度进行过一系列有成效的研究工作的有E. 格尔别尔特，戈特维，K. Л. 特里盖尔，赵佩之，E. 乌苏伊，X. 塔克亚玛。

对金属切削的热过程所作的研究表明，切削时所产生的各种现象极为复杂，因此它导致温度场和加工参数之间并不呈单值关系。例如，提高刀具耐用度，可以采用预先加热被加工毛坯或刀具本身的方法，也可采用冷却润滑液以降低切削区温度的方法。研究的结果同样表明，产生任何一种效果，都是在相当狭窄的温度变化范围内达到的。因此，只有了解它并在这个基础上学会建立必需的切削区温度场，才能保证提高加工生产率。

对各种计算温度和热应力的方法进行分析的结果表明，只有数字计算方法，才可能考虑到切削区各种复杂的边界条件，并且不单在稳定的甚至在动态的切削条件下都能给出足够精确的答案。

为了拟订切削过程自适应控制系统，需要确定切削区温度。这种确定温度的试验方法，还有待进一步完善。

数字计算方法可以计算在各种加工条件下的热应力，这也可为切削过程的优化提供必要的边界条件。必须指出，至今还没有试验方法来确定在实际加工条件下热应力的变化动态。只有采用数字计算的方法，才可能确定它们的数值。

本书介绍了为获得必需的原始数据所采用的新仪器和试验方法，并提供了对刀具应力-应变状态的变化动态，以及对刀具切削部分的温度场与热负载进行数字计算与分析的方法，这种方法是描述它们之间的函数关系作为基础的。

第一章 在变化的切削力作用下 刀具切削部分的强度

1. 断裂力学和刀具材料强度标准

为了评定刀具切削部分的应力状态，必须分析刀具材料的性质、它们的断裂机理和强度标准。用高生产率切削加工各种金属和合金时，采用很多品种的工具钢、硬质合金和陶瓷。金属加工工业中最广泛应用的是 WC-Co, WC-TiC-Co, WC-TiC-TaC-Co 硬质合金及高速钢。在切削力所造成的静负载作用下，刀具切削部分的破坏，乃是由切削部分内部的应力状态所决定的，它取决于下列强度指标：在各种负载形式下的 σ_B , σ_{-B} , σ_{us} , HV, μ , E [24]。因为刀具切削部分是在高温条件下工作的，因此必须研究温度对这些强度指标的影响(图 1)。

E 、HV 及 σ_{-B} 值的单向下降可归纳成线性及指数关系，这种关系今后可用于刀具强度计算。当温度上升时， μ 也呈线性关系增长。对于一些刀具材料 (WC-Co, WC-TiC-TaC-Co 硬质合金及高速钢)，在 200~350℃ 温度范围内 σ_B 和 σ_{us} 具有最大值。为了保持切削刃有很高的形状稳定性，屈服点 $\sigma_{-B_{0.01}}$ 具有很大的意义。但是关于这方面的资料是不多的。例如，对于硬质合金 BK6，当温度在 20~800℃ 之间变化时， $\sigma_{-B_{0.01}}$ 下降到 1/55，而在很高的液体静压力下使它变形时，合金 BK6 的塑性变形在室温状态下可提高到 5 倍。应当指出，像 WC-TiC-Co 这样的脆性合金，在室温条件下的屈服点 $\sigma_{-B_{0.01}}$ 和 σ_B 相差 20~30%，在破坏时其塑性变形达到

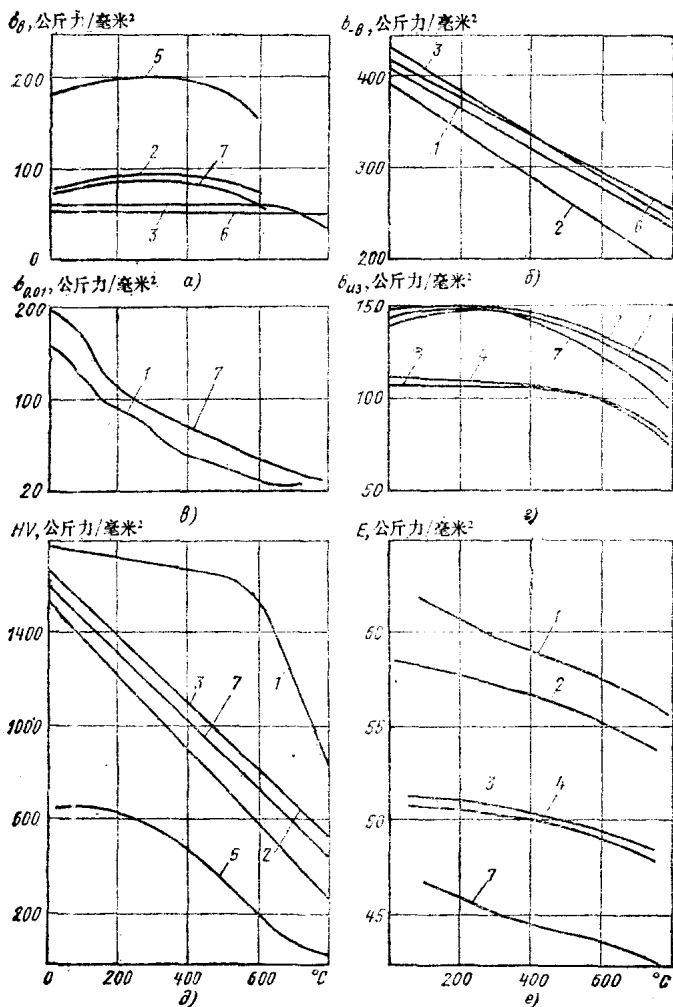


图1 温度对刀具材料性质的影响

a) 抗拉强度极限 σ_B b) 抗压强度极限 σ_{-B} c) 屈服点 $\sigma_{0.01}$ d) 抗弯强度极限 $\sigma_{0.01}$ e) HV—硬度 f) E—弹性模数: 1—BK6 2—BK8 3—T15K6 4—T14K8 5—P18 6—T30K4 7—TT7K12

1~1.3%。采用磨削或研磨来改善试件的表面状态，可以提高强度指标13~22%。高速钢如果只经过磨削而不再研磨，会由于高温作用下表层组织结构的变化而出现深度达0.1毫米的裂纹，严重降低其强度。当刀具材料在大体积范围内承受负载时，强度会有所降低。按照C. C. 普拉托夫的资料，硬质合金试件的体积增大到100倍，根据A. 格里菲特斯的理论，会大大增加产生有害缺陷的可能性， σ_{us} 平均降低30~40%。锻造或轧制具有5~7级碳化物偏析的高速钢毛坯时，会引起材料的各向异性现象。在这种情况下，试件纵向的抗弯强度要比横向高30~50%。钢的各向异性对抗压强度没有影响。当碳化物偏析控制在2~3级的情况下，材料未发现各向异性的现象。由于所有上述因素的影响，由不同研究者提供的刀具材料性能数据会出现很大的分散性，这就提出了用统计方法评定其强度指标的课题。

此外，不能直接地按照单向应力状态所得出的标准来评定刀具材料的强度。譬如说，工具钢的强度比硬质合金高的概念，只适用于弯曲和拉伸的破坏情况，而在受压缩时，工

具钢的强度却要比硬质合金低 $\left(\frac{\sigma_{-BTigRg}}{\sigma_{-BP18}}=1.2\right)$ 。因此，刀

具切削部分强度的安全系数，应该根据切削力所造成的复杂应力状态来决定，同时对工具材料强度问题应考虑采用统计的方法来处理。

由于切削过程总是动态的，刀具材料的疲劳强度便具有很大的意义。

为了测定在周期性弯曲下硬质合金的疲劳极限，曾经进行过广泛的研究[25]。因为刀具的切削部分往往是受热并在高温下工作的，因此必须根据切削试验的温度来研究刀具材

料的疲劳强度。由Л. Г. 库克林所作的在 $r=0.1$ 和 0.6 情况下的试验结果如图2所示。当温度在 200°C 时, 具有最高疲劳强度的是WC-TiC-TaC-Co合金, 而在较高温度下, 含有6%钴的WC-TiC-Co合金(T15K6)显示出高的强度。这两种材料在 20°C 时强度达最小值。含钴量更少的T30K4合金, 其疲劳极限在 600°C 以内时较T15K6低15~20%。当在更高的温度下, 却会出现相反的情况。WC-Co合金也产生同样的现象: 含钴量为8%的合金(BK8), 较之含钴量为4%的合金(BK4)具有较高的疲劳极限。但这个规律仅适用于 650°C 以下。已进行的许多研究工作表明, 疲劳强度和静态拉伸强度之间存在着依赖关系。对于硬质合金, 按全苏硬质合金科学研究所(ВНИИТС)的资料, 它们的数值是 $0.51 \sim 0.54$ 。

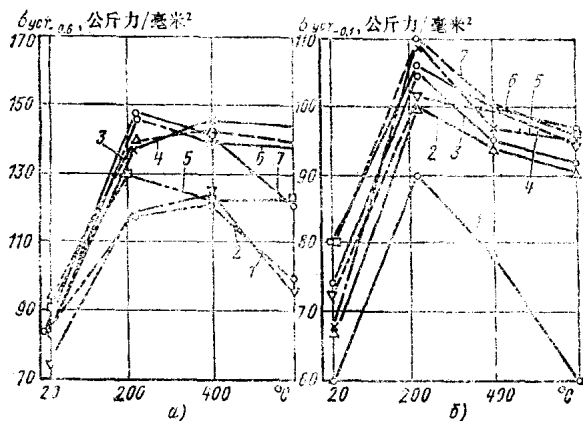


图2 疲劳极限和温度之间的关系

a) 当 $r=0.6$ 毫米时 b) 当 $r=0.1$ 毫米时, 按Л. Г. 库克林的资料
(1-T15K6 2-BK8 3-TT7K12 4-TT10K8 5-T5K10 6-T5K12 7-TT20K8)

试件表面层的质量对疲劳强度具有很大作用 [25] (图3)。把试件表面从 $R_z=2.5$ 微米研磨到 $R_z=0.08$ 微米, 可提高疲劳强度一倍。在被磨件上沿磨削痕迹纵向的疲劳强度可提高 15~20%, 而用研磨代替用绿色碳化硅砂轮刃磨又可提高强度 30%。这个结论对于保证刀具强度的刃磨工艺很重要。

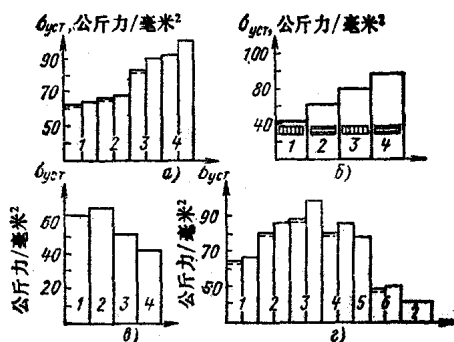


图3 疲劳强度与下列因素的关系[25]

a) 粗糙度: 1—供应状态 2—磨削过的表面 3—用碳化硼研磨过的表面 4—用金刚石砂轮磨过的表面 b) 加工痕迹的方向: 1、2—磨削过的表面 3、4—用金刚石砂轮磨过的表面 c) 残余应力: 1—供应状态 2—喷丸加工 3—磨削 4—电火花加工 d) 加工方法: 1—磨削 2—碳化硼研磨 3—金刚石加工 4—电火花加工 5—化学-机械加工 6—阳极机械加工 7—电火花加工 —BK8, ==T5 K10

刀具材料的冲击韧性是重要的特性。WC-Co类硬质合金的冲击韧性随钴含量的增加和温度的上升成比例地提高(图4), 而对于WC-TiC-Co类硬质合金, 其冲击韧性实际上是不变的。M. Г. 洛沙克的研究表明, 当承受周期性冲击负载时, 试件的寿命服从于威伊布尔分配定律, 它随着钴的含量的增加而提高, 特别是随着孔隙度的减少(减少到1/8~1/9)而提高。可是对于抗弯强度 σ_{us} , 则孔隙度只降低 σ_{us} 15%。当承受周期性冲击负载时, 合金BK8的疲劳强度较之承受谐波负载时降低20%。

将WC-TiC-TaC-Co合金在周期性的冲击压负载下进行

试验表明, 含 7.5% TaC 的合金比不含 Ta 的冲击强度要大 24 倍多, 在这些试验中显示出具有较高的动态屈服极限。

分析刀具切削部分的破坏情况证实, 不论在间断加工或连续加工过程中, 都可以在接触区里发现裂纹, 这些裂纹是由于切削条件不稳定所造成的。在切削力作用下, 在接触区里仅仅有很大的压应力, 因此它们波动的波幅对刀具的疲劳强度有着很大的作用。随着刀具切削部分的磨损, 切削力及其波动值更会增大, 这导致刀具切削部分强度的安全系数下降。

因此, 在和刀具切削部分应力状态相

当的高温条件下, 承受周期性不均匀压力时, 刀具材料的疲劳极限有着重要的意义。基辅工学院在这方面的研究中, 曾采用了三种基本的硬质合金和高速钢的试件: WC-Co(BK8), WC-TiC-Co(T15K6) 和 P6M5。图 5 系试件的显微组织,

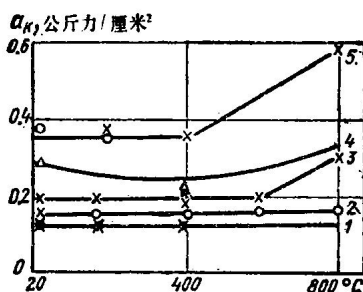


图 4 各种不同含钴量 WC-Co 及 WC-TiC-Co 合金的冲击韧性 with 试验温度之间的关系 [24]

1—T15K6 2—BK4 3—BK8
4—T50 K20 5—BK10

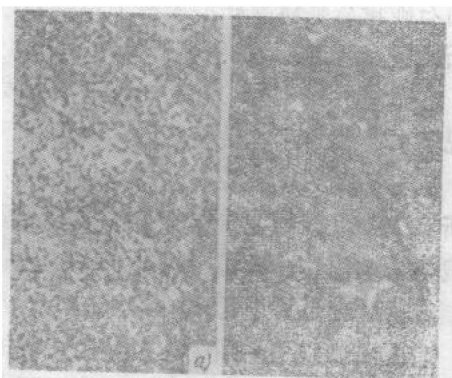


图 5 试件的显微组织

a) 合金 T15K6 ($\times 1350$) b) 合金 BK8 ($\times 1350$)

其机械性能列于表1。

表1 试件的机械性能

参 数	材 料		
	BK 8	T15K6	P6M5
强度极限(公斤力/毫米 ²)	401	412	388
硬度HRC(公斤力/毫米 ²)	87*	92~93*	56~57
晶粒尺寸(微米)	3~5	3~4	—
孔隙度(%)	0.2	0.1	—
碳化物的不均匀性(级)	—	—	2~3

* 此处似为 HRA 之误——译校者。

为了保证组织均匀性，硬质合金试件是用圆柱成型金刚石砂轮从整体圆柱形坯料上切取的。试件的圆角槽用金刚石研磨膏研磨至 $R_a=0.080$ 微米的表面光洁度。

刀具材料应力的波动是在高温下发生的。为了研究该情况下的疲劳强度，曾经创造了一种专门的装置。

杠杆式的试验装置(图6)由下列基本机构和自动装置所组成：反向器；带有加载机构的上横梁；试件按程序的加载机构；加载杠杆稳定机构(保持水平)；试件加热装置；控制装置及变形温度记录装置。

反向器乃是在四个小圆柱上移动的四块平板12。拉杆14和11传递给外面两块平板以拉力，而中间两块平板则用来压缩试件。为了避免试件8歪斜，把它安装在硬质合金的球式支座13上。为了防止试件的碎片溅出，反向器用外壳罩上。为了能测量试验过程中试件的电阻变化及供给炉子的电流，下拉杆11在固定时用塑料套绝缘。

带有加载机构的上横梁，是用于对反向器的拉杆传递拉

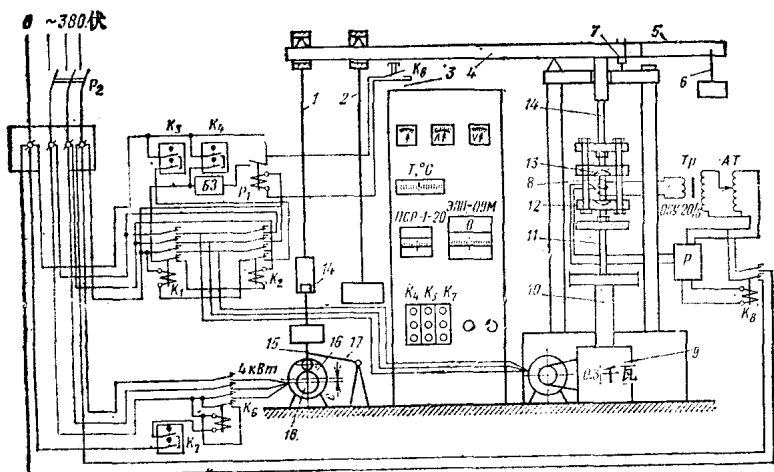


图6 加载到4000公斤力和加温到800℃下测定刀具材料疲劳强度的装置示意图

力的。试验负载依靠上抓斗传递给拉杆，而上抓斗则是通过中间滑环与装在自动调位垫板上的杠杆相连接。在杠杆4的另一端上施加试验负载：加在拉杆2上的是造成周期性不对称的固定负载；加在拉杆1上的是决定 σ 的变化负载。杠杆臂的比例是1:10:15，保证得到从0到8000公斤力的固定的和变化的负载。为了使系统平衡，试件加载时，杠杆上再装一个小杠杆5，通过拉杆6可在小杠杆上附加负载。为了消除杠杆系统的横向振动，它可以在导架7上移动。

试件按程序加载机构安装在拉杆1的下面，将拉杆上的重物抬起即可实现系统周期性的减载。重物的抬起靠电动机($N=4$ 千瓦)实现。电动机轴的转动，经过减速器16传递到偏心套筒18，套筒固定在减速器的从动轴上。由于双倍的偏心距，套筒外表面的振摆可在0~24毫米范围内调节，以决