

✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂
✂
✂ 机械加工零件的表面质量 ✂
✂
✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂✂

(下 册)

西北工业大学一〇〇八教研室

一九八二年十二月

目 录

第三章	机械加工残余应力与强化	3—1
§ 1	表层残余应力产生原因	3—1
§ 2	切削加工的残余应力	3—4
一	车削中的残余应力	3—4
二	铣削中的残余应力	3—9
三	磨削中的残余应力	3—11
四	残余应力的测量	3—21
§ 3	切削加工中表面层的冷作硬化	3—23
一	车削和铣削加工中的冷作硬化	3—24
二	钻削、铰削和拉削加工中冷作硬化	3—28
三	磨削加工中的冷作硬化	3—29
四	磨削淬火钢的冷作硬化	3—32
五	磨削其他材料的冷作硬化	3—36
§ 4	零件表层的形变强化工艺	3—37
一	金属表面的冷压强化	3—37
二	冷压强化加工方法	3—39
第四章	电加工表面质量	4—1
§ 1	电解加工表面粗糙度	4—1
一	电解加工表面质量的特点	4—1
二	表面粗糙度的整平原理	4—2
三	表面粗糙度形成机理	4—6
§ 2	影响电解加工表面粗糙度的因素	4—7
一	工件材料对表面粗糙度的影响	4—7

华北石油学院 83.11.23

二	电解液成份对粗糙度的影响.....	4—11
三	工艺参数对表面粗糙度的影响.....	4—12
四	阳极膜的状态与表面粗糙度的关系.....	4—16
§ 3	电解加工的表层缺陷.....	4—20
一	晶间腐蚀.....	4—20
二	选择性腐蚀.....	4—21
三	短路烧伤及接触不良烧伤.....	4—22
四	表面黑皮.....	4—23
§ 4	电解加工另件表层特性.....	4—24
一	零件的强度、塑性和硬度.....	4—24
二	零件的耐磨性.....	4—25
三	零件的耐蚀性与高温抗氧性.....	4—26
四	氢脆性.....	4—27
§ 5	电解加工零件的疲劳强度.....	4—30
一	电解加工和机械加工后零件疲劳强度 的比较.....	4—30
二	表面粗糙度对疲劳强度的影响.....	4—34
三	电解加工后不同的加工方案对疲劳强度 的影响.....	4—36
四	电解加工疲劳试样的制备.....	4—38
§ 6	电火花加工表面粗糙度的构成.....	4—40
一	放电凹坑直径.....	4—41
二	放电凹坑深度.....	4—43
§ 7	电火花加工表面质量.....	4—44
一	表面光洁度.....	4—44

三	影响表面光洁度的主要因素.....	4—4 5
§ 8	电火花加工后表层状态.....	4—4 9
一	表面变化层.....	4—4 9
二	表面变化层的机械性能.....	4—5 4
第五章	零件的表面质量对疲劳强度的影响.....	5—1
§ 1	疲劳试验方法.....	5—1
§ 2	表面几何构形对疲劳强度的影响.....	5—6
§ 3	残余应力对疲劳强度的影响.....	5—1 8
§ 4	金属表面层形变强化对疲劳特性的影响.....	5—2 3
§ 5	机械加工后表面质量参数对疲劳的 综合影响.....	5—3 1
	参考文献.....	5—3 9

第三章 机械加工残余应力和强化

金属在进行热处理，热加工和机械加工等工艺过程中，都会受到外力或内力的作用。当这些力去掉后，金属物体内仍然存在并自行平衡的应力称为残余应力。已加工表面常有残余张应力和残余压应力之别。残余张应力容易使已加工表面发生裂纹，降低零件的疲劳强度；而残余压应力有时却能提高零件的疲劳强度。工件各部分的残余应力如果分布不均匀，便会使工件发生变形，影响工件的形状和尺寸精度。

§ 1 表层残余应力产生原因

表层残余应力产生的原因有：

一 塑性变形引起比容变化：在切削过程中金属表层的塑性变形和强化都会导致金属密度的降低和比容上升。表层金属体积的增大将受下层金属的阻挠，因而表层产生压应力，下层产生拉应力。

二 弹塑变形应力：在切屑从基体金属分离的那时，以及在刀具后面对工件表面的摩擦作用下，表层中金属晶体将在切削方向产生弹塑性拉伸变形。这种切向的表层金属伸长将受到下层金属的阻挠，从而在表面上层内形成压应力，而下层则形成拉应力。

三 热应力：在切削过程中，从切削形成区内析出的大量切削热可以在瞬时内把表层金属加热至极高的温度，可达 $1000-1500^{\circ}\text{C}$ 。但是离表层 $0.05-0.01$ 毫米的深处将仍处于室温。因此，表层的高温将随着热量从冷却介质和内部金属导去而迅速冷却，有时这种冷却速度足以使工件表层产生第二次淬火的效应。表层在受热和冷却中内应力变化过程如下：

假定金属表层在受热后温度沿截面上的分布如图 3—1 a 所示。 t_H 代表金属的熔解温度。 t_p 代表金属进入完全塑性流动状态时的温度，当金属达到和超过 t_p 时，金属可以自由膨胀而不会产生内应力。 t_s 代表表层下某层金属的温度，在此温度下，由于材料的屈服极限的下降，金属受热变形而产生的内应力已超过屈服极限，开始产生塑性变形，所以 t_s 是表层中金属弹性变形和塑性变形区域的分界温度。在 t_s 以上（区域 2）是塑性变形区，在 t_s 以下（区域 3）是纯弹性变形区。 t_H 代表室温，在此温度下（区域 4），金属不再受切削热影响。

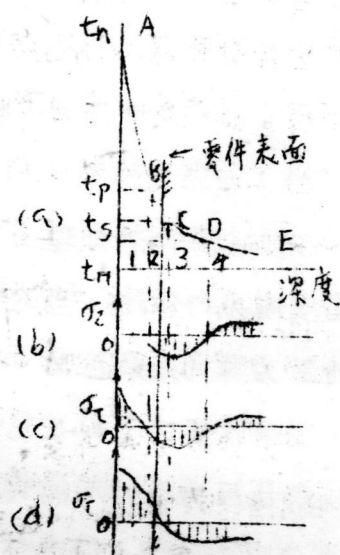


图 3—1 零件表层的残余热应力的形成机构

在刀具切削的瞬间（图 3—1 b），假定表面层的温度（区域 1）超过了 t_p ，金属因热膨胀而塑性剪变，将不存在内应力，介于 t_p 和 t_H 间的金属层（区域 2，3）处于受热膨胀状态，但是受到下层室温金属的阻止，无法得到应有的伸长而处于压缩状态，产生压应力。而材料的屈服极限是随温度的升高而降低的，所以，可以假定在温度高于 t_s 的金属层（区域 2）内应力有可能达到或超过金属在该温度下的屈服极限，就产生了局部的弹性变形，这种变形相应地降低了原有的压应力。在 t_s 和 t_H 间的金属则尚处在弹性状态，在热应力产生作用下会产生相应的弹性压缩变形。在 t_H 以下的金属因温度保持在室温不变，将不会产生线性的变形，但在外层金属热胀的影响下，将产生与之平衡的拉伸应力。

当切削作用终止而开始冷却的瞬间(图3—10),原表面无应力的塑性滑移层迅速冷却而收缩,受到下层的阻碍,因而产生正应力,使下层(区域2,3)的负应力进一步增长。

当工件完全冷却,内外温度平衡以后(图3—1d),表面1、2两层在受热膨胀中发生了塑性压缩变形,冷却后的实际长度比受热前的原长度短,因而1层的正应力进一步上升,有2层也随着冷却而由负应力变为正应力。下面3、4两层由于应力平衡而产生负应力。

在通常的切削条件下,例如车、铣等表面层的最高温度一般不易达到 t_p ,因此在切削的瞬时内,表面总带有负应力,其值应该等于金属在该温度下的屈服极限 σ_s 。在冷却后,表层中正负应力的转换点仍应与 t_s 点相应,即处在膨胀过程中金属的塑性区和弹性区的分界面上。

四 金相组织变化引起的应力:在金属切削加工中,表层受热和冷却不仅会引起热应力,而且还会引起金相组织的变化。不同的金相组织具有不同的比重,也就是说具有不同的比容积。如果金属局部发生金相组织变化,产生了与基体不一致的组织,由于表面层比容积发生变化,必然会导致内应力的产生。这特别显著的是发生在钢的马氏体和奥氏体的相变上。马氏体和奥氏体与其他金相组织相比,其比重相差很多。比重 γ 值如下: $\gamma_{\text{马}} \approx 7.75$ (在各种组织中,比重最小); $\gamma_{\text{奥}} \approx 7.96$ (在各种组织中,比重最大); $\gamma_{\text{铁}} \approx 7.88$;珠 ≈ 7.78 。

综上所述,可知切削加工中表层内的残余应力可以来自四个方面,即:

1. 塑性变形引起的比容增长,导致产生负应力 σ_- ;
2. 表层不均匀弹——塑性拉伸变形,产生切向负应力 σ_- ;

3. 表层的局部受热和冷却，导致产生正应力 σ_+ ；

4. 金相组织变化引起相对的比容和晶体尺寸变化，导致产生的应力可正，可负（ σ_+ 或 σ_- ），视具体的切削条件而定。

上述四种应力将同时出现，综合地影响着残余应力沿另件表层深度方面的分布规律。

§ 2 切削加工中的残余应力

一、车削中的残余应力

车削中工件表层内的残余应力的大小，正负和分布特征是和切削用量的主要参数（ V 、 S 、冷却条件等），刀具的几何参数和表面质量，以及被加工材料的化学成份和金相组织有着密切的内在联系。现有的文献资料指出：车削中表层残余应力的变化是极其复杂的，从数值上说可以在20—80公斤/毫米²，甚至100公斤/毫米²的范围内变化；应力分布的深度在0.05—0.1毫米间内变化；当采用大负前角的车刀加工时，应力分布深度可达0.65毫米。从其沿深度方面的数值分布来说，是可正、可负或正负并存的。下面就几个主要工艺参数与残余应力之间的联系作一概括的叙述。

车削速度 V ：车削速度对残余应力的影响主要决定于热量的作用时间和表层受热后塑性变形的程度。如用硬质合金

刀具车削45钢，只要刀具前角不是负值，在所有的切削速度范围内，表层都将形成正应力，表层金属也不会发生组

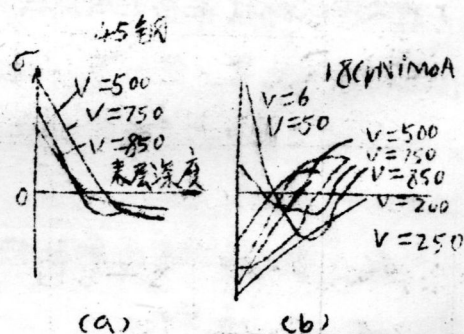


图 3—2 车削速度对残余应力的影响

只变化。显然，这里形成的主要是热应力。随着切削速度的上升，切削热积聚在表面薄层内，金属的变形阻力下降，而塑性变形程度上升。因此热应力也相应下降（图3—2a）。

当车削合金钢18CrNiMoA时（图3—2b），情况与上述有所不同，用同样的正前角刀具，在切削速度 $V < 200$ 米/分时，表层残余应力是正的 σ_+ ；当 $V > 200$ 米/分时，表层就会出现负的残余应力 σ_- 。这是由塑性变形和淬火作用引起金属比容的增加所造成的，例如，当 $V = 20$ 米/分时，表层温度已接近于18CrNiMoA的淬火温度。如果切削速度由此继续上升，表层局部淬火的现象和金属比容逐步上升，负应力随着增长，热应力就相对下降。到 $V = 50$ 米/分时，表层温度已足以使金属发生完全淬火，热应力 σ_+ 显著下降；当 $V = 200$ 米/分时，由比容增长所引起的压应力占优势，表层出现负应力 σ_{-1} 。

车削耐热合金ЭИ437，当切削速度 $V = 2 \sim 7.5$ 米/分时，表面层中不论在切向还是轴向都出现残余应力。其值如表3—1所示。

表3—1 在不同切速度下的硬化和残余应力

切削速度 V 米/分	硬 化		残 余 应 力			
			切 向		轴 向	
	深 度 h(毫米)	程 度 N(%)	σ_{Tmax} (公斤/毫米 ²)	深度 (毫米)	σ_{0max} (公斤/毫米 ²)	深度 (毫米)
2	0.14	49.7	+53	0.04	+13	0.35
6	0.13	44.8	+50	0.055	+20	0.02
25	0.10	42.4	+70	0.06	-40	0.6
75	0.097	35.4	+82	0.075	—	—

进给量 S (毫米/转): 进给量对表层残余应力的影响是比较大的。提高进给量则切削厚度增厚, 摩擦和热量显著增加, 因而应力的分布深度和热应力值也随着增长。图 3—3 是车削 20 钢时进给量与表层残余应力之间的关系。随着 S 的增大, 热应力值和分布深度都相应增加。

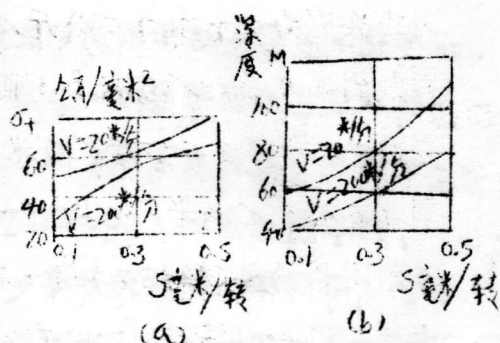


图 3—3 进给量对残余应力的影响

车削耐热合金 ЭИ617 时, 进给量 S 对表层残余应力的影响如表 3—2 所示。当进给量增加时, 使切削厚度增加, 引起表面层内残余应力显著地增加。

表 3—2 各种进给量下的硬化和残余应力 ($V = 5$ 米/分; $t = 0.5$ 毫米)

进给量 S (毫米/转)	硬 化		残 余 应 力	
	深度 h (毫米)	程度 $N(\%)$	σ_{Tmax} (公斤/毫米 ²)	深度 (毫米)
0.15	0.07	50	20	0.05
0.4	0.1	73	23	0.11
0.6	0.12	73	32	0.12
0.8	0.14	92	50	0.17

切削深度 t : 切削深度的增加, 残余应力稍有提高。当以切削速度 $V = 7$ 米/分和进给量 $S = 0.4$ 毫米/转车削耐热合金 ЭИ437 时, 切削深度在 $t = 0.3 \sim 3$ 毫米的范围内, 表面层内产生的最大切

向残余应力 σ_T 由37公斤/毫米²增加到50公斤/毫米²，而轴向应力 σ_0 则由25公斤/毫米²增加到35公斤/毫米²。图3—4是车削耐热合金ЭИ437A时，残余应力 σ_T 沿表面层深度的分布对于切削深度的关系。

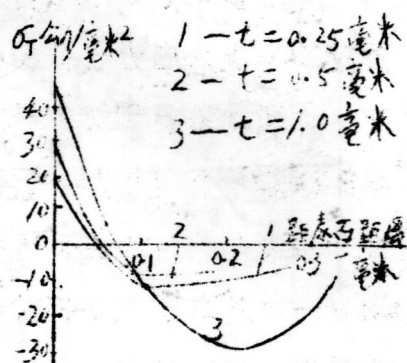


图3—4 不同切削深度对切向应力的关系

刀具前角 γ ：前角在切削过程中对塑性变形和切削热的关系非常密切。上面曾经提到以正前角车刀切削45钢不论在何种速度下所得的残余应力都是正的。当采用大负前角 $\gamma = -30^\circ$ 的车刀时，把车削速度提高到750米/分，表层内就可以出现负压力。至于车削易淬硬的合金钢18CrNiMoA，用 $\gamma = -30^\circ$ 的负前角车刀，车削速度只要提高到150米/分时，表层内也同样能出现负应力（图3—5）。这主要是由于采用大的负前角车刀，在切削过程中能在刀具前方产生极大的塑性变形，使金属比容增长，构成所需的负压力 σ_{-1} 。

刀具磨损：刀具磨损将严重影响表层残余应力的分布规律。一方面说，刀具磨损使表层金属在外部摩擦作用下产生附加的塑性拉伸，于是在由刀具前面引起的压应力上附加部分应力；另一方面，磨损使刀具对金属的摩擦作用加强，表层热量进一步提高，金属软化，压应力部分消失，拉应力相对增加。特别是在加工易于淬透的合金钢和高碳钢时，后面磨损所引起的上述现象可以使表层金属产生二次淬火组织，而在下层出现高温回火烧伤。图3—6中所示，当刀具尖锐时，即刀具磨损量 $\varepsilon = 0$ ，表层均为负应力；当 $\varepsilon = 0.3$ 毫米时，表层内已出现高温回火层。

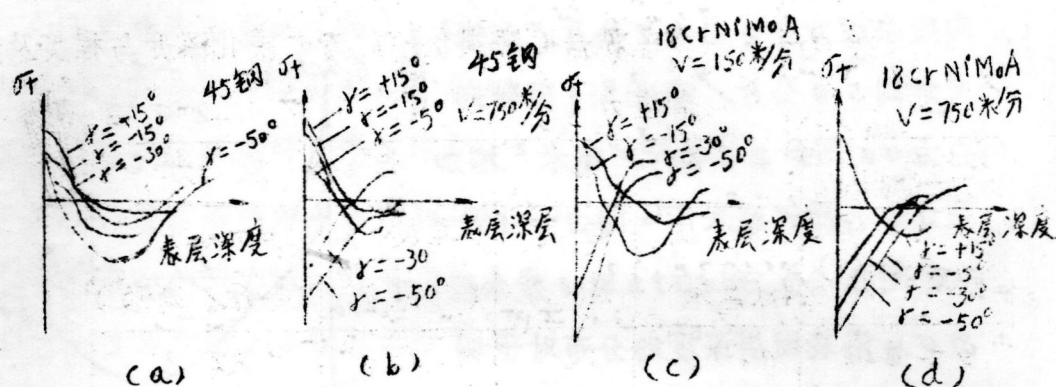


图 3—5 车刀前刀对残余应力的影响

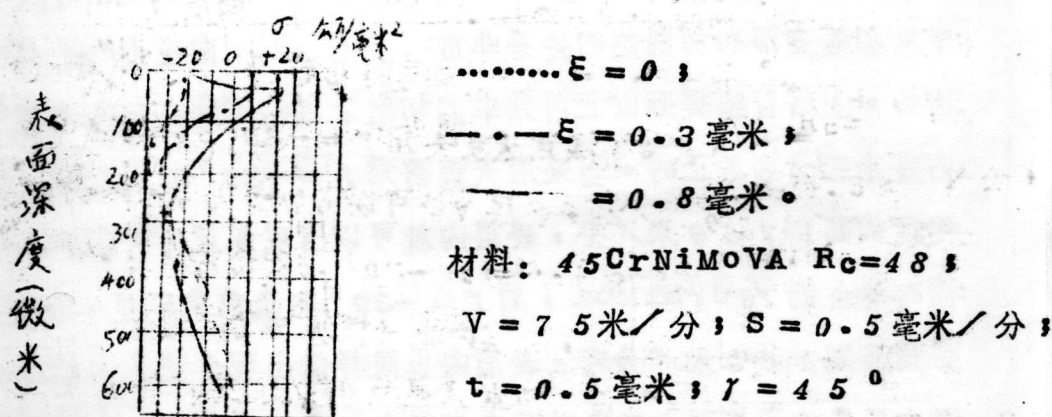


图 3—6 刀具磨损对表层残余应力的影响

切削耐热合金时刀具的磨损主要发生在后面，刀具前面的磨损很不明显，因而，当刀具后面的磨损值 A_s 增加时，已加工表面的变形就随之而增大。

当用银 YG 8 刀片的车刀加工耐热合金 ЭН6П7 时，在 $V = 5$ 米/分时， $S = 0.4$ 毫米/转及 $t = 0.5$ 毫米的情况下，车刀后面的磨损增大，正如表 3—3 所示残余应力增加。

被加工材料：在同样的切削条件下，不同的被加工材料可以得到不同的残余应力。例如：前面提到的碳钢和耐热合金的车削表层内，残余应力都是正的，而 18CrNiMo 在切削速度达到一定值后残余应

表 3—3 在车刀后面磨损值不同时的硬化深度与程度及残余应力

车刀的磨损值 h_s (毫米)	硬 化		残 余 应 力	
	深 度 h (毫米)	程 度 $N(\%)$	深度 (毫米)	σ_{Tmax} (公斤/毫米 ²)
0~0.1	0.1	73	0.125	21
0.5	0.12	77	0.165	34
0.8	0.15	99	0.22	32

—毛钢；—·—淬火+250℃

回火；...淬火+550℃回火。

图 3—7 30CrMnSi 的车削

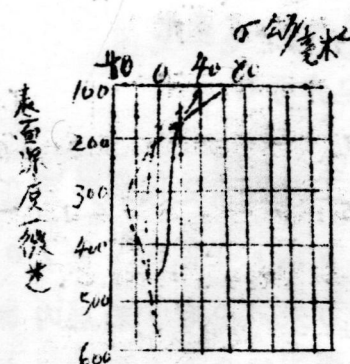
残余应力

($V = 165$ 米/分；

$S = 0.12$ 毫米/转；

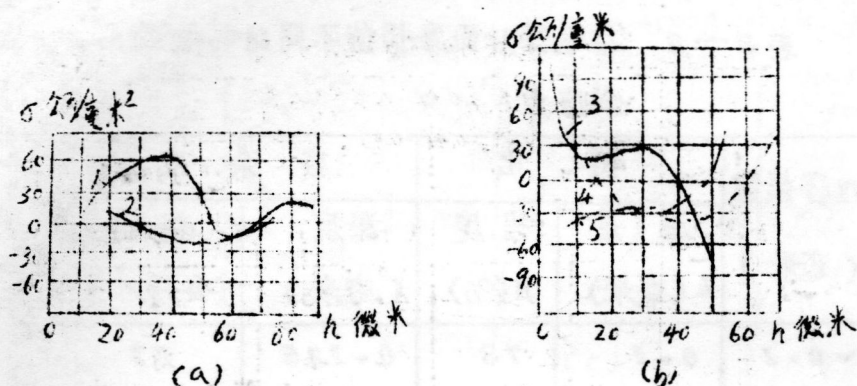
$t = 0.5$ 毫米；刀具 YT15；

$\gamma = 0^\circ$ ；磨损量 $\varepsilon = 0.15$ 毫米)



力可以由正变为负。又如合金钢 30CrMnSi 在经热处理之前，车削残余应力在整个表层内都是正的（图 3—7）。经过淬火并在不同温度下回火后，车削残余应力就显著不同：上表层是正应力，而下表层出现了负应力。原因就在热处理提高了材料的强度，滑移面内塑性变形阻力增加，刀具前方的塑性挤压区扩大了。因而变形层的深度增长，在一定深度以下（~20 微米）存在着压应力。强度愈高压应力也愈大。

三 铣削中的表层残余应力



1— $V = 16$ 米/分；2— $V = 76$ 米/分；

3— $V = 210$ 米/分；4— $V = 490$ 米/分；

5— $V = 610$ 米/分。

45钢； $S_z = 0.5$ 毫米/齿； $t = 2.5$ 毫米

图3—8 端铣中表层残余应力分布

对于端铣来说，应力的分布与大小与工艺因素之间的关系在很多场合下与车削中的情况相仿。例如端铣45钢，在低速 $V = 10 - 60$ 米/分和相当大的切削速度 $V = 210$ 米/分时，表层内都是正的残余应力，达60公斤/毫米²。如果进一步提高切削速度至490米/分，表层负应力成份上升，热应力相应缩小，当 $V = 610$ 米/分时，表层完全转变为负应力，达到-45+ -50 公斤/毫米²（图3—8）。

同样，加大刀片的负前角，可以提高表层残余应力和应力分布的深度。刀具的磨损对残余应力的影响与车削一样。

端铣钛合金TC4，采用 $V = 30.48$ 米/分； $S_z = 1.01$ 毫米/齿，图3—9表示，使用最大磨损为0.76毫米的锐利刀具铣切端面时，在试件上或靠近表面处出现正残余应力，使用钝刀具铣端面时，则在表面附近出现负残余应力。

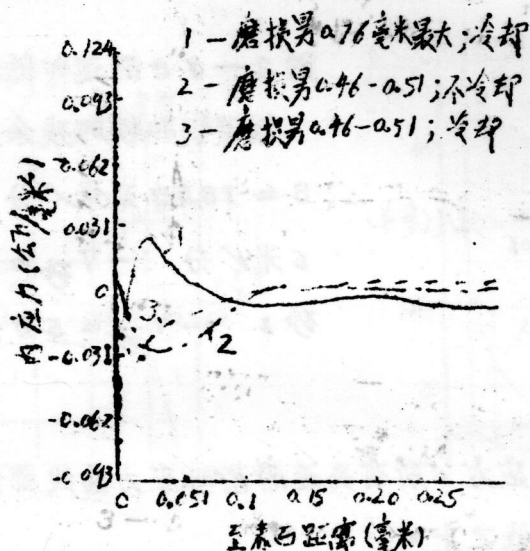


图 3—9 端铣钛合金 TC4 表层残余应力分布

三 磨削表面层的残余应力

1. 低碳钢磨削表面层的残余应力:

低碳钢的特点是导热性良好、机械性能低及塑性大，在磨削中表层易于产生塑性变形，在中等程度的磨削用量中表层多为正应力 σ_+ ，在较低和较高的磨削用量中表层在极大多数情况下产生负应力 σ_- ，达 $-40 \sim -100$ 公斤/毫米²，应力的分布深度达 $0.03 \sim 0.035$ 毫米左右，最大应力 σ_{max} 分布于表层 $0.005 \sim 0.008$ 毫米处。在外圆磨削中与残余应力密切有关的主要的工艺因素有以下几个：

(1) 砂轮的旋转速度 $V_{砂}$ ：提高砂轮的转速，单颗磨粒的平均切削厚度降低，塑性变形的深度应有所缩小，同时单位时间内参与切削的磨粒数增多，即热脉冲数增加，所以与常速磨削相比，高速磨削时热量显著增加，热应力比常速磨削中的高，而应力分布层则比较薄。

图 3—10 中的应力曲线是当 $t = 0.025 \sim 0.05$ 毫米时铁在高速磨

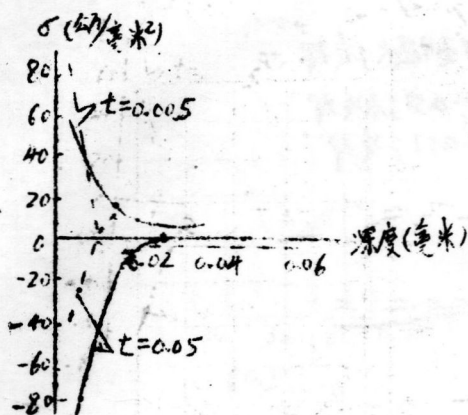


图 3—10 高速和低速磨削中、
低碳钢和铁的残余应力分布
 $S = 1000$ 毫米/分； $V_I =$
 6 米/分 — $V_{砂} = 30$ 米/秒；
... $V_{砂} = 50$ 米/秒

削和低速磨削下表层残余应力，所有高速磨削的应力曲线都位于同种用量的常速磨削的应力曲线之上。

(2) 磨削深度 t ：在较小的纵向进给量 $S_{纵} = 1000$ 毫米/分和工件转速 $V = 6$ 米/分中，当磨削深度 $t = 0.005-0.01$ 毫米时，由于低碳钢和铁的塑性较大，强度较低，单颗磨粒的切削厚度不大，工件表层的塑性变形发展不匀，金属比容有较大增长，负残余应力值也较大。当磨削深度上升至 $t = 0.025-0.0375$ 毫米，单颗磨粒的切削厚度增长，摩擦作用和切削热有较大的提高，热应力的增长超过了由塑性变形引起的压应力，工件表层具有较大的正应力。当 $t > 0.0375$ 毫米，并进一步提高时，热量增长，使表层进一步软化，不均匀的塑性变形迅速增长，压应力又超过了热应力，工件表层仍又出现负应力，此负应力并随着 t 的上升而进一步增长。残余应力的变化如图 3—11a 所示。由于高速磨削中热应力比常速磨削的大，故高速磨削中的应力变化曲线位于常速磨削的应力变化曲线之上。

如果提高工件转速和工件的纵向进给量 $V_I = 39$ 米/分和 $S_{纵} = 3750$ 毫米/分，则缩短了砂轮与工件的接触时间，降低了热效应。提高了由不均匀塑性变形引起的压应力，使热应力下降而压应力上升。在常速磨削中，整个应力曲线都将在负值区内变化，见图 3—11b

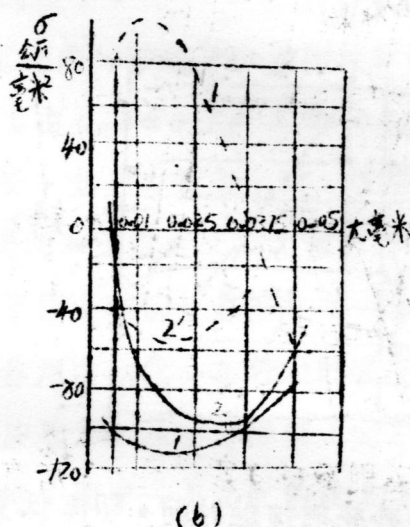
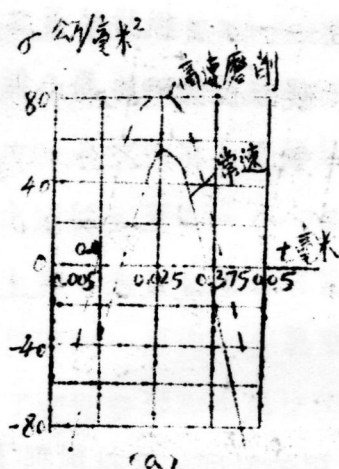


图 3—11 磨削深度对残余应力的影响 (材料: 低碳钢、铁)

..... 高速磨削 ————— 低速磨削

1、1' — $V_{\text{工}} = 39 \text{ 米/分}$; $S = 3750 \text{ 毫米/分}$

2、2' — $V_{\text{工}} = 60 \text{ 米/分}$; $S = 3750 \text{ 毫米/分}$

曲线 1。在高速磨削中, 由于热应力较大, 在 t 很小时 ($t = 0.005$ — 0.1 毫米), 表层不再有负应力, 以后随着 t 的增长, 应力变化曲线急剧下降, 到 $t \geq 0.0375$ 毫米时, 重又出现负应力, 见图 3—11b 曲线 1'。

如把工件转速进一步提高至 $V_{\text{工}} = 60 \text{ 米/分}$, 则砂轮与工件的接触时间和热效应进一步缩短, 大量热积聚在表面层内, 使表层软化, 在磨粒的作用下, 塑性变形有了更完全的发展, 金属比容上升, 不论是高速磨削还是常速磨削, 表层中都将出现负应力, 如图 3—11b 内曲线 2 和 2' 所示。

(3) 工件纵向进给量 $S_{\text{纵}}$: 提高工件纵向进给量 $S_{\text{纵}}$, 可以缩短