

金属压力光加工

斯涅捷尔 著



1964.4 北京

类号: 621.787.4

621.923

出 版 者 的 話

本书系根据苏联列宁格勒航空仪表研究所斯涅捷尔 (Ю.Г. Шнейдер) 所著 “Чистовая обработка металлов давлением” 一书譯出。原文书是苏联机械工业出版社 1963 年出版的。

金属压力光加工, 即用滾子或滾珠的冷滾压加工, 基本上是一种对金属零件表层的机械强化工艺, 但同时还能起到提高零件表面光洁度 (滾压一次提高 2~3 級, 甚至 5 級) 和几何精度的作用。加工效率高, 所用設備和工具一般也比較简单。这种工艺在国外机械制造和仪器仪表制造中, 特别是中、小批生产条件下, 均已获得相当广泛的应用。

本书根据大量的試驗研究結果, 討論了外圓柱表面、平面、特型面和孔的冷滾压加工; 介紹了各个基本加工参数的試驗和計算方法, 以及如何依据零件設計与使用特点選擇具体加工方式和工具結構的問題。书中引用了不少的試驗資料。所有这些对于在生产中推行和掌握压力光加工工艺, 当有所裨益。

为了适应客观上的需要, 本书是在較短的时间內組織几位同志合作譯出的。参加本书翻譯的, 有孙岭梅、刘书麟、刘文博、沈魯和孙荣科。由周倜武和孙荣科校对。由于時間短促和譯校者水平有限, 因之翻譯不当甚至錯誤处可能不少, 敬希讀者指正。

1964 年 4 月

目 录

序 言	(1)
第一章 压力光加工的实质、特点和应用范围	(3)
第二章 外圆柱表面的加工	(26)
一 用滚子和滚珠的滚压	(26)
二 夹在滚子之间的滚压	(123)
第三章 孔的加工	(143)
一 用挤光工具的推挤和拉挤	(145)
二 用滚子和滚珠的滚压	(179)
三 用击打式内滚压器的滚压	(198)
第四章 平面的加工	(230)
第五章 特形表面的加工	(246)
一 球面的加工	(246)
二 旋转体特形表面的加工	(254)
三 特形直纹表面的加工	(259)
四 螺紋和輪齿表面的加工	(261)
第六章 压力光加工对机器和仪器零件某些使用性能的影响	(269)
一 对磁性的影响	(270)
二 对击穿电压的影响	(275)
三 对腐蚀安定性的影响	(276)
四 对表面波反射的影响	(277)
五 对光的反射的影响	(281)
六 对磨合与磨损的影响	(284)
結 論	(295)

序 言

現代機器和儀器製造業的發展特點是，在工作條件愈益繁重的條件下不斷提高機器的速度和功率及儀器的精度和可靠性。因此，提高對機器和儀器零件製造質量，首先是光加工質量的要求。零件製造工藝過程中終加工工序的重要意義越來越大，這已成為現代化生產的特點。這也就是為什麼所有工業國家對改進金屬的光加工方法及研究和在生產中推行新的優質高效的終加工工藝給予極大重視的原因。

特別是近年來，對於切削光加工具有本質優越性的金屬零件表面壓力光加工方法，在一切工業部門獲得了日益廣泛的應用。

壓力光加工在獲得高的表面光潔度的同時，還能達到一般切削光加工所不能達到的表層強化效果，因此所加工出的零件具有高的使用性能：金屬表層的硬度、耐磨性、屈服極限和疲勞極限都提高了。甚至如銅和鋁等軟的塑性金屬的表面，經過壓力光加工也很光潔，不會有象磨料光加工那樣磨料碎粒嵌入金屬表面的現象。正是這些優點，加上實際上在任何生產條件下都具有的經濟性良好和工具製造簡便的優點，決定了金屬壓力光加工方法的迅速發展和在生產中廣泛推行。

本書第一章闡述各種壓力光加工方法的實質、特點和應用範圍，以及這些方法在經濟指標和質量指標方面的效果。加工效果在很大程度上決定於能否正確選擇加工方式、工具結構和加工過程參數。現在已經制定出大量的不同壓力光加工方式和工具結構。但是由於對其中的許多問題研究不夠，在經濟的應用範圍方面缺乏比較分析和可靠的建議性資料，因而常常導致塑性變形加工的效率下降。

第二至第五章分別闡述外圓柱表面、內圓柱表面、平面和特

形面的压力光加工方法；它們的实质、特点、应用范围，所用的設備和工具，加工规范，技术经济指标。

金属压力光加工，在对表层机械物理性能（微观硬度、冷作硬化程度和深度、应力符号和应力值、在电、磁和光学等方面的特性）有规定要求的零件制造中将得到特别广泛的应用。在这些情况下，工具结构的选择问题，主要是加工规范和条件的选择问题，尤其重要。

第六章论述了金属压力光加工对表层机械物理性能的影响的研究结果。

书中阐述的加工过程、它们的实质、特点、技术经济指标以及试验研究结果，会使读者获得关于金属压力光加工可能性的正确概念，并且对于如何正确解决在生产中采用压力光加工时的有关设计和工艺问题有所帮助。

作 者

第一章

金属压力光加工的实质、特点和应用范围

金属压力光加工系以金属在冷态下具有塑性变形的性能为基础。加工的实质在于，在硬金属工具（滚子、滚珠、挤光推刀或拉刀）的压力作用下被加工表面微观不平度的凸峰发生塑性变形——被压塌，从而减小表面粗糙度。

用滚珠或球面滚子进行滚压光加工（应用最广泛的压力光加工方法）时，表面不平度的变形示意图见图1。不平度的凸峰金属自与工具的变形构件接触处向两方移动，原始不平度的高 $R_{\text{всх}}$ 减小，并形成带有高度为 R 的新的不平度的表面，即呈现滚珠或滚子运动痕迹的表面。

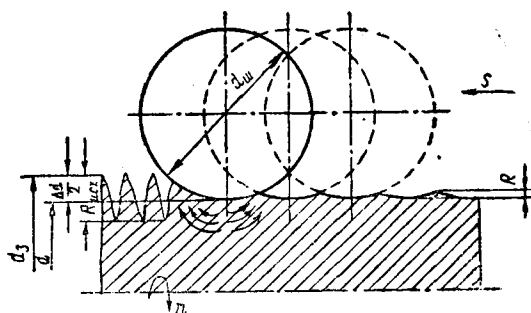


图1 用滚子和滚珠滚压时的表面不平度变形示意图

d_3 —毛坯直径 d —零件直径 Δd —永久变形量

$R_{\text{всх}}$ —毛坯原始表面不平度的高 R —滚压后零件的不平度的高

由示意图可看出，原始不平度的凸峰金属自与加给一定压力的变形构件的接触处向两方移动，“流入”相邻的凹谷。此时，

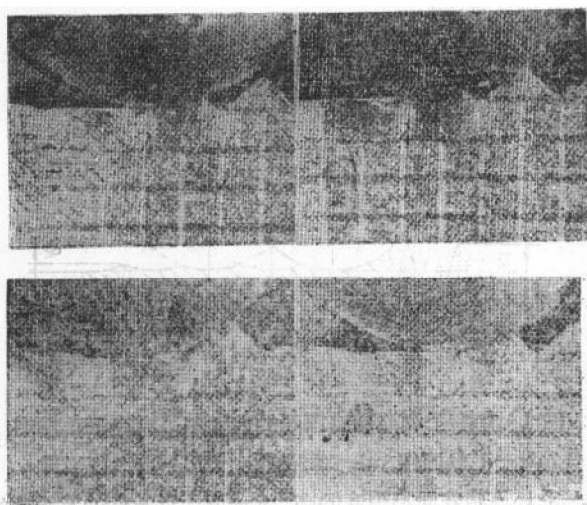
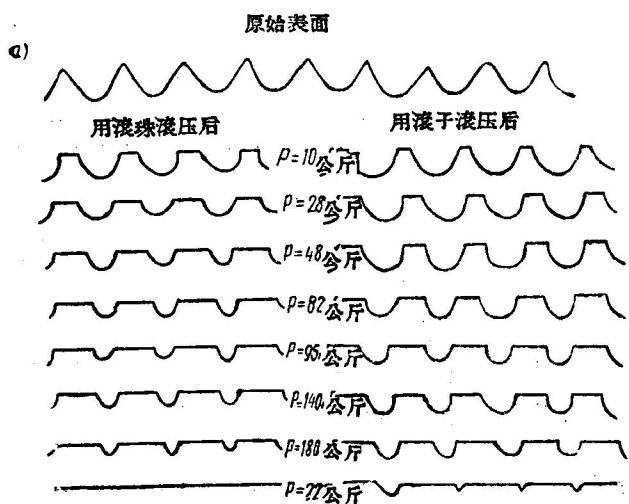


图 2 a. 以不同的压力用滚珠和滚子滚压后粗糙度的变化
 6. 用滚珠滚压后的凸峰模型变形照片

金属从凹谷向上挤出，即发生了一个犹如与滚制螺纹相反的过程，结果形成了新的表面，其不平度的高、形状和峰距取决于滚压规范的基本参数。

被变形金属的变形特点和移动方向如图 2 所示。图 2a 所示是试件原始表面及该表面在逐渐增大的压力下用滚珠和滚子滚压后的形状（放大 50 倍）。图 2b 所示为用直径 10 毫米的滚珠滚压钢试件（50 号钢）时一个凸峰连续变形的照片（格子尺寸 1×1 毫米）。

由图可看出，在变形构件（滚珠或滚子）单向进给的条件下，即使是使夸大了的高不平度变形，金属也是由凸峰的两旁对称地重新分布（图 2b），凹谷之间的距离还是无变化。由此证明，被变形金属主要是在微观凸峰的体积范围内径向和轴向移动的。

金属的这种变形特性首先取决于滚压分力的作用方向。

应用最广和最有效的压力光加工方法是用滚子和滚珠滚压外表面和内表面。对各种外滚压和内滚压方式的分析表明，无论对于这种变形方法或金属的其它大多数压力光整与强化加工方法（用挤光推刀和拉刀挤光，用滚珠进行击打冷作硬化），被变形的单位体积应力状态图的共同特点都是存在着向各个方向的压缩。

对加工过程一切主要质量指标影响最大的，是变形中心产生的最大正应力和切应力以及这两个应力值的比值。此比值决定着变形构件与被加工表面接触区的金属变形方向和移动方向。

于是，问题归结为弹性和塑性理论中主要应力大小和方向的

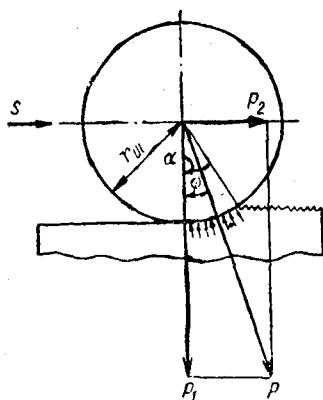


图 3 变形构件与被加工表面的相互作用示意图

計算問題。針對以滾子或滾珠滾壓時金屬被加工表面微觀不平度的彈性塑性變形，這些計算問題目前對於實際應用尚未能足夠準確地解決。

下面將討論解決這個問題的近似計算方法。計算的結果符合于試驗研究的數據，並可滿足實際應用的要求。

圖 3 所示為變形構件（這裡是滾珠）與粗糙的被加工表面的相互作用示意圖。作用於滾珠上的力為 P_1 和 P_2 。 P_1 是作用於被加工表面的法向壓力； P_2 保證滾珠按進給方向相對被加工表面移動。圖中所示是沿滾珠與被加工表面接觸線的剖面。由於經過淬火的滾珠的硬度總是比工件的硬度高得多，所以在分析工件表層的變形時，可不考慮滾珠的變形。

當力 P_1 和 P_2 的數值很小時，只出現彈性變形；隨著 P_1 和 P_2 的增大，除了彈性變形之外還產生塑性變形。當力達到足夠大時，塑性變形變得很大，以致彈性變形實際上可不加考慮。

圖 3 上還示出了作用在與被加工表面接觸區的力的方向。這些力在接觸面積 F 上可以看作是連續分布的，但並不是等值的。所以由接觸角 α 所限定的接觸表面範圍內的應力 σ 也不相等。顯然， P_1 和 P_2 的合力 P 等於分布在接觸表面上的諸力的和，因此合力在 P_1 和 P_2 作用方向上的投影在數值上也應相等。

$$P_1 = \int_0^\alpha \sigma \cos \alpha dF, \quad (1)$$

$$P_2 = \int_0^\alpha \sigma \sin \alpha dF. \quad (2)$$

所以

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\int_0^\alpha \sigma \sin \alpha dF}{\int_0^\alpha \sigma \cos \alpha dF}. \quad (3)$$

积分前，式中的 dF 应通过滚珠尺寸 r_m 和角的微分 $d\alpha$ 表示。然而，在这种情况下，式（1）和（2）不可能积分，因为面积 F 范围内 σ 的分布特性是未知的。

求 σ 的分布特性之所以特别困难，是由于考虑到强化的被加工表面微观不平度的塑性变形过程异常复杂。所以目前在计算变形时仅能用近似公式求出接触应力。

但是从式（3）可以看出，在接触角 α 很小（符合于一切实际情况）的条件下， $\frac{P_2}{P_1}$ 之值极小（ $\sin\alpha \rightarrow 0$ ，而 $\cos\alpha \rightarrow 1$ ）

由图 3 可看出，合力 P 与 P_1 作用方向的夹角为 φ 。

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P_2}{P_1} \cdot \quad (4)$$

显然， P_1 和 P_2 的合力 P 在 α 角范围内通过滚珠的中心，所以 φ 角在由 0 到 α 的范围内。

在 φ 趋近于 0 的极端情况下，由公式（4）得 $P_2 \approx 0$ ，这相当于滚珠无纵向进给的滚压方式。在滚压球面槽和圆根时采用的就是这种加工方式。在这种情况下由于不存在轴向滑移变形，可创造出最良好的塑性变形条件和得到特别光洁的表面。如果其它条件相同，采用有纵向进给的加工方式是不可能达到这样的表面光洁度的。

在 φ 趋近于 α 的另一种极端情况下， $\frac{P_2}{P_1}$ 具有最大值。

采用有纵向进给的加工时，为了达到高的表面光洁度，必须力求 $\frac{P_2}{P_1}$ 之值最小。用大直径滚珠（或具有大球面半径的滚子）以小进给量滚压能满足这一条件。作者以这个结论为基础，制定了用直径为 127 毫米（5"）的滚珠，以 0.005 毫米/转的进给量滚压镜面平面和球面的加工方法（详见第四章）。

在上述条件下，切向分力 P_2 一般极小，以致推力轴承（图 133）不转动，而滚珠在严格垂直于毛坯轴线的平面上旋转。但是

有个别时刻不是如此，在这些时刻由于某种原因（存在带有大的不均匀不平度的区域，被加工表面有个别缺陷）滚珠在进给方向的移动阻力增大。必须指出，正是在这样的滚压条件下才能加工出具有高度反光能力的 13~14 级光洁度的端面。这是因为，当轴向分力 P_z 的值接近于零时，滚珠对被加工表面的打滑最小，塑性变形的条件最佳。

为了确定滚压力分力和永久变形量的试验研究结果也证实了上述变形特性的正确性。

经过压力加工，特别是滚压加工的粗糙度，与切削加工的表面粗糙度不同。然而，在垂直于滚压方向的方向上测得的横向粗糙度的大小，和切削加工的结果一样，超过在滚压方向上测得的纵向粗糙度。这是因为，决定横向粗糙度的基本因素（变形构件的几何形状和进给量）不影响纵向粗糙度的大小。同时，大量的试验研究表明，同切削加工的情形相比较，滚压形成的粗糙度的高与滚珠半径或滚子球面半径及进给量之间的几何关系要严格得多：

$$R = \frac{s^2}{8r_{\text{III}}}, \quad (5)$$

式中 R —粗糙度的高；

s —进给量；

r_{III} —滚珠半径或滚子球面半径。

在切削加工中会使微观不平度的高增大的塑性变形和振动，在压力光加工中的影响是不一样的。在压力光加工中，塑性变形可使在形状、尺寸和位置方面都不均匀的原始表面不平度得以平整，而在加工过程中可能产生的振动的影响不可比拟的微小，这是以塑性变形为基础的加工的特点本身所决定的。正因为如此，可以在刚性低的有磨损的机床上用压力光加工方法达到高的表面光洁度（9 级以上）。弹性变形实际上不会引起粗糙度的形状和位置的畸变，粗糙度的高的增大与计算高度相比，不超过 5%。

除了几何因素之外，还有原始表面不平度的形状和尺寸的不均匀度、表面缺陷（划伤、凹陷和擦伤）、金属缺陷（夹杂、松孔）以及变形构件工作表面的缺陷都对压力光加工所得的表面光洁度有影响。

表 1 中列出用滚子和滚珠滚压光加工所得的几种基本表面类型。从表中看出，有规律性的重复出现的不平度（全苏国家标准 ГОСТ 2798-59 中的典型不平度）只有下列几类情况：

- 1) 由变形构件造成的服从公式 (5) 的不平度；
- 2) 第一类不平度和由于原始粗糙度未完全平整而残留的不平度相结合的情况（往往是后者的高度较大）；
- 3) 第一类不平度和变形构件表面缺陷痕迹所形成之不平度相结合的情况（高度较大的可能是前者，也可能是后者）。

第一类粗糙度的基本特征是峰距比高度大，这是由于加工进给量较大的缘故。特别是以大于 1 毫米的进给量用滚子滚压内外表面，而形成粗糙度的高相当于 9~10 级或更高的光洁度时，这种特征尤为明显。这样的表面用切削加工方法是不可能得到的，因为在能保证高光洁度的磨料加工中，要减小粗糙度的高度，必须使用较小粒度的磨料，这就自然地导致不平度峰距的减小。所以，在制定表面粗糙度的国家标准 ГОСТ 2789-59 时，在为了测定各个等级的不平度的基准长度尺寸计算方面考虑了这一规律性。

考虑到滚压加工后的表面粗糙度的特点，必须承认标准中规定的基准长度在这种情况下是不适用的（尤其是对于 9~12 级光洁度——规定的基准长度等于 0.25 毫米）。

测定这些表面的粗糙度时，应参照国家标准的附注中有关选用加大基准长度的规定，并在技术条件中注明。但是在苏联工厂的生产实际中一般还没有这样执行，因而不能正确地测出压力光加工表面的粗糙度。这种情况由于下述原因而变得更加严重：目前在生产条件下最广泛应用的表面光洁度检验方法是使用光学仪

經過压力加工的表面的微觀几何形狀

表 1

表面特征	不平度和缺陷的性质	形成的原因	示意图	測量方法
粗糙度	規則的	加工过程的几何参数		光度計
粗糙度	規則的	原始不平度未完全平整		光度計, 双筒显微镜
粗糙度	規則的	变形构件的表面缺陷		双筒显微镜和干涉显微镜
起伏不平度	偶然的	原始粗糙度的不均匀度		双筒显微镜, 光度計
缺陷	偶然的	被加工材料的缺陷, 最深的原始粗糙度的痕迹, 划伤、擦伤和其它偶然的缺陷		双筒显微镜

器 (MNC-11 双筒显微镜和 MNN-1 干涉显微镜), 这种方法不适于用来研究以滚压加工所获得的高的表面光洁度, 因为高倍放大时的视界比用以测定峰距大的不平度的基准长度要小得多。

可用来在大的长度范围研究表面质量的表面光洁度计, 在上述测量中可获最好的结果。

第二类粗糙度 (滚压前预加工残留的规则痕迹) 也和第三类粗糙度 (变形构件表面缺陷引起的痕迹) 一样, 只是在其峰距对高度之比相当小的情况下才能用光学仪器测量。

各种性质的缺陷, 包括我们所称的“起伏不平度” (滚压那些具有不均匀高的原始不平度的区域时产生的), 用光学方法或接触法均可测量。

必须指出, 在研究压力光加工表面的粗糙度时, 不仅有光洁度测量上的困难, 而且作为表面粗糙度国家标准的基础的准据 (R_z 和 R_a) 也不完全准确。特别是, 用不平度的高度来鉴定这种表面的使用性能 (耐磨性, 摩擦系数, 电磁波、超声波和光波的反射性能, 等等) 远不如用支承面的大小来鉴定那样精确。若能制出表面支承面的测量工具, 将能更可靠而又比较不费时地鉴定表面的使用性能。

压力光加工和压力冷加工不同。区别在于: 压力冷加工系以成形为目的 (如轧制、拔制、滚锻等), 其特点是材料塑性变形从毛坯表面向内扩展, 有时甚至达到毛坯的整个剖面; 而压力光加工时只有金属的表层发生塑性变形。就塑性变形的机理来说, 成形和光整、校准及强化都相同; 那就是, 单个的晶体沿滑移面滑移而引起变形, 各层 (滑移束) 的相互位移引起结晶形状的巨大变化。结果是晶体失去球体形状, 变成扁平, 在一个方向上缩短, 而在沿变形的方向上伸长, 晶格得到定向的组织。此时, 金属组织本身由晶体不规则分布的组织变成定向的纤维直线分布的组织 (纤维状组织) ——变形了的晶粒。晶体变形在表面最大, 向毛坯深处逐渐减小以至消失。

压力光加工时金属表层的这种变形特性与切削加工时的变形特性相似。图4所示为切削加工后金属表层变形示意图(右图)和用滚珠滚压后金属试件的轴向磨片的示意图(左图)。

经过压力光加工,由于塑性变形的结果,不仅改变了毛坯尺寸和表面粗糙度,并且还改变了金属表层的组织和一切机械物理性能。变形率愈高,变形层的深度也愈大。

变形率由压力加工的条件决定。根据研究结果和积累的生产经验,发现了压力加工的条件与其结果之间的基本定性关系(如

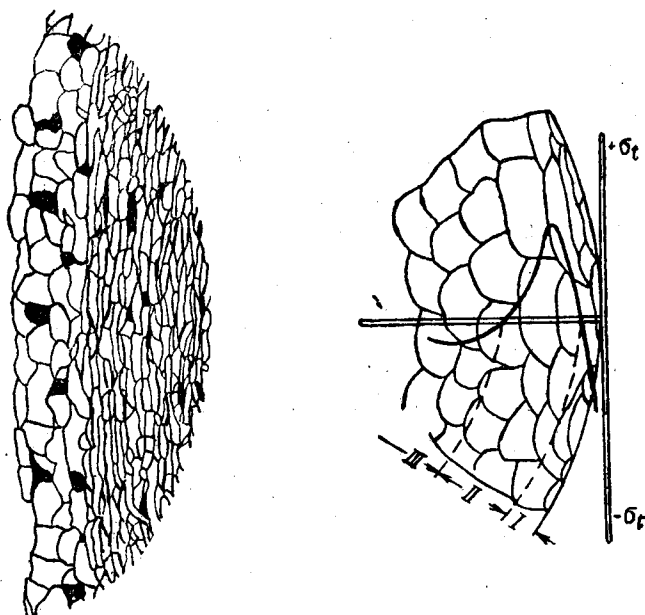


图4 右图:切削加工后金属变形表层示意图

I —— 第一层:主要是塑性变形晶粒的区域

II —— 第二层:主要是弹性变形晶粒的区域

III —— 弹性变形晶粒区域

左图:用滚子滚压后金属表层的变形特性

表 2 所示)。这些关系曲线只能作为调整加工过程用的原始资料，因为没有考虑对压力光加工的一切要求和实现加工的条件。

压力光加工时，最重要的变化是强化。强化是由于晶格变形，变形的不均匀，多晶体的不同变形晶粒的存在，晶粒的重新定向和滑移面的变化等所引起的。强化使得硬度、弹性极限、屈服极限和强度极限提高，也使疲劳强度提高；同时降低了塑性指标：相对延伸率、冲击韧性和相对收缩率。

无论以光整或强化为目的的压力光加工均会造成不均匀的冷作硬化，其结果导致不均匀的体积变化：毛坯金属表层不同程度的变形和形成残余应力（在绝大多数情况下是压应力）。

不均匀的冷作硬化首先是由光整原始不平度时的变形特性本身（图 4 左）引起的，并且同预切削加工所得的原始金属组织的不均质性及内应力的不均匀度有关。即使对预先磨削出的粗糙度比较均匀的表面进行光加工，填充了金属的微观凹谷处的硬度也是低于凸峰处的硬度（图 5a）。

滚压加工时变形区域内的硬度分布特性，与静压入时的相同（图 5b）[1]。

强化过程并不是无限的。研究确定，强化是有极限的。对于碳钢和珠光体钢，强化极限当变形率为 40~50% 时达到，对于奥氏体钢——在变形率为 60~70% 时达到。

压力光加工和成形过程一样，随着变形率的增大，变形阻力也增加。这是因为，消耗于塑性变形的能量的一部份被金属所吸收，而并不以热形式释出。研究表明，正是由于使晶格在原子范围内变形的这部份能量和同这种畸变有关的内应力，造成了金属塑性变形阻力的提高。第二类应力是属于使较大区域内晶格变形的应力，其影响区域处在整个晶体范围内。这类应力是冷作硬化金属具有异向性和产生微观裂纹的原因。当变形率高时，微观裂纹的有害影响特别明显。

变形率对金属性能的影响的这种特点，决定了必须周密确定

表 2 表面压力加工条件与效果之间的定性关系曲线

滚压效果 滚压条件	滚压后粗 糙度 R 微米	冷作硬化 程度 HD 公斤/毫米 ²	冷作硬化 深度 h , 微米	波紋度 H , 微米	尺寸变化 Δd , 微米
	R	HD	h	H	Δd
1 金剛原始硬度 HB					
2 表面原始粗糙度 R_{ux} , 微米					
3 滚压力 P , 公斤					
4 滚子轴向剖面上球面半径 (滚珠 ϕ) r , 毫米					
5 进给 S , 毫米/轉					
6 行程次数 n					
7 滚压速度 V , 米/分					