

切削加工表面残余应力研究综述

Literature Review of Residual Stress on the Surface in the Cutting

西北工业大学现代设计与集成制造教育部重点实验室 王增强 刘超锋



王增强

西北工业大学研究员,航空发动机 CAD/CAM 研究所副所长,现代设计与集成制造技术教育部重点实验室副主任。长期从事航空发动机整体叶盘五坐标数控加工技术、叶片无余量高效数控加工技术、涡轮叶片精铸模具 CAD/CAM 技术以及航空发动机信息化技术的研究与应用。获国家科技进步二等奖 1 项,部级科技进步一等奖 2 项、二等奖 2 项,发表学术论文 30 余篇。

残余应力主要是由构件内部不均匀的塑性变形引起的。各种工程材料和构件在毛坯的制备、零件的加工、热处理和装配的过程中都会产生不同程度的残余应力。残余应

主要研究了切削加工过程中残余应力产生的机理,并对残余应力的测量方法以及残余应力的调整和消除手段进行了较为系统的阐述和比较,提出了在残余应力检测和消除领域的一些建议,为进一步研究提供参考和借鉴。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.06.026

力因其直观性差和不易检测等因素往往被人们忽视。残余应力严重影响构件的加工精度和尺寸稳定性、静强度、疲劳强度和腐蚀开裂。特别是在承力件和转动件上,残余应力的存在易导致突发性破坏且后果往往十分严重。因此,自 20 世纪 50 年代以来国内外技术人员花费了大量的精力研究残余应力的产生机理、检测手段、消除方法以及残余应力对构件的影响^[1]。

Guo 等通过试验的方法研究了车削和磨削产生的不同性质的残余应力对工件疲劳强度的影响^[2]; Seo 等通过试验和有限元模拟的方法揭示了在车轮制造和火车刹车过程中引起的残余应力和火车车轮疲劳寿命之间的代数关系^[3]; Liu 等用试验

的方法研究了残余应力对滚动接触疲劳强度的影响^[4];董辉跃等研究了材料去除过程中残余应力的重新分布及该过程所引起的工件变形^[5];孙杰等基于理论计算和有限元模拟,研究了毛坯的初始残余应力对大型整体结构件数控加工变形的影响^[6]; Hiroyuki 等研究了不同加工参数引起的残余应力对零件疲劳强度的影响^[7],并且结合正交切削模型和刀尖圆角压痕模型建立了残余应力预测模型^[8];王立涛对于铣削加工航空框类整体结构件时的残余应力和变形机理进行了研究,并将研究成果应用于实际生产^[9]。

在机械加工过程中残余应力的存在不仅影响零件的加工精度而且影响零件的使用性能和寿命^[10]。因

此,充分了解残余应力产生的机理并掌握残余应力测量和消除方法对于充分利用残余应力的有益的一面,避免残余应力带来的危害以及改进加工工艺,延长工件的使用寿命和确保安全生产是十分有意义的。

本文主要研究了切削加工过程中残余应力产生的机理,并对残余应力的测量方法以及残余应力的调整和消除手段进行了较为系统的阐述和比较,提出了在残余应力检测和消除领域的一些建议,为进一步研究提供参考和借鉴。

残余应力的定义和分类

1 残余应力的定义

残余应力是指在无外力作用于物体时,物体内部保持平衡的应力。在没有外力的作用下,物体内部保持平衡的应力称为固有应力,残余应力是固有应力的一种^[1]。

现在用一个简单的例子说明残余应力的产生。假设图1中3根弹簧在自由状态下的长度分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 ,弹性常数为 c 。用两块刚性板将3根弹簧连接后的长度为 L ,并且连接之后整个系统不受外力的影响。设连接后3根弹簧上产生的力分别为 F_1 、 F_2 、 F_3 ,这时的 F_1 、 F_2 、 F_3 就相当于这个系统的残余应力且

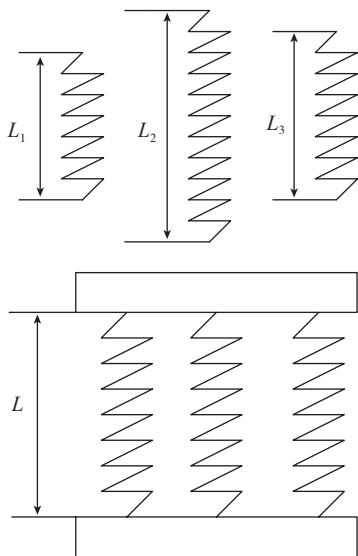


图1 残余应力产生的弹簧模型示意图

$$F_1+F_2+F_3=0。$$

2 残余应力的分类

(1)根据残余应力影响的程度把残余应力分为宏观应力和微观应力。1973年德国学者E. Macherauch进一步把宏观应力称为第一类残余应力;把微观应力分为第二类和第三类残余应力。第一类残余应力存在于材料的较大范围或许多晶粒范围内并且保持相互平衡,它的大小和方向可以用常用的机械和物理方法进行检测。这种残余应力对于所加工的产品是否合格以及最终产品的性能能否达到设计要求等都会产生很大的影响。因此,在实际生产过程中所关注的残余应力一般指第一类残余应力。第二类残余应力是指存在于晶粒范围内的残余应力。第三类残余应力是指存在于晶粒内部的粒子之间的晶内应力^[11-13]。

(2)根据残余应力产生的原因,把宏观应力相对应地叫做体积应力;微观应力叫做结构应力^[11]。

体积应力是由于物体受到外部不均匀的机械的、热的、化学的作用而产生的。内部组织结构均匀的物体也会产生这种残余应力。结构应力是由于物体内部组织结构不均匀造成的,即使受到均匀的外部作用也会产生这种残余应力。

(3)残余应力按其表现形式可以分为残余拉应力和残余压应力。

当工件在使用过程中承受外部载荷时,工件所受到的实际载荷是外部载荷和内部残余应力的叠加。这就会影响到工件的实际承载能力,使工件在使用过程中容易发生突然的过载断裂等,如果这种突然失效发生在关键部件可能会带来重大的事故。另外,残余拉应力的存在会加

速零件表面裂纹的萌生和扩展,降低零件的抗疲劳强度、耐腐蚀性和尺寸稳定性等。而残余压应力则会在一定程度上提高零件的抗疲劳强度和耐腐蚀性^[14-15]。因此,研究如何使零件表面产生残余压应力的加工工艺是非常有意义的。

金属切削加工过程和残余应力产生的机理

1 金属切削过程

在金属的切削过程中,切屑是被加工材料受到刀具前刀面的推挤而沿剪切面剪切滑移形成的。在这个过程中,切削层金属会发生一系列的变形,同时产生大量的热。通常把金属切削的变形过程分为3个变形区来研究^[16](图2)。

第一变形区集中在刀尖与工件接触的前端。在这个变形区内,随着刀具和工件的相对运动,切削层的金属在达到材料的屈服强度之后就产生滑移,直到切削层与前刀面基本平行后停止滑移,退出第一变形区。由于第一变形区内存在大的剪切变形和摩擦,因此会产生大量的热。

在第一变形区内形成的切屑会随着刀具的移动沿着前刀面的方向流动。流动过程中,切屑底层和前刀面会发生进一步的摩擦和挤压,这个过程伴随着塑性变形的产生和热量的释放,这就形成了第二变形区。

由于刀尖钝角的存在,在第一变

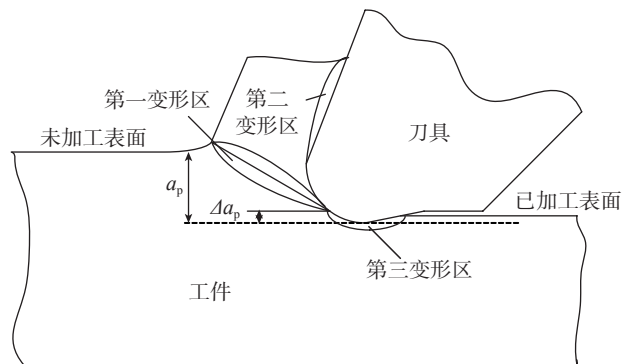


图2 切削加工示意图

形区中切削层金属并没有被完全切除而会留下薄薄一层未被去除的金属。当刀具和工件相对运动时,这一薄层金属会被挤压通过切削刃钝角和后刀面。在这个过程中表层金属会发生塑性变形并产生热量而基体则产生弹性变形,这就是金属切削过程的第三变形区。

2 残余应力产生的机理

关于残余应力产生的机理,从理论上定量分析还存在困难,因此只能对其进行定性分析^[7]。切削过程中残余应力的产生既与机械应力所造成的塑性变形有关,也与热应力所造成的塑性变形有关。

(1)由机械应力引起的残余应力^[10-12]。刀具切削工件材料过程中,刀尖前方的三角形区域会随着刀具的运动而产生沿着切削方向的压缩塑性变形和垂直于切削表面方向的拉伸塑性变形(塑性凸出效应),如图3所示^[11]。因此,在沿着切削表面的方向会有拉伸残余应力的产生。与此同时,刀具的后刀面会对已加工表面有进一步的挤压和摩擦,会使其表面发生塑性伸长而产生沿表面方向的压缩残余应力。实际加工过程中由机械应力所产生的残余应力是刀具接触点前方塑性凸出效应和刀具接触点后方压延效应的叠加。

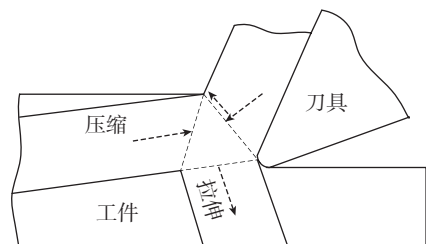


图3 塑性凸出效应形成简图

(2)由热应力所引起的残余应力^[10-13]。金属切削加工过程中的3个变形区由于摩擦和塑性变形的存在都会产生大量的热。这些热量很难及时散发出去,从而导致工件材料表面的受热膨胀。但是表面的膨胀

行为会受到基体的束缚而最终产生压缩塑性变形。当工件完成加工逐渐冷却到室温后,产生压缩塑性变形的表层会在工件表面形成拉伸残余应力。以上所说的情况并不包括工件在受热和冷却过程中可能发生的相变。如果切削过程中产生的热量达到了工件材料的相变转化温度,则工件表层材料会在冷却过程中发生相变而使其体积发生变化,最终在工件表层产生残余应力。

在实际加工过程中,工件表面最终的残余应力状态是以上几种情况的叠加。一般情况下,若切削速度较低,冷却情况良好,切削温度不是太高时,机械应力会对残余应力的产生和性质起主导作用。当切削速度较高、切削温度也相应升高时,工件材料表面的热塑性变形会起主导作用。当切削速度进一步升高,切削温度达到一定数值时,工件材料的相变就会对工件表面最终的残余应力性质起主导作用^[18-21]。由此可以看出,在切削加工过程中残余应力的产生是一个非常复杂的过程,与切削加工过程中的热力耦合密切相关。

残余应力的检测及消除方法

残余应力的检测方法有很多,根据其测试过程对被测构件是否产生破坏可以分为有损检测法(取条法、切槽法和钻孔法等)和无损检测法(X射线法、磁性法和超声法等)。有损检测法又叫做机械检测法或应力释放法,无损检测法又叫做物理检测法。

1 有损检测法

有损检测法是指通过切槽、取条或逐层剥离等方法使构件相应部位的残余应力释放出来,再通过对应被测构件尺寸变化的测量来计算得到残余应力的具体数值的检测方法^[10-11,22-24]。

(1)取条法:取条法是指在存在残余应力的构件上,沿着残余应力存在的方向切取矩形等截面长条,使存

在的残余应力完全释放,再通过测量在残余应力存在方向上构件尺寸的变化值计算出该方向的残余应力的值。

(2)切槽法:切槽法需要在构件表面上切削围成一定区域的沟槽,使所围成的区域内残余应力完全释放出来,再通过对应变的测量来计算获得残余应力。

(3)钻孔法:钻孔法是一种对构件破坏性相对较小的一种有损检测方法。对存在残余应力构件的表面钻一个小孔,使小孔处的残余应力得以释放,再通过粘贴在孔邻近区域的应变片来测量相应的位移和应变,最后可以通过计算来得到在钻孔处深度方向上的平均残余应力值。

采用有损检测法检测残余应力时,会对被测部件的表面造成损伤和破坏,因而在一定程度上影响了零件的力学性能甚至导致直接报废。在实际生产中需要进行残余应力检测的部件往往运用在关键部位且造价不菲,不允许对被测部件表面造成损伤。因而,有损检测法会对被测部件造成损伤的缺点严重制约了它的应用范围和发展前景。

2 无损检测法

残余应力的无损检测法主要是通过物理光学和核物理技术来测量材料内部的物理常量(如晶格常数)在应力场中的变化来间接算出物体内部残余应力值的方法^[11,25]。

(1)X射线衍射法。X射线衍射法测量残余应力是基于X射线衍射理论。当一束波长为 λ 的X射线照射在晶体表面时,会在特定的角度(2θ)上接收到X射线反射光的波峰,这就是X射线衍射现象。

1912年Braag和Laue提出了布拉格方程,建立了宏观上可测量的衍射角(2θ)和晶面间距的确定关系,使得用X射线衍射法测量残余应力成为了可能^[12]。用X射线衍射法测量残余应力的原理见图4。布拉格

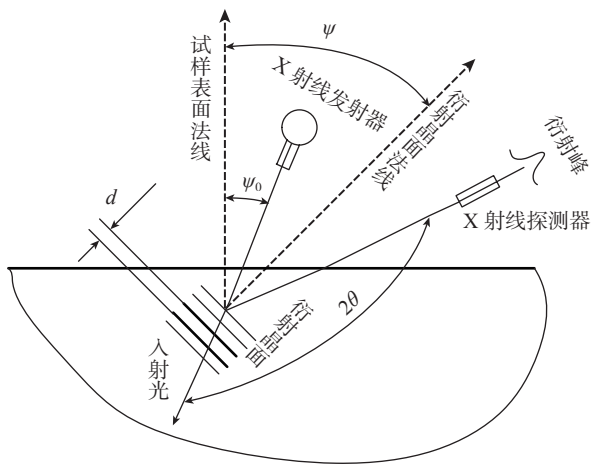


图4 X射线衍射法示意图

方程:

$$2d \cdot \sin \theta = n\lambda \quad (n = \pm 1, 2, 3, 4, 5, \dots), \quad (1)$$

式中, θ 为 X 射线衍射角的 1/2, d 为被测材料的晶面间距, λ 为入射 X 射线的波长^[26-28]。

假设某晶面间距在无外力作用下为 d_0 , 受力后变为 d , 则应变为:

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (2)$$

根据胡克定律, 应力为:

$$\sigma = K\varepsilon = K \frac{d - d_0}{d_0} \quad (3)$$

式中, K 为弹性常数, 当入射线的波长选定之后 (λ 一定), 通过测定衍射角 θ , 即可由布拉格方程得到受力之后的晶面间距, 继而得到相应的残余应力值。这里需要指出的是由于晶体是各向异性的, 因此式 (3) 中的弹性常数 K 和宏观意义上的弹性模量 E 是不同的, 需要根据所选择的衍射晶面来计算出弹性常数 K 。

1961 年德国学者 Macherauch 结合弹性理论和布拉格方程提出了测二维残余应力的 $\sin^2\psi$ 法, 基本方程为:

$$\sigma = -\frac{E}{2(1+\mu)} \cot \theta_0 \cdot \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2\psi)} \quad (4)$$

式中, E 为弹性模量, μ 为泊松比, θ_0 为没有外力作用时被测材料的布拉格角, ψ 为空间任意方向和被测点 Z 轴方向的夹角。

用 $\sin^2\psi$ 法只能得到距离材料表面 10 μm 深度范围内二维残余应力的平均值, 但配合电解抛光可得到任意深度的残余应力。若想得到三维残余应力沿其深度方向的分布, 可通过 X 射线积分法、泰勒级数展开法、拉氏变换法及剥层法和 $\sin^2\psi$ 法配合使用等方法来实现^[27-28]。图 5 为用 X 射线衍射法检测

叶片表面残余应力的应用实例。

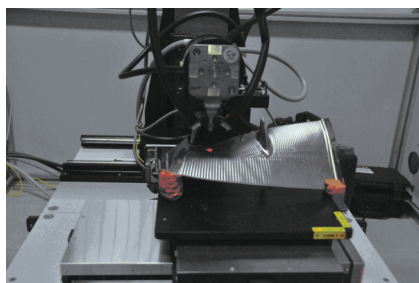


图5 X射线检测实例

在各种无损检测残余应力的方法中, X 射线衍射法被公认为是最精确可靠和方便快捷的, 最重要的是对被测工件不会造成任何损伤和破坏。因此, X 射线衍射法在国内外的机械工程 and 材料学科方面得到广泛应用。

(2) 磁性法。磁性法分为磁噪声法和磁应变法。磁噪声法的理论基础是当铁磁材料处于外加交变磁场中时, 磁畴壁会发生不连续的跳跃式急剧变化, 从而在探测线圈中引起噪声, 此现象称为磁噪声, 又称为巴克豪森磁噪声 (BN)。研究表明, BN 对材料中的应力和显微组织及晶粒缺陷很敏感, 因此可以通过测量 BN 在探测线圈内感应产生的脉冲电压信号的大小来检测材料的应力、显微组织和缺陷^[22,29]。磁应变法是利用铁磁性材料在外磁场作用下所表现出的磁致伸缩效应来实现的。当被测材料受到力的约束时, 其磁致伸

缩会受到阻碍, 磁导率变小。磁导率和所受约束力之间有线性关系:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu_\sigma} = \lambda_0\mu_0\sigma \quad (5)$$

式中, λ_0 为无应力状态下的磁致伸缩系数, μ_0 为无应力状态下的磁导率, μ_σ 为应力作用下的磁导率, σ 为所受应力值, $\Delta\mu = \mu_0 - \mu_\sigma$ 。磁导率的变化和测量回路中的电流的变化有确定的关系。因此, 可以通过测定传感器中电流的变化来确定残余应力的值。

用磁性法测定残余应力时, 被测材料必须是铁磁性材料 (铁、刚、镍钴合金等), 而且测量结果的精度和可靠性不高。它的优势在于所用仪器设备轻便, 便于现场操作, 反应快、测量时间短, 适用于大型工件的残余应力检测。

(3) 超声波法: 当被测材料中有残余应力产生时, 会引起被测材料内部力学性能的变化。声波在材料内部传递时也会发生速度的变化。超声波法就是利用应力引起的声双折射效应来测量声波传播路径上的平均应力值^[12,29]。

超声波法的最大特点是不受测量深度的限制, 但是同样存在测量精度低、结果不可靠等缺点。目前该技术还不成熟, 还处于试验研究阶段。

除了上述的一些检测方法外, 还有诸如: 中子衍射法、电子散斑法、金属磁记忆法和硬度法等一系列适用于各种不同环境条件下的检测方法。在实际应用中, 可根据具体的检测条件和经费状况等选择。

3 消除残余应力的方法

残余应力的存在会严重影响零件的加工精度、使用性能以及使用寿命。因此, 必须采取相应的工艺来降低或消除不良的残余应力。

(1) 保证零件结构设计合理, 尽量避免尖角和壁厚不均等结构^[30]; 优化加工工艺路线并在每个工艺选择合理的加工参数, 降低零件在每个

加工工序中产生的残余应力,同时通过合理的加工工艺的配合来降低残余应力。

(2)自然时效处理^[30-31]。把工件在室内或室外放置一段时间,在昼夜温差和复杂的“环境振荡”的作用下工件内部的原子发生微观位移和扩散,导致微观残余应力下降,同时促进工件在宏观意义下的塑性变形,从而达到降低残余应力的目的。这种方法需要的时间较长,且消除残余应力的能力有限。

(3)人工时效处理^[11,30-31]。最常见的人工时效处理是时效退火。由于材料的屈服强度会随着温度的升高而降低,时效退火法就是把工件加热到材料的回复或再结晶温度范围内保存几小时甚至几十小时,来降低材料的屈服强度,使那些在残余应力作用下达到屈服极限的部分发生热塑性变形来消除残余应力的。这种方法要保证冷却速度足够缓慢,以免在工件冷却过程中产生新的残余应力。目前人工时效处理应用非常广泛,它最高可以消除部件内部80%的残余应力,但是它存在可能引起部件材料的高温软化,其设备昂贵,对环境也有一定污染等缺点。

(4)振动时效处理^[32]。振动时效是利用机械共振的方法消除或均化金属结构在铸造、锻压、焊接和切削等机械加工后所产生的残余应力。它通过向工件施加一定大小和频率激荡力的方式给工件传递能量,使工件发生微小或宏观塑性应变来均化和消除残余应力。振动时效法不仅可以大幅度地消除工件内部的残余应力,而且设备简便,节能环保,消除残余应力效率高。

(5)局部塑性变形法。对于精度要求不高的零件,可以在其残余拉应力存在的表面通过手锤敲击或过载的方法使其沿着拉应力的方向产生塑性变形来消除残余应力。

结束语

(1)切削加工残余应力的产生是切削过程中机械应力和热应力共同作用的结果。虽然已经充分了解残余应力产生的机理,但是对残余应力定量的控制和分析还存在困难,这应该作为今后残余应力研究的方向。

(2)残余应力检测技术对于生产出合格的零件是必不可少的。在目前应用较为广泛的残余应力检测方法中,X射线残余应力检测法是最为便捷、可靠和有效的。因此,X射线衍射法应作为残余应力检测技术的主要方法。

(3)残余应力的消除方法对于改善产品质量,延长产品寿命有很大的帮助。人工时效法消除残余应力效率高且形成了规范,是现在最广泛采用的方法。振动时效法消除残余应力在经济性、环保性和消除效率方面明显优于其他方法,因此,振动时效法可作为今后研究残余应力消除的主要方法。

参考文献

[1] Rossini R S, Dassisti M, Benyounis K Y, et al. Methods of measuring residual stresses in components. *Materials and Design*, 2012, 35: 572-588.

[2] Guo Y B, Warren A W, Hashimoto F. The basic relationships between residual stress, white layer, and fatigue life of hard turned and ground surfaces in rolling contact. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2010, 2(2):129-134.

[3] Seo J W, Goo B C, Choi J B, et al. Effects of metal removal and residual stress on the contact fatigue life of railway wheels. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(10-11):2021-2029.

[4] Liu C R, Choi Y. Rolling contact fatigue life model incorporating residual stress scatter. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2008, 50(12):1572-1577.

[5] 董辉跃,柯映林.残余应力对加工变形影响的分析与模拟. *航空材料学报*, 2005, 45(12):1664-1667.

[6] 孙杰,柯映林.残余应力对航空整

体结构件加工变形的影响分析. *机械工程学报*, 2005, 41(2):117-122.

[7] Hiroyuki S. The effect on fatigue life of residual stress and surface hardness resulting from different cutting conditions of 0.45% C steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, 45(2): 131-136.

[8] Hiroyuki S, Toshiyuki O, Takahiro S. Prediction model of surface residual stress within a machined surface by combining two orthogonal plane models. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, 44(7-8): 815-822.

[9] 王立涛.关于航空框类结构件铣削加工残余应力和变形机理的研究[D].杭州:浙江大学,2003.

[10] 刘海涛,卢泽生,孙亚洲.切削加工表面残余应力研究的现状与进展. *航空精密制造技术*, 2008, 44(1):17-31.

[11] 米谷茂.残余应力的参数和对策.朱荆璞,邵会孟,译.北京:机械工业出版社,1983.

[12] 袁发荣,伍尚礼.残余应力测试与计算.长沙:湖南大学出版社,1987.

[13] 王秋成.航空铝合金残余应力消除及评估技术研究[D].杭州:浙江大学,2003.

[14] 王仁智.残余应力与弹簧的疲劳性能.理化检验-物理分册,2005,41(11):541-548.

[15] Megrann R T R, Greving D J, Shadley J R, et al. The effect of coating residual stress on the fatigue life of thermal spraycoated steel and aluminum. *Surface and Coatings Technology*, 1998, 108-109:59-64.

[16] 韩荣第,周明,孙玉洁.金属切削原理与刀具.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.

[17] 王立涛,许玲萍,张海涛,等.铣削加工残余应力研究的基本理论和方法. *安徽工程科技学院学报*, 2004, 19(20):36-40.

[18] Garcia N V, Gonzalo O, Bengoetxea I. Effect of cutting parameters in the surface residual stresses generated by turning in AISI 4340 steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012(6):48-57.

[19] El-Axil M H. A method of modeling residual stress distribution in turning for different materials. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, 42(9):1055-1063.

本文共有参考文献32篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 春早)