基于单因素法对 7A09 铝合金铣削表面质量的研究

罗恒[1]，王优强[1]，张平[2]

（1.青岛理工大学 机械与汽车工程学院，山东 青岛 266520；
2.华东理工大学 机械与动力工程学院，上海 200237）

摘 要：目的 通过对工件表面粗糙度、表面形貌和残余应力的分析，探究铣削用量对 7A09 铝合金铣削表面质量的影响，从而为 7A09 铝合金铣削加工表面质量的控制提供一定的理论基础。**方法** 基于 KVC800-1 型数控加工中心，采用单因素法对 7A09 铝合金进行平面铣削试验，试验变量为铣削速度、每齿进给量和铣削深度，以此便可得平面铣削中铣削用量对 7A09 铝合金已加工表面质量的影响规律。**结果** 7A09 铝合金的表面粗糙度随铣削速度的增大和每齿进给量的降低而得以改善，但铣削深度对表面粗糙度的影响则较小。由已加工面的二维轮廓图和三维表面形貌图可知，铣削加工后，工件表面出现明显的犁沟，且沿进给方向的波峰和波谷都在一定范围内起伏变化，呈现出明显的规律性。当铣削用量改变时，其残余应力曲线均呈“勺”形分布，且残余应力对铣削速度和每齿进给量的变化都较为敏感，而对铣削深度的敏感性则较低。**结论** 通过分析铣削用量对 7A09 铝合金已加工表面质量的影响，得出 v_c= 240 m/min、f_z= 0.14 mm/z、a_p= 0.15 mm 时，工件可获得最佳表面质量。

关键词：7A09 铝合金；铣削用量；表面质量；表面粗糙度；表面形貌；残余应力

中图分类号：TG506 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2020)03-0327-07

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.03.041

Study on Surface Quality of 7A09 Aluminum Alloy Milling Based on Single Factor Method

LUO Heng[1], *WANG You-qiang*[1], *ZHANG Ping*[2]

(1.School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;
2.School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the influence of milling amount on the surface quality of 7A09 aluminum alloy by

收稿日期：2019-07-28；**修订日期：**2019-10-25
Received: 2019-07-28; **Revised:** 2019-10-25
基金项目：国家自然科学基金（51575289，51705270）；山东省自然科学基金（ZR2016EEP03）
Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51575289, 51705270); the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2016EEP03)
作者简介：罗恒（1992—），男，硕士研究生，主要研究方向为先进制造技术。
Biography: LUO Heng (1992—), Male, Master, Research focus: advanced manufacturing technology.
通讯作者：王优强（1970—），男，博士，教授，博导，主要研究方向为先进制造技术。邮箱：17685749750@163.com
Corresponding author: WANG You-qiang (1970—), Male, Doctor, Professor, Doctor tutor, Research focus: advanced manufacturing technology. E-mail:17685749750@163.com
引文格式：罗恒，王优强，张平. 基于单因素法对 7A09 铝合金铣削表面质量的研究[J]. 表面技术，2020, 49(3): 327-333.
LUO Heng, WANG You-qiang, ZHANG Ping. Study on surface quality of 7A09 aluminum alloy milling based on single factor method[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 327-333.

analyzing the surface roughness, surface morphology and residual stress of the workpiece, so as to provide a certain theoretical basis for the control of the surface quality of 7A09 aluminum alloy. Method based on KVC800-1 CNC machining center, single factor method was used to test the plane milling of 7A09 aluminum alloy. Results the surface roughness of 7A09 aluminum alloy was improved with the increase of milling speed and decrease of feed per tooth. It can be seen from the 2D contour diagram and 3D surface topography diagram of the processed surface that the surface of the workpiece after milling has obvious furrows, and the wave peaks and troughs along the feed direction fluctuate within a certain range, presenting obvious regularity. When the amount of milling changed, the residual stress curve was distributed in the shape of a spoon, and the residual stress was more sensitive to the change of milling speed and the feed amount of each tooth, but less sensitive to the depth of milling. Conclusion by analyzing the influence of milling amount on the surface quality of processed 7A09 aluminum alloy, it can be concluded that the best surface quality can be obtained when the milling amount is v_c= 240 m/min, f_z= 0.14 mm/z, a_p= 0.15 mm.

KEY WORDS: 7A09 aluminum alloy; milling amount; surface quality; surface roughness; surface morphology; residual stress

切削零件表面是零件与外界或其他零件相接触的交界面，承受着外界载荷和环境的作用，材料的硬化、粘结、腐蚀等都与之有关，因此优化切削加工工艺，根据零件应用工程环境来选择、控制或优化零件表面完整性就显得尤为重要[1-4]。

1964 年，在美国金属切削研究协会召开的一次技术座谈会上，Field 等[2]首次提出了“表面完整性”的概念，定义为：由受到可控制加工方法的影响，导致成品中表面状态没有任何损伤或有所强化的结果。1976 年，Liu 等[5]给出了比较直观的定义：表面完整性通常可用其力学、冶金学、化学和表面形貌状态等来定义。自此，国内外诸多学者对切削表面完整性进行了研究。高尚等[4]研究了不同粒径金刚石砂轮磨削石英玻璃的表面质量，以完成石英玻璃高效、低损伤和超精密磨削。陈鑫等[5]基于 Salomon 及高速磨削理论，对齿轮材料进行磨削加工试验，得出磨削加工中的磨削参数对表面完整性的影响规律。Dahlman 等[6]用 PCBN 刀具车削淬硬钢 AISI 52100，观测到加工表面为拉应力，但表层以下均为残余压应力。Bashir 等[7]进行了切削参数对淬火工具钢表面完整性影响的试验研究，研究表明：在较高的切削速度（210 m/min）下，表面完整性相对较好。切削速度越快，表面完整性越高，而在较低的进给速度下，表面完整性一般也越好。

7A09 铝合金因具有优异的力学性能、良好的可塑性、较高的耐蚀性，故近年来已愈来愈多地取代模锻零件，从而大大地减少了航空器的本体重量及其材料的强度损失，同时也使航空器的制造工艺得到了一定程度上的简化[8-11]。目前，对该材料的研究多集中于热处理制度、焊接性能、耐腐蚀性能等方面[12-16]，尚缺乏对 7A09 铝合金在切削加工中表面完整性变化的探究。故本文采用单因素法对 7A09 铝合金进行铣削加工试验，以此得出切削用量对表面完整性的影响规律，为航空铝合金平面铣削表面完整性的研究提供理论依据，可对航空铝合金切削工艺的探究提供一定的借鉴。

1 试验

1.1 材料

本试验所用材料为 7A09 铝合金轧制态板材，其所含成分见表 1。轧制板材经过 470 ℃/45 min 固溶处理后，再经过 T6 时效处理（150 ℃/15 h，水淬），其热处理后的力学性能如表 2 所示，并用线切割截取 130 mm×130 mm×30 mm 的长方体试件，用于铣削加工试验。

表 1 7A09 铝合金的组成成分
Tab.1 Composition of 7A09 aluminum alloy

wt/%

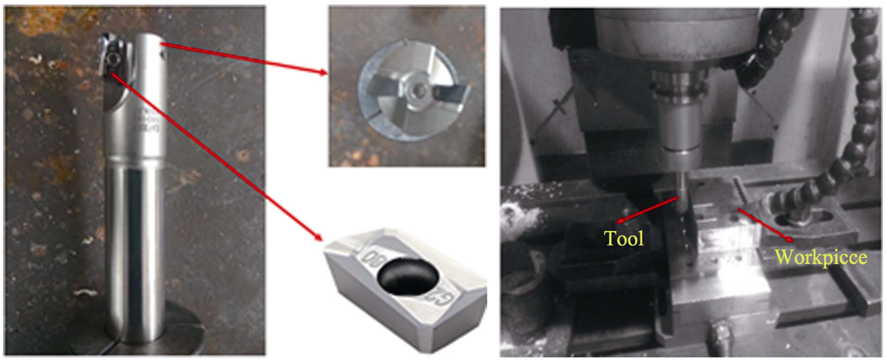
Zn	Mg	Cu	Ti	Mn
5.1~6.1	2.0~3.0	1.2~2.0	≤0.10	≤0.15
Cr	Fe	Si	Other	Al
0.16~0.30	≤0.50	≤0.50	0.1	Allowance

表 2 7A09 铝合金的力学性能
Tab.2 Mechanical properties of 7A09 aluminum alloy

Tensile strength/MPa	Elongation/%	Hardness/MPa	Yield strength/MPa
490	7	1500	410

1.2 设备

试验在 KVC800-1 型数控加工中心上进行，刀具采用刀杆+刀片的组合形式，如图 1a 所示，立铣刀杆为 EAP300R-C16-18-150-2T 型，刀片则采用 1135（*R*0.8）型。因切削液传统的冷却、润滑和排屑等作用，在很多加工过程中，尤其是高速切削中，得不到充分而有效的发挥，且加工过程中产生的高温使切削液形成雾状挥发，污染环境并威胁操作者的身体健康。鉴于此，本试验的铣削方式选为顺铣干切削。图 1b 为 7A09 铝合金的铣削试验现场照片。



a 刀具　　b 铣削试验现场

图 1　刀具及铣削试验现场照片

Fig.1 Photo of tool and milling test site: a) tool, b) milling test site

1.3　方案

在精加工和半精加工中，常常采用较小的铣削深度和每齿进给量，为了提高加工表面质量，硬质合金刀具则采用较高的铣削速度（一般为 80~100 m/min 以上）。对于硬质合金铣刀，由于刀片经受冲击载荷，刀片易破损，故同样强度的硬质合金刀片允许的 f_z 比车削时小，一般取 f_z=0.10~0.35 mm。故本文选取如表 3 所示的试验方案，分别改变铣削速度（160~320 m/min）、每齿进给量（0.1~0.18 mm/z）和铣削深度（0.05~0.25 mm），可得各切削参数下残余应力和表面粗糙度的变化规律。

表 3　铣削试验方案

Tab.3 Milling test program

Group	Milling speed v_c /(m·min^{-1})	Feed f_z /(mm·z^{-1})	Milling depth a_p /mm
1	160, 200, 240, 280, 320	0.14	0.15
2	240	0.10, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18	0.15
3	240	0.14	0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25

1.4　表面完整性的检测方案

工件的表面粗糙度和表面形貌采用美国 KLA-Tencor 公司生产的 MicroXAM-800 非接触式三维表面轮廓仪进行检测。由于铣削加工的对象为一个平面，且随铣刀头的切入切出，以及在边缘处的断续切削，使得在整个加工平面范围内的表面质量并不相同。故本文在整个铣削平面内随机选取 5 个测定点，来获得其表面粗糙度值，并求取平均值及标准偏差，用以绘制误差棒变化曲线，同时也可得到工件的三维轮廓图片。

将铣削加工后的工件冷却至室温，随后将工件放入盛有丙酮的超声波清洗机中进行清洗，然后采用芬兰 Stresstech 公司生产的 Xstress3000 X 射线应力分析仪来检测工件表面及其表层的残余应力值。Xstress3000 应力仪的衍射几何采用改善的 y 衍射几何系统，它由两个对称的探测器从两个相反的方向来记录衍射信号，每个探测器独立使用且互相关联，并以此来定峰，所以检测结果较为准确。

2　结果及分析

2.1　切削用量对表面粗糙度的影响

表面粗糙度即微观几何形状偏差，指在切削加工中，由于刀具和工件之间的挤压和摩擦、切屑和工件分离时产生的塑性变形及加工过程中产生振动等因素，在工件已加工表面产生凸峰和凹谷等微观现象。而表面粗糙度的特征与切削用量密切联系。图 2 展示了切削用量对表面粗糙度的影响规律。

因 7A09 铝合金为塑性材料，故在切削速度较低时，极易产生鳞刺与积屑瘤，致使工件已加工面的表面粗糙度值都偏大。而当切削速度较高时，则能较好地抑制鳞刺与积屑瘤，从而降低已加工面的表面粗糙度值。图 2a 为表面粗糙度值随铣削速度变化的曲线，当铣削速度 v_c>240 m/min 时，积屑瘤消失，工件表面粗糙度值下降并稳定在 0.49 处，基本不再发生改变。

减小每齿进给量，不仅能降低铣削加工残余材料的间距，还能抑制积屑瘤的出现，故其能有效地减小已加工表面的粗糙度值，但铣削力对每齿进给量的变化较为敏感，铣削过程中伴随有刀具的振动，因而表面粗糙度值不会无限制地降低。图 2b 为表面粗糙度值随每齿进给量变化的影响曲线，可得当每齿进给量增大时，表面粗糙度值也在持续增加，由值由 0.412 μm 升高到 0.795 μm，变化幅度最大。

图 2c 为表面粗糙度值随铣削深度变化的曲线，可知当铣削深度从 0.05 mm 增大为 0.25 mm 时，其表面

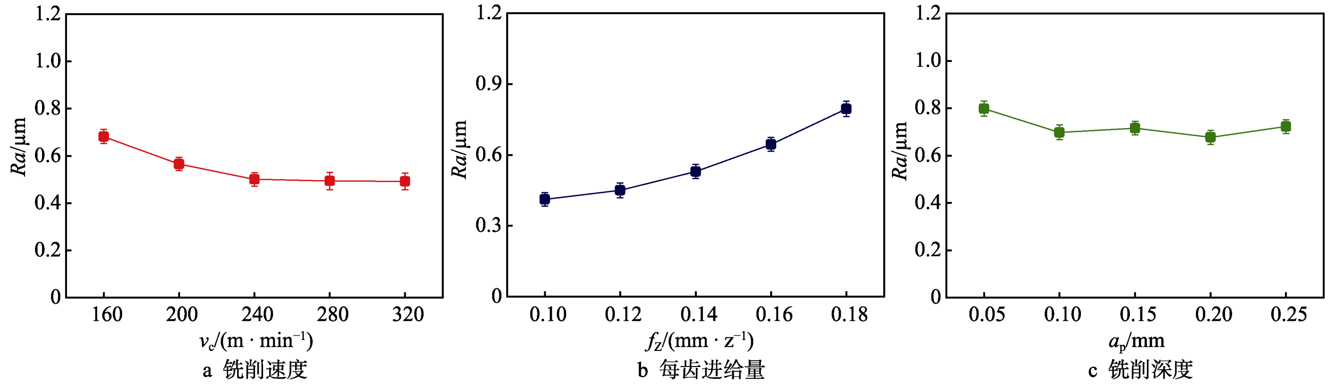


图 2 切削用量对表面粗糙度的影响
Fig.2 Effect of cutting parameters on surface roughness: a) milling speed, b) feed, c) milling depth

粗糙度值在 0.722~0.798 μm 之间起伏变化，且变化幅度较小，即表面粗糙度对铣削深度的敏感性较低。但当铣削深度过小时，会形成额外的塑性变形，致使表面粗糙度值增大，即图 2c 中铣削深度为 0.05 mm 处的表面粗糙度值为 0.798 μm，明显高于其他铣削深度处的表面粗糙度值。

2.2 工件表面形貌

在切削过程中，表面形貌与表面的功能特性和零件的使用性能密切相关。一方面，表面形貌直接影响着零件表面的摩擦、润滑、配合等结合面的功能特性；另一方面，表面形貌对零件的磨损和腐蚀等使用性能具有显著的影响。所以表面形貌的探究在机械加工领域越来越受到重视。

因为铝合金属于塑性金属，故在切削加工时，会在接近刀刃及刀尖的前刀面上出现积屑瘤，且积屑瘤的硬度较高，能够替代刀刃进行切削加工。因积屑瘤会伸出刀尖和刀刃以外，致使其出现过切量 δ（见图 3a），

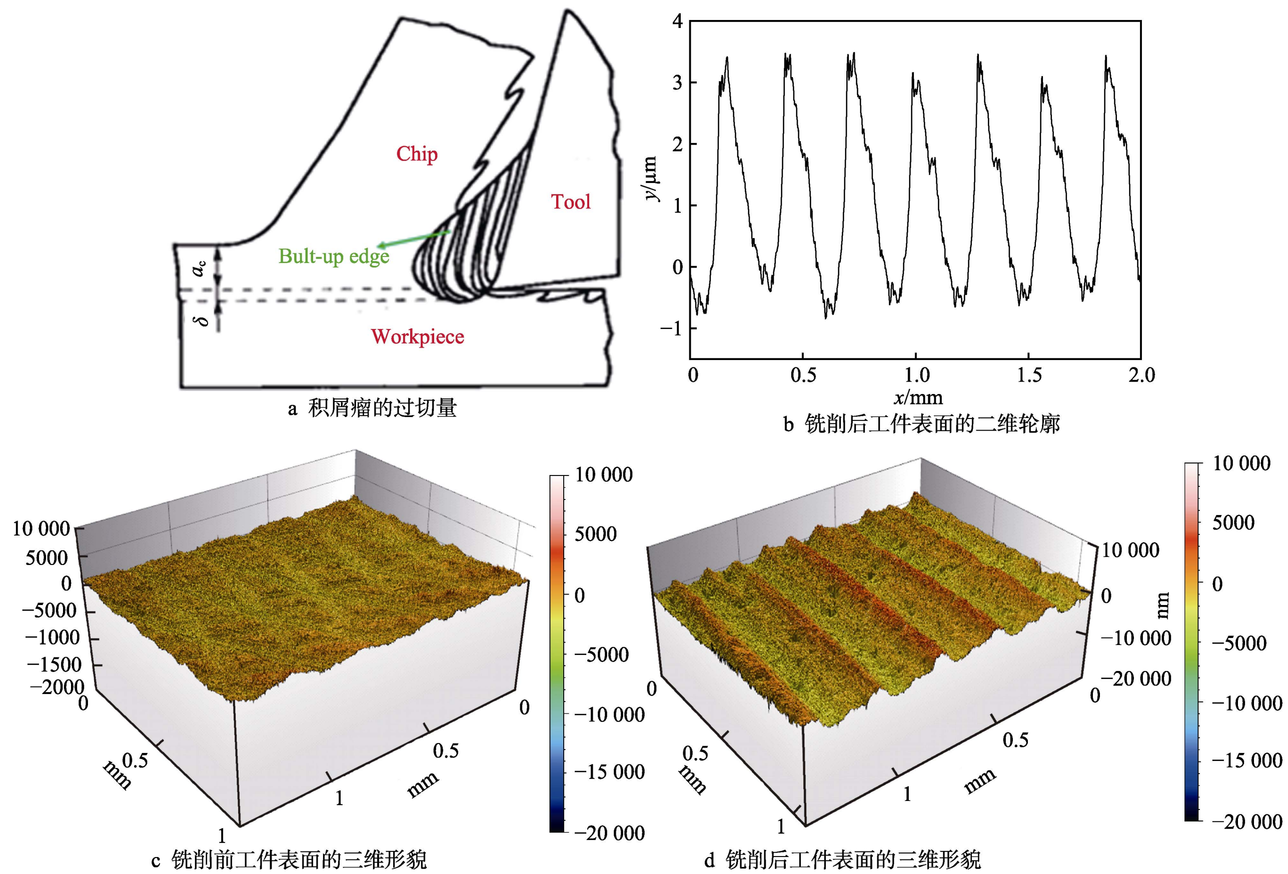


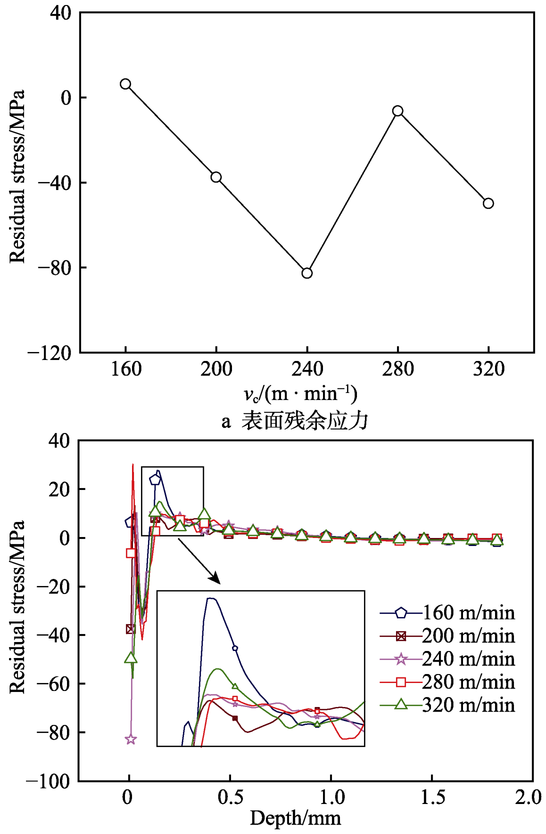
图 3 积屑瘤及工件切削前后的表面形貌
Fig.3 The surface morphology of chip tumor and workpiece before and after cutting:
a) overcutting of debris nodules, b) 2D profile of the surface of a workpiece after milling,
c) 3D morphology of workpiece surface before milling, d) 3D morphology of workpiece surface after milling

且积屑瘤的形状并不规则，故刀刃上各点的过切量也不相同，使得工件的已加工表面上出现一些深度和宽度各不相同的纵向犁沟。虽然切削刃的不平整也会导致犁沟的产生，但与积屑瘤相比，其所产生的犁沟较浅。由图 3b—d 可得，铣削加工后工件表面出现较深的犁沟，沿切削进给方向，加工表面存在的波峰和波谷都在一定的范围内起伏变化，呈现出明显的规律性。故该现象也印证了本试验中积屑瘤的存在。

2.3　切削用量对残余应力的影响

2.3.1　铣削速度对残余应力的影响

图 4 是不同铣削速度对表面和表层残余应力的影响曲线。由图 4a 可得，当铣削速度增加时，已加工表面的残余应力变化曲线并无显著的单调性。在铣削速度由 160 m/min 增加为 240 m/min 时，其表面残余应力曲线呈现出直线下降的趋势。而铣削速度在 240~280 m/min 之间时，表面残余应力值又呈现出上升趋势，后又随速度的增大开始下降。在整个铣削速度范围内，仅 160 m/min 时为残余拉应力，其余各速度下均为残余压应力。此现象可用热效应在残余应力产生过程中的影响来解释。当铣削速度 v_c< 240 m/min 时，因铣削速度较低，导致切屑散热速度较慢，较高的热量传递到工件表面，引起表面残余压应力的增加；



a 表面残余应力

b 表层残余应力

图 4　铣削速度对表面和表层残余应力的影响
Fig.4 Effect of milling speed on residual stress of surface and surface: a) surface, b) surface layer

而当铣削速度较大时，材料去除速率增加，切屑以及与其相关的热量在切割区域保持更短的时间，因此加工表面的散热率降低，导致表面残余压应力降低。因铣削速度持续增加使得刀具与工件、切屑间产生剧烈摩擦，并产生大量热量，致使表面残余压应力又呈现出增大的趋势。

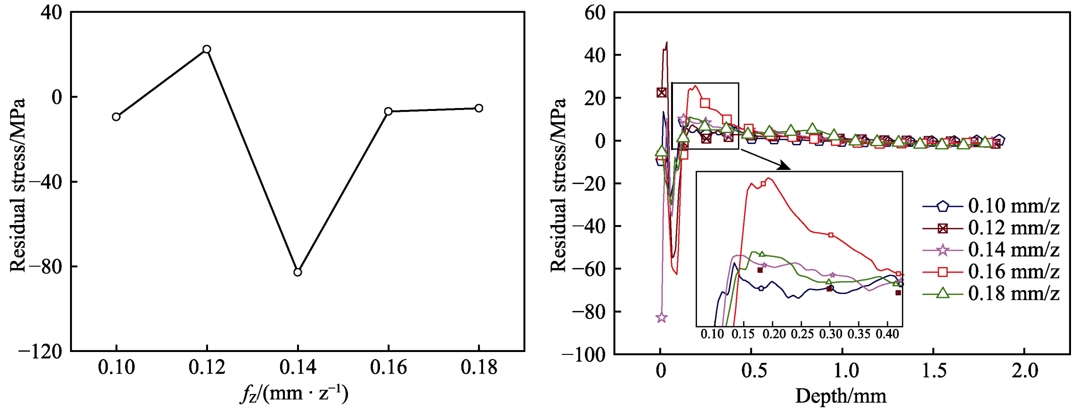
图 4b 为不同铣削速度对表层残余应力的影响曲线。由图 4b 可知：各铣削速度下，其残余应力曲线基本相同，均呈“勺”形分布。在工件表面以下很小的区域内，残余应力具有较大的梯度下降，主要是因为：随着铣削速度的增大，尽管切削力会减小，但单位时间内刀具与工件的碾压、摩擦力作用加剧等因素，使其接触表面产生大量的切削热，进而在表面层产生较大的犁耕力，造成表面、里层的残余应力均有所增大。由局部放大图可得：当铣削速度在 200~320 m/min 之间时，其残余应力值随铣削速度的增大而增大，但在 160 m/min 时，工件获得了最大残余拉应力，为 27.73 MPa。

2.3.2　每齿进给量对残余应力的影响

图 5 是不同每齿进给量对表面和表层残余应力的影响曲线。由图 5a 可得，已加工表面残余应力对每齿进给量的变化较为敏感，随每齿进给量的增加，表面残余应力的变化曲线为锯齿状，仅在 0.12 mm/z 时表现为残余拉应力，其余各进给量下皆为残余压应力，且在每齿进给量为 0.14 mm/z 时，残余应力值变化幅度较大，此时的残余压应力值也最大，即工件在此每齿进给量下可获得优异性能。

出现上述现象的原因是：当每齿进给量为 0.10~0.12 mm/z 时，随着进给量的增加，里层材料弹性变形由拉伸变形转变为压缩变形，当加工完成时，里层材料弹性形变的恢复受到表面材料的牵制，而出现由表面残余压应力向残余拉应力的转变；当每齿进给量继续增加时，刀具后刀面与已加工表面产生较大的挤压与摩擦，使表层金属产生拉伸塑性变形，刀具离开后，在里层金属的作用下，表层金属又产生相应的残余压应力；当每齿进给量为 0.14~0.16 mm/z 时，前一因素占主导，使得残余压应力减小；而在 0.16 mm/z 后，二者相平衡，导致表面残余压应力基本保持不变。

图 5b 为不同每齿进给量对表层残余应力的影响曲线。与图 4b 相似，曲线均呈“勺”形分布。随着每齿进给量的增加，切削力和产生塑性变形的面积也在增加，且因热应力引起的残余应力占主导地位，因此工件的表面残余应力及残余应力层深都会与之增大。由局部放大图可见，当每齿进给量增加时，其残余应力曲线也随之上升，且统一表现为残余拉应力，但在 0.16 mm/z 时工件的残余拉应力值出现了突变，其曲线明显高于其余进给量，残余拉应力最大值为 25.69 MPa。



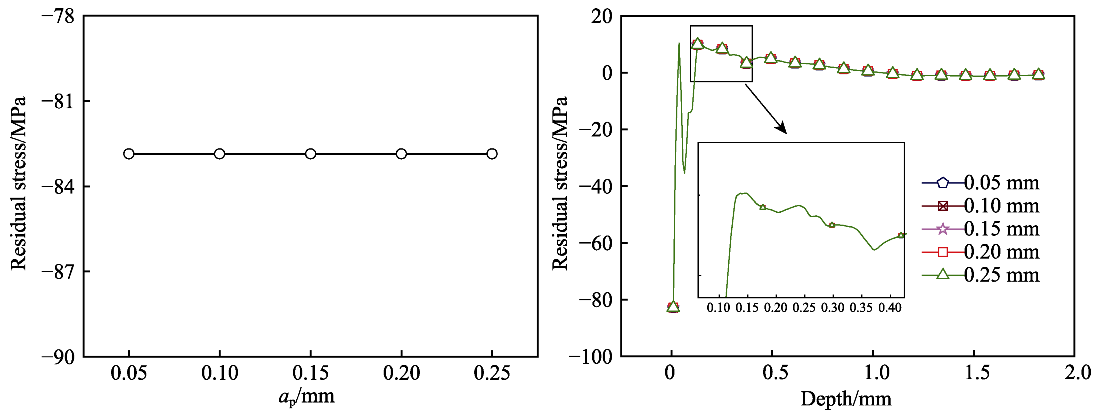
a 表面残余应力　　b 表层残余应力

图 5　每齿进给量对表面和表层残余应力的影响

Fig.5 Effect of feed per tooth on surface and surface residual stress: a) surface, b) surface layer

2.3.3　铣削深度对残余应力的影响

图 6 为不同铣削深度下表面和表层残余应力的变化曲线。由图 6a 可得，铣削深度的改变对已加工表面残余应力的影响并不显著，5 个参考点处的残余应力值几乎一样，呈直线状。且图 6b 中 5 种铣削深度下的残余应力曲线相互重叠，对其进行局部放大后仍难观察出差别，可得铣削深度对残余应力层深的分布影响也较小。究其原因：在铣削加工过程中，因变形力会随着铣削深度的增大而增大，但变形系数却相反，随着铣削深度的增加而减小，导致摩擦系数减小，所以致使铣削深度对表面残余应力的影响较小。



a 表面残余应力　　b 表层残余应力

图 6　铣削深度对表面和表层残余应力的影响

Fig.6 Effect of milling depth on residual stress of surface and surface: a) surface, b) surface layer

3　结论

1）本文采用单因素法对 7A09 铝合金进行了平面铣削试验，研究了铣削用量（铣削速度、每齿进给量及铣削深度）对铣削表面质量的影响，得到了表面粗糙度和残余应力的变化规律，对 7A09 铝合金铣削加工表面质量的控制具有一定的借鉴意义。

2）平面铣削试验中，7A09 铝合金的表面粗糙度随铣削速度的增大和每齿进给量的降低而得以改善，但铣削深度对表面粗糙度的影响较小。同时，因积屑瘤的存在使已加工表面出现一些深度和宽度各不相同的纵向犁沟。

3）当改变铣削用量时，7A09 铝合金的残余应力曲线均呈“勺”形分布，且残余应力对铣削速度和每齿进给量的变化都较为敏感，而对铣削深度的敏感性较低。

4）通过分析铣削用量对 7A09 铝合金铣削表面质量的影响，得到了本文试验条件下的最优铣削参数组合：v_c=240 m/min，f_z=0.14 mm/z，a_p= 0.15 mm。

参考文献：

[1] FANG F, GU C, HAO R, et al. Recent progress in surface integrity research and development[J]. Engineering(Beijing), 2018, 4(6): 754-758.

[2] FIELD M, KAHLES J F. The surface integrity of machined and ground high strength steels[J]. DMIC, 1964, 210: 54-77.

[3] LIU C R, BARASH M M. Variables governing patterns of mechanical residual stress in a machined surface[J]. Journal of engineering for industry, 1982, 104(3): 257-264.

[4] 高尚, 耿宗超, 吴跃勤, 等. 石英玻璃超精密磨削加工的表面完整性研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 186-195.
GAO Shang, GENG Zong-chao, WU Yue-qin, et al. Surface integrity of quartz glass induced by ultra—Precision grinding[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2019, 55(5): 186-195.

[5] 陈鑫, 王栋, 刘昱范. 高速磨削对 18CrNiMo7-6 表面完整性的影响研究[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 268-274.
CHEN Xin, WANG Dong, LIU Yu-fan. Influence of high speed grinding on surface integrity of 18CrNiMo7-6[J]. Surface technology, 2018, 47(9): 268-274.

[6] DAHLMAN P, GUNNBERG F, JACOBSON M. The influence of rake angle, cutting feed and cutting depth on residual stresses in hard turning[J]. Journal of materials processing technology, 2004, 147(2): 181-184.

[7] BASHIR K, ALKALI A U, ELMUNAFI M H S, et al. Experimental investigation into effect of cutting parameters on surface integrity of hardened tool steel[J]. IOP conference series: Materials science and engineering, 2018, 344: 012020.

[8] WANG B, LI X, LIU J, et al. Comparison of atmospheric corrosion behavior of Al-Mn and Al-Zn-Mg-Cu alloys in a tropical coastal environment[J]. Materials and corrosion, 2017, 458: 653.

[9] ZHANG Y, JIANG S, ZHU X, et al. Influence of heat treatment on complex-shape rotating disk subjected to isothermal precision forging[J]. Journal of mechanical science and technology, 2017, 31(1): 141-147.

[10] LI F, WU H, QIN M. Effects of processing parameters on the extrusion by continuous variable cross-section direct extrusion with 7A09 aluminium alloy[J]. Modern physics letters B, 2016, 53: 1650053.

[11] 马冬威, 李淼泉, 罗皎, 等. 基于应变影响的 7A09 铝合金等温压缩流动应力模型[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(5): 954-960.
MA Dong-wei, LI Miao-quan, LUO Jiao, et al. Flow stress model considering contribution of strain in isothermal compression of 7A09 aluminum alloy[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2011, 21(5): 954-960.

[12] LUO J, LI M Q, MA D W. The deformation behavior and processing maps in the isothermal compression of 7A09 aluminum alloy[J]. Materials science & engineering: A (structural materials: properties, microstructure and processing), 2012, 532: 548-557.

[13] LUO J, LI M Q, MA D W. Microstructure and mechanical properties of 7A09 aluminium alloy after isothermal compression and solution treatment[J]. Journal of materials processing technology, 2012, 212(5): 1039-1048.

[14] CHEN Q, XIA X, YUAN B, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of 7A09 high strength aluminium alloy processed by backward extrusion at room temperature[J]. Materials science and engineering: A, 2013, 588: 395-402.

[15] JI Hong-zhi, YUAN Lin, SHAN De-bin. Study on cooling contraction behavior of 7A09 aluminum alloy at different cooling rates[J]. Materials science and technology, 2011, 23: 412.

[16] WANG W W, JIA B B, LUO S J. Effect of heat treatment on mechanical properties of thixoformed 7A09 aluminum alloy[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2009, 19(S2): 1345.

（上接第 326 页）

[13] LIU G, ZHOU Z, QIAN X, et al. Wear mechanism of cemented carbide tool in high speed milling of stainless steel[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2018, 31(1): 1-10.

[14] LI A, ZHAO J, HOU G. Effect of cutting speed on chip formation and wear mechanisms of coated carbide tools when ultra-high-speed face milling titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. Advances in mechanical engineering, 2017, 9(7): 1-13.

[15] HOU Jun-zhan, ZHOU Wei, DUAN Hong-jian, et al. Influence of cutting speed on cutting force, flank temperature, and tool wear in end milling of Ti-6Al-4V alloy [J]. International journal of manufactural technology, 2014, 70(9-12): 1835-1845.

[16] ABUKSHIM N, MATIVENGA P, SHEIKH M. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: a review and implications for high speed machining[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2006, 46(7): 782-800.

[17] WANG C, DING F, TANG D, et al. Modeling and simulation of the high-speed milling of hardened steel SKD11 (62HRC) based on SHPB technology[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2016, 108: 13-26.

[18] JIANG F, LIU Z, YANG F, et al. Investigations on tool temperature with heat conduction and heat convection in high-speed slot milling of Ti6Al4V[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2018, 96(5-8): 1847-1858.

[19] LIU J, CHOU Y K. On temperatures and tool wear in machining hypereutectic Al-Si alloys with vortex-tube cooling[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2007, 47(3-4): 635-645.

[20] YILDIZ Y, SUNDARAM M M, RAJURKAR K P. Empirical modeling of the white layer thickness formed in electrodischarge drilling of beryllium copper alloys[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2013, 66(9-12): 1745-1755.