

切削法制备超细晶材料研究进展与展望

焦锋, 孙海猛, 牛赢, 李成龙, 王壮飞

(河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 综述了切削法制备超细晶材料时加工参数和工艺条件对晶粒细化的影响, 分析了切削法制备超细晶材料的力学性能、耐腐蚀性能和热稳定性等, 探讨了超声振动复合切削法制备超细晶材料的可能性。在超声振动加工中, 材料受低应力高速、高频撞击的影响, 会发生严重的塑性变形, 表面大尺寸的晶粒得到细化, 同时超声振动还可以在材料表面形成表面微结构, 进一步改善材料性能。因而提出将切削法和超声振动相复合, 高效制备具有功能微结构的超细晶材料, 为微型零件超细晶材料制备提供新的工艺选择以及理论和技术支撑。

关键词: 切削; 超声振动; 晶粒细化; 微结构; 材料性能

中图分类号: TG511; TB559 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)04-0037-13

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.04.004

Research Progress and Prospect of Ultrafine Grained Material Prepared by Cutting Method

JIAO Feng, SUN Hai-meng, NIU Ying, LI Cheng-long, WANG Zhuang-fei

(School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Henan Jiaozuo 454003, China)

ABSTRACT: In this paper, the effects of machining parameters and processing conditions on grain refinement in the preparation of ultrafine grained material by cutting method were reviewed, the mechanical properties, corrosion resistance and thermal stability of ultrafine grained material prepared by cutting method were analyzed, and the possibility of preparing ultrafine grained material by ultrasonic vibration combined cutting method was discussed. The literatures show that in the ultrasonic vibration machining, the material is affected by low stress, high speed and high frequency impact, which will cause serious plastic deformation, and the large size grains on the surface will be refined. At the same time, ultrasonic vibration can also form surface microstructure on the material surface, which can further improve the material properties. Therefore, the combination of large strain extrusion machining and ultrasonic vibration is proposed to efficiently prepare ultrafine grain material with functional microstructure, which provides a new process selection and theoretical and technical support for the preparation of ultrafine grain material for micro parts.

KEY WORDS: cutting; ultrasonic vibration; grain refinement; microstructure; material properties

收稿日期: 2021-02-24; 修订日期: 2021-09-01

Received: 2021-02-24; Revised: 2021-09-01

基金项目: 河南省自然科学基金(202300410172); 国家自然科学基金(51675164); 河南省重点研发与推广专项(212102210056, 202102210070)

Fund: The Natural Science Foundation of Henan(202300410172); The National Natural Science Foundation of China(51675164) and Key R & D and Promotion Project of Henan Province(212102210056, 202102210070)

作者简介: 焦锋(1971—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密超精密加工技术与装备。

Biography: JIAO Feng(1971—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision and ultra-precision machining technology and equipment.

通讯作者: 牛赢(1987—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为精密超精密加工技术与装备。

Corresponding author: NIU Ying(1987—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: precision and ultra-precision machining technology and equipment.

引文格式: 焦锋, 孙海猛, 牛赢, 等. 切削法制备超细晶材料研究进展与展望[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 37-49.

JIAO Feng, SUN Hai-meng, NIU Ying, et al. Research Progress and Prospect of Ultrafine Grained Material Prepared by Cutting Method[J]. Surface Technology, 2022, 51(4): 37-49.

微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 在现代工业中占有重要的角色, 广泛应用于生物医疗、电子通讯及航空航天等领域。MEMS 的迅速崛起, 推动了当前工业向小型化、微型化的方向发展^[1]。目前, 制备微机电系统材料的加工技术主要有微细机械加工 (Micro-Machining)、激光技术 (Laser Technology)、LIGA 技术及准 LIGA 技术等, 但是这些技术都存在制造成本较高和加工效率低的缺点, 限制了这些工艺的应用。相对于微细加工技术, 通过金属塑性变形加工微零件材料, 在成本控制、加工效率和尺寸精度控制方面有较大优势。但是, 金属塑性变形加工微型零件材料时, 材料的平均晶粒尺寸一般超过 10 μm , 与大多数微小零件的特征尺寸在同一个数量级, 将产生尺寸效应, 影响零部件最终的尺寸精度和使用寿命^[2]。

超细晶材料 (Ultra-Fine Grained, UFG, 晶粒尺寸为 100 nm~1 μm) 因为具有优异的性能得到广泛的关注, 如果将超细晶材料应用于 MEMS 中, 其整体性能将得到提高^[3]。目前块体超细晶材料制取方法主要有溶胶-凝胶自组装技术、惰性气体冷凝法、电化学沉积法、射频溅射法等, 但是这些方法的超细颗粒在团聚过程中会不可避免地污染环境及设备, 而且致密化后存在诸如孔洞等大量宏观缺陷; 另外, 成形过程繁杂, 导致产业化应用成本较高^[4]。大塑性变形法 (Severe Plastic Deformation, SPD) 制备的超细晶材料能够显著改善金属及合金的致密度, 消除其内部缺陷, 不易引入孔隙和污染。常见的 SPD 方法主要有等通道转角挤压 (Equal Channel Angular Pressing, ECAP)^[5]、高压扭转 (High Pressure Torsion, HPT)^[6]、累积叠轧 (Accumulative Roll Bonding, ARB)^[7]、搅拌摩擦 (Friction Stir Processing, FSP)^[8] 等技术。SPD 技术通过施加较大的剪切应变, 可以有效地细化材料内部组织, 制备出具有大角度晶界的超细晶材料, 其晶粒尺寸可以细化至几百纳米。

随着研究的深入, 人们发现传统 SPD 技术存在不少局限性。首先, 传统 SPD 方法仅限于小应变率加工 ($<10^2 \text{ s}^{-1}$), 通常变形区温度也很低。其次, 由于成形设备的限制, 中高强度合金在接近环境温度和小变形率下很难变形。最后, 需要多次变形才能产生较大的应变, 导致变形参数 (如应变和应变率) 和变形路径的控制存在不确定性^[9]。

相比较而言, 大应变挤压切削法 (Large Strain Extrusion Machining, LSEM)^[10] 是通过 2 次剧烈塑性变形促使晶粒的破碎和细化, 可以控制切屑形成一条平整的带材或板材。其本质是塑性变形诱导晶粒内部位错大量增殖、湮灭、重组及其交互作用, 形成大量亚晶界和晶界, 原始粗晶逐步分裂为亚晶粒, 亚晶粒进一步破碎形成超细晶或纳米晶^[11]。已有研究表明, 在切削加工过程中, 单个变形阶段, 塑性变形的应变可达 13 左右, 应变率可达 10^6 s^{-1} , 既达到了 SPD

标准, 又达到了动态塑性变形标准, 属于典型的剧烈塑性变形过程。若工艺控制适当, 切削加工能够满足材料晶粒细化的条件^[12]。

由于对高性能材料日趋高涨的需求, 超声振动复合加工技术的研究和应用越来越多。超声振动因具有出色的辅助加工能力, 已经广泛应用于磨削、切削、铣削和钻削等技术, 并开始向超声 ELID 复合磨削、超声 EDM 复合加工和三维超声椭圆振动技术等方面发展。如果将超声辅助加工工艺与传统的 SPD 方法相结合, 实现多工艺加工方法复合, 则会在一定程度上改善加工工艺和制造过程, 使材料表面质量、微观形貌、表面完整性和疲劳性能发生显著变化^[13]。例如, 相比常规 ECAP, 间歇超声辅助等通道转角挤压 (Intermittent Ultrasonic Equal Channel Angular Pressing, IU-ECAP) 制备的超细晶材料具有更均匀的组织 and 更小的晶粒, 材料的硬度和极限拉应力得到增强, 具有更好的热稳定性^[14-15]。因此, 本文提出了切削法和超声振动复合制备超细晶材料。

本文重点介绍了近年来切削法制备高性能金属材料的重要研究进展, 主要包括切削法制备超细晶材料时加工参数和工艺条件对晶粒细化的影响, 分析了切削法制备超细晶材料的力学性能、耐腐蚀性能和热稳定性等, 探讨了超声振动复合切削法制备超细晶材料的可能性。文献表明, 在超声振动加工中, 材料表面大尺寸的晶粒得到细化, 材料性能得到改善。如果将切削法和超声振动相复合, 制备的材料综合性能会再次提升, 打破传统 SPD 方法的强化极限, 该技术必将成为新加工工艺的研究热点。

1 切削法制备超细晶材料的影响因素

国内外学者对切削法制备超细晶材料进行了广泛研究, 并取得了重要成果。目前, 大应变挤压切削法 (LSEM) 已经应用于面心立方结构的金属及其合金 (铝和铝合金、铜和铜合金等) 和密排六方金属 (镁合金和钛合金) 等的加工^[16-17]。关于 LSEM 的研究成果主要集中在以下几个方面: LSEM 制备超细晶材料的工艺机理; 加工参数对成形材料晶粒大小的影响; LSEM 制备的材料性能检测; 组合刀具形状及姿态对材料表面形貌的影响; 超细晶材料的再加工利用。

针对大应变挤压切削法制备超细晶材料的研究现状, 本文从切屑厚度压缩比 λ 、刀具前角 α 、冷却条件和刀具表面微沟槽等方面对超细晶材料微观组织变化和力学性能的影响进行综述。

1.1 切屑厚度压缩比 λ 和刀具前角 α

大应变挤压切削法之所以能产生近似纯剪切的塑性变形, 主要是刀具前角 α 和切屑厚度压缩比 λ 共同作用的结果^[18-22]。LSEM 由切削刀具和限制块 (刀具) 2 部分组成, 切削刀具通过前刀面的剪切和摩擦

使切屑受到剧烈塑性变形, 实现工件材料与基体分离。切屑沿着切削刀具前刀面和限制块(刀具)形成的挤压通道流出, 在挤压摩擦作用下, 切屑材料产生第二次剧烈塑性变形。2 次剧烈塑性变形在微观上引起晶粒的破碎和细化, 在宏观上控制切屑形成一条平整的带材或板材, 其加工原理如图 1 所示^[23]。Chiffre^[10]通过试验推导得出总剪切应变 γ 与刀具前角 α 、切屑厚度压缩比 λ 的关系为:

$$\gamma = \frac{\lambda}{\cos \alpha} + \frac{1}{\lambda \cos \alpha} - 2 \tan \alpha \quad (1)$$

式中: $\lambda = t_c/t_0$, t_c 为切屑厚度; t_0 为待切削厚度。

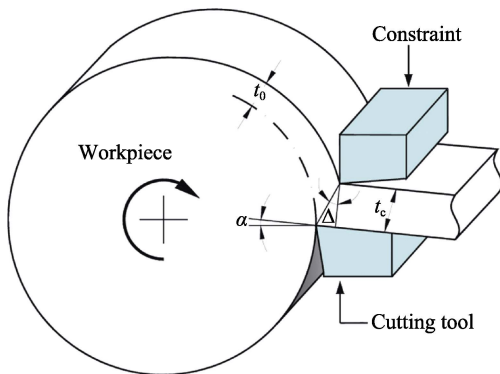


图 1 大应变挤压切削法原理^[23]
Fig.1 Schematic diagram of LSEM^[23]

Moscoso 等^[24]采用 LSEM 工艺制备具有超细晶结构的 MgAZ31B 合金薄板, 研究了剪切应变与切屑厚度压缩比和刀具前角的关系, 如图 2 所示。结果表明, 给定刀具前角 α , 当 $\lambda < 1$ 时, 剪切应变和切屑厚度压缩比成反比; 当 $\lambda > 1$ 时, 剪切应变和切屑厚度压缩比成正比; 当切屑厚度压缩比 $\lambda = 1$ 时, 剪切应变最小。给定切屑厚度压缩比, 当刀具前角为 -20° 时, 剪切应变最大。

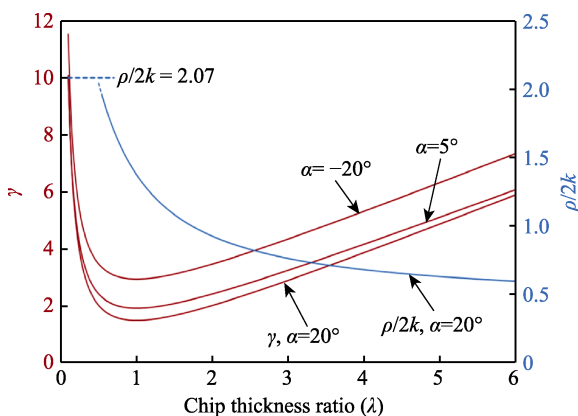


图 2 剪切应变随切屑厚度比和前角的变化^[24]
Fig.2 Variation of shear strain with chip thickness ratio and rake angle^[24]

梁土荣等^[25]采用 LSEM 制备超细晶 AZ31 镁合金带材, 分析了带材的微观组织和材料性能。结果表明, 当 $\lambda = 1.0$ 时, 晶粒从原始的 $20 \sim 40 \mu\text{m}$ 细化到 $5 \sim 10 \mu\text{m}$,

同时出现较多的超细晶粒, 维氏硬度从 51.6HV 增加到 68.9HV ; 当 $\lambda = 0.5$ 时, 晶粒进一步细化到 $3 \sim 6 \mu\text{m}$, 且分布均匀, 但维氏硬度下降至 67.7HV 。Moradi 等^[26]对镍合金进行平面应变加工 (Plane Strain Machining, PSM) 和大应变挤压切削法加工, 证明了 LSEM 对加工表面微结构的实用性, 同时增强了对晶粒细化区厚度的控制。利用红外热成像对 LSEM 试验进行测量, 随着 λ 的减小, LSEM 变形区的温度会升高, 如图 3 所示。采用取向成像显微技术 (Orientation Imaging Microscopy, OIM) 对 PSM 和 LSEM 加工材料横截面进行分析, 结果显示, PSM、LSEM ($\lambda = 1.8$) 和 LSEM ($\lambda = 0.8$) 在加工材料表面下分别产生 $(20 \pm 3) \mu\text{m}$ 、 $(44 \pm 5) \mu\text{m}$ 和 $(59 \pm 5) \mu\text{m}$ 的 UFG 组织厚度, 如图 4 所示。同时, LSEM 产生的材料表面具有较高的硬度, 通过减小 λ , 硬度增加区域也会变大。

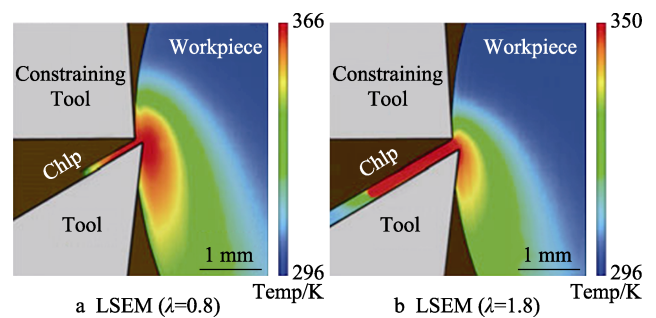


图 3 变形区温升的红外热成像表征^[26]
Fig.3 IR thermography characterization of temperature rise in the deformation zone^[26]

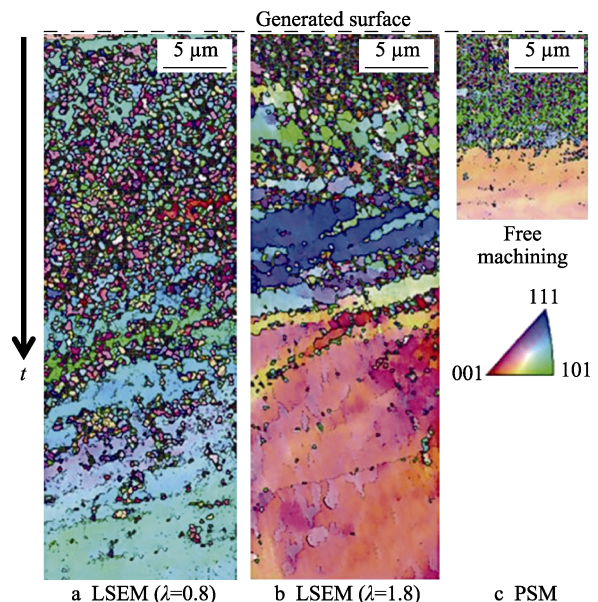


图 4 表面微结构的取向成像显微技术^[26]
Fig.4 Orientation imaging microscopy of microstructures generated in the surface^[26]

大量研究表明, 通过改变 LSEM 的切屑厚度压缩比获得不同加工应变来制备超细晶材料的想法是可行的。但是, LSEM 中切屑厚度压缩比是有上限的,

如果挤削组合刀具的通道宽度大于普通带材的宽度,限制刀具将不再起作用,LSEM就会退变为普通切削。

Deng等^[27]研究了LSEM中刀具前角对纯铜切屑组织和力学性能的影响。试验结果表明,当刀具前角为5°或10°时,等轴晶粒尺寸为0.2~1 μm,平均尺寸约为0.5 μm。刀具前角为5°时,切屑晶粒略小于刀具前角为10°时。当刀具前角为20°和30°时,切屑晶

粒尺寸变大,为1~10 μm。邹志杰等^[28]利用不同前角的刀具对纯铜材料进行加工,结果表明,当刀具前角为30°时,纯铜材料晶粒由约100 μm粗晶细化至亚微米级,且晶粒被拉长,宏观硬度提升了约62%;刀具前角为10°时,晶粒进一步细化为等轴超细晶,甚至材料部分出现纳米晶,宏观硬度提升了约76%,如图5所示。同时,前角越小,开始再结晶温度越低,再结晶时晶粒越小,切屑硬度值越高。

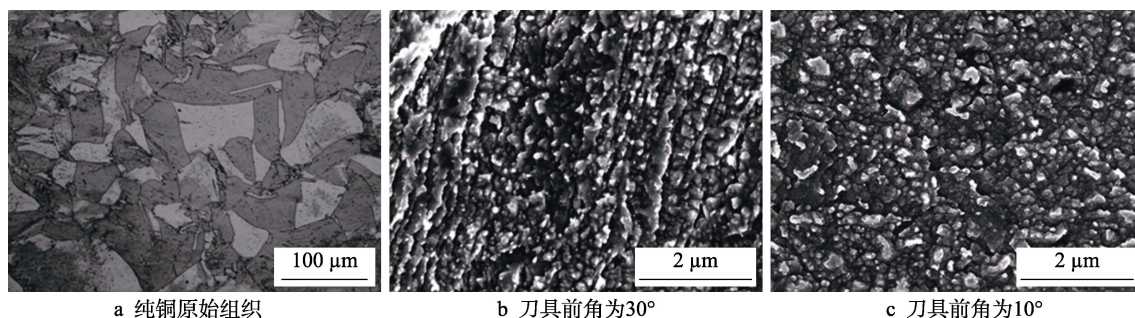


图5 纯铜原始组织和不同刀具前角时切屑的微观形貌^[28]

Fig.5 Original microstructure of pure copper (a), Chip by 30° rake angle tool (b) and chip by 10° rake angle tool (c)^[28]

刀具几何角度很大程度决定了刀具加工性能的好坏,正确选择刀具几何角度可以减少加工中振动和过载的可能性,延长刀具及设备的使用寿命,降低能耗等。在LSEM中,刀具前角作为切削加工中重要的几何参数之一,其对晶粒细化和材料性能等有很大的影响。

1.2 冷却条件

材料在超低温条件下与室温条件下的力学性能

有很大差异,如铝合金^[29]、铜合金^[30]、钛合金^[31]和某些特殊钢铁材料^[32],它们在超低温条件下具有比室温中更高的强度和更加优异的韧性。6061铝合金、纯铜、高锰钢、纳米晶纯钛4种材料在室温(Room Temperature, RT)和超低温(Cryogenic Temperature, CT)环境下拉伸的应力-应变曲线如图6所示^[33],如果利用材料在超低温条件下的物理性能进行LSEM,可以获得性能更加优异的超细晶带材。

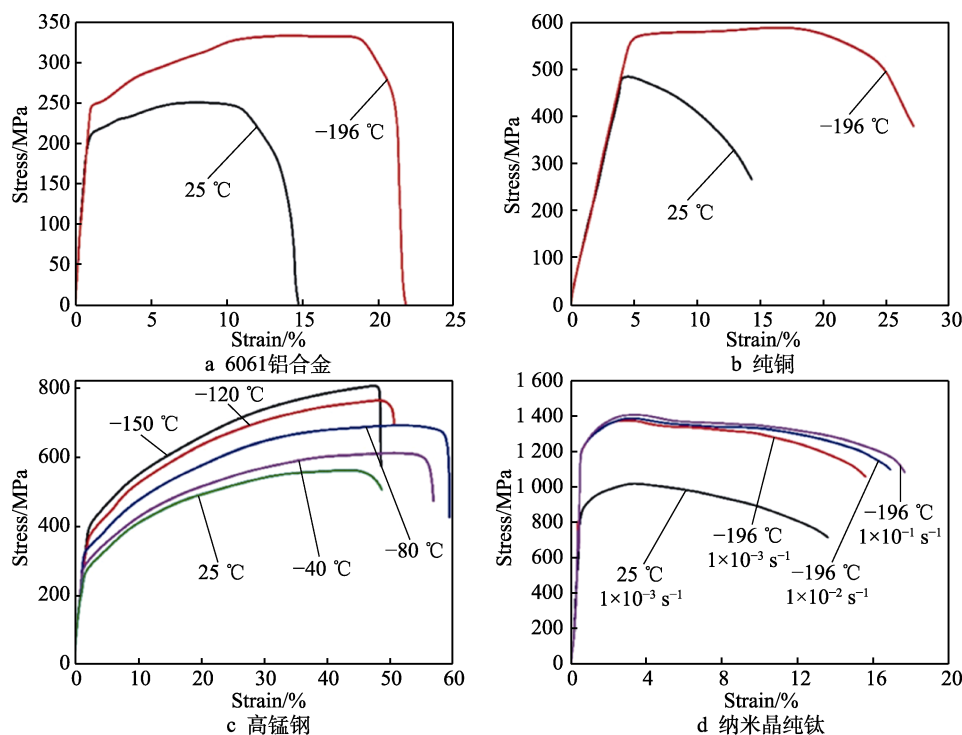


图6 4种典型金属材料在室温和超低温环境下拉伸的应力-应变曲线^[33]

Fig.6 Engineering stress vs strain curves of four typical metals during tensile test at room temperature and cryogenic temperature^[33]: a) 6061 aluminum alloy; b) pure copper; c) high manganese steel; d) nanocrystalline pure titanium

殷晓龙等^[34-35]在超低温 (CT, 加工前将工件浸入液氮浴中) 和室温 (RT) 条件下对 7075 铝合金进行 LSEM 试验, 发现 2 种条件下加工结果表现得截然不同, 温度对微观结构产生了重要影响。CT-LSEM 制备的切屑比 RT-LSEM 切屑的表面更加光滑, 只有细小的裂纹可见, 具有更好的形态完整性, 如图 7 所示。RT-LSEM 和 CT-LSEM 制备的 7075 铝合金切屑平均晶粒尺寸分别为 175 nm 和 170 nm, 如图 8 所示。

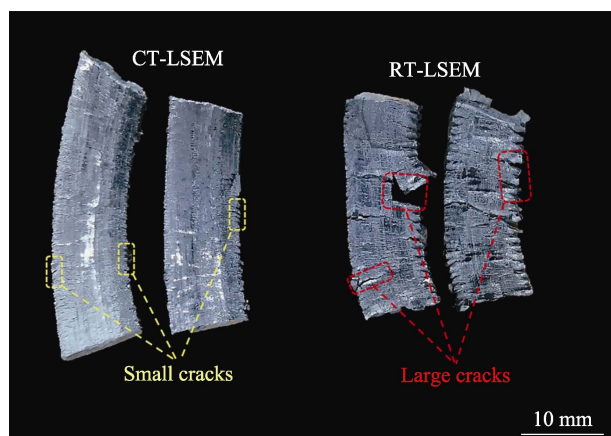


图 7 大应变挤压切削法低温和室温条件下 7075 铝合金切屑及其形态差异^[34]

Fig.7 The 7075 aluminum alloy chips and their morphology differences obtained from CT and RT LSEM^[34]

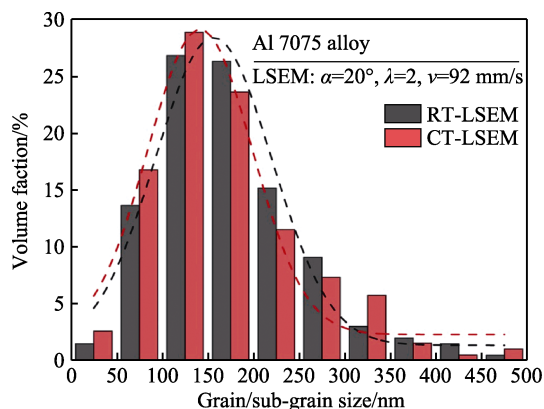


图 8 大应变挤压切削法低温和室温下 7075 铝合金样品的晶粒/亚晶粒尺寸统计分布^[34]

Fig.8 Grain/sub-grain size statistic distributions of the RT and CT LSEM 7075 aluminum alloy samples^[34]

Bertolini 等^[23]设计了一种特殊的 LSEM 装置, 该装置通过高真空绝缘管将液氮输送到切削区, 研究不同加工参数下 LSEM 制备的切屑表面完整性和晶粒细化, 如图 9 所示。当切削速度从 30 m/min 提高到 120 m/min 时, AZ61 镁合金 UFG 层厚度也从 $(27.7 \pm 4) \mu\text{m}$ 增至 $(33.9 \pm 6) \mu\text{m}$; 当切削速度为 120 m/min, 冷却条件分别为 Dry 和 Cryogenic 时, Cryogenic 条件下的 UFG 层厚度为 $(45 \pm 4) \mu\text{m}$, 同比提高了约 27.82%。结果表明, 提高切削速度可以增加切屑 UFG 层厚度。同时, 无论采用何种切削速度, 低温冷却应用于 LSEM

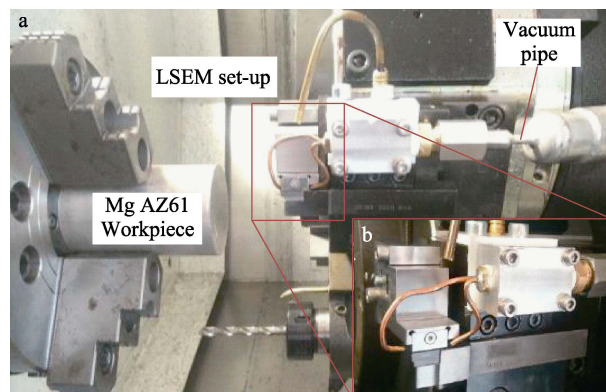


图 9 车床上安装的低温 LSEM 试验装置^[23]

Fig.9 Cryogenic LSEM experimental setup mounted on the lathe^[23]

加工时都可以使切屑表面具有更大的晶粒细化和扩展的 SPD 变形层。

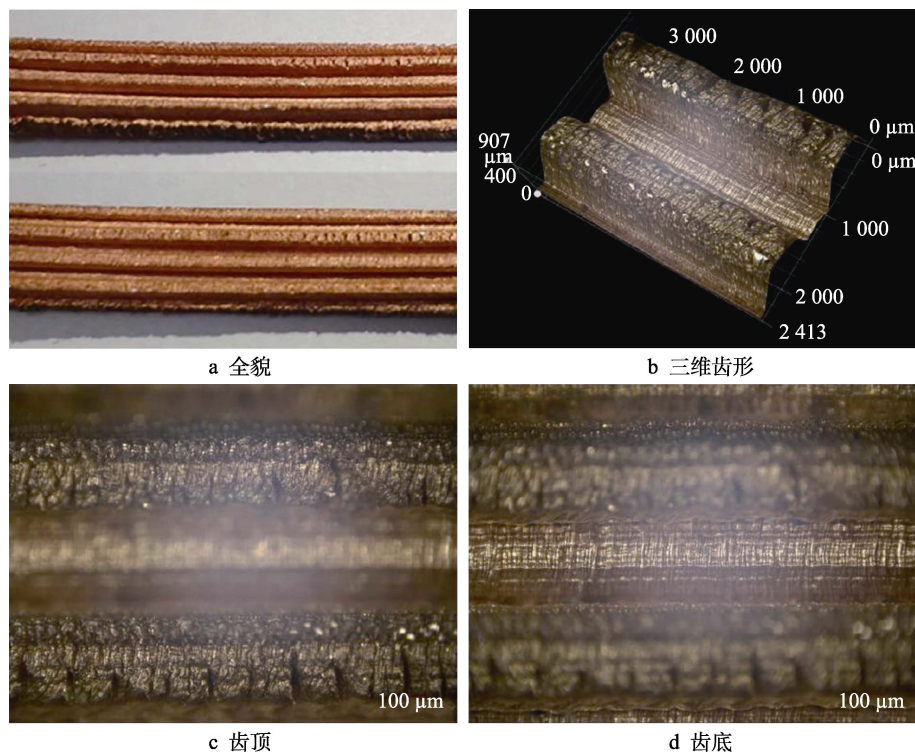
由于在超低温变形过程中位错的增殖和积累使材料的加工硬化能力提高, 使合金有了良好的超低温塑性加工能力, 延展性也因此改善。但是, 在常温变形过程中材料变形和摩擦作用会产生大量的切削热, 在动态回复的作用下产生位错湮灭, 位错密度和位错累积能力下降, 加工硬化能力和延展性也因此变差^[36]。

1.3 刀具表面微沟槽

切削成形是一种新颖的切屑成形工艺, 在刀具的表面制备不同类型的微沟槽会使切屑表面产生具有减阻、抗振、耐磨和降噪等特性的微结构。在切削过程中, 将原本是废料的切屑直接制备成为工业需求的带材, 具有低污染、高效率、工艺简单和应用价值大等优点。

Kim 等^[37]在刀具的前刀面制备了微沟槽, 研究了不同结构形状的微沟槽对切削成形的影响。研究发现, 通过调整微沟槽的几何参数, 可实现切屑形貌的控制。何迪^[38]采用 LSEM 技术, 通过在限制刀具预制沟槽, 制备出了具有沟槽结构的超细晶纯铜成形切屑, 如图 10 所示。这表明合理地设计限制刀具与切屑接触部分的结构, 能影响切削的成形结果。Aoki 等^[39]提出了一种既不破坏切屑, 又克服切屑堵塞, 提高传统车削作业效率的新方法。在刀具前刀面上雕刻“沟槽”, 通过优化沟槽形貌, 对不同切削加工条件下的切屑流动进行调整, 以减小前刀面的摩擦力, 提高切削性能。

国内外学者针对超细晶材料制备和切屑回收利用等课题^[40-41], 采用复合切削方法制备金属带材的工艺, 制备了初步规整的切屑带材, 得出了切削工艺参数与切屑变形之间的联系, 获得的再生材料的力学性能要高于铸造材料, 并将再生的超细晶材料制成了微型零件, 取得了丰硕的研究成果, 证明了切削技术在切屑成形领域具有突出优势。

图 10 超细晶纯铜成形切屑^[38]Fig.10 Formed chips of ultrafine grained pure copper^[38]: a) full view; b) 3D tooth; c) tooth top; d) tooth bottom

2 切削法制备超细晶材料的性能研究

随着航空航天、生物医药、电子通讯和军事装备等行业对金属材料性能提出的要求越来越高,人们在不断寻找高性能材料及其制备方法来满足当前日趋高涨的需求。超细晶材料因为晶粒细小、位错高和缺陷密度低而备受关注,其物理化学性能往往优于传统的粗晶金属材料。本文将从切削法制备超细晶材料的腐蚀性能、力学性能和热稳定性 3 方面进行综述。

2.1 腐蚀性能

近年来,高强度工业纯钛和镁合金等材料在医疗金属材料领域的需求越来越大,但是由于植入物在生理环境中耐腐蚀性差及腐蚀时会产生气泡导致过早的失效,在很大程度上限制了它们的临床应用。因此,近年来医疗金属材料的研究主要集中在如何减小腐蚀降解速率方面。SPD 提供了一种有效提高材料腐蚀性能的方法,通过改变材料的表面完整性,如晶粒尺寸、残余应力和晶体取向^[42]等控制材料的降解速率。但是,传统的 SPD 技术需要在变形通道内多次加工才能使材料中积累较大的应变,也需要合适的加工路径来细化材料的微观组织,才能使晶粒成为超细晶粒^[43-45]。

Kim 等^[46]研究发现,晶粒细化对抗晶间腐蚀存在有利作用,其观察到纳米晶镍的表面光滑,晶界穿透率较小,抗晶间腐蚀能力显著增强。随后 Klocke 等^[47]和 Deng 等^[48]对超细晶材料的腐蚀性能进行了研究,

发现 LSEM 制备的超细晶材料与普通粗晶金属材料相比,大多数都存在能量稳定的晶界,这些组织使其具有更强的耐腐蚀性能。Bertolini 等^[23]设计了一种特殊的 LSEM 装置,该装置采用高真空绝缘管将液氮输送到切削区,通过动电位极化技术研究切屑的耐腐蚀性。结果表明, LSEM 技术显著提高了 AZ61 镁合金的耐蚀性,与基体材料相比, LSEM 试样的腐蚀曲线向更高的值移动,同时与干式挤压切削相比,低温挤压切削可增强镁合金材料的耐腐蚀性。

国内外学者对 LSEM 切屑进行了电化学腐蚀测试,通过对比动电位极化曲线,得出超细晶材料具有更强的耐腐蚀性,但对提高超细晶材料耐腐蚀性的机理还需进一步研究。

2.2 力学性能

传统 SPD 方法加工的材料晶粒被细化至亚微米级/纳米级,塑性会出现下降,这对于后续加工和变形是不利的^[49-51]。Wang 等^[52]对纳米铜的应变硬化和塑性行为进行了研究,认为变形过程中位错与晶界相互作用引起的动态回复效应致使位错密度降低,从而引起应变硬化能力下降,最终导致塑性降低。随后, Wang 等^[53]进一步研究发现, SPD 工艺制备的超细晶金属具有很高的初始位错密度(甚至达到饱和),使得加工硬化率降低和塑性变形减小。

Sharma 等^[54]采用 LSEM 制备 Al-6063 超细晶合金带材,分析发现, LSEM 制备超细晶带材时晶粒尺寸随着应变水平的提高而减小,加工后的带材硬度可

提高 34%~97%。Iglesias 等^[55]研究了 LSEM 制备的超细晶高导无氧 (Oxygen-Free High-Conductivity, OFHC) 铜切屑的摩擦磨损性能。结果表明, LSEM 制备的纳米晶铜切屑比普通切削制备的切屑, 耐磨性能更为优异, 通过大应变挤压切削法可以生产具有方向依赖性和耐磨性的材料。

通过国内外学者的研究可以发现, 材料在经过细化之后, 其摩擦磨损性能和硬度都得到了大幅度的提升。但是, 当晶粒细化到几微米时, 若再进一步细化, 材料的塑性变形能力会显著降低。

2.3 热稳定性

组织稳定性对于超细晶材料非常重要, 若晶粒长大, 超细晶材料就会失去其优越的力学性能。通常, 通过对比不同温度退火后材料的显微硬度和力学性能来研究其热稳定性^[56]。

在较大的温度范围内, 对 LSEM 制备的切屑进行

退火处理, 观察合金在退火前后切屑的显微组织。结果表明, 超细晶材料能够有效固定晶界, 使热处理后的合金具有高达 1 870 MPa 的室温拉伸屈服强度, 证实了超细晶材料具有较高的热稳定性^[57-58]。

Deng 等^[59]和 Wu 等^[60]将 LSEM 制备的超细晶纯铜材料在不同温度下进行热处理, 研究其热稳定性, 材料微观结构的 EBSD 反极图 (Inverse Pole Figure, IPF) 如图 11 所示。结果表明, 在 160 °C 退火时, 切屑的晶粒尺寸约为 0.789 μm ; 在 160~280 °C 退火时, 随着退火温度的升高, 切屑的晶粒尺寸迅速增大; 当温度达到 280 °C 时, 切屑的平均晶粒尺寸达到 2.14 μm ; 此后, 温度分别升高到 320 °C 和 360 °C, 晶粒尺寸分别增长至 3.6 μm 和 4.0 μm 。当温度从 160 °C 上升到 360 °C 时, 纯铜切屑的硬度也从 145HV 逐渐减小至 61HV。结果表明, UFG 纯铜切屑在低于 160 °C 的温度下具有良好的热稳定性, 材料的热稳定性与晶粒的大小紧密相关。

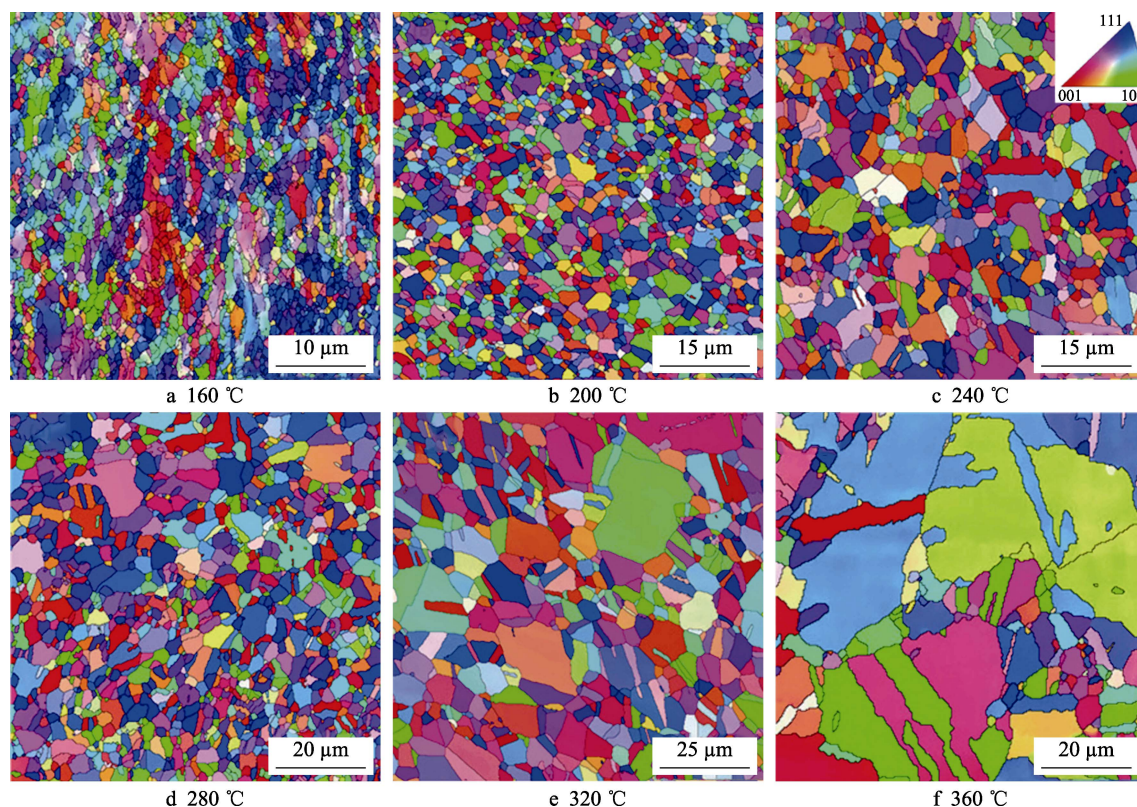


图 11 纯铜切屑在不同温度下的反极图 (IPF) ^[60]

Fig.11 The inverse pole figures (IPF) of pure copper chip at different temperatures^[60]

3 超声振动对加工材料的影响研究现状

在超声振动加工中, 对刀具或工件施加高频微幅振动, 使其在接触瞬间能量聚集, 被加工材料的局部受到巨大的冲击力, 会发生严重的塑性变形, 受到冲击后, 表面大尺寸晶粒会被细化。刀具以超声频率进

行的周期性振动, 会在切屑加工表面留下独特的表面纹理, 这种微观纹理的形状及排列会随着加工参数和振动参数的变化发生相应的改变。由于不同切屑微结构具有不同的表面特性, 因此超声振动加工制备微结构的精确控制成为研究的一个重点。超声振动使切屑材料的力学性能和切削加工性能发生改变, 使切屑的表面质量和可靠性显著提高。

3.1 晶粒细化

自 20 世纪 60 年代以来, 超声波辅助塑性加工已经开始应用于金属成形工艺。超声振动加工是利用高频超声振动以低应力高速、高频冲击试件表面, 当材料表面受到冲击时, 会发生严重的塑性变形, 表面大尺寸的晶粒经过冲击后得到细化^[61-62]。Ahamadi 等^[63]设计了一套 ECAP 系统, 其冲头可以由超声波振动激励。研究表明, 常规 ECAP 加工后的纯铝样品晶粒细化至 $45\text{ }\mu\text{m}$, 而采用 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的超声振幅加工后, 纯铝样品的晶粒分别细化至 $28.2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $22\text{ }\mu\text{m}$, 即在 ECAP 加工过程中叠加超声振动可以提高加工材料的晶粒细化效率。随后, Ahamadi 等^[64]进一步研究了施加超声振动后在材料上引起超声软化的主要原因, 发现当 ECAP 加入超声振动后, 所有试样的屈服应力均有所降低。当材料的最大晶粒尺寸为 $109\text{ }\mu\text{m}$ 时, 屈服应力降低了 66%; 最小晶粒尺寸为 $0.97\text{ }\mu\text{m}$ 时, 屈服应力降低了 11.3%, 屈服应力的降低与晶粒尺寸有关。

程明龙等^[65]对 45 号钢进行了超声振动滚压试验, 与普通滚压相比, 超声振动滚压能够在零件表层产生特有的“叠层纤维”状组织, 有效细化了零件表面组织。超声振幅越大, 越有利于形成“叠层纤维”组织, 而且产生的纤维宽度越细。当振幅 $A=0\text{ }\mu\text{m}$ 时, 只有最表层的晶粒发生了部分流变现象, 随着超声振幅的增加, 沿深度方向发生流变现象的组织越来越多。当振幅从 $0\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $6\text{ }\mu\text{m}$ 时, 流变组织深度从 $17\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $53.5\text{ }\mu\text{m}$ 。Liu 等^[66]研究了超声表面滚压技术 (Ultrasonic Surface Rolling Process, USRP) 对 40Cr 表面微观结构的影响。根据显微观察发现, 40Cr 表面经过 12 次超声表面滚压后可以得到晶粒尺寸为 $3\sim 7\text{ nm}$ 的纳米结构层, 塑性流动深度可达 $150\text{ }\mu\text{m}$, 变形程度呈现从试样表面到材料内部的梯度分布, 其横截面 SEM 如图 12 所示。

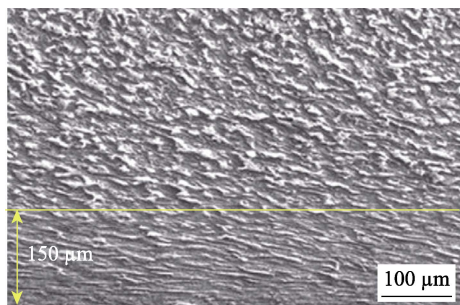


图 12 超声表面滚压后 40Cr 的横截面 SEM 图像^[66]
Fig.12 Cross-section SEM image of 40Cr surface subjected to USRP^[66]

研究表明, 在相同条件下, 通过加入超声波振动, 切屑表面的晶粒细化程度更大, 同时会在材料表层形成更厚的纳米结构层, 超声振动与 SPD 方法复合可以获得传统加工无法达到的效果。

3.2 微结构创成

近年来, 随着科学技术的发展, 具有微结构的特殊表面在减阻、抗振、减粘、脱附、耐磨、降噪等方面显示出良好的应用前景, 被广泛应用于航空、航天、国防、生物工程、精密机械和高端装备等领域。目前常规的微结构表面加工方法较为复杂或需要二次加工, 应用仍存在一些困难, 而超声振动可以在材料表面形成特殊的微结构, 进一步改善材料性能, 具有操作简单、单次成形和精确控制等特点。

超声振动加工表面微结构时, 通过在刀具施加高频微幅振动来改变切削运动轨迹, 可以直接在工件表面加工出具有一定几何形状和分布规律的微结构表面, 包括微凹坑表面、微凹槽表面、鱼鳞状表面以及复杂的分层微结构表面等。国内外学者针对刀具参数 (刀具后角、切削刃圆角半径等)、振动参数 (超声振幅、振动频率、振动方向等)、切削参数 (进给量、切削速度等) 以及刀具材料对表面微凹坑形状、尺寸和分布状态的影响进行了大量研究, 论证了超声振动在微结构创成方面的可行性^[67]。

基于超声辅助加工系统, Brehl 等^[68]采用刀尖角度为 70° 的刀具加工高度为 $8\text{ }\mu\text{m}$ 的正三面体, 如图 13a 所示。Zhu 等^[69]采用超声振动在硬质合金刀具的前刀面制备成形微结构, 如图 13b 所示。Kim 等^[70]提出椭圆超声成形微结构工艺, 成功制备出深度为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的 V 型微槽和高度为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的微金字塔阵列, 如图 13c 所示。Suzuki 等^[71]采用椭圆超声振动技术, 调整超声振动的频率、振幅雕刻出不同几何形状的微结构, 如图 13d 所示。在国内, Zhou 等^[72]提出一种双频椭圆振动切削方法, 在模具钢工件上创成了多种复杂的谐波网格曲面, 如图 13e 所示。赵波等^[73]通过试验发现, 超声振动切削可以加工出波纹状表面纹理, 如图 13f 所示。Tao 等^[74]采用超声辅助车削的方法, 通过调整超声振动方向与工件的相对位置关系, 形成了特定的微观结构。陶国灿^[75]建立了进给方向超声振动辅助铣削表面加工模型, 研究表明, 进给方向超声振动辅助铣削会在加工表面形成相互堆叠的鱼鳞状纹理表面。

3.3 加工材料性能

传统 SPD 技术制备的超细晶金属中具有很高的初始位错密度 (甚至达到饱和), 从而使得加工硬化率降低和塑性变形减小。如果在传统 SPD 中加入超声振动, 当超声振动传播引起的峰值应力超过材料的屈服应力时, 位错密度会呈线性增加。当位错密度足够高时, 就会发生位错排列, 材料塑性增强。Pal 等^[76]证明了超声振动可以增加位错密度。Siddiq 等^[77]报道了一种基于晶体塑性的有限元模型, 该模型考虑了金属在超声辅助变形过程中的声软化。该模型能够捕捉超声软化效应, 并证明了塑性变形随超声强度的增大而增加。

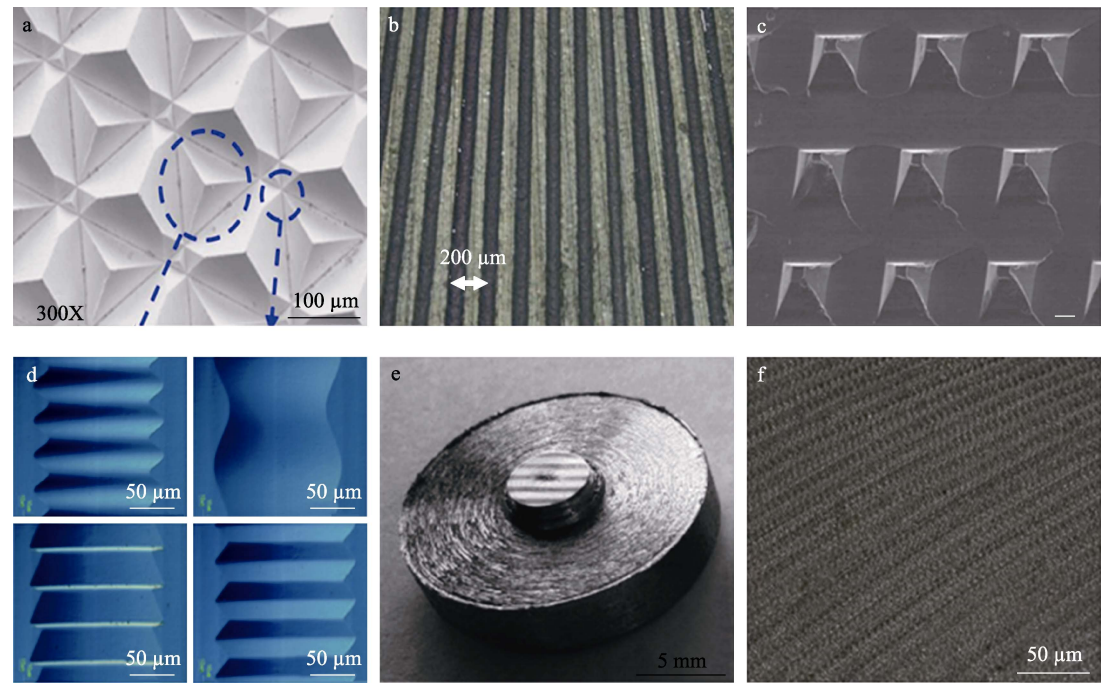


图 13 超声振动加工表面微观结构^[68-73]
Fig.13 Surface microstructure of ultrasonic vibration machining^[68-73]

Abrinia 等^[78]采用超声振动等通道转角挤压法 (Ultrasonic Vibration-Equal Channel Angular Pressing, UV-ECAP) 加工 AA-1050 工业铝, 研究发现, 在 UV-ECAP 工艺中施加频率为 20 kHz、振幅为 15 μm 的超声振动, 所需载荷降低了 31%, 消除了 ECAP 过程中的折叠缺陷。与常规 ECAP 相比, UV-ECAP 的最大塑性应变和平均等效塑性应变分别增加了 33% 和 58%。Djavanroodi 等^[79]将 ECAP 和超声振动相结合, 用于纯铝试验, 发现加入超声振动后, 可使 ECAP 成形力降低 9%, 增大振动幅值或频率可降低 ECAP 成形力, 且振幅比频率更能有效降低成形载荷。

Ahamadi 等^[63]研究了纵向超声振动对 ECAP 过程的影响, 结果表明, 当振幅为 2.5 μm 和 5 μm 时, 显微组织的均匀性分别提高了 26.7% 和 37.1%, 超声辅助 ECAP 使材料组织更加均匀。同时, 从表 1 可以看出, 在超声振动作用下, 单次 ECAP 的屈服应力和极限强度随振动幅值的增加而变大。

表 1 工业纯铝屈服应力和极限强度对比^[63]
Tab.1 Comparison for yield stress and ultimate strength of industrial pure aluminum^[63]

Processing	Yield strength/MPa	Ultimate strength/MPa
Original	28.7	65.2
After one pass conventional	34.5	76.65
After one pass with ultrasonic vibration amplitude 2.5 μm	38.9	80.1
After one pass with ultrasonic vibration amplitude 5 μm	41.5	82.4

张新华等^[80]分别采用喷丸和超声喷丸 2 种工艺对 7075-T651 铝合金进行处理, 通过对比研究发现, 超声喷丸加工后, 材料的表面粗糙度大幅度降低, 粗糙度值约为普通喷丸的 35.5%, 超声喷丸加工后的表面硬化程度增加了约 31.9%。Liu 等^[66]发现, 超声表面滚压技术 (USRP) 可以使加工材料的表面粗糙度值降低到 0.06 mm, 表面硬度提高 52.6%, 残余压应力可以达到 846 MPa, 有效深度约为 1.4 mm。尹飞等^[81]和邓云发等^[82]分析了超声振动加工后对材料性能的影响, 研究结果均证明超声振动有效细化了材料内部晶粒, 阻碍了加工过程中裂纹的萌生和扩展, 有效提高了材料的强度、抗疲劳能力和抗腐蚀性能。

大量研究结果表明, 将超声加工与传统 SPD 复合制备得到的超细晶材料各项性能均得到大幅提升。在超细晶尺寸范围内, 材料的动态力学性能与尺寸大小成反比。当金属材料中的晶粒尺寸减小到超细晶量级时, 其性能将发生一系列巨大而有益的变化^[83-85]。

4 结语

本文从切削法制备超细晶材料时加工参数和工艺条件对晶粒细化的影响, 切削法制备超细晶材料的力学性能、耐腐蚀性能和热稳定性等, 超声振动复合切削法制备超细晶材料的可能性等方面进行了全面综述。由文献总结得到, 切削法能高效制备出力学性能优良、耐磨损、耐腐蚀和热稳定性好的超细晶材料。超声振动加工可以很大程度上改善材料的加工性能, 有效细化材料内部晶粒, 阻碍加工过程中裂纹的萌生和扩展, 提高材料的强度、抗疲劳能力和抗腐蚀性能。

同时,超声振动还可以高质高效地完成表面微结构的高精度创成,代表了一种新型的表面微结构可再生制造方法。

鉴于切削法低污染、高效率、工艺简单的优点和超声振动辅助加工的优势,将超声振动应用于切削法已成为发展趋势。然而,欲将超声振动辅助加工技术和切削法复合制备超细晶材料,还有以下问题亟待解决:

1) 超声振动复合切削法制备超细晶材料表面微观结构及性能的研究尚处于起步阶段,需要建立适用于复合切削的声学系统,以保持连续稳定工作的计算、制造与参数调节,并探明超声振动方向施加和多维超声施振的方法。

2) 超声振动复合切削法的晶粒细化机理,超声振动参数、切削参数及其耦合对加工表面微观组织(晶粒细化、变形孪晶和相变)和结构特征的影响以及微观组织演化对材料性能的影响及调控均有待进一步研究。

3) 超声振动切削过程中微结构理论建模尚未形成体系,深入研究切屑表面层不同功能微结构的产生条件及其在多因素耦合作用下的演化规律,完成不同振动施加方式和方向下切屑表面微结构的准确表征,建立微结构特征预测模型,有利于零件加工表面性能的控制和改善。

综上所述,将超声振动和切削法复合制备微机电系统高性能超细晶材料,将会使微型零件的综合性能再次提升,打破传统SPD的强化极限,是当前推动工业向小型化、微型化方向发展亟需研究的重要方法之一。

参考文献:

- [1] 秦雷, 谢晓瑛, 李君龙. MEMS 技术发展现状及未来发展趋势[J]. 现代防御技术, 2017, 45(4): 1-5, 23.
- [2] 闫光强. 超细晶纯铜 T 型微锻挤变形行为及微观组织演变[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [3] 陆建勋. 间歇式超声波辅助 ECAP 制备超细晶材料及其微结构与性能表征[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
- [4] 刘博, 郑丽, 卢振华. 基于剧烈塑性变形法制备块体超细晶材料和力学性能的研究综述[J]. 天水师范学院学报, 2017, 37(2): 46-51.
- [5] LIU Bo, ZHENG Li, LU Zhen-hua. Progress in Fabricating Bulk Ultrafine-Grained Materials and Mechanical Properties by Severe Plastic Deformation[J]. Journal of Tianshui Normal University, 2017, 37(2): 46-51.
- [6] 张苏鹏, 王军丽, 章震威, 等. 等通道转角挤压制备超细晶材料的最新研究进展[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(3): 1-14.
- [7] ZHANG Su-peng, WANG Jun-li, ZHANG Zhen-wei, et al. Latest Research Progress in the Preparation of Ultra-Fine Grain Materials by Equal Channel Angular Pressing[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(3): 1-14.
- [8] LUO Jun-ting, YU Wen-lu, XI Chen-yang, et al. Preparation of Ultrafine-Grained GH4169 Superalloy by High-Pressure Torsion and Analysis of Grain Refinement Mechanism[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 777: 157-164.
- [9] RAHMATABADI D, SHAHMIRZALOO A, HASHEMI R, et al. Using Digital Image Correlation for Characterizing the Elastic and Plastic Parameters of Ultrafine-Grained Al₁₀₅₀ Strips Fabricated via Accumulative Roll Bonding Process[J]. Materials Research Express, 2019, 6(8): 086542.
- [10] 张翠翠, 吴化, 于晓丰. 搅拌摩擦加工制备 Al6061/SiC 复合材料的耐蚀性研究[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 315-320.
- [11] ZHANG Cui-cui, WU Hua, YU Xiao-feng. Investigation on Corrosion Resistance of Al6061/SiC Composite Prepared with Friction Stir Processing[J]. Surface Technology, 2021, 50(5): 315-320.
- [12] BROWN T L, SALDANA C, MURTHY T G, et al. A Study of the Interactive Effects of Strain, Strain Rate and Temperature in Severe Plastic Deformation of Copper[J]. Acta Materialia, 2009, 57(18): 5491-5500.
- [13] DE CHIFFRE L. Extrusion-Cutting[J]. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1976, 16(2): 137-144.
- [14] 潘延安, 付秀丽, 安增辉, 等. 金属表面梯度纳米结构的切削制备技术[J]. 表面技术, 2015, 44(11): 59-65, 86.
- [15] PAN Ya-nan, FU Xiu-li, AN Zeng-hui, et al. Fabrication Technology of Gradient Nanostructured Materials by Cutting[J]. Surface Technology, 2015, 44(11): 59-65, 86.
- [16] 马世宁, 王翔, 王晓明. 表面纳米化 7A52 铝合金在油润滑条件下的耐磨性能[J]. 中国表面工程, 2012, 25(1): 28-32.
- [17] MA Shi-ning, WANG Xiang, WANG Xiao-ming. Wear Properties of 7A52 Alloy Aluminum after Surface Nanocrystallization in Oil Lubricating[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(1): 28-32.
- [18] 别文博, 赵波, 王晓博, 等. 超声加工在齿轮抗疲劳制造中的研究综述与展望[J]. 表面技术, 2018, 47(7): 35-51.

- BIE Wen-bo, ZHAO Bo, WANG Xiao-bo, et al. Overview and Expectation on Gear Anti-Fatigue Manufacture by Ultrasonic-Assisted Machining[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(7): 35-51.
- [14] LU Jian-xun, WU Xiao-yu, LIU Zhi-yuan, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Ultrafine-Grained Copper Produced Using Intermittent Ultrasonic-Assisted Equal-Channel Angular Pressing[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2016, 47(9): 4648-4658.
- [15] LU Jian-xun, WU Xiao-yu, WU Zhao-zhi, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Ultrafine-Grained Al-6061 Prepared Using Intermittent Ultrasonic-Assisted Equal-Channel Angular Pressing[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(10): 5107-5117.
- [16] 王力, 赵西成, 杨西荣, 等. 工业纯钛 ECAP 变形组织与织构演变的 EBSD 分析[J]. *稀有金属*, 2015, 39(6): 570-576.
- WANG Li, ZHAO Xi-cheng, YANG Xi-rong, et al. Microstructure and Texture Evolution in Commercial Pure Ti after ECAP by EBSD[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2015, 39(6): 570-576.
- [17] 席莎. 等径弯曲通道变形 T250 马氏体时效钢的组织 and 性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- XI Sha. Microstructure and Property of T250 Maraging Steel Processed by ECAP[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.
- [18] MOSCOSO W, SHANKAR M R, MANN J B, et al. Bulk Nanostructured Materials by Large Strain Extrusion Machining[J]. *Journal of Materials Research*, 2007, 22(1): 201-205.
- [19] PI Yun-yun, YIN Xiao-long, DENG Wen-jun, et al. Study on Surface Hardness and Microstructure of Pure Copper Chip Strips Prepared by LSEM[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 2019: 5254892.
- [20] 吴邦睨. 超细晶铝合金制备和退火过程中微观组织研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- WU Bang-xian. Research on Microstructure of Ultrafine-Grained Aluminium Alloy during Preparation and Annealing[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [21] SWAMINATHAN S, SHANKAR M R, LEE S, et al. Large Strain Deformation and Ultra-Fine Grained Materials by Machining[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 410-411: 358-363.
- [22] WU Chun-ling, YE Bang-yan, DENG Wen-jun. Effect of Machining Parameters on Microstructure and Hardness of Ultra-Fine Grained Material Created by Large Strain Machining[J]. *Materials Science Forum*, 2009, 628-629: 387-392.
- [23] BERTOLINI R, BRUSCHI S, GHIOTTI A. Large Strain Extrusion Machining under Cryogenic Cooling to Enhance Corrosion Resistance of Magnesium Alloys for Biomedical Applications[J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 26: 217-227.
- [24] EFE M, MOSCOSO W, TRUMBLE K P, et al. Mechanics of Large Strain Extrusion Machining and Application to Deformation Processing of Magnesium Alloys[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(5): 2031-2042.
- [25] 梁士荣, 王斌, 张嘉阳, 等. 大应变挤出切削制备 AZ31 镁合金超细晶带材工艺研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(18): 10-13.
- LIANG Tu-rong, WANG Bin, ZHANG Jia-yang, et al. Process Research of Preparing Ultra-Fine Grained AZ31 Magnesium Alloy Strip by Large Strain Extrusion Machining[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(18): 10-13.
- [26] MORADI M, BASU S, SHANKAR M R. Creation of Ultrafine-Grained Surfaces by Large Strain Extrusion Machining (LSEM)[J]. *Machining Science and Technology*, 2017, 21(4): 617-631.
- [27] DENG Wen-jun, HE Yong-tai, LIN Ping, et al. Investigation of the Effect of Rake Angle on Large Strain Extrusion Machining[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, 29(5): 621-626.
- [28] 邹志杰, 吴邦睨, 刘良伟. 刀具前角对超细晶纯铜组织与性能的影响[J]. *金属热处理*, 2018, 43(1): 121-125.
- ZOU Zhi-jie, WU Bang-xian, LIU Liang-wei. Effect of Tool Rake Angle on Microstructure and Properties of Ultra Fine-Grained Pure Copper[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2018, 43(1): 121-125.
- [29] XU Ze-bing, ROVEN H J, JIA Zhi-hong. Mechanical Properties and Surface Characteristics of an AA6060 Alloy Strained in Tension at Cryogenic and Room Temperature[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 648: 350-358.
- [30] UMEZAWA O. Tensile Properties and Conductivities of a Precipitation Hardened and Cold-Rolled Cu-0.3Cr-0.1Zr Alloy at Cryogenic Temperature[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, 102(1): 012006.
- [31] WANG Y, MA E, VALIEV R, et al. Tough Nanostructured Metals at Cryogenic Temperatures[J]. *Advanced Materials*, 2004, 16(4): 328-331.
- [32] WANG Yu-hui, SHI Bao-dong, HE Yan-ming, et al. A Fine Grain, High Mn Steel with Excellent Cryogenic Temperature Properties and Corresponding Constitutive Behaviour[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2018, 11(2): 253.
- [33] 喻海良. 深冷轧制制备高性能金属材料研究进展[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(1): 89-99.
- YU Hai-liang. Progresses in Fabrication of High-Performance Metals by Using Cryorolling[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(1): 89-99.
- [34] YIN Xiao-long, PI Yun-yun, HE Di, et al. Development of Ultrafine Grained Al₇₀₅ by Cryogenic Temperature Large Strain Extrusion Machining[J]. *Journal of Materials Research*, 2018, 33(20): 3449-3457.
- [35] YIN Xiao-long, CHEN Hai-tao, DENG Wen-jun. Effects of Machining Velocity on Ultra-Fine Grained Al₇₀₅ Alloy

- Produced by Cryogenic Temperature Large Strain Extrusion Machining[J]. *Materials* (Basel, Switzerland), 2019, 12(10): 1656.
- [36] 殷晓龙, 邓文君, 张嘉阳, 等. 超低温挤出切削 7075 铝合金的组织与性能[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(5): 89-95.
YIN Xiao-long, DENG Wen-jun, ZHANG Jia-yang, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Al₇₀₇₅ Alloy Prepared by Cryogenic-Temperature Extrusion Machining [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(5): 89-95.
- [37] KIM D M, BAJPAI V, KIM B H, et al. Finite Element Modeling of Hard Turning Process via a Micro-Textured Tool[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(9-12): 1393-1405.
- [38] 何迪. 纯铜切屑成形切削已加工表面及再生微沟槽带材性能的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
HE Di. Investigation of the Properties of Machined Surface and Regenerated Micro Grooved Strips Prepared by Chip Forming Machining[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [39] AOKI T, SENCER B, SHAMOTO E, et al. Development of a High-Performance Chip-Guiding Turning Process—Tool Design and Chip Flow Control[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 85(1-4): 791-805.
- [40] SAGAPURAM D, EFE M, TRUMBLE K P, et al. Flow Transitions and Flow Localization in Large-Strain Deformation of Magnesium Alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 659: 295-305.
- [41] 刘良伟. 挤压一切削加工表面微沟槽结构翅片工艺及机理[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
LIU Liang-wei. Technology and Mechanism of Surface Micro-Groove Structure Fin in Extrusion-Machining Process[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [42] 许晓嫦, 刘志义, 党朋, 等. 强塑性变形(SPD)制备超细晶粒材料的研究现状与发展趋势[J]. *材料导报*, 2005(1): 1-5.
XU Xiao-chang, LIU Zhi-yi, DANG Peng, et al. Progression of Studies on Severe Plastic Deformation Techniques[J]. *Materials reports*, 2005(1): 1-5.
- [43] MOSTAED E, FABRIZI A, DELLASEGA D, et al. Microstructure, Mechanical Behavior and Low Temperature Superplasticity of ECAP Processed ZM21 Mg Alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 638: 267-276.
- [44] KIM W J, CHUNG S W, CHUNG C S, et al. Superplasticity in Thin Magnesium Alloy Sheets and Deformation Mechanism Maps for Magnesium Alloys at Elevated Temperatures[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(16): 3337-3345.
- [45] SEIPP S, WAGNER M F X, HOCKAUF K, et al. Microstructure, Crystallographic Texture and Mechanical Properties of the Magnesium Alloy AZ31B after Different Routes of Thermo-Mechanical Processing[J]. *International Journal of Plasticity*, 2012, 35: 155-166.
- [46] KIM S H, ERB U, AUST K T, et al. The Corrosion Behavior of Nanocrystalline Electrodeposits[J]. *Plating & surface finishing*, 2004, 91(5): 68-70.
- [47] KLOCKE F, SCHWADE M, KLINK A, et al. Influence of Electro Discharge Machining of Biodegradable Magnesium on the Biocompatibility[J]. *Procedia CIRP*, 2013, 5: 88-93.
- [48] DENG Wen-jun, LIN Ping, LI Qing, et al. Ultrafine-Grained Copper Produced by Machining and Its Unusual Electrochemical Corrosion Resistance in Acidic Chloride Pickling Solutions[J]. *Corrosion Science*, 2013, 74: 44-49.
- [49] SINCLAIR C W, POOLE W J, BRÉCHET Y. A Model for the Grain Size Dependent Work Hardening of Copper[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 55(8): 739-742.
- [50] LU K. Nanomaterials. Making Strong Nanomaterials Ductile with Gradients[J]. *Science*, 2014, 345(6203): 1455-1456.
- [51] 刘颀, 朱国辉. 超细晶粒钢中晶粒尺寸对塑性的影响模型[J]. *金属学报*, 2015, 51(7): 777-783.
LIU Jin, ZHU Guo-hui. Model of the Effect of Grain Size on Plasticity in Ultra-Fine Grain Size Steels[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 51(7): 777-783.
- [52] WANG Y M, MA E. Strain Hardening and Strain Rate Sensitivity of Ultrafine-Grained Metals[J]. *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*, 2003, 17: 55-64.
- [53] WANG Y M, MA E. Three Strategies to Achieve Uniform Tensile Deformation in a Nanostructured Metal[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(6): 1699-1709.
- [54] SHARMA V K, KUMAR V, SINGH JOSHI R. Quantitative Analysis of Microstructure Refinement in Ultrafine-Grained Strips of Al6063 Fabricated Using Large Strain Extrusion Machining[J]. *Machining Science and Technology*, 2020, 24(1): 42-64.
- [55] IGLESIAS P, BERMÚDEZ M D, MOSCOSO W, et al. Influence of Processing Parameters on Wear Resistance of Nanostructured OFHC Copper Manufactured by Large Strain Extrusion Machining[J]. *Wear*, 2010, 268(1-2): 178-184.
- [56] 刘晓燕, 张琪, 高飞龙, 等. 复合变形制备超细晶工业纯钛的研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34(19): 19111-19116.
LIU Xiao-yan, ZHANG Qi, GAO Fei-long, et al. Research Progress on Preparation of Ultrafine Grained Commercially Pure Titanium by Complex Deformation[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(19): 19111-19116.
- [57] ZHANG Jia-yang, LI Bing-lin, ZOU Zhi-jie, et al. Grain Refinement and Thermal Stability of AISI1020 Strips Prepared by Large Strain Extrusion Machining[J]. *Materials Science Forum*, 2016, 836-837: 509-521.
- [58] XIA Tian, XIE Yue-huang, YANG Chao, et al. Strengthening Effects and Thermal Stability of the Ultrafine Grained Microstructure of a Nickel Base Superalloy at Room and Elevated Temperatures[J]. *Materials Characterization*, 2020, 169: 110755.

- cterization, 2018, 145: 362-370.
- [59] DENG W J, LI Q, LI B L, et al. Thermal Stability of Ultrafine Grained Aluminium Alloy Prepared by Large Strain Extrusion Machining[J]. Materials Science and Technology, 2014, 30(7): 850-859.
- [60] WU Bang-xian, CHEN Bin, ZOU Zhi-jie, et al. Thermal Stability of Ultrafine Grained Pure Copper Prepared by Large Strain Extrusion Machining[J]. Metals, 2018, 8(6): 381.
- [61] AMANOV A, KARIMBAEV R, MALEKI E, et al. Effect of Combined Shot Peening and Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification Processes on the Fatigue Performance of AISI 304[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 358: 695-705.
- [62] LIU Yan-xiong, SUSLOV S, HAN Qing-you, et al. Microstructure of the Pure Copper Produced by Upsetting with Ultrasonic Vibration[J]. Materials Letters, 2012, 67(1): 52-55.
- [63] AHMADI F, FARZIN M, MERATIAN M, et al. Improvement of ECAP Process by Imposing Ultrasonic Vibrations[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(1-4): 503-512.
- [64] AHMADI F, FARZIN M, MANDEGARI M. Effect of Grain Size on Ultrasonic Softening of Pure Aluminum[J]. Ultrasonics, 2015, 63: 111-117.
- [65] 程明龙, 肖勇, 刘康宁, 等. 超声振动滚挤压对金属表面微观组织的影响[J]. 工具技术, 2019, 53(7): 73-76.
CHENG Ming-long, XIAO Yong, LIU Kang-ning, et al. Investigations on Effects of Ultrasonic Rolling Process on Surface Microstructure of Steel[J]. Tool Engineering, 2019, 53(7): 73-76.
- [66] LIU Yu, WANG Li-jun, WANG Dong-po. Finite Element Modeling of Ultrasonic Surface Rolling Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(12): 2106-2113.
- [67] 刘宪福. 超声振动辅助车削微织构表面形成机理及其表面性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
LIU Xian-fu. Research on the Forming Mechanism and Surface Properties of Micro-Textured Surfaces Fabricated by Ultrasonic Vibration Assisted Turning[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [68] BREHL D E, DOW T A. 3-D Microstructure Creation Using Elliptical Vibration-Assisted Machining (EVAM) [J]. Dissertations & Theses-Gradworks, 2014, 40: 21-26.
- [69] ZHU Wu-le, XING You-qiang, EHMANN K F, et al. Ultrasonic Elliptical Vibration Texturing of the Rake Face of Carbide Cutting Tools for Adhesion Reduction[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(9-12): 2669-2679.
- [70] KIM G D, LOH B G. Machining of Micro-Channels and Pyramid Patterns Using Elliptical Vibration Cutting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(9-12): 961-968.
- [71] SUZUKI N, YOKOI H, SHAMOTO E. Micro/Nano Sculpturing of Hardened Steel by Controlling Vibration Amplitude in Elliptical Vibration Cutting[J]. Precision Engineering, 2011, 35(1): 44-50.
- [72] ZHOU Xiao-qin, ZUO Cheng-ming, LIU Qiang, et al. Surface Generation of Freeform Surfaces in Diamond Turning by Applying Double-Frequency Elliptical Vibration Cutting[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 104: 45-57.
- [73] 张存鹰, 赵波, 王晓博. 纵扭复合超声端面铣削表面微结构建模与试验研究[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 52-63.
ZHANG Cun-ying, ZHAO Bo, WANG Xiao-bo. Modeling and Experiment of Surface Microstructure by Longitudinal-Torsional Compound Ultrasonic End Milling[J]. Surface Technology, 2019, 48(10): 52-63.
- [74] TAO Guo-can, ZHANG Jian-hua, SHEN Xue-hui, et al. Feasibility Study on Ultrasonic Vibration Assisted Milling for Squamous Surface[J]. Procedia CIRP, 2016, 42: 847-852.
- [75] 陶国灿. 超声振动辅助铣削鱼鳞状表面成形机理及表面性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
TAO Guo-can. Study on the Forming Mechanism and Surface Properties of Ultrasonic Vibration Assisted Milling for Squamous Surfaces[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [76] PAL D, STUCKER B. A Study of Subgrain Formation in Al₃₀₀₃ H-18 Foils Undergoing Ultrasonic Additive Manufacturing Using a Dislocation Density Based Crystal Plasticity Finite Element Framework[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(1): 019901.
- [77] SIDDIQ A, SAYED T E. Acoustic Softening in Metals during Ultrasonic Assisted Deformation via CP-FEM[J]. Materials Letters, 2011, 65(2): 356-359.
- [78] BAGHERZADEH S, ABRINIA K, HAN Qing-you. Analysis of Plastic Deformation Behavior of Ultrafine-Grained Aluminum Processed by the Newly Developed Ultrasonic Vibration Enhanced ECAP: Simulation and Experiments[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 485-497.
- [79] DJAVANROODI F, AHMADIAN H, KOOHKAN K, et al. Ultrasonic Assisted-ECAP[J]. Ultrasonics, 2013, 53(6): 1089-1096.
- [80] 张新华, 曾元松, 王东坡, 等. 超声喷丸强化 7075-T651 铝合金表面性能研究[J]. 航空制造技术, 2008, 51(13): 78-80.
ZHANG Xin-hua, ZENG Yuan-song, WANG Dong-po, et al. Surface Hardening Effectiveness on Aluminium Alloy 7075-T651 by Ultrasonic Shot Peening[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(13): 78-80.
- [81] YIN Fei, HU Shan, HUA Lin, et al. Surface Nanocrystallization and Numerical Modeling of Low Carbon Steel by Means of Ultrasonic Shot Peening[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(3): 1253-1261.