γ-TiAl 合金的加工特性及能场辅助技术研究进展

范 滔[1,2] 姚倡锋[1,2*] 谭 靓[1,2]
1.西北工业大学航空发动机高性能制造工业和信息化部重点实验室,西安,710072
2.西北工业大学航空发动机先进制造技术教育部工程研究中心,西安,710072

摘要:γ-TiAl 合金密度小、比强度高,具有优异的高温抗氧化性能,在航空航天领域有着广泛的应用潜力,然而,由于其高脆性和低室温塑性,被认为是典型的难加工材料,加工过程中存在高切削力、快速刀具磨损和表面缺陷等挑战。近年来,能场辅助加工技术为解决这些问题提供了新的思路。系统分析了 γ-TiAl 合金的材料特性、加工特性及表面完整性,并重点探讨了能场辅助加工技术的研究进展,包括在减小切削力、延长刀具寿命及提升表面质量中的应用效果。同时梳理了当前研究的局限性,并提出了未来发展趋势,以期为 γ-TiAl 合金的高效加工提供理论与技术参考。

关键词:γ-TiAl 合金;难加工材料;表面完整性;能场辅助加工
中图分类号:TG506
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.04.001 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Research Progresses for Machining Characteristics and Field-assisted Techniques of γ-TiAl Alloys

FAN Tao[1,2] YAO Changfeng[1,2*] TAN Liang[1,2]
1.Key Laboratory of High Performance Manufacturing for Aero Engine,Ministry of Industry and Information Technology,Northwestern Polytechnical University,Xi'an,710072
2.Engineering Research Center of Advanced Manufacturing Technology for Aero Engine,Ministry of Education,Northwestern Polytechnical University,Xi'an,710072

Abstract: γ-TiAl alloys, due to their low density, high specific strength and excellent high-temperature oxidation resistance had broad application potentials in the aerospace fields. However, due to their high brittleness and low room-temperature plasticity, they were considered typical difficult-to-machine materials, with challenges such as high cutting forces, rapid tool wear and surface defects during the machining processes. In recent years, field-assisted machining technologies provided new solutions to these issues. The material properties, machining characteristics, and surface integrity of γ-TiAl alloys were systematically analyzed, with a focus on the research progresses of field-assisted machining technologies, including their applications in reducing cutting forces, extending tool life and improving surface quality. Additionally, the current research limitations and future development trends were sorted out, aiming to provide theoretical and technical references for the efficient machining of γ-TiAl alloys.

Key words: γ-TiAl alloy; difficult-to-machine material; surface integrity; field-assisted machining

0 引言

随着航空航天技术的快速发展,下一代高性能航空发动机对材料性能提出了更加苛刻的要求,包括更高的比强度、更低的密度、更好的高温性能和更优异的抗氧化能力[1]。这些特性对减小发动机质量、提高推重比以及提高燃油效率至关重要。传统的镍基高温合金虽然具备优异的高温性能,但其密度高(8.9~9.2 g/cm^3),显著增大了发动机整体质量,成为进一步提高发动机性能的瓶颈。为此,寻找具有轻量化与高温抗氧化特性的替代材料成为航空发动机研发的关键方向。相比之下,γ-TiAl 基材料密度(约 3.9 g/cm^3)仅为镍基高温合金的一半,同时具有高比强度、高温抗氧化性能以及优异的抗蠕变性能[2],可将航空发动机叶片的工作温度提高至 700 ℃以上,质量减小 20%~30%,大幅提高推重比,使其在巡航速度、燃油消耗率等指标上表现优异[3]。因此,γ-

收稿日期:2024-02-27
基金项目:国家自然科学基金(92360309,92160301);陕西省重点研发计划(2024PT-ZCK-63);国家重点研发计划(2024YFB4609000)

TiAl 合金逐渐成为航空发动机高压压气机叶片和低压涡轮叶片的理想材料[4]。需要说明的是，尽管“γ-TiAl 合金”这一名称在工程文献中普遍使用，其主导相 γ-TiAl 本质上是一种 $L1_0$ 型（面心四方结构）金属间化合物，Ti 和 Al 原子比为 1∶1，然而实际工程材料常通过添加 Nb、Mo 等元素形成固溶体，或与 α_2-Ti_3Al 相构成双相组织，因此在本文中“γ-TiAl 合金”特指以 γ 相为基体的多组元体系。

然而，γ-TiAl 合金在航空发动机上的广泛应用仍面临严峻挑战。由于其滑移系较少、伯格斯矢量较大，材料内应力集中难以释放，表现出显著的脆性和低室温延展性（仅 2%～4%），被认为是“典型的难加工材料”[5]。在传统切削加工中，高切削力与高温会导致材料沿层断裂、微裂纹产生以及表面缺陷生成，从而大幅缩短零件服役寿命[6]。此外，刀具磨损严重及加工效率低下也成为限制 γ-TiAl 合金工程化应用的重要瓶颈[7]。为应对这些挑战，国内外学者已尝试发展多种加工技术，如高速切削、微量润滑和低温切削等。尽管这些技术在一定程度上缓解了加工困难，但局限性仍较为明显：高速切削虽然利用了热软化效应来实现脆-塑性切削，但显著加剧了刀具磨损[8]；微量润滑加工局部降低了切削区的高温和高应力状态，但程度有限[9]；低温液氮加工虽然可以有效抑制切削温度，但易诱导刀具产生裂纹，且还需要考虑空气湿度、润滑剂等因素的影响，局限性较大[10]。近年来，能场辅助加工技术（如激光辅助、超声辅助加工等）以其显著的脆塑性转变优势，为 γ-TiAl 合金等材料的加工难题提供了新的解决方案[11]。例如，激光辅助加工通过高功率密度热源实现材料局部软化，从而减小切削力，提高加工质量[12]；超声辅助加工则利用高频振动有效减小工件和刀具之间的摩擦和热应力，从而具有减小切削力、延长刀具寿命、抑制颤振、提高表面完整性等优势[13]。

尽管如此，目前针对 γ-TiAl 能场辅助加工的研究仍处于初级阶段，其加工机理尚不明确，加工参数的优化及其对加工表面完整性的定量影响研究仍需深入探索。本文以 γ-TiAl 合金为研究对象，围绕其材料特性、加工特性以及表面完整性展开系统综述，重点分析能场辅助加工技术的研究进展，探讨能场辅助加工技术在提高加工效率和表面质量中的应用潜力与存在的问题，并展望未来研究方向。

1　γ-TiAl 合金的材料特性

1.1　γ-TiAl 合金的发展历程

γ-TiAl 合金因具有轻量化、高比强度以及优异的高温抗氧化性能，成为航空航天和汽车工业中备受关注的高温结构材料，特别在高推重比航空发动机中具有重要应用潜力，然而，由于其室温塑性差和脆性高，γ-TiAl 合金的开发经历了多个阶段，图 1 所示为 γ-TiAl 合金的发展历程。

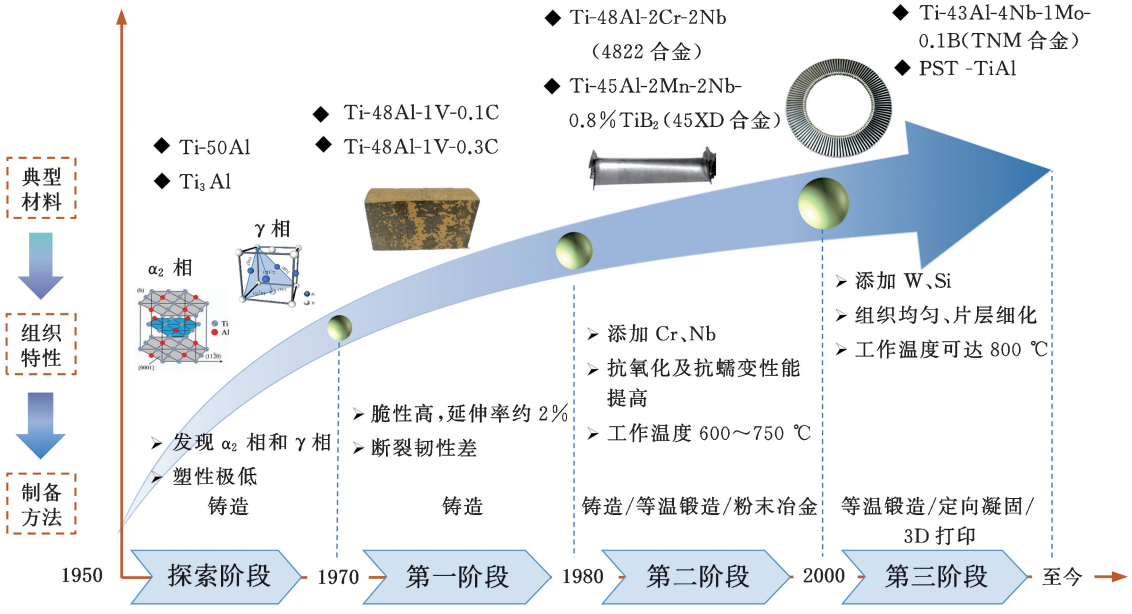


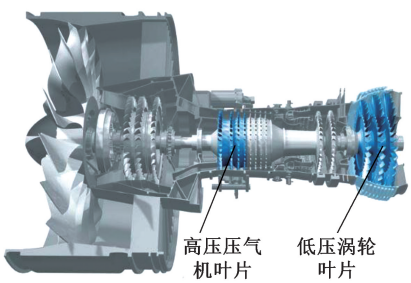
图 1　γ-TiAl 合金的发展历程图

Fig.1　The development history of γ-TiAl alloy

γ-TiAl 合金的研究始于 20 世纪 50 年代，最初集中在 Ti-Al 二元相图的构建和金属间化合物晶体结构的解析上[14]。随着技术的进步，20 世纪 70 年代第一代 TiAl 合金（如 Ti-48Al）显示出一

定的抗拉强度和抗蠕变性能，但低断裂韧性限制了实际应用[15]。到了 20 世纪 80 年代，第二代 TiAl 合金通过微量合金化技术提高了合金的高温稳定性，并提高了抗拉强度和抗蠕变性能，使其成功应用于部分航空发动机部件。这标志着 TiAl 合金的工程化迈出了关键一步[16]，与此同时，第二代 TiAl 合金也开始逐步应用于汽车工业[17]。

进入 21 世纪，第三代 γ-TiAl 合金的研发重点是提高其抗氧化性能和高温服役能力，并扩展应用领域。通过在 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金基础上添加 W、Mo、Si、B 等元素，代表性合金 Ti-43.5Al-4Nb-1Mo-0.1B(TNM)优化了显微组织稳定性，服役温度从 750 ℃提高到 800 ℃以上[18]。此外，微观组织更加均匀，片层厚度显著细化，进一步提高了材料的抗蠕变性能和断裂韧性[19]。南京理工大学陈光教授团队通过控制临界形核冷却速率制备了 0°取向的聚片孪生 TiAl 单晶，其韧性比 4822 合金提高近 3 倍[20]。目前，第三代 TiAl 合金广泛应用于航空发动机高压压气机叶片和低压涡轮叶片，并在汽车工业中的涡轮增压器叶轮、发动机连杆等领域取得了良好的应用效果。图 2 所示为典型的 γ-TiAl 合金零件[14,17,21-22]。

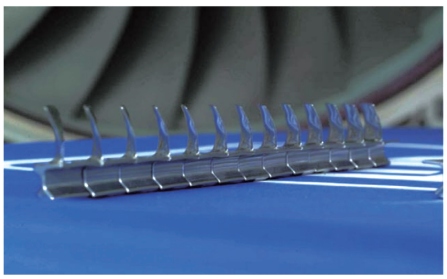


(a)PW1000G 航空发动机叶片[21]

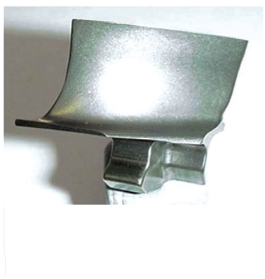


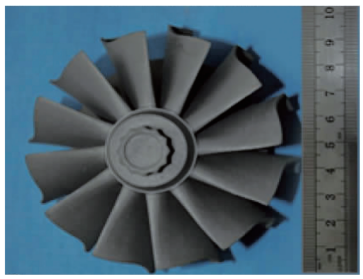


(b)罗罗公司制造的 γ-TiAl 叶片[21]

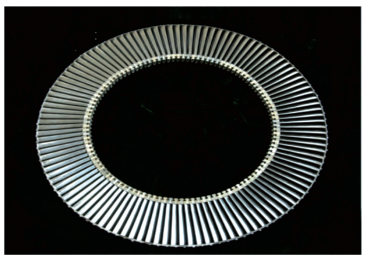


(c)TNM 合金制备的压气机叶片[22]





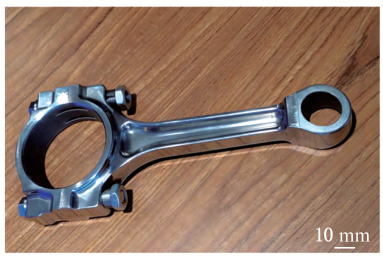
(d)铸造 γ-TiAl 合金增压器涡轮[17]



(e)中国科学院金属研究所制造的 γ-TiAl 合金低压涡轮叶片精密铸件[14]



(f)中国科学院金属研究所制造的 γ-TiAl 合金汽车发动机活塞精密铸件[14]



(g)中国科学院金属研究所采用近净成形粉末冶金工艺制造的 γ-TiAl 合金汽车发动机连杆[14]

图 2　典型的 γ-TiAl 合金零件

Fig.2　Typical γ-TiAl alloy components

第三代 TiAl 合金的工业化应用标志着 TiAl 合金从实验室研究全面进入实际工程领域。然而，合金的室温塑性和加工性能依然是限制其更广泛应用的关键瓶颈，这一问题成为未来研究的重要方向。

1.2　γ-TiAl 合金的相图和组织

γ-TiAl 合金的显微组织特性和力学性能主要受到相组成和热处理工艺的影响，而相图研究为其相变行为提供了理论支撑。目前最权威的相图版本是由 SCHUSTER 等[23]提出的，如图 3 所示。Ti-Al 合金的主要相包括 γ 相(TiAl)、α_2 相(Ti3Al)和 β/B_2 相。其中，γ 相具有 $L1_0$ 型有序面心四方结构，可提供优异的高温强度；α_2 相为 $D0_{19}$ 型有序密排六方结构，易发生有序-无序转

变；β/B_2 相呈体心立方结构，通过添加 Nb、Mo、Cr 等元素可提高热加工性能和室温塑性[24]。此外，Ti-Al 二元相图的 γ/α_2 转变区域直接决定了片层组织的形成与演化，对优化钛铝合金的高温性能和抗蠕变性能至关重要[25]。近年来的研究表明，第三组元（如 Nb、Cr、Mn）可扩展特定相区的稳定性。例如，Nb 增强 β 相区的热稳定性，提高高温强度和抗氧化性；Cr 和 Mn 优化 γ/α_2 相比例，改善组织均匀性和室温塑性[26]。

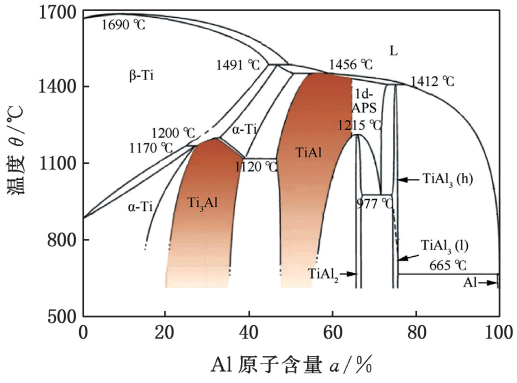


图 3　Ti-Al 二元相图[23]

Fig.3　Ti-Al binary phase diagram[23]

γ-TiAl 合金的显微组织主要由 γ 相和 α_2 相组成，典型形态可以分为近 γ 组织（near gamma structure，NG）、双态组织（duplex structure，DP）、近片层组织（nearly lamellar structure，NL）及全片层组织（fully lamellar structure，FL），其显微组织如图 4 所示[27]。

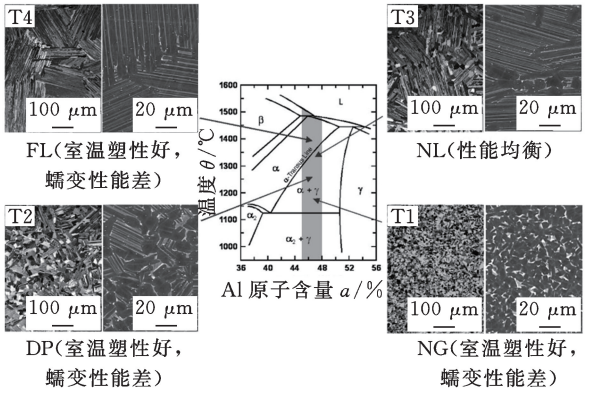


图 4　γ-TiAl 合金的典型组织[27]

Fig.4　Typical microstructure of γ-TiAl alloy[27]

近 γ 组织是片层比例最低的组织形式，主要由 γ 相构成，夹杂少量片层结构和 β/B_2 相，通常通过调控合金成分或快速冷却工艺形成。该组织在室温塑性和加工性能上表现优异，适用于复杂动态载荷环境。代表合金为 TNM（Ti-43.5Al-4Nb-1Mo-0.1B），其动态性能使其在高塑性和中高温应用中占有重要地位。

双态组织的片层含量较低，包含细化的 γ/α_2 片层团和均匀分布的等轴 γ 晶粒，通过在 α+γ 相区的特定热处理工艺可以形成此类组织，综合性能优良，兼具较好的室温韧性和高温强度。典型合金如 Ti-47Al-2Cr-2Nb，广泛应用于多工况环境。

近片层组织以片层结构为主，夹杂少量等轴 γ 晶粒或 β/B_2 相。通过短时高温退火或在单一相区控温冷却形成，其片层比例高于双态组织，但低于全片层组织。近片层组织在高温强度和室温延展性之间达到平衡，适用于综合性能要求较高的场合。

全片层组织以片层结构为主，具有最高的片层比例。片层的厚度和分布受冷却速率和热处理工艺影响，通常通过缓慢冷却形成。全片层组织的高温强度和抗蠕变性能最优，但室温塑性较差，适用于高温工作环境中的部件，如航空发动机低压涡轮叶片。典型合金包括 4822（Ti-48Al-2Cr-2Nb），在高温环境下具有卓越的力学性能。

XIA 等[4]对比了 γ-TiAl 合金和其他常用航空材料的性能。从表 1 中可以看出，γ-TiAl 合金在高温性能及密度方面均有极大的优势，展现出巨大的应用潜力。然而，其塑性差的问题仍然限制了实际应用的推广，为此，研究人员正积极致力于开发具备更优异综合性能的新型钛铝合金，以满足日益严苛的工程需求。

表 1　γ-TiAl 合金和常用航空材料性能对比[4]

Tab.1　Comparison of properties between γ-TiAl alloy and commonly used aerospace materials[4]

合金	密度/（g·cm^{-3}）	弹性模量/GPa	屈服强度/GPa	延伸率/%	蠕变极限/℃	抗氧化极限温度/℃
γ-TiAl	3.7～3.9	160～176	450～630	1～4	1000	900～1000
α_2-Ti3Al	4.1～4.7	120～145	700～990	2～7	750	650
Ti2AlNb	5.0～5.8	102～134	1030～1292	3.5～10	650～750	650
Ti-6Al-4V	4.5	96～115	380～1150	10～20	600	600
高温合金	8.3	206	800～1120	3～5	1090	1090

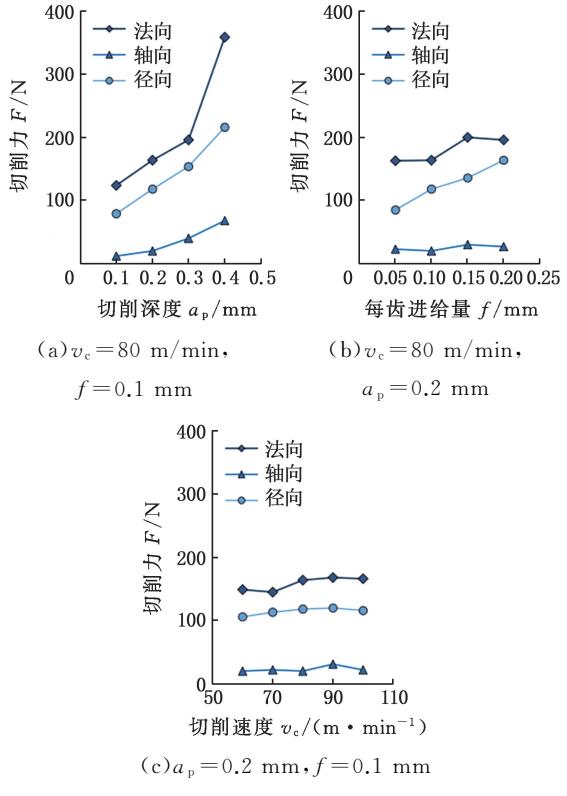
2　γ-TiAl 合金的加工特性

γ-TiAl 合金具有低密度、高比强度和优异的高温性能，在航空航天等领域具有广阔的应用前景[28]。然而，γ-TiAl 合金也以其高硬度、高脆性和化学反应性强等特点而难以切削加工。为了推动 γ-TiAl 合金的工程化应用，国内外学者针对其切削加工特性开展了大量的研究工作，重点研究

了切削力、切削温度以及刀具磨损性能等方面。

2.1 切削力

切削力是评价材料加工性能的重要指标之一。在切削 γ-TiAl 合金时，KLOCKE 等[29]、PÉREZ[30]发现切削速度和进给量对切削力有显著影响。他们的研究结果表明，在较低的切削速度范围内，提高进给量会明显增大切削力，而提高切削速度对切削力的影响较小。但当切削速度超过 50 m/min 时，切削速度和进给量的增加都会导致切削力增大，其中切削速度的影响更为显著，如图 5 所示。这表明在较高切削速度下，γ-TiAl 合金会承受更大的应变、应变率和温度，发生加工硬化，进而导致切削力增大。ASPINWALL 等[31]的研究结果表明，与 TC4 钛合金相比，γ-TiAl 在相同切削条件下的径向切削力达到其 2 倍，轴向切削力也高出 1.3 倍。研究还发现，切削时温度显著升高，未磨损刀具切削温度可达 700 ℃，刀具磨损至 0.3 mm 时温度可高达 900 ℃，这大大缩短了刀具寿命，并影响车削加工表面完整性。同样的结果也可见于 GE 等[32]的研究，他们比较了铣削 γ-TiAl 合金和 TA15 的切削力，结果显示，γ-TiAl 合金在 x、y、z 方向上的切削力分别为 TA15 在 x、y、z 方向上切削力的 1.9、1.8、2.0 倍。当刀具磨损超过 0.2 mm 后，γ-TiAl 合金在 x 方向的切削力甚至会达到初始切削力的 2.6 倍，如图 6 所示。控制切削区温度可以改善切削区工作环境，从而减小切削力，提高刀具寿命。潘多[33]的研究表明，在干切削条件下切削力最大，而液氮冷却下切削力最小，尤其在切削速度达到 150 m/min 时，液氮切削显著减小了切削力。乳化液切削在低速范围内与液氮切削相似，但在高速下由于冷却效果不足，切削力有所增大，如图 7 所示。

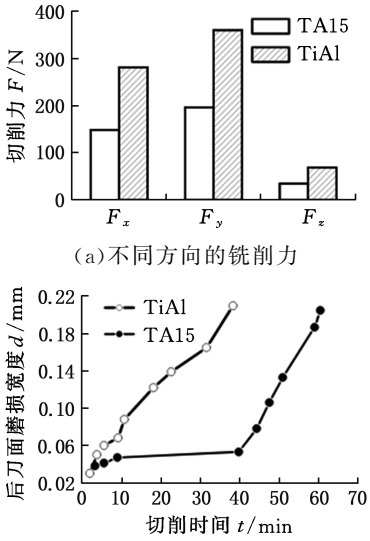


(a)v_c=80 m/min，f=0.1 mm　(b)v_c=80 m/min，a_p=0.2 mm

(c)a_p=0.2 mm，f=0.1 mm

图 5 切削三要素对切削力的影响[29]

Fig.5 The effect of the three cutting parameters on cutting force[29]



(a)不同方向的铣削力

(b)不同刀具磨损情况下的铣削力

图 6 不同合金的切削力[32]

Fig.6 Cutting force of different alloys[32]

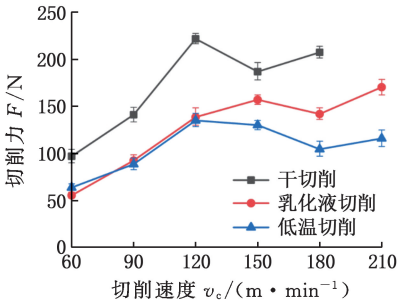


图 7 不同切削条件下的切削力[33]

Fig.7 Cutting force under different cutting conditions[33]

综上所述，切削力演化的一般规律可归纳如下：切削力随着刀具的磨损稳步增大；切削速度的提高导致刀具承受极端的热载荷，加剧了刀具的磨损；当刀具达到磨损标准甚至发生破损时，切削力偏离稳定趋势；刀具锋利度越差，摩擦力越大，这是一个恶性循环。

2.2 切削温度

γ-TiAl 合金的热导率低，切削时会产生较高的切削温度。ASPINWALL 等[34]测试了在每齿进给量为 0.12 mm，切削深度和切削宽度均为 0.2 mm 时铣削 γ-TiAl 合金的温度，当切削速度 v_c

从 50 m/min 增加到 135m/min 时，切削温度提高了 43%～47%，如图 8 所示。因此，许多研究者采用高速铣削（HSM）来提高材料温度从而软化材料，在这一方面，最受关注的是 γ-TiAl 合金脆韧转变（BDT）。LIU 等[35]揭示了 γ-TiAl 的 BDT 温度与应变率有关，当应变率从0.001 s^{-1}增大到 0.1 s^{-1}时，BDT 温度从 700～800 ℃提高至 1100 ℃，同时材料的断裂模式由晶间断裂转变为以空洞形成和合并为主的延展性断裂。IMAYEV 等[36]认为 Ti-50.7Al 合金的脆性-韧性转变是由热活化引起的，随着温度升高，被束缚在晶界中的晶格位错（TLD）的释放比例从低于 10%大幅增加到约 90%。UHLMANN 等[37]研究指出，当 v_c 达到 300 m/min 时，切削温度高于 700 ℃，切屑的形态相对完整，且工件表面无明显裂纹和缺陷，证实了高温有利于改善 γ-TiAl 合金的铣削加工性能。UHLMANN 等[38]使用外部加热设备对 TNB 进行了准静态切削试验，进一步证明，当切削温度升高至 800 ℃时，裂纹完全消失，这与常规切削时典型的断续切屑和表面裂纹形貌形成鲜明对比。虽然有大量证据证明高温有利于提高材料的塑性，但仍需要更多数据来描述 γ-TiAl 的塑性状态与切削温度之间的定量关系。

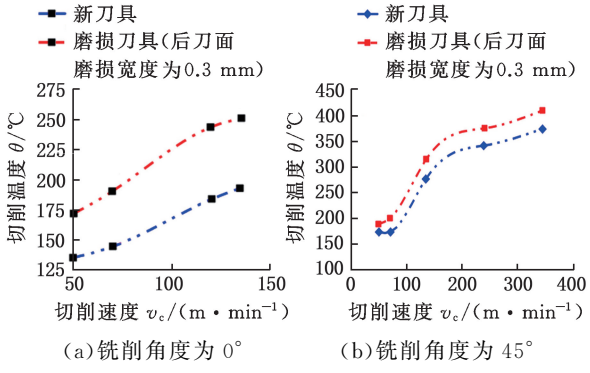


图 8　不同切削速度下 γ-TiAl 合金的切削温度[34]

Fig.8　Cutting temperature of γ-TiAl alloy at different cutting speeds[34]

2.3　刀具磨损

刀具磨损是传统切削方法加工 γ-TiAl 合金时面临的一大挑战。大量试验表明，γ-TiAl 合金不良切削性能严重影响刀具寿命。WANG 等[39]研究发现，车削 γ-TiAl 时，刀具磨损主要由磨粒磨损、黏着磨损和氧化磨损引起，如图 9 所示。切削速度被认为是影响刀具磨损的最重要因素，YAO 等[40]指出，在切削速度较小时，刀具以黏结磨损为主；高速切削时，以扩散磨损和黏着磨损为主[41]。在润滑策略方面，KLOCKE 等[42]研究了四种润滑方式的差异，相比于常规湿切削，冷却液和高压润滑比微量润滑（MQL）更能有效抑制刀具磨损，刀具磨损分别降低了 61%（冷却液）、41%（高压 30 MPa）和 7%（MQL）。在刀具选择方面，PRIARONE 等[43]指出，无论何种刀具，其切削寿命都无法超过 1 min。在没有涂层的 WC 刀具上会定期发生磨粒磨损，直至破裂，整个过程约 2 min。此外，立方氮化硼（CBN）含量对刀具寿命至关重要，在相同切削参数下，50%CBN 仅工作 0.9 min，磨损量达 0.242 mm，而 92%CBN 的磨损量仅为0.04 mm。以上研究表明，合理的切削参数和硬质涂层刀具可以延长刀具寿命。然而，基于 γ-TiAl 合金的脆性特性及含有硬质颗粒相，磨粒磨损仍然是主要磨损形式。因此，在实际加工中，优化工艺参数和选择适当的硬质涂层刀具是延长刀具使用寿命的关键。

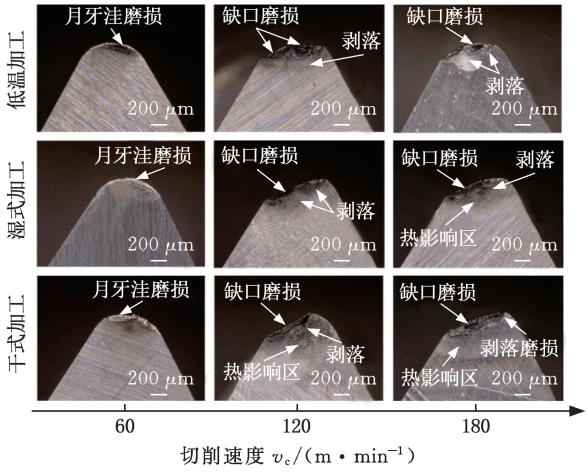


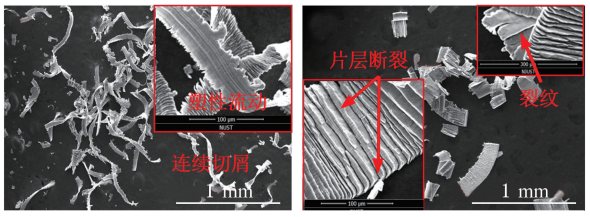
图 9　不同润滑策略下刀具磨损形态[39]

Fig.9　Tool wear morphology under different lubrication strategies[39]

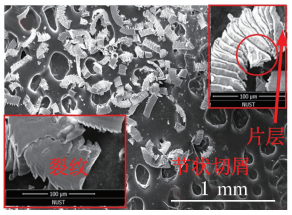
2.4　切屑形成机理

在切削过程中，切屑的形成机制是了解切削机理的一个关键环节。深入研究切屑的形成，有助于理解材料变形及工具与材料之间的接触规律。对于 γ-TiAl 材料，切屑的特征表现为碎裂并带有锯齿形的结构，这与 γ-TiAl 的高强度和低塑性密切相关，同时切削过程中会发生硬化倾向。WANG 等[44]研究表明，不同进给速度和切削深度对 Ti-47.5Al-2.5V-1Cr 的切屑形貌有显著影响。从图 10a 和图 10b 中可以看出，当切削深度 a_p 从 0.05 mm 增加到 0.25 mm 时，切屑由连续状转变为节状。尽管切屑的前表面仍表现出层状结构，但在层内出现了脆性断裂。这是由于切削力随着切削深度的增大而增大。当切削力超过层状晶粒之间的结合力时，微裂纹在晶界处产生，并随着加工的进行进一步扩展，最终导致切屑在卷曲过程中发生碎裂，形成节状碎屑。此外，从图

10a 和图 10c 中可以看出，当每齿进给量 f 从 0.005 mm增加到 0.025 mm 时，切屑从连续状转变为节状，并且在前面的片层内也发现了裂纹。



(a)v_c=40 m/min，α_p=0.05 mm，f=0.005 mm　(b)v_c=40 m/min，α_p=0.25 mm，f=0.005 mm



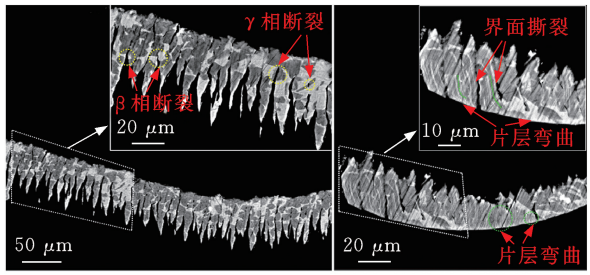
(c)v_c=40 m/min，α_p=0.05 mm，f=0.025 mm

图 10　切屑形貌[44]

Fig.10　Chip morphology[44]

此外，切屑的形成还与动态流动应力密切相关，这一过程对 TSE(热剪切效应)和 SRH(应变速率硬化效应)之间的竞争非常敏感[45]。PENG 等[46]对 γ-TiAl 的切屑形貌进行了研究，发现高切削速度下，切屑呈现出锯齿形状并具有绝热剪切带，而在低速切削时则呈现出片状。这表明瞬时流动应力对切屑形貌有显著影响。在高速切削时，SRH 效应增强，流动应力增大，从而导致材料的塑性变形增强。由于 γ-TiAl 材料的热导率较低，切削区温度会迅速上升，达到某一临界切削速度后，TSE 主导作用更为显著，进而导致热塑性不稳定性，并形成带有绝热剪切带的锯齿形切屑。

ZHANG 等[47]进一步研究了不同微观结构对 Ti-43Al-9V 合金切削性能的影响，发现其切削机理主要由微观结构特性及其主导的变形模式决定。如图 11 所示，NG 结构具有较强的塑性，切屑中可见显著的晶粒拉伸、位错滑移和机械孪晶，裂纹主要分布在 γ 或 β 晶粒内部，形成连续或轻微锯齿状切屑，切削力较大，但表面质量较好。相反，FL 结构以脆性断裂为主，裂纹主要沿 α_2/γ 层片界面扩展，导致切屑呈明显锯齿状，切削力显著减小，但表面粗糙度增加。因此，γ-TiAl 合金的切削机理受其高温力学特性与微观结构协同影响，切屑的形成形态由材料的塑性变形能力与脆性断裂倾向共同决定，表现出明显的结构依赖性



(a)NG　(b)FL

图 11　NG 和 FL 结构的切屑形貌[47]

Fig.11　Chip morphologies of NG and FL microstructures[47]

与参数敏感性。

2.5　切削仿真

近年来，针对 γ-TiAl 合金切削过程的仿真研究不断深入，为理解其复杂的微观变形机制与断裂行为提供了重要支撑。分子动力学(MD)模拟因具有原子尺度的分辨能力，成为研究亚表面缺陷演化与材料去除机制的主要手段。LI 等[48]提出的模型成功模拟了 γ-TiAl 在纳米尺度上的切削行为，揭示了在不同切削距离下的位错分布、堆垛层错与缺陷演化。如图 12 所示，随着切削距离的增大，位错与亚表面缺陷的数量显著增加，这表明切削过程中材料的微观损伤演化与切削参数密切相关。此外，JIANG 等[49]的研究也表明，切削过程中高温和高压作用下位错的迁移与相变现象会显著影响材料的加工性能。

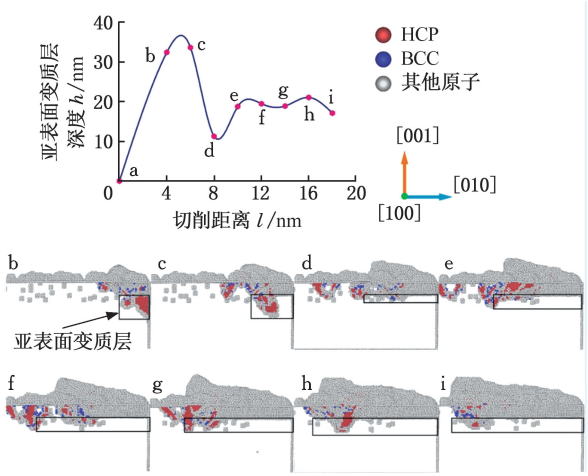
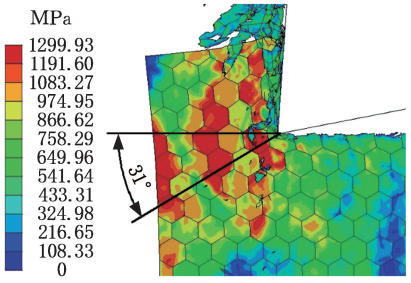


图 12　不同切削距离下 γ- TiAl 合金工件压表层深度的变化和亚表面缺损结构分布的剖面图[48]

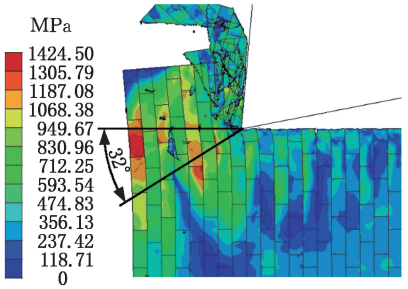
Fig.12　The changes of depth of SSD layers and sectional views of subsurface defect structure distribution of γ-TiAl alloy workpiece in different cutting distances[48]

除模拟原子尺度外，有限元法(FEM)在宏观尺度上同样展现出良好的预测能力。周丽等[50]基于不同取向角下的 α_2/γ 层片结构，构建了矩形与六边形晶体模型，分析了工具靠近工件边缘时剪切角变化及裂纹扩展路径。如图 13 所示，裂纹

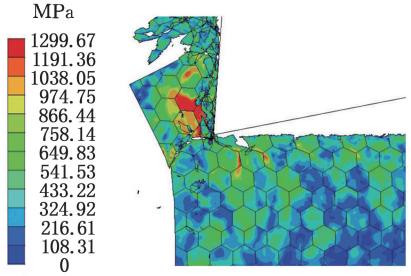
倾向于在片层内部萌生而非界面剥离，且六边形结构展现出更高的裂纹扩展阻力。此外，该模型也揭示了片层取向角对断裂模式（解理、剥离或跨层断裂）的控制作用，与实验观察高度一致。MD 与 FEM 仿真分别从微观与宏观尺度揭示了 γ-TiAl 合金在切削过程中的变形机制、位错演化及断裂行为，能够为加工参数优化和组织调控提供理论支持。建议未来进一步结合多尺度建模手段，拓展至多晶结构，以更接近实际工程应用场景。



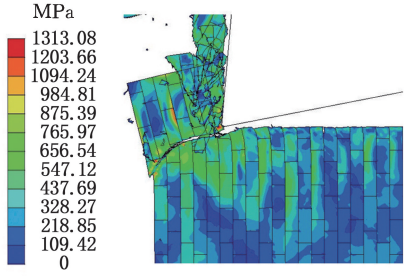
(a)正六边形片层结构断裂前工件边缘形貌



(b)矩形片层结构断裂前工件边缘形貌



(c)正六边形片层结构断裂后工件边缘形貌



(d)矩形片层结构断裂后工件边缘形貌

图 13　不同片层结构获得的断裂前后工件出口处的边缘形貌[50]

Fig.13　Edge morphology of workpiece at the exit before and after fracture obtained from different lamellar structures[50]

综上所述，γ-TiAl 合金因高比强度和耐高温性能在航空航天等领域有广阔应用前景，但其切削加工性能较差，切削力大、切削温度高和刀具磨损快是其难加工的主要原因。针对性地进行加工参数优化、先进刀具材料和刀具几何设计，以及合适的加工策略选择是 γ-TiAl 合金切削加工研究的重要方向。此外，借助有限元仿真等手段揭示 γ-TiAl 合金切削机理，对加工工艺优化具有重要意义。

3　表面完整性

表面完整性是加工后材料表面几何形状与物理性能的综合表现，表面完整性包括表面粗糙度、形貌、缺陷、残余应力以及金相变化等多个方面，对零件的疲劳性能和可靠性起着至关重要的作用[51]。然而，γ-TiAl 合金由于其固有的脆性特性，使得加工后的表面完整性问题尤为突出，成为研究和工程应用中广受关注的关键问题。

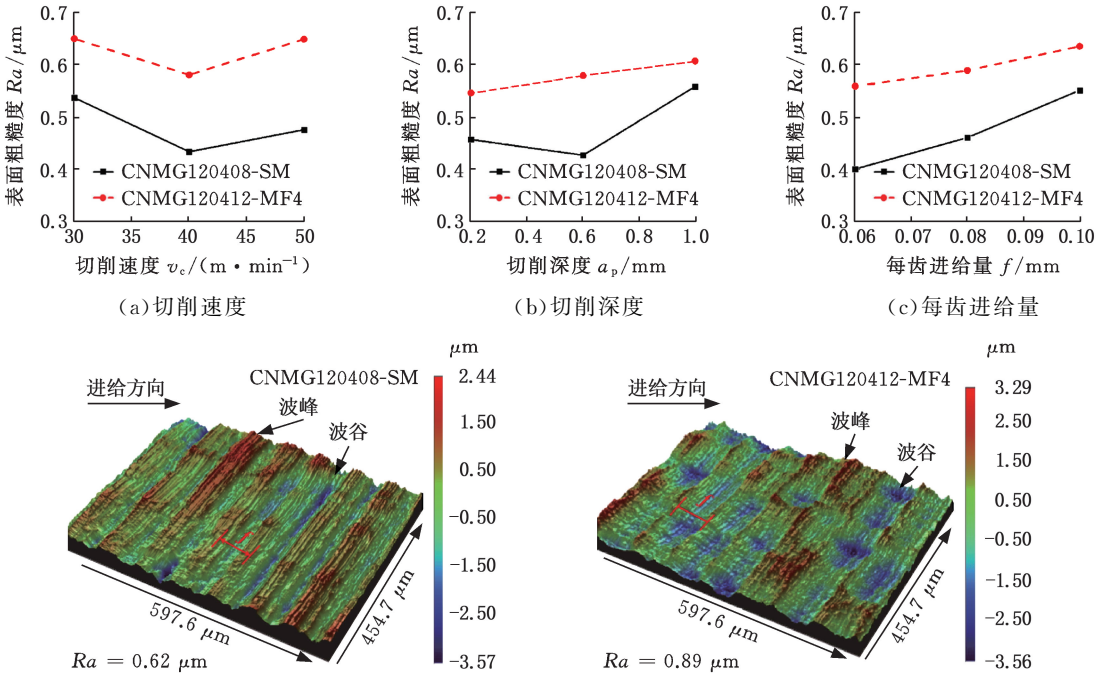
3.1　表面粗糙度和表面形态

表面粗糙度是评估加工后零件表面质量的重要指标，受塑性变形、弹性恢复等物理因素以及刀具轨迹干涉引起的几何因素影响，直接关系到零件的装配质量和精度。如图 14 所示，YAO 等[40]使用具有不同断屑槽的刀具车削 γ-TiAl 合金，发现直径更小的刀具更适合加工该脆性材料。两种刀具在相同切削参数下，Ra 变化趋势相似，其中切削速度对 Ra 影响较小，而切削深度则显著影响 Ra，可能是由于切削深度增大引起切削力增大和机械振动。进给量增加会导致残余高度增加，从而增大 Ra。WANG 等[44]的铣削试验显示，当切削速度 v_c 从 40 m/min 增大到 120 m/min 时，Ra 波动约为 0.075 μm。王麟等[52]指出，增大切削深度会引起更大的变形，减小切削深度可有效减小表面缺陷层深度，从而减小 Ra。刘耀文等[53]通过正交试验建立了切削参数与 Ra 的回归模型，分析结果表明，切削速度、每齿进给量和切削深度对 Ra 的影响依次增大，表明获得较光洁表面需尽可能地采用较小的切削深度。

3.2　表面缺陷

表面缺陷（如撕裂、空洞、裂纹等）是影响零件疲劳寿命的潜在威胁，特别是在航空发动机用 γ-TiAl 叶片，对表面质量要求极高[54]。但 γ-TiAl 合金脆性大，抑制其表面缺陷是切削过程中面临的又一问题。

γ-TiAl 合金的脆性使其在切削过程中容易产生表面缺陷，其片层状组织使得微观裂纹易于



(a)切削速度　(b)切削深度　(c)每齿进给量

(d)车削表面形貌(v_c=30 m/min,a_p=0.6 mm,f=0.08 mm)

图 14　车削表面粗糙度和表面形貌[40]

Fig.14　Turning surface roughness and surface topography[40]

在切削过程中形成,通常垂直于切削方向扩展,导致表面出现拔出、破碎、剥落等问题,如图 15 所示,裂纹长度一般在 5～30 μm 之间,大多起源于晶界[55]。MANTLE 等[56]和 PRIARONE 等[57]研究发现,裂纹扩展会导致撕裂和剥落,且与切削方向和片层结构的夹角密切相关。FURUSAWA 等[58]指出,裂纹的扩展通常分为三个阶段:初始时,刀具的挤压与剪切作用导致亚表面裂纹萌生;随后,在切削力的推动下,裂纹逐渐扩展;最后,裂纹停止扩展并形成不可逆撕裂或其他缺陷。此外,WANG 等[44]研究表明,片层间较低的结合力是裂纹萌生的关键因素,切削力超过结合力时,片层被拔出形成凹坑。

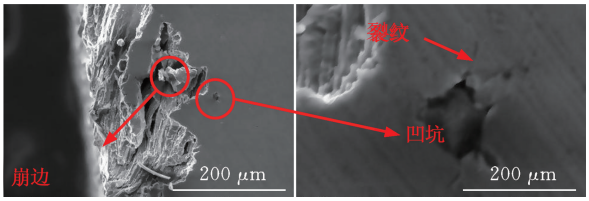
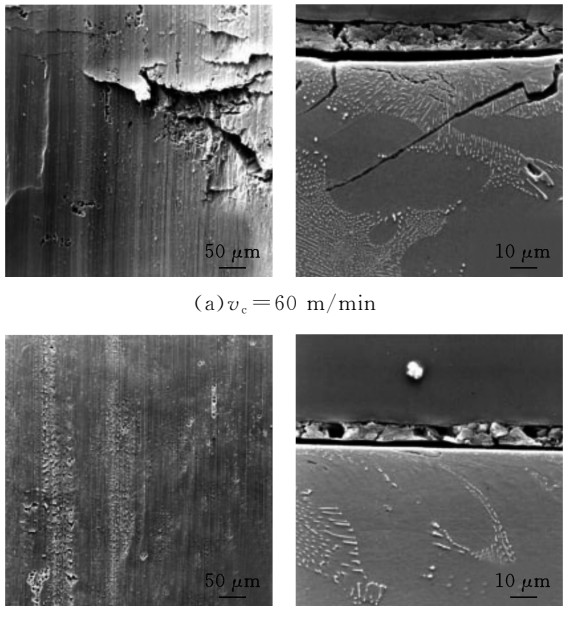


图 15　边缘崩碎以及材料拔出产生的凹坑[55]

Fig.15　Pits generated by edge spalling and material pull-out[55]

减少加工表面缺陷是切削 γ-TiAl 合金的关键研究方向。PRIARONE 等[43]发现,通过减小切削力和加工应力可有效抑制裂纹的形成。切削温度升高时,γ-TiAl 合金的断裂模式会从穿晶脆性断裂转变为沿晶脆性断裂,最终表现为韧性断裂,这有助于改善表面质量[36]。因此 UHLMANN 等[37]对 γ-TiAl 合金进行了高速铣削试验,结果表明,高速切削(v_c=150 m/min)相较于低速切削(v_c=60 m/min)能够显著减少裂纹的出现,如图 16 所示;接着他们对预热 γ-TiAl 合金进行了直角切削,发现预热至 800 ℃以上可得到无缺陷的表面。为减少表面缺陷,建议在常规切削中采用较低的进给速度和切削深度,同时提高切削速度[38]。



(a)v_c=60 m/min

(b)v_c=150 m/min

图 16　γ-TiAl 合金不同切削速度下的加工表面[37]

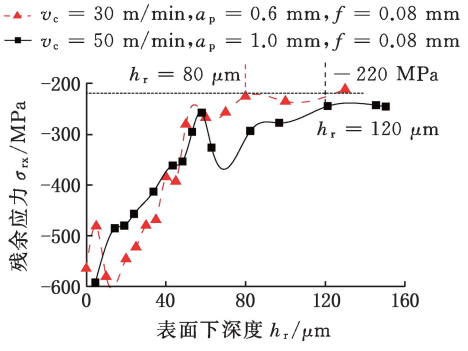
Fig.16　Machined surface of γ-TiAl alloy at different cutting speeds[37]

综上所述，γ-TiAl 合金切削过程中表面缺陷的产生与其片层状组织及切削条件密切相关。通过优化切削参数、控制温度和应力，有望降低表面缺陷，以满足高性能零部件的应用需求。

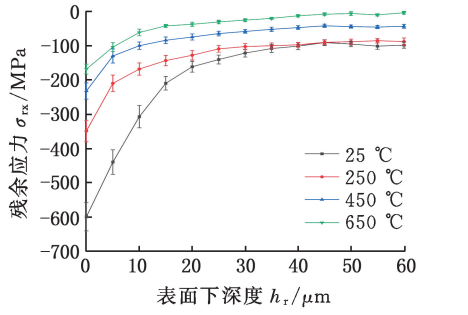
3.3　残余应力

力热耦合效应诱导亚表层结构引起其形状、体积的变化，以及相对于基体组织的金相相变，并且在两层之间的交界处产生残余应力。残余应力影响零件的精度、疲劳强度和耐腐蚀性能[59-60]。

MANTLE 等[61]采用盲孔钻削的方法对残余应力进行了测试，结果表明，刀具磨损和切削速度显著影响残余应力，其中，刀具磨损导致切削刃侵入工件的面积增大，从而引起更大程度的塑性变形，有利于残余压应力的产生。根据 YAO 等[40]的研究，切削量的增加导致残余压应力和深度较大，残余应力沿深度方向迅速减小，最后稳定在−220 MPa(图 17a)。FAN 等[62]研究发现，残余应力与切削温度有关，采用外部热源加热时会导致残余应力的释放(图 17b)。BENTLEY 等[63]发现压缩残余应力提高了疲劳抗力和表面硬度，显微硬度的变化趋势与残余应力的变化趋势基本一致。徐伟峰等[64]研究了 γ-TiAl 合金铣削加工表面残余应力，发现表面均为残余压应力，并且残余应力对切削速度的变化最敏感，对其他铣削参数并不敏感。



(a)残余应力与切削参数的关系[40]



(b)残余应力与预热温度的关系[62]

图 17　切削后表层残余应力

Fig.17　Residual stress in the surface layer of γ-TiAl alloy after cutting

目前，关于切削 γ-TiAl 合金残余应力的研究报道较少。除了对切削 γ-TiAl 合金的研究较少外，残余应力的检测方法局限也是一个重要原因。例如，X 射线衍射法检测残余应力可能会比较麻烦，因为 γ-TiAl 的晶体结构会导致重叠反射[65]。另外，对于超过屈服应力 50 %的残余应力，不建议采用盲孔法检测[61]，因此，需要一种准确有效的残余应力检测方法。此外，γ-TiAl 合金残余应力的研究应侧重于机械加工和热变形的高度非线性耦合的理论建模，以及刀具磨损等工艺条件对残余应力大小和分布的影响。理论与实验的耦合有助于探索 γ-TiAl 合金加工过程中的残余应力演变规律。

表面完整性对零件的加工质量和使用寿命至关重要，但 γ-TiAl 合金由于其本身加工性能较差，较难获得理想的表面。因此，为追求优异的表面完整性，不得不牺牲材料去除率，从而极大限制了生产效率。一些研究人员尝试采用高速切削来减少裂纹的产生和扩展，但极高的刀具磨损率和过高的热应力可能引发白层或不利相变，对表面完整性产生新的不利影响。因此，开发新型切削方法，减小切削力，抑制刀具磨损，降低力-热耦合效应对表面完整性的不利影响，是实现 γ-TiAl 合金构件高质量高效加工的关键目标。

4　γ-TiAl 合金的能场辅助加工

为解决 γ-TiAl 合金的加工问题，许多新型加工技术被相继提出，国内外学者进行了广泛研究。其中能场辅助加工是解决钛合金、高温合金、陶瓷基复合材料等材料加工问题的一类方法[11]，根据外场类型，可分为超声辅助加工(UVAM)[66]、感应辅助加工(IAM)[62]、激光辅助加工(LAM)[67]等加工方式。与常规加工(CM)方法相比，场辅助加工具有减小切削力、提高表面光洁度、降低刀具磨损等优点，因而成为难加工材料加工领域的研究热点。尽管能场辅助加工在 γ-TiAl 合金加工中显示出广阔前景，但相关研究目前仍处于起步阶段。

4.1　超声辅助加工

超声辅助加工通过在加工过程中施加高频低幅的振动，有效改善了 γ-TiAl 合金的加工性能，超声铣削试验台如图 18 所示[66]。研究表明，超声振动能够减小切削力、降低温度、延长刀具寿命和提高表面质量。CHEN 等[68]研究发现，超声辅助高效深磨削(UVHEDG)显著降低了磨削温度(约 15.4%)和减小了磨削力(约 16%)，同时提高

表面光洁度，表现出优越的加工性能。卢跃锋等[69-70]的研究表明，超声辅助铣削能显著降低

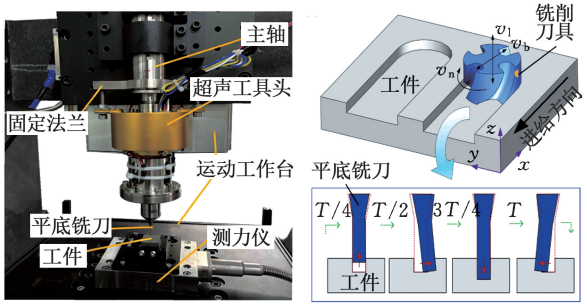
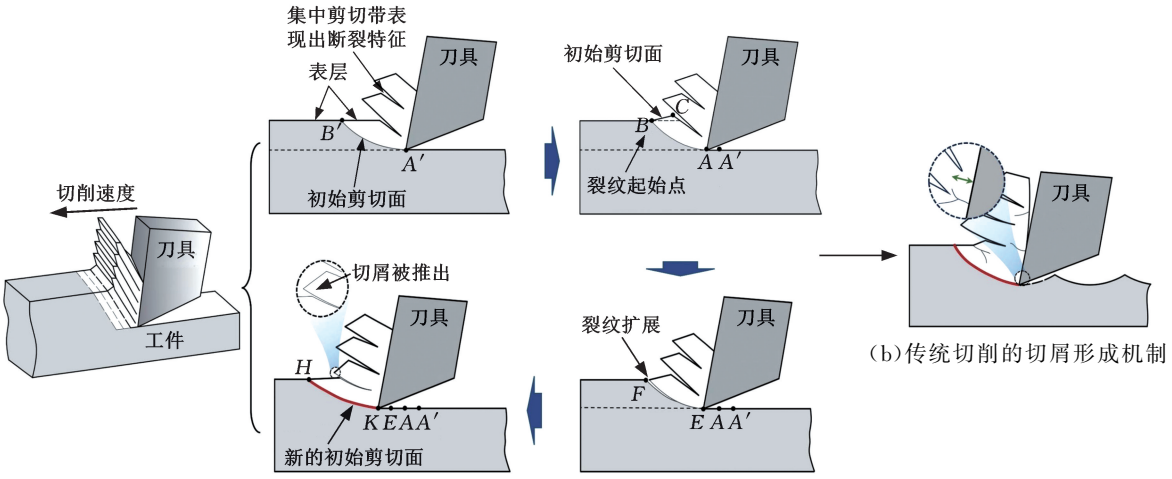


图 18　超声辅助铣削试验台[66]

Fig.18　Ultrasonic-assisted milling[66]

γ-TiAl 合金侧铣加工表面粗糙度，最佳条件下 Ra 值可降至 0.9 μm 以下，并延迟刀具磨损的发生，显著延长刀具寿命。

在表面质量方面，宋阳轩等[71]采用的超声纵扭复合铣削（ULTM）方法能够显著降低表面粗糙度，Ra 值普遍小于 0.6 μm，且提高了表面硬度，提高幅度超过 10%。XIA 等[72]的研究进一步揭示，超声辅助椭圆振动铣削能够通过周期性脆性断裂和塑性变形复合机制，改善 γ-TiAl 合金的材料去除过程，显著减小切削力，图 19 所示为 γ-TiAl 合金在常规铣削和超声铣削下的切削形成过程。



(a)超声切削的切屑形成机制

图 19　常规铣削和超声铣削 γ-TiAl 合金的切屑形成过程[72]

Fig.19　Cutting formation process of γ-TiAl alloy in conventional milling and ultrasonic milling[72]

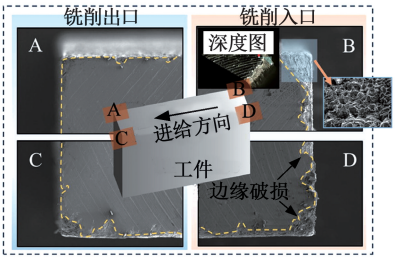
刀具磨损是加工 γ-TiAl 合金时需考虑的重要问题。研究表明，刀具磨损通常经历初期磨损、稳定磨损和剧烈磨损三个阶段。卢跃锋[70]研究发现，超声辅助铣削显著延迟了刀具黏结磨损和扩散磨损的发生，还能缩短刀具与工件的接触时间和降低切削温度，有效延长刀具使用寿命。CHEN 等[68]研究表明，超声辅助高效深磨削中 CBN 磨具磨损量显著低于传统深磨削的磨损量。XIA 等[72]也发现超声辅助铣削能抑制刀具边缘破损，如图 20 所示，这对提高加工系统的经济性具有重要意义。

尽管超声辅助加工在 γ-TiAl 合金加工中取得了进展，但该方法在工业应用中仍面临挑战，如超声振动系统的稳定性和经济性问题，以及复杂曲面和薄壁结构件加工的研究不足问题等。未来的研究应集中在优化超声加工参数模型、探索与激光辅助加工等技术的融合，以及开发高效稳定的超声振动系统等。

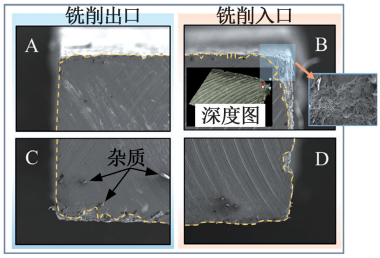
4.2　激光辅助加工

激光辅助加工作为一种热辅助加工技术，通过激光局部预热降低材料硬度和屈服强度，从而改善材料的加工性能[73]。研究表明，该技术能够显著减小切削力、延长刀具寿命，并提高表面质量[74]。在难加工材料研究领域，激光辅助加工展现了巨大的潜力和应用价值，图 21 所示为激光辅助铣削实验平台[75]。

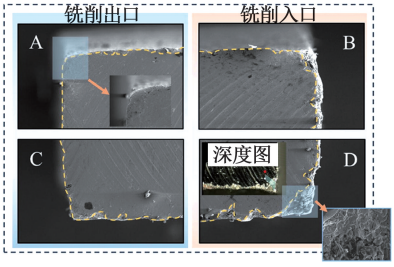
近年来，激光辅助加工在钛合金、镍基高温合金等难加工材料的加工中取得了显著进展。KALANTARI 等[76]对 Ti-6Al-4V 合金的激光辅助加工和传统加工进行了对比研究，得出激光预热可显著改善表面完整性，包括表面粗糙度、微硬度和晶粒尺寸等的结论。激光预热通过降低屈服强度和热软化效应，显著降低切削阻力，提高去除效率和刀具寿命。DARGUSCH 等[77]研究指出，激光辅助加工能够将钛合金的切削力减小 30% 以上（图 22），显著提高表面质量。张迎信等[78]总结了激光辅助切削技术的研究进展，发现通过激光预热不仅能降低切削比能和刀具磨损，还能显著改善加工表面质量。但为了实现最佳加工效果，



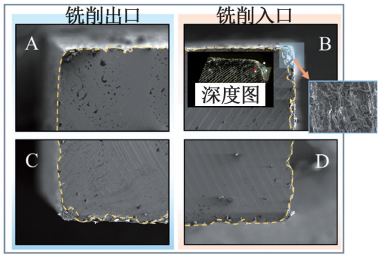
(a)v=15 m/min,传统铣削



(b)v=15 m/min,超声辅助铣削



(c)v=95 m/min,传统铣削



(d)v=95 m/min,超声辅助铣削

图 20　不同铣削条件下的刀具边缘断裂状态[72]

Fig.20　Tool edge fracture state under different milling conditions[72]

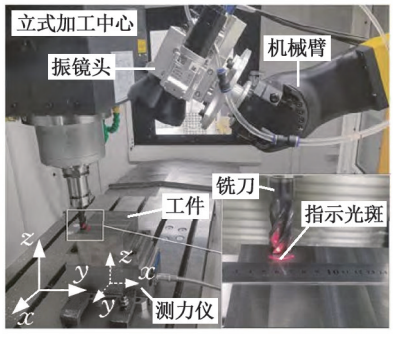


图 21　激光辅助铣削实验平台[75]

Fig.21　Laser-assisted milling experimental platform[75]

激光功率和扫描速度等关键参数需进一步优化。在此基础上,刘鑫等[75]提出了激光辅助铣削的温度场均衡控制方法,通过优化激光扫描路径,实现

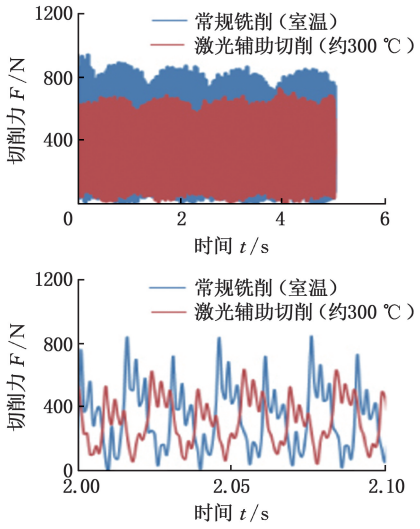


图 22　不同工艺下常规铣削和激光辅助铣削钛合金的切削力(v_c=100 m/min)[77]

Fig.22　Cutting force of titanium alloy in conventional milling and laser-assisted milling (v_c=100 m/min)[77]

了温度场的均匀分布,使切削力减小 10%以上,表面粗糙度下降 30%。

尽管激光辅助加工在难加工材料领域已有广泛研究,但在 γ-TiAl 合金中的应用仍较少。CHI 等[79]尝试将激光辅助加工应用于 γ-TiAl 合金,发现激光预热能够显著提高加工表面的硬度和光洁度,同时减少加工裂纹的产生。然而,该研究也指出,由于激光热积累效应,刀具可能发生黏结磨损,影响加工质量。这表明优化冷却策略对维持加工稳定性尤为重要。

尽管激光辅助加工技术在 γ-TiAl 合金加工中已有初步进展,但仍存在诸多局限。现有研究集中在激光参数优化和温度场控制上,对复杂几何形状零件(如薄壁件和曲面件)的研究较少,热-机械耦合机制尚未形成完善的理论模型,工业应用仍需深入探索。未来研究方向应包括:①激光与切削参数的协同优化,构建基于加工性能的参数控制模型;②探索激光辅助加工与其他技术的结合机制;③开发适用于复杂结构件的激光辅助加工工艺。总的来说,尽管该技术在 γ-TiAl 合金加工中的应用仍处于起步阶段,但它在改善加工性能、提高表面质量和延长刀具寿命方面的潜力已得到初步验证,未来有望为高端制造提供技术支撑。

4.3　感应辅助铣削

与激光辅助加工类似,感应辅助加工(IAM)是一种通过将感应热源置于刀具前对工件进行预热的方法。感应加热过程利用高频电流流过线圈产生涡流损耗和磁滞,进而产生热量[80]。图 23

所示为感应辅助铣削实验平台。这种加热方式能够精确控制热源和热容量，仅加热工件的一小部分，且加热快速、清洁，因此在切削过程中具有优势。

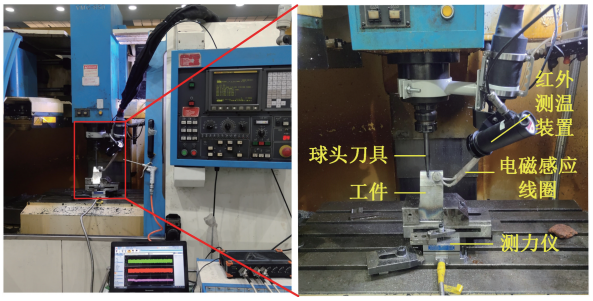
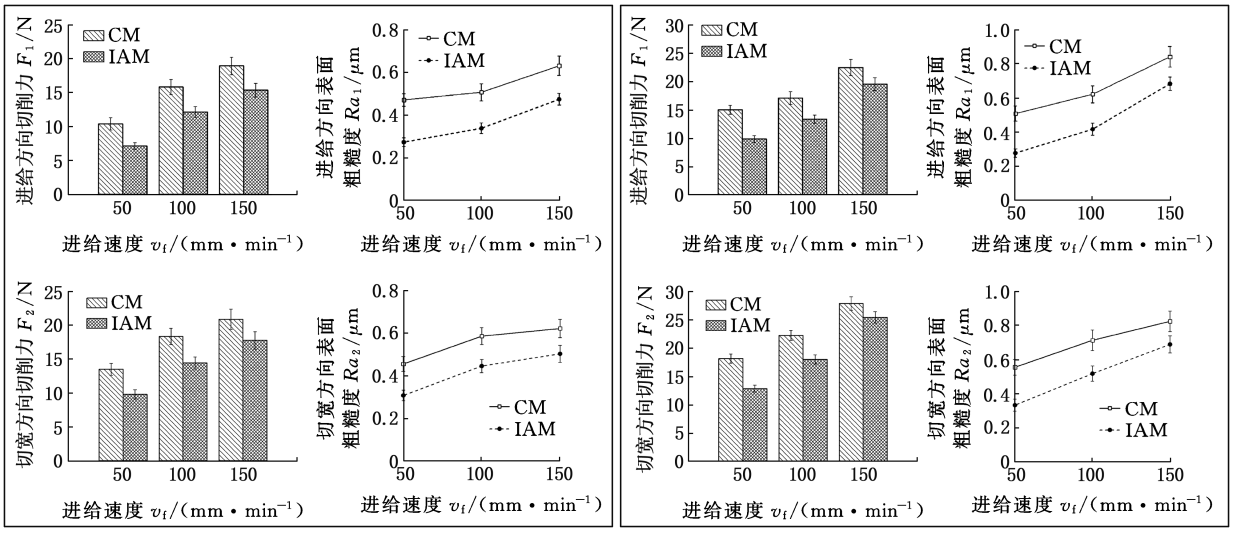


图 23 感应辅助铣削实验平台[62]

Fig.23 Induction-assisted milling experimental platform[62]

近年来，感应辅助加工在镍基合金和钛合金中的研究取得了诸多成果。例如，AMIN 等[81]研究表明，感应辅助铣削 Inconel 718 显著减小了切削振动和切削力，刀具寿命延长了 80%。GINTA 等[82]研究发现，感应加热显著减小了 Ti-6Al-4V 的切削力、减少了刀具磨损并提高了金属去除率。KIM 等[83]研究指出，感应加热能够使 Inconel 718 和 Ti-6Al-4V 的切削力减小 22.6%～33.2%，表面粗糙度减小 14.8%～28.5%。同样的结论也可以在 CHOI 等[84]的研究中找到，他们发现通过优化预热路径可使 AISI 1045 钢的切削力减小 18.9%～31.2%，表面粗糙度减小19.0%～41.9%；对于 Inconel 718 合金，切削力减小 13.0%～34.3%，表面粗糙度减小 16.3%～45.2%，如图 24 所示。由于单一热源可能存在热量不足的问题，研究者开始采用多热源组合研究难加工材料在多热源作用下的加工特性。HA 等[85]研究了激光与感应组合热源对镍基合金加工性能的影响，发现组合热源可使切削力降低70.2%，并显著延长刀具寿命。这些研究表明，感应辅助加工在高温合金及其他难加工材料中具有广泛适用性。此外，相比激光辅助加工，感应辅助加工设备成本仅为其十分之一，具有更大的经济优势。



(a)AISI 1045 钢　　(b)Inconel 718 合金

图 24 不同加工方法加工 AISI 1045 钢和 Inconel 718 的切削力和表面粗糙度[84]

Fig.24 Cutting force and surface roughness of AISI 1045 steel and Inconel 718 processed by different machining methods[84]

尽管感应辅助应用在 γ-TiAl 合金加工中的研究较少，但已有初步成果。FAN 等[62]的研究显示，感应加热显著改善了 γ-TiAl 合金的加工性能，减小了切削力并提高了表面完整性，如图 25 所示。该研究还指出，预热温度和切削参数的协同优化是实现高效加工的关键。

目前，感应辅助铣削在 γ-TiAl 合金加工中仍处于初步阶段，尤其在加工复杂几何结构(如曲面和薄壁件)方面，技术尚不成熟。γ-TiAl 合金的低热导性加剧了热控制难度，局部过热可导致表面氧化和刀具磨损，限制了工艺优化。未来研究应聚焦于优化感应加热路径和参数，结合数值模拟与实验验证，提高工艺稳定性和表面质量。此外，探索感应辅助技术与智能加工、冷却策略的结合，有望进一步降低热积累影响，提高加工效率。建立适用的热-力耦合模型，将为工业化应用提供理论支持。尽管目前在该领域的研究尚显不足，但感应辅助铣削技术在 γ-TiAl 合金加工中的应用潜力，尤其在高端制造领域的前景，值得进一步探讨与关注。

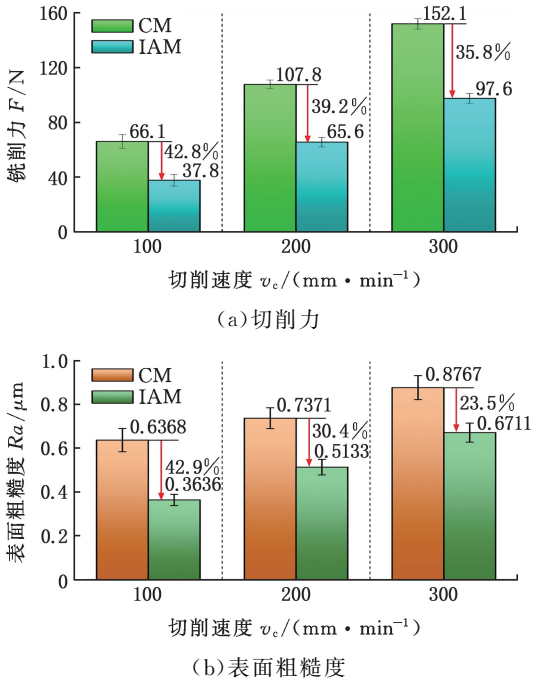


图 25　不同加工方法加工 γ-TiAl 合金的切削力和表面粗糙度[62]

Fig.25　Cutting force and surface roughness of γ-TiAl alloy processed by different machining methods[62]

4.4　存在的问题与发展挑战

尽管超声、激光与感应等能场辅助加工方式在 γ-TiAl 合金加工中展现出显著优势，如减小切削力、改善表面完整性与延长刀具寿命，但当前技术仍面临诸多挑战。

首先，热-力耦合机制尚不明确。γ-TiAl 合金的热导率低、脆性强，使得激光和感应加工中热量难以有效扩散，易导致热积聚，引发表面烧蚀、热裂纹甚至组织结构异常转变。现有研究对不同能场作用下的组织演化与损伤机制尚缺乏系统模型。其次，刀具磨损问题依然突出。虽然超声辅助加工能够缩短刀具-工件接触时间并缓解温升，但当切削路径复杂或频率不稳定时，振动系统可能发生共振或磨损加剧，影响加工质量与刀具寿命。再次，复杂结构件加工能力有限。目前大多实验聚焦于平面或简单几何构件，对薄壁件、曲面件等复杂零件的适应性和稳定性研究不足，尤其是对壁厚变化和局部热积效应的响应尚不明确。此外，参数窗口狭窄、系统集成度高，如激光功率、扫描速度、感应频率、超声振幅等参数高度耦合，稍有不当即可能造成质量波动。与此同时，设备成本较高、系统构建复杂，仍是限制其工业化推广的现实因素。最后，当前研究普遍忽略多物理场之间的协同效应，如激光＋超声、感应＋冷却的复合场耦合策略仍属探索阶段，缺乏成熟工艺集成方案。

综上所述，γ-TiAl 合金能场辅助加工仍面临多重挑战，材料本身特性与加工过程中材料响应之间不匹配。一方面，γ-TiAl 合金具有热导率低、高温强度大、室温塑性差等特点，导致它在热能场（如激光、感应）作用下易产生热应力集中与微裂纹扩展，在声能场（如超声）作用下则因塑性受限、变形能力不足而难以实现理想的间歇切削或自激振动软化效应。另一方面，γ-TiAl 合金的片层组织在高温、应力共同作用下可能发生复杂的组织转变与局部损伤演化，但目前对这些机制仍缺乏足够的原位表征与建模能力。加之该类 γ-TiAl 合金对工艺参数敏感性高，加工稳定性依赖于能场系统的精准控制，进一步限制了工艺推广。因此，未来研究应聚焦于能场辅助加工中物理场作用对 γ-TiAl 合金的软化、变形机制及加工表面完整性的影响。这些研究将为实现高效、精密的 γ-TiAl 合金加工提供理论支持，特别是在航空航天等高端制造领域的复杂构件加工中发挥重要作用。

5　未来发展趋势

尽管 γ-TiAl 合金在航空航天等高端领域中具有广泛应用前景，但它在切削加工中的难度依然较大，尤其是材料的低塑性、高脆性以及加工过程中产生的热应力和残余应力等问题。为了有效解决这些挑战，未来的研究方向应当更加侧重于以下几个方面。

1）深化加工机理研究。γ-TiAl 合金的低热导性和强高温性能使其在切削过程中容易出现局部过热和热裂纹，这主要与材料的脆性和热应力积累有关。未来的研究应更加深入地分析材料的微观变形机制，包括位错运动、孪晶形成、堆垛层错和应力诱导的相变等现象。通过高温切削和动态力学模拟，进一步揭示材料在复杂切削过程中所经历的微观损伤演化和宏观力学行为。这些研究将有助于更好地控制切削力、温度和应力分布，从而减少材料表面的微裂纹和加工缺陷，提高加工效率。

2）多物理场协同作用下的能场辅助加工。能场辅助加工技术，如激光、超声、感应等技术，已证明能有效改善 γ-TiAl 合金的切削性能。然而，热-力-声-电等多物理场的耦合作用在 γ-TiAl 合金加工中的具体机制尚不完全清晰。未来的研究应着重揭示不同能场（如激光辅助的热能作用与超声辅助的振动效应）对材料软化、缺陷修复、变

形行为的协同作用，探索它们如何在实际加工中共同作用于微观结构的重构、应力的释放以及裂纹的修复。

3)加工表面完整性的控制。γ-TiAl合金的表面质量和残余应力直接影响它在高温环境下的疲劳强度和耐腐蚀性。大切削力和高温会导致表面损伤、塑性变形和残余应力的产生，特别是在传统加工方法中。未来的研究应重点解决表面完整性控制的问题，探索如何通过能场辅助加工优化切削温度分布，减少应力集中和表面裂纹。结合激光辅助的表面激活和超声的振动软化，有望实现对表面粗糙度和残余应力的精确控制。

4)复杂结构件加工技术的突破。当前，能场辅助加工的研究多集中在简单几何形状和单一平面材料的切削上，然而，复杂结构件的加工(如薄壁结构、曲面零件等)仍面临极大的挑战。对于这些复杂形状的零件，局部热积累、材料的非均匀变形以及系统的动态稳定性是需要解决的主要问题。未来研究应重点优化多能场技术在复杂几何件加工中的适应性，尤其是在实际工程中对精密和高效加工的需求下，智能化与自动化的加工路径规划将成为提高加工稳定性和减少误差的重要方向。

5)智能化加工与绿色加工技术的结合。随着智能制造的发展，结合实时监测与自适应控制的能场辅助加工系统能够实现对γ-TiAl合金加工过程的动态调整和优化。通过集成传感器和实时反馈机制，未来加工系统能够根据材料的响应自动调整加工参数，以确保加工质量的稳定性与一致性。同时，随着环境保护要求的提高，绿色加工技术(如减少切削液的使用、降低能耗等)也将成为能场辅助加工技术的重要发展方向。

6)激光熔覆与增材制造技术的应用突破。随着激光熔覆、增材制造等先进加工技术的不断发展，这些技术在γ-TiAl合金的加工和修复中展现出了显著的优势。激光熔覆能够精确控制热输入，减少热应力和变形，且能够在复杂几何形状上进行局部修复；增材制造则提供了更加灵活的材料沉积方式，有助于生产复杂结构零件，特别是在航空航天等高温部件的制造中显示出巨大潜力。未来，这些技术将进一步融合切削加工技术，推动“增减材一体化”的发展，为γ-TiAl合金提供更加高效、精准的加工解决方案。

参考文献：

[1] 宫声凯，尚勇，张继，等. 我国典型金属间化合物基高温结构材料的研究进展与应用[J]. 金属学报，2019，55(9)：1067-1076.
GONG Shengkai，SHANG Yong，ZHANG Ji，et al. Application and Research of Typical Intermetallics-based High Temperature Structural Materials in China[J]. Acta Metallurgica Sinica，2019，55(9)：1067-1076.

[2] LIANG Zhenquan，XIAO Shulong，LI Xinyi，et al. Significant Improvement in Creep Resistance of Ti-46Al-6Nb-1Cr-1.5V Alloy via Introducing High-density Nanotwins[J]. Materials Science and Engineering：A，2023，862：144485.

[3] 蔡建明，弭光宝，高帆，等. 航空发动机用先进高温钛合金材料技术研究与发展[J]. 材料工程，2016，44(8)：1-10.
CAI Jianming，MI Guangbao，GAO Fan，et al. Research and Development of Some Advanced High Temperature Titanium Alloys for Aero-engine[J]. Journal of Materials Engineering，2016，44(8)：1-10.

[4] XIA Ziwen，SHAN Chenwei，Meng Hua，et al. Machinability of γ-TiAl：a Review[J]. Chinese Journal of Aeronautics，2023，36(7)：40-75.

[5] 黄锋，梁思诚，胡尚兴，等. TiAl合金强韧化研究现状与进展[J]. 特种铸造及有色合金，2023，43(11)：1441-1446.
HUANG Feng，LIANG Sicheng，HU Shangxing，et al. Status and Progress in Strengthening and Toughening of TiAl Alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys，2023，43(11)：1441-1446.

[6] 廖阳稷敛，顾琳，刘苏毅，等. γ-TiAl金属间化合物加工的国内外研究现状[J]. 航空制造技术，2020，63(4)：22-33.
LIAO Yangjilian，GU Lin，LIU Suyi，et al. Research Status of Machining γ-TiAl Intermetallic Compounds Both in China and Overseas[J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2020，63(4)：22-33.

[7] 高万里，温家亮，王春晓. 新型钛铝合金数控切削加工表面完整性及耐腐蚀性研究[J]. 中国金属通报，2023 (4)：100-102.
GAO Wangli，WENG Jialiang，WANG Chunxiao. Study of Surface Integrity and Corrosion Resistance in CNC Machining of New TiAl Alloys[J]. Science and Technology，2023 (4)：100-102.

[8] 左俊彦，林有希，孟鑫鑫. 难加工材料的高速铣削研究进展[J]. 精密成形工程，2017，9(4)：121-125.
ZUO Junyan，LIN Youxi，MENG Xinxin，et al. Research Progress of HSM in Difficult-machining-metal-material[J]. Journal of Netshape Forming Engineering，2017，9(4)：121-125.

[9] 赵鑫. 超临界 CO2-MQL 铣削 γ-TiAl 合金表面完整性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2023
ZHAO Xin. Supercritical CO_2-MQI Milling of γ-TiAl Alloys Surfaceintegrity Study[D]. Harbin : Harbin University of Science and Technology, 2023.

[10] 王相宇, 仇文豪, 牛金涛,等. 钛铝合金低温切削加工温度的实验和仿真研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(19):318-331.
WANG Xiangyu, QIU Wenhao, NIU Jintao, et al. Simulation and Experimental Study on Temperature in Cryogenic Cutting of Titanium Aluminum Alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(19):318-331.

[11] 许剑锋, 黄凯, 郑正鼎,等. 难加工材料场辅助超精密加工研究[J]. 中国科学:技术科学, 2022, 52(6):829-853.
XU Jianfeng, HUANG Kai, ZHENG Zhengding, et al. Review of Field-assisted Ultraprecision Machining Difficult-to-machine Materials[J]. Scientia Sinica(Technologica), 2022, 52(6):829-853.

[12] HOJATI F, AZARHOUSHANG B, DANESHI A, et al. Modeling of Laser-assisted Micro-milling [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2023, 40:29-43.

[13] 赵重阳, 陆俊宇, 王晓博,等. 超声纵扭辅助铣削高强铝合金表面润湿性能研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(16):1912-1918.
ZHAO Chongyang, LU Junyu, WANG Xiaobo, et al. Wettability of High-performance Aluminum Alloy Surfaces Machined Longitudinal-torsion Ultrasonic-assisted Milling[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(16):1912-1918.

[14] 杨锐. 钛铝金属间化合物的进展与挑战[J]. 金属学报, 2015, 51(2):129-147.
YANG Rui, Chinese Academy of Sciences Institute of Metal Research[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(2):129-147.

[15] 胡志力, 张嘉恒, 华林. TiAl 合金热成形技术研究现状与展望[J]. 材料工程, 2025,53(4):1-14.
HU Zhili, ZHANG Jiaheng, HUA Lin. Research Progress and Prospect in Hot Forming Techniques of TiAl Alloys[J]. Journal of Materials Engineering,2025,53(4):1-14.

[16] BEWLAY B P, NAG S, SUZUKI A, et al. TiAl Alloys in Commercial Aircraft Engines[J]. Materials at High Temperatures, 2016, 33(4/5):549-559.

[17] 朱春雷, 李胜, 张继. 有利于铸造 TiAl 合金增压器涡轮叶片可靠性的组织设计[J]. 材料工程, 2017, 45(6):36-42.
ZHU Chunlei, LI Sheng, ZHANG Ji, et al. Microstructure Design for Reliability of Turbocharger Blade of Cast TiAl Based Alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(6):36-42.

[18] MAYER S, ERDELY P, FISCHER F D, et al. Intermetallic β-solidifying γ-TiAl Based Alloys-from Fundamental Research to Application[J]. Advanced Engineering Materials, 2017, 19(4):1600735.

[19] 油如月, 王强, 赵春玲,等. TNM 变形钛铝合金研究进展[J]. 中国材料进展, 2023, 42(8):669-680.
YOU Ruyue, WANG Qiang, ZHAO Chunling, et al. Progress of TNM Deformed TiAl Alloys[J]. Materials China, 2023, 42(8):669-680.

[20] CHEN Guang, PENG Yingbo, ZHENG Gong, et al. Polysynthetic Twinned TiAl Single Crystals for High-temperature Applications[J]. Nature Materials, 2016, 15:876-881.

[21] JANSCHEK P. Wrought TiAl Blades[J]. Materials Today:Proceedings, 2015, 2:S92-S97.

[22] WU Xinhua. Review of Alloy and Process Development of TiAl Alloys[J]. Intermetallics, 2006, 14:1114-1122.

[23] SCHUSTER J C, PALM M. Reassessment of the Binary Aluminum-titanium Phase Diagram[J]. Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 2006, 27:255-277.

[24] 王子特, 郑功, 祁志祥, 等. TiAl 合金结构、组织、性能与应用[J]. 科学通报, 2023, 68(25):3259-3274.
WANG Zite, ZHENG Gong, QI Zhixiang, et al. Structures, Microstructures, Properties, and Applications of TiAl Alloys[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(25):3259-3274.

[25] 强凤鸣, 寇宏超, 贾梦宇,等. β 型 γ-TiAl 合金热变形过程中组织演化及动态再结晶行为研究现状[J]. 精密成形工程, 2022, 14(1):11-18.
QIANG Fengming, KOU Hongchao, JIA Mengyu, et al. Microstructure Evolution and Dynamic Recrystallization Behavior in β-Solidifying γ-TiAl during Thermomechanical Processing[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(1):11-18.

[26] 刘宏武. (γ+α_2+B_2)三相 TiAl 合金热加工特性及组织性能研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2017.
LIU Hongwu. Hot Working, Structure and Properties of (γ+α_2+B_2) Multiphase TiAl Alloy[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017

[27] CLEMENS H, MAYER S. Design, Processing, Microstructure, Properties, and Applications of Advanced Intermetallic TiAl Alloys[J]. Advanced

Engineering Materials, 2013, 15(4):191-215.

[28] XU Runrun, LI Miaoquan, ZHAO Yonghao. A Review of Microstructure Control and Mechanical Performance Optimization of γ-TiAl Alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 932: 167611.

[29] KLOCKE F, LUNG D, ARFT M, et al. On High-speed Turning of a Third-generation Gamma Titanium Aluminide[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65:155-163.

[30] PÉREZ R G V. Wear Mechanisms of WC Inserts in Face Milling of Gamma Titanium Aluminides [J]. Wear, 2005, 259(7/12):1160-1167.

[31] ASPINWALL D K, DEWES R C, MANTLE A L. The Machining of γ-TiAI Intermetallic Alloys [J]. CIRP Annals, 2005, 54(1):99-104.

[32] GE Yingfei, FU Yucan, Xu Jiuhua. Experimental Study on High Speed Milling of γ-TiAl Alloy[J]. Key Engineering Materials, 2007, 339:6-10.

[33] 潘多. γ-TiAl 合金低温冷却切削加工材料去除机理研究[D]. 济南:济南大学, 2022
PAN Duo. Removal Mechanism of γ-TiAl Alloy in Cryogenic Cooling Cutting[D]. Jinan : University of Jinan, 2022.

[34] ASPINWALL D K, MANTLE A L, CHAN W K, et al. Cutting Temperatures When Ball Nose End Milling γ-TiAl Intermetallic Alloys[J]. CIRP Annals, 2013, 62(1):75-78.

[35] LIU Xin, LIU Hongguang, SHI Shijia, et al. On Revealing the Mechanisms Involved in Brittle-to-ductile Transition of Fracture Behaviors for γ-TiAl Alloy under Dynamic Conditions[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1010:177614.

[36] IMAYEV V M, IMAYEV R M, SALISHCHEV G A. On Two Stages of Brittle-to-ductile Transition in TiAl Intermetallic [J]. Intermetallics, 2000, 8(1):1-6.

[37] UHLMANN E, HERTER S. Studies on Conventional Cutting of Intermetallic Nickel and Titanium Aluminides[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2006, 220(9):1391-1398.

[38] UHLMANN E, HERTER S, GERSTENBERGER R, et al. Quasi-static Chip Formation of Intermetallic Titanium Aluminides[J]. Production Engineering, 2009, 3(3):261-270.

[39] WANG Xiangyu, ZHANG Xiaoxia, PAN Duo, et al. Tool Wear and Surface Integrity of γ-TiAl Cryogenic Coolant Machining at Various Cutting Speed Levels[J]. Lubricants, 2023, 11:238.

[40] YAO Changfeng, LIN Jiannan, WU Daoxia, et al. Surface Integrity and Fatigue Behavior When Turning γ-TiAl Alloy with Optimized PVD-coated Carbide Inserts[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31:826-836.

[41] HOOD R, ASPINWALL D K, SAGE C, et al. High Speed Ball Nose End Milling of γ-TiAl Alloys[J]. Intermetallics, 2013, 32:284-291.

[42] KLOCKE F, SETTINERI L, LUNG D, et al. High Performance Cutting of Gamma Titanium Aluminides:Influence of Lubricoolant Strategy on Tool Wear and Surface Integrity[J]. Wear, 2013, 302(1/2):1136-1144.

[43] PRIARONE P C, KLOCKE F, FAGA M G, et al. Tool Life and Surface Integrity When Turning Titanium Aluminides with PCD Tools under Conventional Wet Cutting and Cryogenic Cooling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85:807-816.

[44] WANG Zhenhua, LIU Yaowen. Study of Surface Integrity of Milled Gamma Titanium Aluminide [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56:806-819.

[45] RAHMAN M A, RAHMAN M, KUMAR A S. Modelling of Flow Stress by Correlating the Material Grain Size and Chip Thickness in Ultra-precision Machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 123:57-75.

[46] PENG C T, SHAREEF I. Dry Machining Parameter Optimization for γ-TiAl with a Rhombic Insert [J]. Procedia Manufacturing, 2021;53:162-73.

[47] ZHANG Y, LEE Y, CHANG S, et al. Microstructural Modulation of TiAl Alloys for Controlling Ultra-precision Machinability[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2022, 174:103851.

[48] LI Junye, SUN Yuxiao, XIE Hongcai, et al. Effect of Cutting Parameters on the Depth of Subsurface Deformed Layers of Single γ-TiAl Alloy during Nano-cutting Process[J]. Applied Physics, 2022, 128:189.

[49] JIANG Junqiang, DONG Zhaowei, MA Hongwei, et al. Computational Investigation on the Surface Cutting of γ-TiAl Alloy[J]. Solid State Communications, 2022, 342:114618.

[50] 周丽,崔超,贾清,等. γ-TiAl 金属间化合物铣削加工实验与有限元模拟[J]. 金属学报, 2017, 53(4):505-512.
ZHOU Li, CUI Chao, JIA Qing, et al. Experimental and Finite Element Simulation of Milling Process for γ-TiAl Intermetallics[J]. Acta Metal-

lurgica Sinica, 2017, 53(4):505-512.

[51] YAO Jun, LI Xun, DU Baorui, et al. Research Status of Influence Mechanism of Surface Integrity on Fatigue Behavior of Metal Workpieces:a Review [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 131:3401-3419.

[52] 王麒,冯瑞成,樊礼赫,等. 切削深度对单晶 γ-TiAl 合金亚表面缺陷及残余应力的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(14):14089-14095.
WANG Qi, FENG Ruicheng, FAN Lihe, et al. Effect of Cutting Depth on Subsurface Defects and Residual Stress in Single Crystal γ-TiAl Alloy[J]. Materials Reports, 2021, 35(14):14089-14095.

[53] 刘耀文,汪振华,章波,等. γ-TiAl 合金铣削加工表面粗糙度研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(17):53-58.
LIU Yaowen, WANG Zhenhua, ZHANG Bo, et al. Study on Surface Roughness of γ-TiAl Alloys Milling[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(17):53-58

[54] CHEN Tao, WANG Xiaowei, ZHAO Biao, et al. Surface Integrity Evolution during Creep Feed Profile Grinding of γ-TiAl Blade Tenon[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(8):496-512.

[55] 刘耀文. 新型钛铝合金切削加工表面完整性研究[D]. 南京:南京理工大学, 2020
LIU Yaowen. Research on Surface Integrity of New Titanium-aluminum Alloy Machining [D] Nanjing :Nanjing University of Science and Technology, 2020.

[56] MANTLE A L, ASPINWALL D K. Surface Integrity and Fatigue Life of Turned Gamma Titanium Aluminide[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 72(3):413-420.

[57] PRIARONE P C, RIZZUTI S, ROTELLA G, et al. Tool Wear and Surface Quality in Milling of a Gamma-TiAl Intermetallic[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 61:25-33.

[58] FURUSAWA T, HINO H, TSUJI S, et al. Generation of Defects due to Machining of TiAl Intermetallic Compound and Their Effects on Mechanical Strength[J].Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(3):506-514.

[59] LIANG Xiaoliang, LIU Zhanqiang, WANG Bing. State-of-the-art of Surface Integrity Induced by Tool Wear Effects in Machining Process of Titanium and Nickel Alloys:a Review[J]. Measurement, 2019, 132:150-181.

[60] DING Wenfeng, ZHANG Liangchi, LI Zheng, et al. Review on Grinding-induced Residual Stresses in Metallic Materials[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 88:2939-2968.

[61] MANTLE A L, ASPINWALL D K. Surface Integrity of a High Speed Milled Gamma Titanium Aluminide[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 118(1/3):143-150.

[62] FAN Tao, YAO Changfeng, TAN Liang, et al. The Influence of Induction-assisted Milling on the Machining Characteristics and Surface Integrity of γ-TiAl Alloys [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 118:215-227.

[63] BENTLEY S A,MANTLE A L, ASPINWALL D K. The Effect of Machining on the Fatigue Strength of a Gamma Titanium Aluminide Intertmetallic Alloy[J]. Intermetallics, 1999, 7:967-969.

[64] 徐伟峰,闫冉,刘维伟. γ-TiAl 合金铣削加工表面残余应力研究[J]. 航空制造技术, 2017 (10):82-85.
XU Weifeng, YAN Ran, LIU Weiwei, et al. Surface Residual Stress of Gamma Titanium Aluminide in Milling Process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(10):82-85.

[65] HOOD R, ASPINWALL D K, SOO S L, et al. Workpiece Surface Integrity When Slot Milling γ-TiAl Intermetallic Alloy[J]. CIRP Annals, 2014, 63:53-56.

[66] AHMAR K, WANG Xin, ZHAO Biao, et al. Ultrasonic Vibration-assisted Cutting of Titanium Alloys:a State-of-the-art Review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2025, 38:103078.

[67] XU Binbin, ZHANG Jun, LIU Xin, et al. Fully Coupled Thermomechanical Simulation of Laser-assisted Machining Ti6Al4V Reveals the Mechanism of Morphological Evolution during Serrated Chip Formation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 315:117925.

[68] CHEN Tao, WANG Xiaowei, ZHAO Biao, et al. Material Removal Mechanisms in Ultrasonic Vibration-assisted High-efficiency Deep Grinding γ-TiAl Alloy[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(11):462-476.

[69] 卢跃锋, 汪振华, 马耀,等.超声铣削钛铝合金表面完整性与刀具磨损研究[J].机械设计与制造, 2023 (4):118-123.
LU Yuefeng, WANG Zhenhua, MA Yao, et al. Study on the Surface Integrity and Tool Wear of TiAl Alloy Processed by Ultrasonic Vibration Assisted Milling[J]. Machinery Design & Manufacture,2023 (4):118-123.

[70] 卢跃锋. 超声铣削钛铝合金加工工艺与表面完整性研究[D]. 南京:南京理工大学, 2021.
LU Yuefeng. Ultrasonic Milling Titanium-aluminum Alloy Processing Technology and Surface Integrity Research[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.

[71] 宋阳轩,汪振华,黄雷. 超声纵扭辅助铣削 TiAl 合金表面质量及刀具磨损研究[J]. 制造技术与机床, 2024 (2):31-37.
SONG Yangxuan, WANG Zhenhua, HUANG Lei, et al. Study on Surface Quality and Tool Wear of TiAl Alloy in Ultrasonic Longitudinal Torsion Assisted Milling[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2024(2):31-37.

[72] XIA Ziwen, SHAN Chenwei, ZHANG Menghua, et al. Machinability of Elliptical Ultrasonic Vibration Milling γ-TiAl: Chip Formation, Edge Breakage, and Subsurface Layer Deformation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2025,38(3):103096.

[73] YOU Kaiyuan, YAN Guangpeng, LUO Xichun, et al. Advances in Laser Assisted Machining of Hard and Brittle Materials[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58:677-692.

[74] HE Yi, XIAO Guijian, LIU Zhenyang, et al. Subsurface Damage in Laser-assisted Machining Titanium Alloys[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 258:108576.

[75] 刘鑫,张俊,徐斌斌,等. 激光辅助铣削过程的预热温度场调控方法研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(9):218-228.
LIU Xin, ZHANG Jun, XU Binbin, et al. Controlling Strategy of Preheating Temperature Field in Laser-assisted Machining Process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(9):218-228.

[76] KALANTARI O, JAFARIAN F, FALLAH M M. Comparative Investigation of Surface Integrity in Laser Assisted and Conventional Machining of Ti-6Al-4V Alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62:90-98.

[77] DARGUSCH M S, SIVARUPAN T, BERMINGHAM M, et al. Challenges in Laser-assisted Milling of Titanium Alloys[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2020, 3(1):015001.

[78] 张迎信, 安立宝. 激光加热辅助切削加工技术研究进展[J]. 航空材料学报, 2018, 38(2):77-85.
ZHANG Yinxin, AN Libao. Research Progress on Laser Assisted Machining[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(2):77-85.

[79] CHI Yada, DONG Zexuan, CUI Minchao, et al. Comparative Study on Machinability and Surface Integrity of γ-TiAl Alloy in Laser Assisted Milling[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33:3743-3755.

[80] MIN C S, YOUNG H M. Coupled Electromagnetic and Thermal Analysis of Induction Heating for the Forging of Marine Crankshafts[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 98:98-109.

[81] AMIN A N, HOSSAIN M I, PATWARI A U. Enhancement of Machinability of Inconel 718 in End Milling through Online Induction Heating of Workpiece[J]. Advanced Materials Research, 2011, 415/417:420-423.

[82] GINTA T L, NURUL AMIN A K M. Thermally-assisted End Milling of Titanium Alloy Ti-6Al-4V Using Induction Heating[J]. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 2013, 14:194.

[83] KIM J H, KIM E J, LEE C M. A Study on the Heat Affected Zone and Machining Characteristics of Difficult-to-cut Materials in Laser and Induction Assisted Machining[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57:499-508.

[84] CHOI Y H, LEE C M. A Study on the Machining Characteristics of AISI 1045 Steel and Inconel 718 with Circular Cone Shape in Induction Assisted Machining[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34:463-476.

[85] HA J H, LEE C M. A Study on the Thermal Effect by Multi Heat Sources and Machining Characteristics of Laser and Induction Assisted Milling[J]. Materials, 2019, 12:1032.

(编辑 王艳丽)

作者简介:范 滔,男,1996 年生,博士研究生。研究方向为多能场辅助加工 γ-TiAl 合金。E-mail:ft@mail.nwpu.edu.cn。姚倡锋*(通信作者),男,1975 年生,教授、博士研究生导师。研究方向为航空发动机关键零部件表面完整性控制及抗疲劳制造。E-mail:chfyao@nwpu.edu.cn。

本文引用格式:
范滔,姚倡锋,谭靓,等. γ-TiAl 合金的加工特性及能场辅助技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2025, 36(4):636-654.
FAN Tao, YAO Changfeng, TAN Liang, et al. Research Progresses for Machining Characteristics and Field-assisted Techniques of γ-TiAl Alloys[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(4):636-654.