

引文格式: 王科昌, 易鹏, 朱焯均, 等. 镍基高温合金 K4125 磨削性能与参数优化研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(7): 81-87.

WANG Kechang, YI Peng, ZHU Yejun, et al. Grinding performance and parameter optimization of nickel-based superalloy K4125[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(7): 81-87.

镍基高温合金K4125磨削性能与参数优化研究

王科昌¹, 易鹏^{1,2}, 朱焯均³, 丁文锋²

(1. 中国航发南方工业有限公司, 株洲 412002;

2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

3. 南京农业大学工学院, 南京 210031)

[摘要] 镍基高温合金 K4125 是燃气涡轮导向叶片的主要材料。通过理解 K4125 的磨削加工性, 可以优化磨削工艺参数, 改善材料去除效率。对比了 K4125 与 GH4169 的材料性能差异, 开展了磨削试验, 通过对比分析磨削力、磨削温度、磨削比能以及表面粗糙度等参数, 综合分析了材料磨削性能差异。结果表明 K4125 的磨削力均大于 GH4169 的磨削力。磨削 K4125 合金时, 磨削温度保持在 400℃ 以上, 而 GH4169 合金的磨削温度则在 200℃ 以下。K4125 已加工表面的涂抹、磨屑粘黏以及沟槽现象均比 GH4169 严重。该现象导致 K4125 的磨削表面粗糙度远大于 GH4169。因此, K4125 的磨削加工性差于 GH4169。磨削 K4125 的推荐参数为砂轮线速度 $v_s=25\sim 30\text{m/s}$, 工件进给速度 $v_w=500\sim 1000\text{mm/min}$, 磨削深度 $a_p=0.01\sim 0.02\text{mm}$ 。

关键词: 镍基高温合金; 磨削力; 磨削温度; 表面粗糙度; K4125; 比磨削能

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2021.07.081



王科昌

高级工程师, 主要从事航空发动机叶片精密制造技术及表面强化技术研究, 承担多项航发集团及公司科研攻关项目。

近年来, 镍基高温合金等难加工材料已经广泛应用于航空发动机中。这些材料优异的性能对机械加工提出了更高的挑战, 逐渐成为研究热点^[1]。K4125 镍基高温合金常用于制造涡轮导向叶片, 具有高温强度高、稳定性好、能够在超过 800℃ 高温条件下持久工作的优势。但是, 这些优异的材料特性也使得 K4125 成为典型的难加工材料, 机械加工比较困难^[2]。高效磨削加工技术自 20 世纪 80 年代发展以来, 已逐渐应用于镍基高温合金等难加工材料的高效加工。在保证材料表面质量的基础上, 极大地提高了材料的去除率, 可以达到“以

磨代切”的加工效果, 适用于 K4125 导向叶片的加工^[3]。

目前, 高效磨削加工研究主要集中在以 GH4169 和 Ti-6Al-4V 为代表的难加工材料中。Xi 等^[4]对比研究了 GH4169、Ti2AlNb、Ti-6Al-4V 等高温合金的磨削性能, 结果表明磨削 GH4169 的磨削力和磨削比要高于磨削 Ti2AlNb、Ti-6Al-4V, 同时, 磨削后 GH4169 的表面质量也差于 Ti2AlNb、Ti-6Al-4V 的表面质量。Tian 等^[5]通过两次单磨粒划伤试验, 研究了磨削速度对 GH4169 材料去除机理的影响, 并提出了尺寸效应和速度效应。Dai 等^[6]使用有限元方

法研究了单颗磨粒磨削 GH4169 材料切削的形成机理,结果表明磨削速度对于切削形成有重要影响。

K4125 作为近年来开发的新型镍基高温合金,具有自身独特的材料特性。然而,目前该材料的磨削加工特性研究鲜有报道,限制了 K4125 磨削加工效率的进一步提高。因此,有必要探究 K4125 材料在高效磨削加工中的磨削性能,为进一步提高材料加工效率提供理论依据。

本研究开展了棕刚玉砂轮磨削 K4125 的研究工作,探讨了砂轮线速度、工件进给速度以及磨削深度对磨削力、磨削温度、比磨削能以及表面粗糙度的影响,并与典型镍基高温合金 GH4169 进行对比研究,研究材料性能对磨削加工性的影响规律,以期优化磨削参数提供理论依据。

试验材料与设备

1 镍基高温合金材料特性分析

镍基高温合金是用于制备燃气涡轮导向叶片的重要材料。在本试验中,对镍基高温合金 K4125 开展磨削试验研究,并与常用的镍基高温合金 GH4169 进行对比,揭示 K4125 的磨削性能。GH4169 和 K4125 力学性能如下:两者测试温度均为 650℃;GH4169 的抗拉强度为 900MPa, K4125 为 830MPa;GH4169 的断面收缩率 $\geq 6.0\%$, K4125 为 8.0%。K4125 与 GH4169 的化学成分组成如表 1 所示^[2,7]。

决定镍基高温合金性能的是金相组织特征,关键的强化作用来自于有序面心立方金属间化合物相

γ' -Ni₃(Al, Ti)。变形镍基高温合金随温度升高到 600~800℃,常会出现强度巅峰,这是由相 γ' 的特性决定,相 γ' 体积分数超过 45% 难以锻造成型,强度也受限制。因而 GH4169 常应用中温即 600~800℃。在中温(650℃)条件下 K4125 与 GH4169 具有相似的力学性能。因为 K4125 合金中 Cr 元素含量少,所以在中温下 K4125 的塑性略低于 GH4169。然而在 K4125 中 Al、Ti 元素含量更多,增大了 γ' 相体积分,降低了 Cr 元素,增加了 Co、W、Hf、Re 等元素含量,提高了 γ' 相溶解温度,使得固溶强化效果更明显,材料的抗蠕变性能、高温下抗冲击性和稳定性更好。此外,高温作用下,材料晶界是薄弱环节,而 K4125 相较于 GH4169 晶界更少,且 C 元素和 B、Zr、W、Ta 等元素含量更多,形成的碳化物强化晶界的效果更明显,使得 K4125 合金在高温下强度更高,稳定性更好,能够在超过 800℃ 高温条件下持久工作。K4125 材料优异的性能也对加工工艺提出了更高的要求。

2 镍基高温合金磨削试验装置

为对比 GH4169 和 K4125 两种镍基高温合金的磨削性能,本研究开展了缓进深切磨削试验研究,如图 1(a) 所示。磨削试验采用高速平面磨床 Blohm Format MT-408。该磨床主轴转速可达 8000r/min,最大输出功率为 45kW,采用针状喷嘴和水基乳化液(5%)进行冷却,冷却液流量与喷嘴出口压力分别最高可达 90L/min 与 1.5MPa,可为磨削试验提供良好的冷却条件。采用棕

刚玉砂轮(F13A80FF22V35M)开展磨削试验研究,砂轮气孔率为 23%,磨粒直径为 160~200 μ m,砂轮硬度为 F。采用逆磨方式开展试验研究,并在每次磨削前采用单点金刚石修整器对砂圆周进行修整,修整参数如下:砂轮修整速度 v_d 为 20m/s,进给速度 f_d 为 200mm/min,磨削深度 a_p 为 0.01mm,总修整量 h 为 0.5mm。

磨削力与磨削温度可以反映磨削参数对材料加工性能的影响,是评价材料磨削性能的重要技术指标。在本研究中,使用 Kistler 公司生产的压电测力仪(Kistler 9272)和电荷放大器(Kistler 5018A)测量工件磨削中的磨削力信号,并导入专用软件(Dynoware)进行处理,获取磨削中的法向和切向磨削力 F_n 、 F_t 。为测量磨削弧区温度,探明磨削参数对磨削温度的影响规律,本研究采用半人工热电偶法进行测量^[8]。如图 1(b) 所示^[8],将康铜丝放置于两块尺寸相同的工件之间,康铜丝的一端与工件待磨削面相连,另一端则与工件一起分别连接至数据采集卡。当砂轮磨削工件表面磨粒在去除工件材料时,也会对康铜丝进行切削。由于康铜丝具有延展性,该材料会与工件相连,形成热电偶的热端,而数据采集卡则形成热电偶的冷端。磨削弧区的热端在磨削高温的作用下,与冷端形成电势差,该数值与热端温度、热电偶材料相关。因此,通过分析测量的温度信号,即可得到磨削弧区的温度。需注意的是,康铜丝与工件之间需放置云母片,避免热电偶短路,影响温度信号的测量。

表1 GH4169与K4125化学成分(质量分数)对比

Table 1 Chemical composition (mass fraction) of GH4169 and K4125

%

材料	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	B
K4125	0.09~0.13	8.7~9.1	9.5~10.5	6.6~7.4	1.6~2.4	4.6~5.0	2.3~2.7	0.01~0.02
GH4169	≤ 0.08	17.0~21.0	≤ 1.0	—	2.80~3.30	0.30~0.70	0.75~1.15	≤ 0.006
材料	Zr	Ta	Hf	Nb	Mn	Si	Ni	Fe
K4125	0.03~0.07	3.6~4.0	1.4~1.7	—	—	—	其他	—
GH4169	—	—	—	4.75~5.50	≤ 0.35	≤ 0.35	50.0~55.0	其他

K4125-康铜以及GH4169-康铜为非标准热电偶,为获取热电势 U 与磨削弧区温度的关系模型,本研究对这两组热电偶开展了标定试验,并获得了 0°C 条件下对应的热电势-温度模型,如式(1)所示。

$$\begin{cases} T_k = -0.016U^2 + 7.98U - 13.36 \\ \quad (\text{K4125-康铜热电偶}) \\ T_g = -0.0666U^2 + 20U + 12.78 \\ \quad (\text{GH4169-康铜热电偶}) \end{cases} \quad (1)$$

本研究的磨削参数如下:砂轮线速度 v_s 为 $15\sim 30\text{m/s}$,工件进给速度 v_w 为 $480\sim 1800\text{mm/min}$,磨削深度 a_p 为 $0.01\sim 0.1\text{mm}$,磨削宽度 b 为 5mm 。为进一步探明材料磨削性能差异,本研究使用 Load Controls PPC-3 型功率仪对主轴模型功率进行了测量。此外,本研究使用 MarSurf PSI 型粗糙度仪测量工件已加工表面粗糙度,每组参数均测量 3 次,并取平均值,并使用 JEOL EB-019 型扫描电镜对已加工表面微观形貌进行观察,探究磨削参数对工件已加工表面的影响。

结果与讨论

1 GH4169与K4125磨削力对比研究

磨削力是由磨粒与工件材料相互接触过程中发生的摩擦力、弹塑性

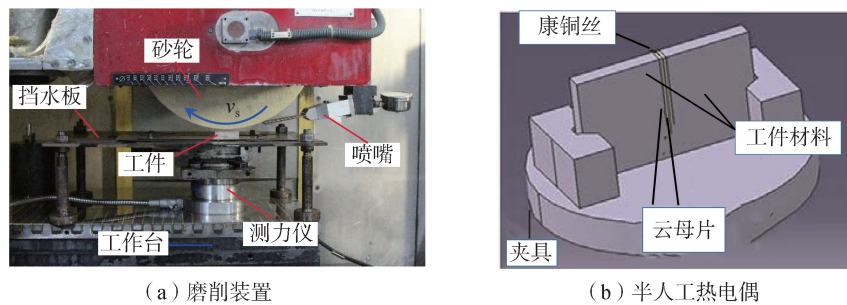
变形抗力等工作作用形成的,是评价工件材料磨削性能的重要参量。磨削力的大小与磨削热的高低息息相关,从而影响磨削温度以及工件表面完整性。对磨削力的充分研究有助于更好地理解工件材料的加工性能。

图 2 显示了不同工件进给速度 v_w 和磨削深度 a_p 对切向磨削力 F_t 和法向磨削力 F_n 的影响。显然, F_t 与 F_n 均随 v_w 和 a_p 的增大而增大。当 v_w 由 480mm/min 增至 1200mm/min 时, GH4169 的法向磨削力 F_n 基本稳定在 $39\sim 45\text{N}$ 之间,变化较小,而 K4125 的法向磨削力 F_n 则先由 60N 缓慢降至 55.8N 后,迅速增至 71.7N 。当磨削深度 a_p 由 0.01mm 增至 0.1mm 时, GH4169 的法向磨削力 F_n 由 7.5N 增至 40.7N ,而 K4125 的法向磨削力 F_n 从 23.7N 增至 119N 。

此外,当磨削深度 $a_p > 0.05\text{mm}$ 时, GH4169 的法向磨削力 F_n 逐渐保持平稳,而 K4125 的法向磨削力 F_n 则持续增大。

磨削力比是指法向磨削力 F_n 与切向磨削力 F_t 的比值,可以反映砂轮磨粒的磨损程度,该数值越小,则砂轮越锋利。从图 2 可以看出, GH4169 的磨削力比普遍小于 K4125,即在磨削 K4125 时,砂轮更易磨钝,使用寿命较短,需要对砂轮进行频繁的修整。

砂轮线速度 v_s 对 GH4169 与 K4125 的切向磨削力 F_t 、法向磨削力 F_n 的影响如图 3 (a) 所示。显然,砂轮线速度 v_s 增大时,磨削力总体呈下降趋势。当 v_s 由 15m/s 增至 25m/s 后, GH4169 的法向磨削力 F_n 由 46N 降至 36N ;与之相比, K4125 的法向磨



(a) 磨削装置

(b) 半人工热电偶

图1 镍基高温合金磨削试验装置

Fig.1 Grinding experimental setup of nickel based superalloy

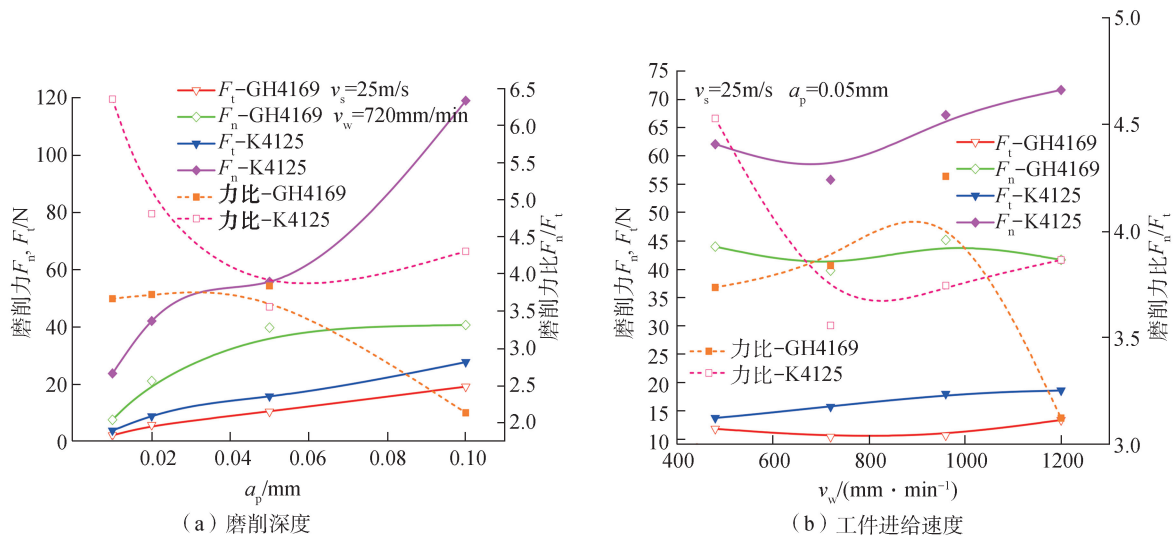


图2 磨削深度与工件进给速度对磨削力的影响

Fig. 2 Effects of grinding depth and feeding speed on grinding force

削力 F_n 在 55.8~70N 范围内波动变化,而切向磨削力 F_t 则随砂轮线速度地增大而降低。定速比磨削是指砂轮线速度 v_s 与工件进给速度 v_w 比值为定值的磨削方式。此时,单颗磨粒切厚 $a_{g,max}$ 可以认为是定值。如图 3 (b)所示,当砂轮线速度 v_s 增大时,GH4169 与 K4125 的磨削力均出现了降低的现象。分析表明,随着砂轮线速度的提高,GH4169 和 K4125 的磨削力减小,主要原因在于单颗磨粒切厚的减小导致砂轮的载荷减小,所以磨削力降低。当砂轮线速度与工件进给速度的比值恒定时,磨削过程的单颗磨粒切厚保持恒定。研究结果表明,随着磨削速度的提升,磨削力下降,主要原因在于随着磨削速度的提升,工件表面热软化效应提高,工件表面强度降低,使得磨削力减小。

由图 2 和图 3 可知,K4125 的磨削力均显著大于 GH4169 的磨削力,最大差值可达 68.4%。磨削力比也高于 GH4169。因此,磨削 K4125 材料时需要频繁对砂轮进行修整。此外,在磨削 K4125 时,磨削力随磨削速度增加而呈现下降趋势,磨削力随磨削深度急剧增大,随进给速度缓慢增加,因此应选用较大的磨削速度 v_s 为 25~30m/s,较小的磨削深度 a_p 为 0.01~0.02mm。为保证材料去除

率,可以适当增大工件进给速度 v_w 为 500~1000mm/min。

2 GH4169与K4125磨削温度对比研究

镍基高温合金在磨削中会产生大量的热量,而这部分热量主要通过工件、砂轮以及冷却液进行疏散,其中,工件传输的热量占绝大部分。然而,由于镍基高温合金导热率较低,热量极易聚集在工件磨削表面,引发烧伤现象,对工件表面造成热冲击,从而带来较大的热应力,产生微裂纹等缺陷,表面质量难以满足使用要求。因此,工件磨削表面的温度研究对于改善工件表面质量具有重要意义。

图 4 (a)显示了砂轮线速度对工件表面磨削温度的影响。当砂轮线速度 v_s 为 15m/s 时,GH4169 与 K4125 的磨削温度均在 400℃ 以上,相差仅为 38℃。但是,当砂轮线速度 v_s 继续增大至 30m/s 后,K4125 的磨削温度由 424℃ 缓慢升至 549℃,始终高于 400℃;而 GH4169 的磨削温度则从 460℃ 快速下降至 53℃。图 4 (b)显示了工件进给速度对工件表面磨削温度的影响。当工件进给速度增大时,GH4169 的磨削温度首先由 46℃ 缓慢升至 59℃,随后急剧升至 558℃;而 K4125 的磨削温度则几乎不受工件进给速度的影响,维

持在 500℃ 左右。磨削深度对工件表面磨削温度的影响如图 4 (c)所示。随着磨削深度的增大,K4125 和 GH4169 的磨削温度均出现了快速升高的现象。其中,GH4169 的磨削温度由 20℃ 升至 672℃,而 K4125 的磨削温度则由 20℃ 升至 647℃。

3 GH4169与K4125比磨削能对比研究

比磨削能是指磨削加工中,去除单位体积的材料所消耗的能量,是评价材料磨削加工性的重要指标,如式 (2)所示。

$$e_s = \frac{P}{bv_w a_p} = \frac{F_t \cdot v_s}{bv_w a_p} \quad (2)$$

式中, P 为磨削功率,该参数通过测量主轴功率的变化得到; b 为磨削宽度。

图 5 (a)显示了砂轮线速度对比磨削能的影响。可知,GH4169 与 K4125 的比磨削能均随砂轮线速度地增加而逐渐增大。当砂轮线速度 v_s 由 15m/s 增至 30m/s 时,GH4169 的比磨削能由 85.3J/mm³ 增至 124.6J/mm³;而 K4125 的比磨削能由 110.7J/mm³ 增至 143J/mm³。如图 5 (b)所示,两种材料的比磨削能随工件进给速度的增大而逐渐减小。单颗磨粒切厚对比磨削能的影响如图 5 (c)所示。

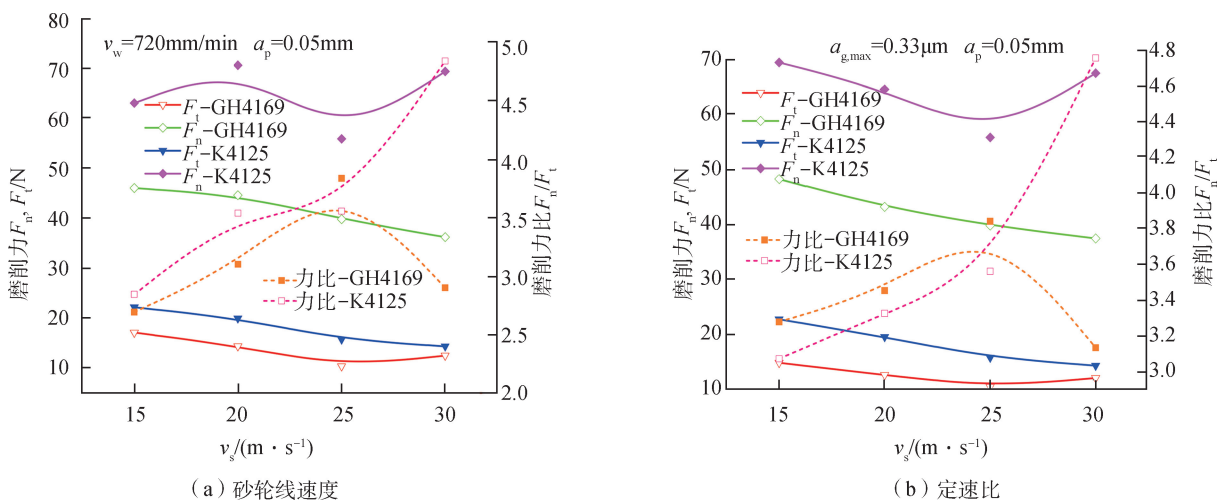


图3 砂轮线速度对磨削力的影响
Fig.3 Effect of grinding wheel speed on grinding force

单颗磨粒切厚越小,比磨削能越大,这是因为较小的单颗磨粒切厚更易引起划擦、耕犁现象,用于材料去除的能量比例逐渐降低。通过拟合方法得到比磨削能与单颗磨粒切厚之间的经验公式,如式(3)所示。

$$\begin{cases} e_s = 12.9386 a_{g,\max}^{-1.792} & (\text{GH4169}) \\ e_s = 26.105 a_{g,\max}^{-1.792} & (\text{K4125}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, GH4169 的相关系数为 0.985, 而 K4125 的拟合系数为 0.983, 这是因为磨粒与工件的相互作用过程主要分为划擦、耕犁和切削 3 个阶段。当单颗磨粒切厚较小时, 主要发生划擦和耕犁现象, 工件材料仅仅发生弹塑性变形, 而未被有效去除。弹塑性变形做功增加, 从而造成比磨削能增大。而当单颗磨粒切厚增大后, 材料切削过程逐渐占主导作用, 比磨削能也逐渐减小。此外, 可以发现 K4125 的比磨削能均高于 GH4169 的比磨

削能, 这显示了 K4125 更差的磨削加工性。

4 GH4169与K4125表面形貌与粗糙度对比研究

图 6 对比了 GH4169 与 K4125 的典型磨削表面形貌。可以观察到两种材料均存在因工件材料侧流导致的涂抹现象, 未断裂的磨屑粘黏在已加工表面, 并形成较深的划痕沟槽。然而, 两种材料仍然存在较大的差异。其中, GH4169 的已加工表面主要由细小的磨痕构成, 沟槽深度较小, 涂抹以及磨屑粘黏现象较少; 而 K4125 的已加工表面则存在更多的沟槽和磨屑粘黏现象, 表面质量更差。这是因为 K4125 材料黏性大, 并与刚玉磨粒存在亲和性, 易附着在砂轮表面的磨粒上^[9]。在磨削过程的高温高压作用下, 形成了硬质层包裹在磨粒切削刃上, 在增加磨粒切削刃宽度的同时, 也增大了磨粒与工件

的摩擦, 使得磨削表面恶化, 如图 7 所示。

磨削参数对工件磨削表面粗糙度的影响如图 8 所示。当砂轮线速度增大时, 磨屑逐渐变薄, 磨削弧区温度逐渐升高。此时, GH4169 的塑性逐渐增加, 导致砂轮的材料去除能力降低, 磨粒切削后两侧的隆起逐渐增多, 表面粗糙度逐渐增大。而 K4125 具有更优异的高温强度, 当砂轮磨削时, 磨粒两侧的材料塑性流动有限, 同时由于切削变薄, 因此, 残留的材料进一步减少, 表面粗糙度得到改善。随着工件进给速度增大, K4125 的表面粗糙度 R_a 由 $0.61\mu\text{m}$ 缓慢升至 $0.63\mu\text{m}$, 几乎保持不变。而 GH4169 的表面粗糙度 R_a 则从 $0.27\mu\text{m}$ 迅速增大至 $0.41\mu\text{m}$ 。图 8(c) 显示了磨削深度对工件表面粗糙度的影响, 可知, 当磨削深度增大时, GH4169 与 K4125 的表面粗糙度数

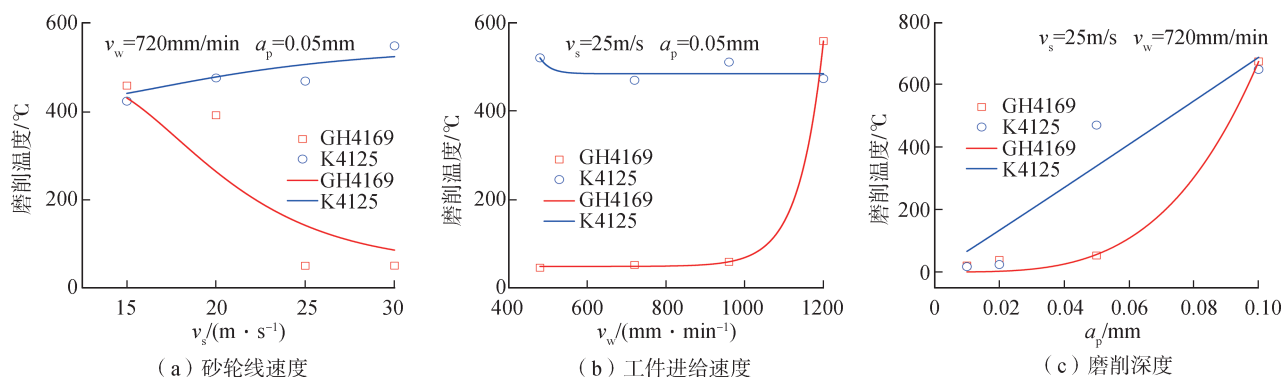


图4 磨削参数对磨削温度的影响

Fig. 4 Effects of grinding parameters on grinding temperature

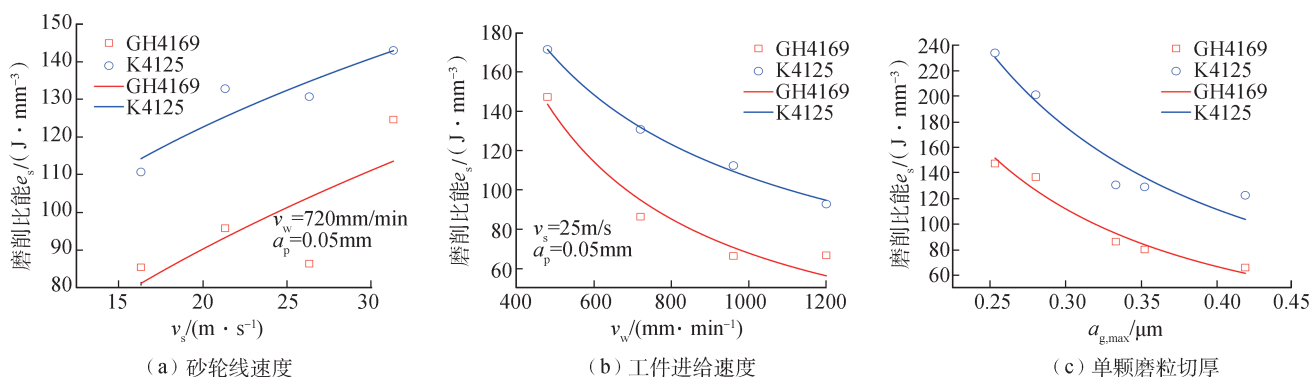
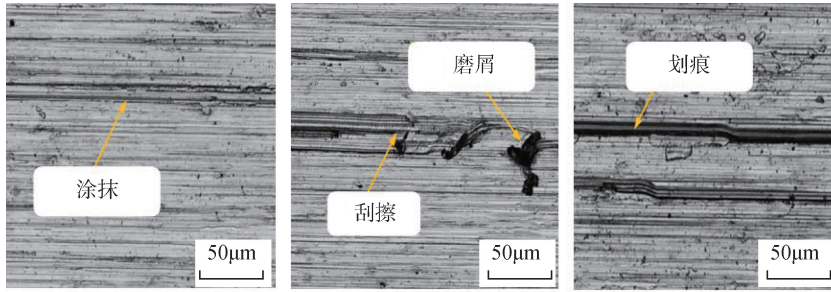
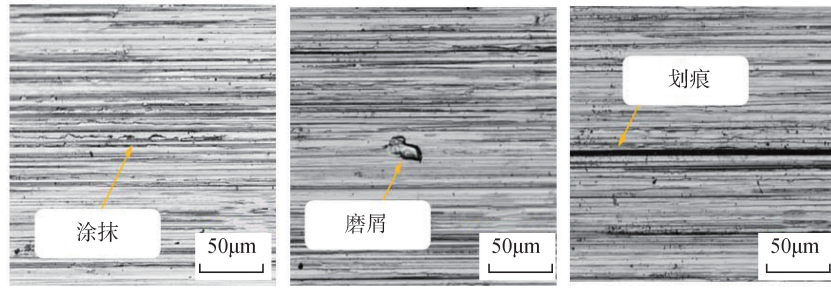


图5 磨削参数对比磨削能的影响

Fig. 5 Effects of grinding parameters on specific energy



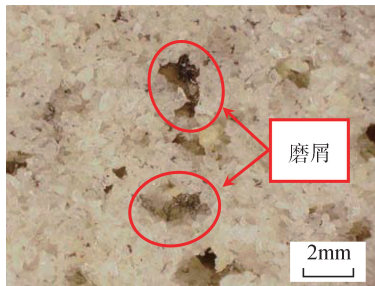
(a) K4125



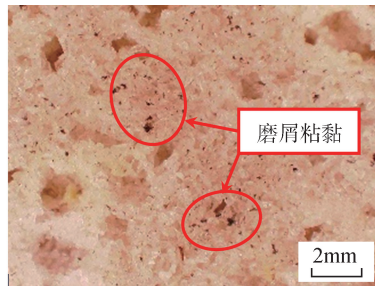
(b) GH4169

图6 GH4169与K4125磨削表面形貌对比

Fig.6 Comparison of ground surface morphology between GH4169 and K4125



(a) GH4169砂轮磨损形貌



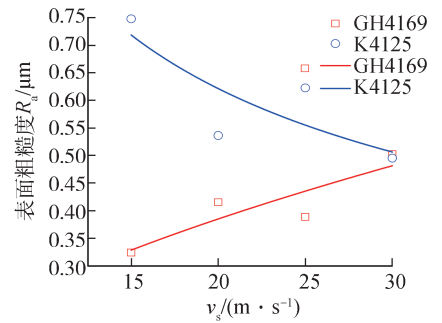
(b) K4125砂轮磨损形貌

图7 GH4169与K4125磨削砂轮磨损形貌对比

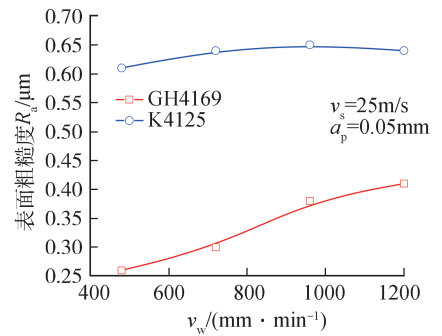
Fig.7 Comparison of grinding wheel wear morphology between GH4169 and K4125

值均出现了大幅增加的现象。这是由于工件进给速度与磨削深度的增大均提高了单颗磨粒切厚。在砂轮线速度较低而磨削深度较大的条件下, K4125的表面粗糙度数值远大于GH4169。进给速度的改变对表面粗糙度数值影响较小, 而砂轮线速度对表面粗糙度数值影响较大。在相同参数下, K4125的磨削加工表面质量不及GH4169, 更难加工出较好的工件表面。因此, 可以选择较高的砂轮线速度 v_s (25~30m/s), 较小的磨削深度 a_p (0.01~0.03mm), 为了保证材料去除率可以增加进给速度。

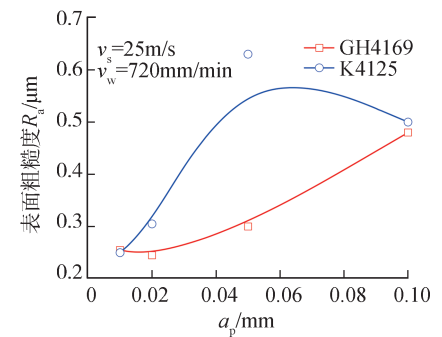
通过上述分析可知, K4125的磨削力和磨削温度均大于GH4169, 而加工表面的粗糙度也远不如GH4169。这是因为K4125导热率低于GH4169, 导致相同磨削条件下磨削弧区产生的热量难以通过工件材料传出去, 从而在弧区聚集, 并引起烧伤, 而从工件表面的显微形貌图6可知, K4125工件表面存在更多的刮擦和耕犁现象, 这表明砂轮在磨削K4125时更易磨钝, 砂轮的材料去除能力急剧下降。尽管K4125的高温强度低于GH4169, 但砂轮磨削性能的恶化使得该材料较GH4169更难被



(a) 砂轮线速度



(b) 工件进给速度



(c) 磨削深度

图8 磨削参数对磨削表面粗糙度的影响

Fig.8 Effects of grinding parameters on surface roughness

去除, 磨削力和磨削温度因而更高。

结论

本研究主要对K4125和GH4169高温合金的磨削加工性进行比较, 首先从材料本质上进行研究, 然后搭建磨削试验平台, 最后从磨削力、比磨削能、磨削温度、表面粗糙度等方面研究了磨削K4125和GH4169的差别。主要得到以下结论:

(1) 磨削过程中, K4125的磨削力均大于GH4169的磨削力, 且最大相差68.4%。K4125的比磨削能变化范围为120~240J/mm³, 而GH4169

的比磨削能则为 50~140J/mm³, K4125 合金的比磨削能均大于 GH4169 合金的比磨削能,且最大高出 45.4%。磨削 K4125 合金时,磨削温度大部分保持在 400℃以上,而对于 GH4169 合金,磨削温度大部分在 200℃以下。此外磨削 K4125 时砂轮磨损更加严重,寿命更短。因此 K4125 的磨削加工性差于 GH4169。

(2) 磨削 K4125 的已加工表面涂抹、磨屑粘黏和沟槽比 GH4169 严重, K4125 的磨削表面粗糙度远大于 GH4169 的磨削表面粗糙度,磨削 K4125 更难获得较好的表面质量。

(3) 使用棕刚玉砂轮磨削 K4125 合金时推荐的磨削参数为:磨削速度 $v_s=25\sim 30\text{m/s}$,进给速度 $v_w=500\sim 1000\text{mm/min}$,磨削深度 $a_p=0.01\sim 0.02\text{mm}$ 。

参考文献

[1] KLOCKE F, SOO S L, KARPUSCH-EWSKI B, et al. Abrasive machining of advanced

aerospace alloys and composites[J]. CIRP Annals -Manufacturing Technology, 2015, 64(2): 581-604.

[2] QIAN N, DING W F, ZHU Y J. Comparative investigation on grindability of K4125 and Inconel 718 nickel-based superalloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(5-8): 1649-1661.

[3] 徐九华, 张志伟, 傅玉灿. 镍基高温合金高效成型磨削的研究进展与展望[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 351-360.

XU Jiuhua, ZHANG Zhiwei, FU Yucan. Review and prospect on high efficiency profile grinding of nickel-based superalloys[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2): 351-360.

[4] XI X X, DING W F, FU Y C, et al. Grindability evaluation and tool wear during grinding of Ti2AlNb intermetallics[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94: 1441-1450.

[5] TIAN L, FU Y, XU J, et al. The influence of speed on material removal mechanism in high speed grinding with single grit[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015(89): 192-201

[6] DAI J B, DING W F, ZHANG L C, et al. Understanding the effects of grinding speed and undeformed chip thickness on the

chip formation in high-speed grinding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(5-8): 995-1005.

[7] RAHMAN M, SEAH W K H, TEO T T. The machinability of inconel 718[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997(63): 199-204.

[8] ZHAO B, DING W F, XU J H, et al. Comparative study on cutting behavior of vitrified cubic boron nitride wheel and electroplated cubic boron nitride wheel in high-speed grinding of (TiCp+TiBw)/Ti-6Al-4V composites[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2016(230): 428-438.

[9] 朱焯均, 丁文锋, 陈珍珍, 等. 基于阶梯分层磨削试验方法的棕刚玉砂轮磨损演变研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2019, 39(5): 79-84.

ZHU Yejun, DING Wenfeng, CHEN Zhenzhen, et al. Wear evolution of brown alumina abrasive wheel based on step grinding method[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2019, 39(5): 79-84.

通讯作者: 丁文锋, 教授、博士生导师, 研究方向为航空航天难加工材料高效高性能磨削技术, E-mail: dingwf2000@vip.163.com.

Grinding Performance and Parameter Optimization of Nickel-Based Superalloy K4125

WANG Kechang¹, YI Peng^{1,2}, ZHU Yejun³, DING Wenfeng²

(1. AECC South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412002, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

[ABSTRACT] The guide blade is mainly composed of nickel-based superalloy K4125, which is a typical difficult-to-cut material. The understanding of grinding performance of K4125 can help to optimize the grinding process parameters and improve the material removal efficiency. In this article, the material property difference between K4125 and GH4169 is discussed firstly. Then, the grinding experiments are carried out. The grinding performances are compared on the basis of grinding force, grinding temperature, specific energy and surface roughness. The results show that the grinding force of K4125 is always higher than that of GH4169. The grinding temperature of K4125 is over 400℃, while the grinding temperature of GH4169 is lower than 200℃. Nevertheless, the phenomena of coating and redeposited chip on the ground surface of K4125 are more serious than that of GH4169. The size of the striation on the ground surface of K4125 is larger and the surface roughness of K4125 is larger. The grindability of K4125 is poorer than that of GH4169. The optimal grinding parameters is selected as follows: grinding wheel speed $v_s=25\sim 30\text{m/s}$, infeed speed $v_w=500\sim 1000\text{mm/min}$, grinding depth $a_p=0.01\sim 0.02\text{mm}$.

Keywords: Nickel-based superalloy; Grinding force; Grinding temperature; Surface roughness; K4125; Specific energy

(责编 古索)