

镍基高温合金磨削表面工艺性能试验研究

蔡明, 巩亚东, 冯耀利, 刘瑶佳
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为了探究镍基高温合金的磨削表面工艺性能,采用单因素试验的方法,分别进行镍基高温合金单晶 DD5 和多晶 GH4169 的平面槽磨削试验,得到砂轮线速度、磨削深度和进给速度对其表面质量的影响规律,并对磨削亚表面微观组织和磨屑形貌进行观察.结果表明:随着砂轮线速度的增大,表面粗糙度 R_a 不断减小;随着磨削深度和进给速度的增大,表面粗糙度 R_a 不断增大.在相同工艺参数下,多晶 GH4169 更容易加工,可磨削性能更好.随着砂轮线速度的增大,磨削亚表面出现塑性变形层且塑性变形作用减弱.磨屑主要有锯齿状和崩碎状等,其中锯齿状磨屑居多.

关 键 词: 镍基高温合金;磨削;表面;单因素试验;亚表面;磨屑
中图分类号: TH 161 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)02-0234-05

Experimental Study on Grinding Surface Processing Property of Nickel-Based Superalloy

CAI Ming, GONG Ya-dong, FENG Yao-li, LIU Yao-jia
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: GONG Ya-dong, E-mail: gongyd@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Plane slot grinding single factor experiments of nickel-based single crystal superalloy DD5 and polycrystalline superalloy GH4169 were conducted in order to explore the grinding surface processing property of nickel-based superalloy. The influence of grinding wheel linear speed, grinding depth and feed rate on grinding surface quality was concluded. The grinding subsurface microstructure and grinding debris morphology were observed. The results show that: with the increase of grinding wheel linear speed, the grinding surface roughness R_a decreases; with the increase of grinding depth and feed rate, the grinding surface roughness R_a increases. With the same process parameters, the GH4169 is easier to machine and has better grinding performance than the DD5. With the increase of grinding wheel linear speed, a plastic deformation layer appears on the grinding subsurface and plastic deformation action is weakened gradually. The grinding debris mainly presents the serrated and crumbled features, and the serrated debris is dominant.

Key words: nickel-based superalloy; grinding; surface; single factor experiment; subsurface; grinding debris

磨削加工被公认为是能够产生最好的表面质量和最小的尺寸误差的主要机械加工方法之一,一般作为机械加工的最后一道工序,用于生成零件的最终工作表面.镍基高温合金广泛应用于航空、航天和国防等领域的耐高温部件中;但镍基高温合金属于典型的难加工材料,可磨削性能差,其磨削表面质量直接影响其使用性能.本文通过试验对镍基高温合金中单晶 DD5 材料和多晶 GH4169 材料的磨削表面质量进行研究.单晶材料结晶取向一致,因此其位错较少,杂质原子等微观缺陷也相对较少,机械性能较好,与其他晶体材料相比具有良好的拉伸、剪切强度和延展性^[1].

国内外的研究机构和学者对镍基高温合金的磨削加工工艺开展了一定的研究,但针对镍基高温合金单晶材料和多晶材料的磨削加工工艺的对比研究还鲜有报道.文献[2-4]分别对镍基高温合金微磨削表面质量、磨削表面完整性和表面变质层软化机理进行试验研究.文献[5-11]分别对镍基高温合金磨削加工工艺进行试验研究.

鉴于镍基高温合金磨削表面质量直接影响其使用性能,本文对镍基高温合金单晶 DD5 材料和多晶 GH4169 材料磨削表面质量进行对比试验研究.首先利用单因素试验的方法分别对镍基高温合金单晶 DD5 和多晶 GH4169 进行磨削加工,分析砂轮线速度 v_s 、磨削深度 a_p 、进给速度 v_f 对其磨削表面质量的影响规律;然后对磨削后的单晶 DD5 亚表面微观组织进行观察和分析;最后对单晶 DD5 和多晶 GH4169 磨屑形貌进行观察和分析.

1 镍基高温合金磨削单因素试验

1.1 试验条件

试验采用 2M9120 多用磨床对镍基高温合金单晶 DD5 材料和多晶 GH4169 材料进行磨削加工;采用 CA20 低速走丝线切割机床切割亚表面试样;采用 VHX-1000E 超景深显微镜、Micromesure 三维轮廓仪、LEXT OLS4100 共聚焦显微镜,以及 Ultra Plus 场发射扫描电镜对磨削加工后的表面性能进行检测;采用直径为 180 mm 的 CBN 砂轮,其粒度为 180#,砂轮宽度为 5 mm,砂轮厚度为 5 mm,结合剂为树脂,浓度为 100%;试验材料为镍基高温合金单晶 DD5 和多晶 GH4169,其中单晶 DD5 材料沿 001 晶向生长,磨削方向沿 001 晶面 100 晶向.

1.2 试验方案

试验采用单因素平面槽磨削的方法,分别探究砂轮线速度 v_s 、磨削深度 a_p 和进给速度 v_f 三个因素对镍基高温合金单晶 DD5 材料和多晶 GH4169 材料磨削表面工艺性能的影响规律.试验方案如表 1 所示.

1.3 试验结果及分析

本文试验材料镍基高温合金单晶 DD5 和多晶 GH4169 的金相组织分别如图 1a 和图 1b 所示.镍基高温合金单晶 DD5 的金相组织为“十”字枝晶结构,整个材料只有一个晶粒,没有晶界,使得其具有优异的高温力学性能;而多晶 GH4169 的金相组织由多个晶粒组成,具有晶界,

使得其具有良好的高温力学性能.

表 1 镍基高温合金平面磨削单因素试验方案设计
Table 1 Scheme of plane grinding single factor experiments of nickel-based superalloy

试验	v_s	a_p	v_f	R_a (DD5)	R_a (GH4169)
	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	μm	$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	μm	μm
1	15	60	0.6	0.983	0.821
2	20	60	0.6	0.927	0.803
3	25	20	0.6	0.826	0.721
4	25	40	0.6	0.865	0.735
5	25	60	0.6	0.896	0.749
6	25	80	0.6	0.923	0.833
7	25	100	0.6	0.955	0.859
8	25	60	0.2	0.853	0.722
9	25	60	0.4	0.879	0.738
10	25	60	0.8	0.926	0.797
11	25	60	1.0	0.986	0.803
12	30	60	0.6	0.861	0.726
13	35	60	0.6	0.809	0.715

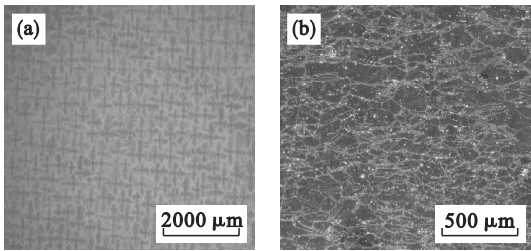


图 1 镍基高温合金的金相组织

Fig. 1 Microstructure of nickel-based superalloy

(a)—单晶 DD5 金相组织;(b)—多晶 GH4169 金相组织.

根据表 1 中的试验方案对镍基高温合金单晶 DD5 材料和多晶 GH4169 材料进行平面槽磨削单因素试验.通过共聚焦显微镜对每组试验中工件的表面粗糙度 R_a 测量 5 次并取平均值,平均值如表 1 所示;通过超景深显微镜观察其磨削加工后的表面形貌;通过三维轮廓仪获得其磨削加工后的表面三维轮廓.根据试验结果,分别绘制出两种材料试验中砂轮线速度、磨削深度和进给速度三个因素对 R_a 的影响规律如图 2 所示,并分析 R_a 变化的原因.

从图 2a 中可以看出,随着砂轮线速度的不断增大,单晶 DD5 和多晶 GH4169 的表面粗糙度 R_a 都不断减小.单晶 DD5 的 R_a 从 0.983 μm 下降到 0.809 μm ,多晶 GH4169 的 R_a 从 0.821 μm 下降到 0.715 μm .分析其原因:随着砂轮线速度的不断提高,单位时间内参与磨削过程的磨粒数增加,使得单颗磨粒未变形切屑厚度减少,工件表面的塑性变形作用减弱, R_a 减小.在实际磨削加工过

程中,可通过适当提高砂轮线速度,以获得更好的表面质量. 镍基高温合金单晶 DD5 和多晶 GH4169 不同砂轮线速度下的磨削表面形貌以及表面三维轮廓如图 3 所示. 单晶 DD5 的 R_a 总体

上高于多晶 GH4169,表明两种材料在相同磨削工艺参数下,多晶 GH4169 的表面质量更好且更容易加工,可磨削性能更好.

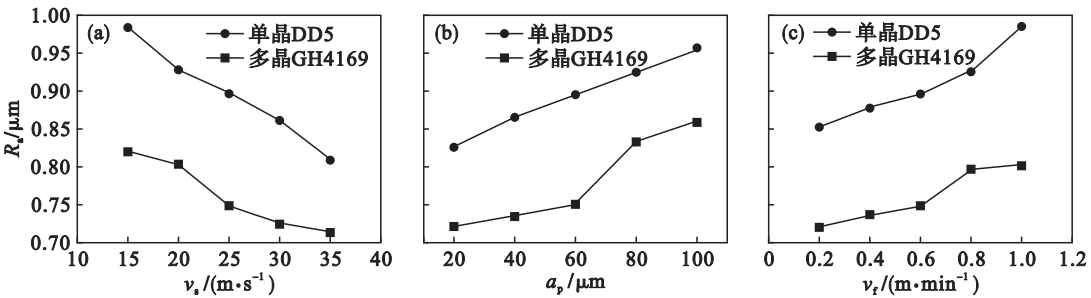


图2 各因素对磨削表面粗糙度的影响
Fig. 2 Influence of each factor on grinding surface roughness

(a)—砂轮线速度的影响; (b)—磨削深度的影响; (c)—进给速度的影响.

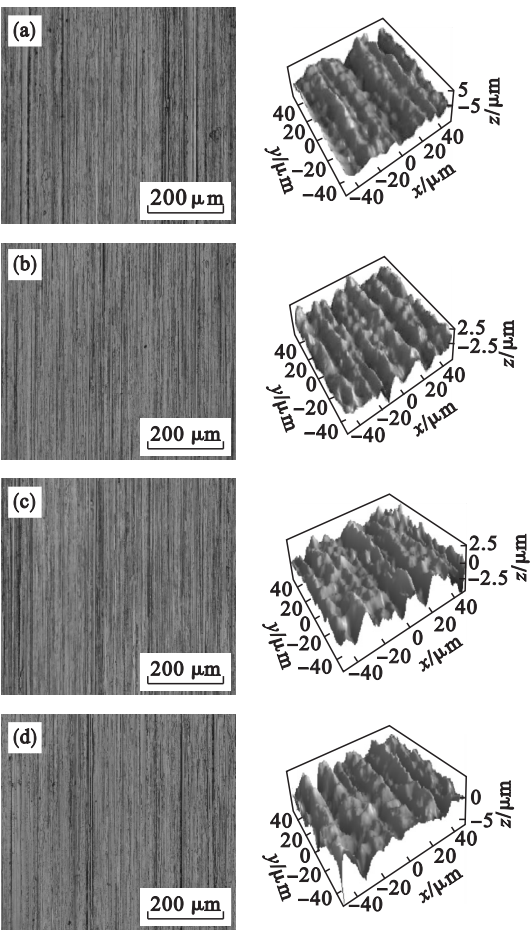


图3 镍基高温合金不同砂轮线速度下的磨削表面形貌
Fig. 3 Surface morphology of nickel-based superalloy with different grinding wheel linear speeds

(a)—DD5, 15 m/s; (b)—DD5, 35 m/s;
(c)—GH4169, 15 m/s; (d)—GH4169, 35 m/s.

从图 2b 中可以看出,随着磨削深度的不断增加,单晶 DD5 和多晶 GH4169 的表面粗糙度 R_a 都不断增大. 分析其原因:随着磨削深度的不断增

加,单颗磨粒未变形切屑厚度增大,工件表面的塑性变形作用增强,磨削力增大且磨削温度升高,导致砂轮排屑困难,使得磨削表面质量变差.

从图 2c 中可以看出,随着进给速度的不断增大,单晶 DD5 和多晶 GH4169 的表面粗糙度 R_a 都不断增大. 分析其原因:随着进给速度的不断增大,磨削效率不断提高,但磨削力也会显著增大,导致砂轮排屑困难,随着磨屑的堆积,磨屑黏附在砂轮的磨粒上,造成砂轮堵塞,影响被加工材料的去除,磨削表面质量变差.

2 单晶 DD5 磨削亚表面微观组织

采用 CA20 低速走丝线切割机床将已加工好的单晶 DD5 单因素试验磨削试件切割成 13 个长度为 6 mm、宽度为 1 mm 的亚表面试样,在镶样机上进行镶样后,分别使用砂纸和抛光机对亚表面试样进行打磨和抛光,最后对亚表面试样进行腐蚀处理. 腐蚀液成分为甘油、氢氟酸、硝酸,比例为 4:2:1,腐蚀时间为 32 s. 采用 Ultra Plus 场发射扫描电镜对单晶 DD5 磨削加工后的亚表面微观组织进行观察和分析.

镍基单晶高温合金由基体 γ 相和沉淀相 γ' 相组成, γ' 相均匀地镶嵌在基体 γ 相中,其体积分数约为 70%. 单晶 DD5 磨削加工后不同砂轮线速度下的磨削亚表面微观组织如图 4 所示.

从图 4 中可以看出,当砂轮线速度为 15 m/s 时,磨削亚表面出现了约 3 μm 的塑性变形层,当砂轮线速度为 35 m/s 时,磨削亚表面出现了约 2 μm 的塑性变形层,塑性变形作用减弱. 在塑性变形层内, γ 相和 γ' 相扭曲在一起,这是由于磨削

加工过程产生的磨屑与材料表面分离时,材料表面随着磨屑和砂轮产生严重的塑性流动,导致未被去除的材料表面塑性变形严重, γ 相和 γ' 相发生较严重的扭曲.在磨削亚表面中,出现了由于塑性变形而产生的滑移带,这是由于单晶体中不同晶面和不同晶向的原子排布不均匀,当其受力过大而发生塑性变形时,就会导致层与层之间发生位错,一般位错会沿着密排面和密排方向发生.磨削产生的应力使得磨削亚表面内的材料超过自身的弹性极限,使得层片之间发生位移,累积下来就形成了宏观的塑性变形.

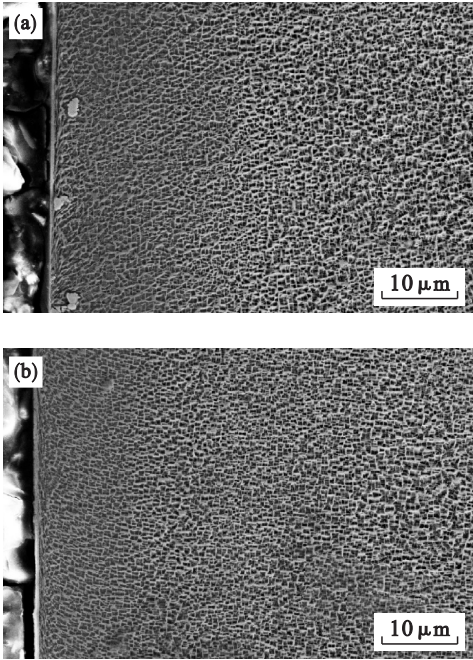


图 4 单晶 DD5 不同砂轮线速度下的磨削亚表面微观组织

Fig. 4 Subsurface microstructure of single crystal superalloy DD5 with different grinding wheel linear speeds

(a)—线速度为 15 m/s; (b)—线速度为 35 m/s.

单晶 DD5 磨削加工后的亚表面微观组织如图 5a 所示.亚表面析出 γ/γ' 共晶相,经分析该共晶相为 Ni - Al 相,如图 5b 所示.

3 镍基高温合金磨屑形貌

磨削加工中产生的磨屑可以有效地反映磨削加工机理和材料塑性变形情况.试验中收集磨削加工过程中所产生的磨屑,并在 Ultra Plus 场发射扫描电镜下观察其形貌,如图 6 所示.

从图 6 中可以看出,镍基高温合金单晶 DD5 和多晶 GH4169 磨削加工过程产生的磨屑主要有

锯齿状磨屑和崩碎状磨屑,其中锯齿状磨屑居多.磨屑表面由接触表面和自由表面组成,其中接触表面光滑平整,而自由表面不连续且表现出一节一节的锯齿状特征.这表明在磨削过程中,金属材料由于受到高速运动的磨粒作用而发生剧烈的剪切滑移变形,而剪切滑移变形主要集中在节与节之间很窄的区域,节块内部的塑性变形则很小,因而形成一节一节的锯齿状特征.

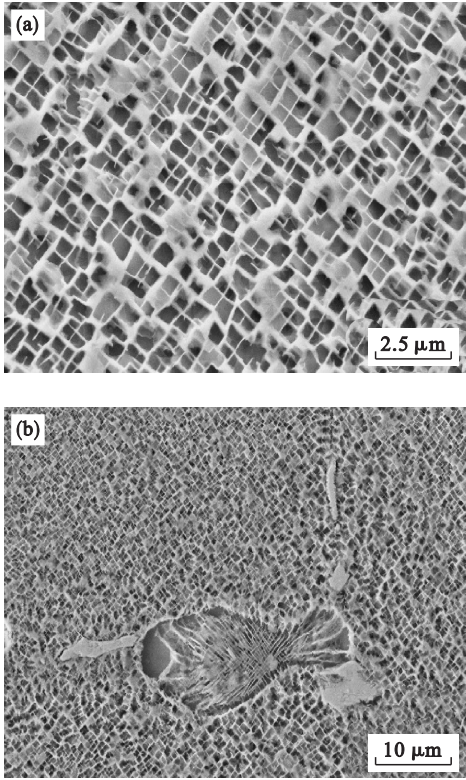


图 5 单晶 DD5 磨削亚表面微观组织

Fig. 5 Subsurface microstructure of single crystal superalloy DD5

(a)— γ 相和 γ' 相; (b)—析出共晶相.

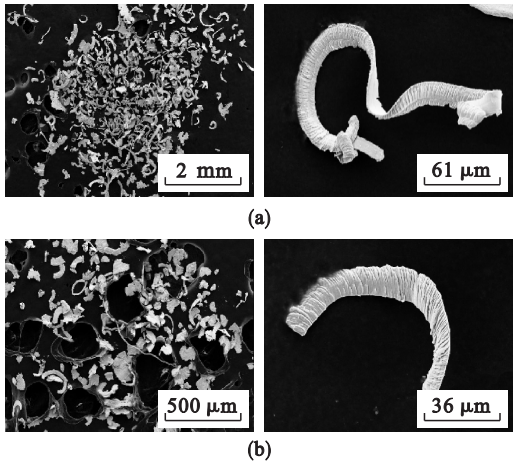


图 6 镍基高温合金磨屑形貌

Fig. 6 Grinding debris morphology of nickel-based superalloy

(a)—单晶 DD5 磨屑形貌; (b)—多晶 GH4169 磨屑形貌.

4 结 论

1) 通过镍基高温合金单晶 DD5 和多晶 GH4169 两种材料平面槽磨削单因素试验,得到:两种材料随着砂轮线速度的增大,表面粗糙度 R_a 不断减小;随着磨削深度和进给速度的增大,表面粗糙度 R_a 不断增大.

2) 通过上述两种材料相同工艺参数下平面槽磨削单因素试验,得到:镍基高温合金多晶 GH4169 的表面粗糙度 R_a 整体上低于单晶 DD5 的,即多晶 GH4169 更容易加工,可磨削性能更好.

3) 通过对单晶 DD5 磨削亚表面微观组织的观察,得到:随着砂轮线速度的增大,磨削亚表面出现塑性变形层且塑性变形作用减弱.

4) 通过对镍基高温合金单晶 DD5 和多晶 GH4169 磨屑形貌的观察,得到:磨屑主要有锯齿状磨屑和崩碎状磨屑,其中锯齿状磨屑居多,自由表面不连续且表现出一节一节的锯齿状特征.

参考文献:

[1] 蔡明,巩亚东,于宁,等. 单晶 DD98 微尺度铣削表面质量试验研究[J]. 中国机械工程,2017,28(11):1261-1265.
(Cai Ming, Gong Ya-dong, Yu Ning, et al. Experimental study on surface quality of single crystal DD98 in micro-milling processes[J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28(11):1261-1265.)
[2] 周云光,巩亚东,温雪龙,等. 高温合金 K445 微磨削表面质量实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2016,37(2):218-221.
(Zhou Yun-guang, Gong Ya-dong, Wen Xue-long, et al. Experimental study on surface quality in micro-grinding of superalloy K445 [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2016, 37(2):218-221.)
[3] 黄新春,张定华,姚倡锋,等. 镍基高温合金 GH4169 磨削

参数对表面完整性影响[J]. 航空动力学报,2013,28(3):621-628.
(Huang Xin-chun, Zhang Ding-hua, Yao Chang-feng, et al. Effects of grinding parameters on surface integrity of GH4169 nickel-based superalloy [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(3):621-628.)
[4] 杜随更,姜哲,张定华,等. GH4169DA 磨削表面变质层软化机理[J]. 航空学报,2014,35(5):1446-1451.
(Du Sui-geng, Jiang Zhe, Zhang Ding-hua, et al. Softening mechanism of grinding surface metamorphic layer of GH4169DA [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(5):1446-1451.)
[5] Zhou Y G, Gong Y D, Cai M, et al. Study on surface quality and subsurface recrystallization of nickel-based single-crystal superalloy in micro-grinding [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90 (6): 1749-1768.
[6] Gong Y D, Zhou Y G, Wen X L, et al. Experimental study on micro-grinding force and subsurface microstructure of nickel-based single crystal superalloy in micro grinding[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31 (7):3397-3410.
[7] Aspinwall D K, Soo S L, Curtis D T, et al. Profiled superabrasive grinding wheels for the machining of a nickel based superalloy [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2007, 56(1):335-338.
[8] Yao C F, Jin Q C, Huang X C, et al. Research on surface integrity of grinding Inconel 718[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 65 (7): 1019-1030.
[9] Zhao Z C, Fu Y C, Xu J H, et al. An investigation on high-efficiency profile grinding of directional solidified nickel-based superalloys DZ125 with electroplated CBN wheel[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(1):1-11.
[10] Jin D, Liu Z Q, Yi W, et al. Influence of cutting speed on surface integrity for powder metallurgy nickel-based superalloy FGH95 [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 56(6):553-559.
[11] Chen Z Z, Xu J H, Ding W F, et al. Grinding temperature during high-efficiency grinding Inconel 718 using porous CBN wheel with multilayer defined grain distribution[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 77(1):165-172.