

引文格式: 杨忠学, 张帅奇, 王赛, 等. IC10 定向凝固高温合金缓进磨削工艺参数优化研究 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(8): 98–106.
 YANG Zhongxue, ZHANG Shuaiqi, WANG Sai, et al. Parameter optimization of creep feed grinding for IC10 directionally solidified superalloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(8): 98–106.

IC10 定向凝固高温合金缓进磨削工艺参数优化研究*

杨忠学¹, 张帅奇¹, 王赛¹, 王帅¹, 张长春¹, 熊一峰^{2,3}, 蒋睿嵩⁴, 张强¹

- (1. 北京航空材料研究院先进高温结构材料国防科技重点实验室, 北京 100095;
 2. 西北工业大学机电学院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;
 3. 西北工业大学机电学院航空发动机先进制造技术教育部工程研究中心, 西安 710072
 4. 四川大学, 成都 610065)

[摘要] 通过设计正交试验, 研究了 IC10 高温合金在缓进磨削过程中磨削工艺参数及表面粗糙度对疲劳寿命的影响规律, 建立了工艺参数对磨削表面粗糙度及疲劳寿命影响的映射关系模型, 并以表面粗糙度、疲劳寿命、材料去除率为优化目标进行了 IC10 高温合金缓进磨削工艺参数多目标优化。研究表明, IC10 高温合金磨削工件疲劳寿命随砂轮线速度的增加而增加, 随工件进给速度和磨削深度的增加而减小, 且疲劳寿命随砂轮线速度的变化最为敏感, 工件进给速度次之, 对磨削深度的变化敏感度最低。当表面粗糙度 R_a 由 $0.44\mu\text{m}$ 增大到 $0.94\mu\text{m}$ 时, 磨削工件疲劳寿命由 9.69×10^6 降低到 1.25×10^6 , 减小了约 87.1%, 这表明磨削表面粗糙度对磨削疲劳寿命的影响非常显著。在综合考虑磨削表面粗糙度、疲劳寿命、材料去除率的情况下, 通过多目标优化得到 IC10 高温合金缓进磨削工艺参数为: 砂轮线速度 $v_s=20\text{m/s}$, 工件进给速度 $v_w=117\text{mm/min}$, 磨削深度 $a_p=0.48\text{mm}$ 。

关键词: IC10 高温合金; 磨削工艺参数; 多目标优化; 疲劳寿命; 缓进磨削

Parameter Optimization of Creep Feed Grinding for IC10 Directionally Solidified Superalloy

YANG Zhongxue¹, ZHANG Shuaiqi¹, WANG Sai¹, WANG Shuai¹, ZHANG Changchun¹,
 XIONG Yifeng^{2,3}, JIANG Ruisong⁴, ZHANG Qiang¹

- (1. National Key Laboratory of Advanced High Temperature Structural Materials,
 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;
 2. Key Laboratory of High Performance Manufacturing for Aero Engine, Ministry of Industry and Information Technology,
 School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
 3. Engineering Research Center of Advanced Manufacturing Technology for Aero Engine, Ministry of Education,
 School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
 4. Sichuan University, Chengdu 610065, China)

[ABSTRACT] Orthogonal experiments were designed to research the effects of grinding parameters and surface roughness on the fatigue life of IC10 superalloy during creep feed grinding. Based on experimental results, empirical models of grinding parameters and surface roughness, fatigue life were established. Then multi-objective optimization of grinding parameters was carried out for smaller surface roughness, longer fatigue life and higher machining efficiency. The results show that the fatigue life increases with increasing grinding wheel speed while it decreases with increasing workpiece feed speed or grinding depth. The wheel speed has the highest influence on the fatigue life, followed by workpiece feed speed and grinding depth. As surface roughness R_a increased from $0.44\mu\text{m}$ to $0.94\mu\text{m}$, the fatigue life decreased about 87.1% from 9.69×10^6 to 1.25×10^6 , indicating that the grinding surface roughness has a significant influence

* 基金项目: 中国航发自主创新专项基金(CXPT-2020-014)。

on fatigue life. By optimization of grinding parameters, a group of suitable grinding parameters could be given as: wheel speed $v_s=20\text{m/s}$, the workpiece feed speed $v_w=117\text{mm/min}$, and the grinding depth $a_p=0.48\text{mm}$, with taking full account of the fatigue life, machining efficiency and surface roughness.

Keywords: IC10 superalloy; Grinding parameters; Multi-objective optimization; Fatigue life; Creep feed grinding

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.08.098

缓进磨削作为一种高效成型磨削方法,已经广泛应用于航空发动机涡轮叶片及各种难加工材料的高效率、高精度磨削加工。已有研究表明,在适中的砂轮线速度、低工件进给速度、较低的磨削深度下可获得较好的磨削表面质量和较高的疲劳寿命;然而,与此同时也会导致磨削材料去除率的降低,使得加工效率下降。因此,为实现缓进给磨削高效高质量加工,除了控制磨削表面质量外,还需综合考虑零件加工效率、服役性能等指标。

为改善磨削加工表面质量、提高涡轮叶片加工效率及服役性能,国内外学者对高温合金磨削加工进行了大量研究。Österle 等^[1]采用棕刚玉砂轮研究镍基高温合金 IN738LC 磨削过程中材料去除率对表层组织的影响规律,发现当材料去除率为 $8\text{mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ 时,磨削弧区的温度迅速上升,磨削表面会产生白层。上海交通大学 Chen 等^[2]采用刚玉砂轮对 DZ4 定向凝固高温合金进行磨削加工,研究发现,当磨削温度超过 1100°C 时,工件表面会发生烧伤,其影响深度可达到 0.5mm 。Rabiei 等^[3]采用微量磨削润滑技术,研究了磨削参数对塑性钢 (CK45、S305) 和脆性钢 (HSS、100Cr6) 磨削表面粗糙度的影响规律,建立了磨削表面粗糙度与工艺参数的经验模型,并采用遗传算法对工艺参数进行优化,最终获得了最佳磨削工艺参数组合。Miao 等^[4-5]采用两种砂轮对 3 种镍基合金材料 (变形 GH4169、定向凝固合金 DZ408 和单晶合金 DD6) 分别进行了缓进深切磨削研究,通过对磨削力、磨削温度、表面形貌、砂轮磨损的对比分析,综合评价了镍基单晶合金的磨削加工性能,研究表明,砂轮堵塞严重与磨损剧烈是镍基单晶合金磨削加工困难的主要原因。黄新春等^[6-7]对 GH4169 合金进行了外圆磨削研究,通过对表面粗糙度、表面显微硬度和表面形貌等相关表面完整性主要特征参数进行约束,建立了残余应力及加工效率的磨削参数优化模型,研究表明,当工件进给速度 $v_w=15\text{m/min}$,砂轮线速度 $v_s=25\text{m/s}$,磨削深度 $a_p=0.004\text{mm}$ 时,不仅可以获得较好的表面质量,而且材料去除率提高了 2 倍。

以上研究可以看出,对于不同的材料与磨削方法,磨削性能存在明显的差异。IC10 作为一种新型定向凝固高温合金,其使用温度可达到 1100°C ,在航空领域中

有着广阔的应用前景^[8]。IC10 高温合金已经应用于多个发动机空心导向叶片的研制,然而目前针对 IC10 定向凝固高温合金的研究仍主要集中于材料制备工艺、性能的提升与稳定,在 IC10 定向凝固高温合金机械加工方面,尤其是缓进磨削加工方面的研究却少见报道。为将此性能优异的新型材料应用于国内先进高推重比航空发动机的研制,还需要对 IC10 高温合金磨削特性及工艺参数优化进行研究。

本文针对 IC10 定向凝固高温合金缓进磨削工艺参数优化展开研究,通过正交试验分析研究缓进磨削工艺参数对 IC10 高温合金表面完整性及疲劳寿命的影响规律,建立磨削工艺参数对表面完整性及疲劳寿命影响的映射关系模型,并以低表面粗糙度、高疲劳寿命、高材料去除率为目标,借助遗传算法对工艺参数进行多目标优化,得到 IC10 高温合金最佳磨削工艺参数组合。

1 缓进给磨削试验

1.1 试验材料

IC10 定向凝固高温合金叶片毛坯通常经过固溶及时效处理,本文采用的试验材料制作流程如下。

(1) 金块浇注与热处理。首先,采用定向凝固技术,通过熔炼、浇注制备出合金块试样。试块化学成分见表 1。然后对试块进行固溶及时效处理 (固溶: $1180^\circ\text{C}\times 2\text{h}+1265^\circ\text{C}\times 2\text{h}$,空冷;时效: $1050^\circ\text{C}\times 4\text{h}$)。热处理后其组织主要由呈较规则正形状的 γ' 相组成,如图 1 所示。

(2) 疲劳试样的制作。按图 2 所示尺寸加工出板状疲劳试样,试样厚度为 4.3mm 、 4.4mm 、 4.5mm ,3 种厚度各 12 个。加工完毕后对疲劳试样的各个棱边进行倒圆处理 (倒圆半径 R 为 $0.1\sim 0.2\text{mm}$),尽量保证试样棱边光滑转接,避免棱边处产生过大的应力集中而成为裂纹源。另外,为保证试样与支撑平台可靠接触,保证磨削效果,试样表面平面度不大于 0.02mm ,且试样上下表面平行度不大于 0.02mm 。

1.2 试验设计

为了研究磨削工艺参数对表面完整性及疲劳寿命的影响,设计了板状疲劳试样正交缓进磨削试验,每组

表 1 IC10 高温合金的化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of IC10 superalloy (mass fraction)

C	Co	Cr	Al	W	Mo	Ta	Hf	B	Ni
0.07~0.12	11.5~12.5	6.5~7.5	5.6~6.2	4.7~5.2	1.0~2.0	6.5~7.5	1.0~2.0	0.01~0.02	余量

参数加工 4 件疲劳试样,抽取一件对其表面粗糙度、磨削表面形貌进行测试,另外 3 件进行疲劳寿命测试。为避免疲劳试样厚度对疲劳寿命产生影响,每个疲劳试样制备时须留有对应磨削深度的加工余量,使得疲劳试样磨削后其外形尺寸及厚度完全一致,试样最终厚度均为 4mm。

三因素三水平正交磨削试验在 FSG-B818CNC 缓进磨床上进行,采用不同的磨削参数对试样上下表面进行磨削。磨削工艺参数有 3 个,分别为砂轮线速度 v_s 、工件进给速度 v_w 、磨削深度 a_p 。参数水平表如表 2 所示。为避免加工振动,试样采用磁力平台进行支撑,并设计如图 3 所示的装夹工装对疲劳试样进行固定。

疲劳试验在 QBG-25KN-3 轴向拉压疲劳试验机上进行,如图 4 所示。为保证疲劳寿命测试的准确性,每组磨削工艺参数下制备 3 个疲劳试样,分别对其进行疲劳寿命测试,然后取其均值。

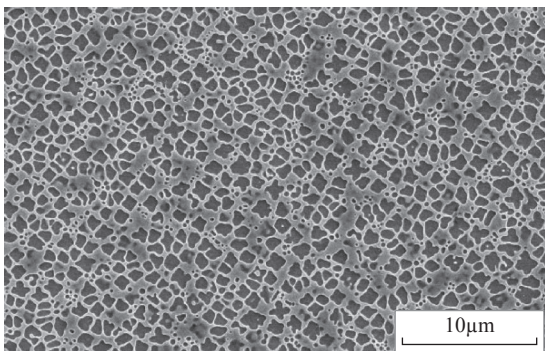


图 1 IC10 热处理后合金微观组织
Fig.1 Microstructure of IC10 after heat treatment

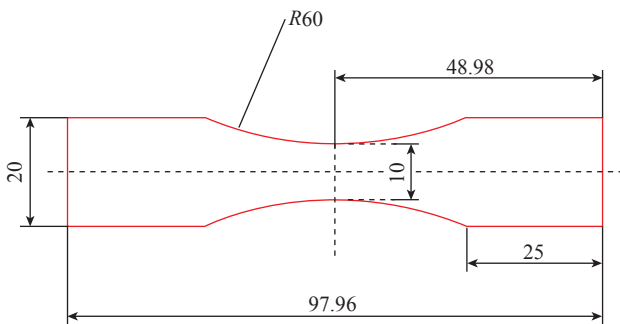


图 2 疲劳试样示意图(mm)
Fig.2 Schematic diagram of the fatigue specimen (mm)

本试验采用粗糙度测试仪、激光共聚焦显微镜、疲劳试验机分别对表面粗糙度、表面形貌和疲劳寿命进行测试,测试方法如下。

(1)粗糙度测试。采用 TR620 粗糙度测试仪对粗糙度进行测量,测量时其测量方向垂直于其磨削纹理方向,对每个试样测量 5 个点,以 5 个点的粗糙度平均值

表 2 磨削参数水平表
Table 2 Grinding parameter level table

水平	工艺参数		
	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	$v_w/(mm \cdot min^{-1})$	a_p/mm
1	10	15	20
2	100	150	200
3	0.3	0.4	0.5

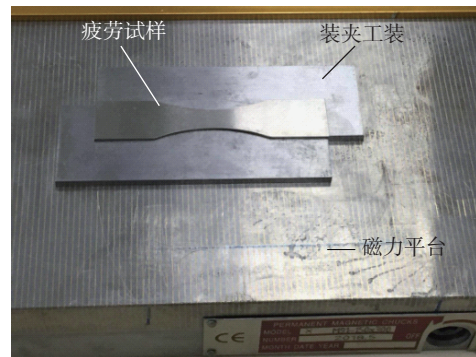


图 3 磁力平台支撑示意图
Fig.3 Schematic diagram of magnetic platform support

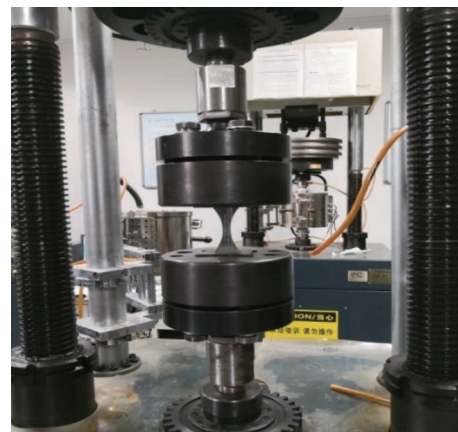


图 4 疲劳试验机
Fig.4 Fatigue testing machine

作为最终测量结果。

(2) 表面形貌测试。采用激光共聚焦显微镜测量试样三维及二维形貌,放大倍数 50 倍,试验前将试样表面进行酒精擦拭处理,然后放置到测试平台上进行对焦测量;测量结束后,观察测量得到的 3D 形貌图,读取所测量的表面粗糙度值、2D 轮廓图、表面纹理等并储存信息。

(3) 疲劳寿命测试。进行拉压疲劳试验的温度为 20℃,试验频率为 115Hz,载荷应力为 300MPa,应力比 R 为 0。对每个正交参数准备 3 个疲劳试样,在相同的条件下进行疲劳寿命测试,最终每组参数以 3 个疲劳试样的平均值作为疲劳寿命最终测试结果。

2 试验结果与分析

2.1 试验测量结果

不同磨削参数下的表面粗糙度 R_a 与疲劳寿命 N_f 测试结果如表 3 所示。

2.2 表面粗糙度对磨削疲劳寿命的影响

采用多元线性回归法对粗糙度与疲劳寿命的规律进行拟合,得到图 5 所示的规律曲线,由曲线建立了 IC10 高温合金磨削疲劳寿命随表面粗糙度变化的经验公式

$$N = 1.4164 \times 10^6 R_a^{-2.3693} \quad (1)$$

由式(1)可以看出,随着表面粗糙度 R_a 的增大,磨削疲劳寿命显著减小。图 6 和 7 分别为采用两组不同工艺参数磨削后的三维形貌及截面轮廓图。图 6 (a) 与图 7 中曲线 1 的磨削工艺参数为 $v_s=20\text{m/s}$, $v_w=100\text{mm/min}$, $a_p=0.5\text{mm}$,可以看出磨削纹路较为规则,表面轮廓峰起伏程度较小,最大轮廓峰高度为 $5.52\mu\text{m}$,其对应的表

面粗糙度 R_a 为 $0.44\mu\text{m}$,疲劳寿命 N_f 为 9.69×10^6 。图 6 (b) 与图 7 中曲线 2 的磨削工艺参数为 $v_s=10\text{m/s}$, $v_w=200\text{mm/min}$, $a_p=0.5\text{mm}$,可以看出磨削表面有明显变形,表面轮廓起伏程度较大,最大轮廓峰高度为 $8.41\mu\text{m}$,其对应的表面粗糙度 R_a 为 $0.94\mu\text{m}$,疲劳寿命为 1.25×10^6 。可以看出,当粗糙度 R_a 由 $0.44\mu\text{m}$ 增大到 $0.94\mu\text{m}$ 时,磨削疲劳寿命由 9.69×10^6 减小到 1.25×10^6 ,减小了约 87.1%。因此,磨削表面粗糙度和磨削表面平整程度对磨削疲劳寿命影响较为显著。

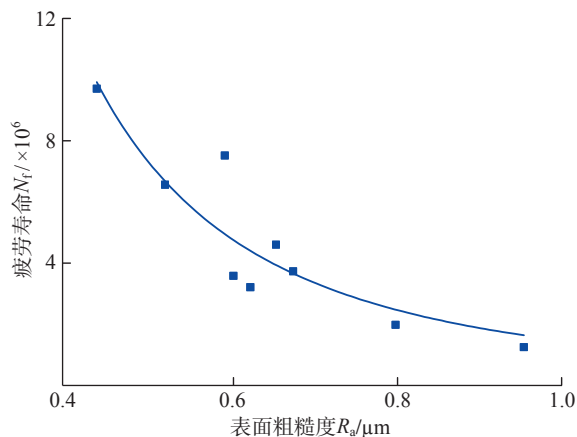


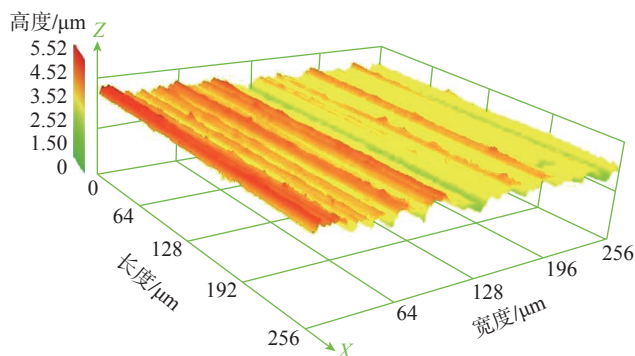
图 5 表面粗糙度对疲劳寿命的影响

Fig.5 Effect of surface roughness on fatigue life

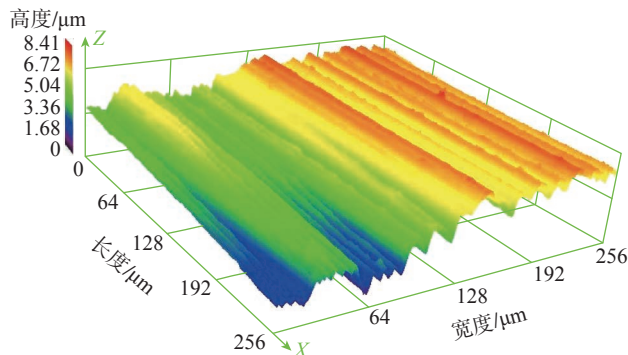
表 3 磨削参数与粗糙度、疲劳寿命正交试验结果

Table 3 Orthogonal test results of grinding parameters with roughness and fatigue life

序号	工艺参数			$R_a/\mu\text{m}$	$N_f/\times 10^6$
	$v_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_w/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	a_p/mm		
1	10	100	0.3	0.67	3.73
2	10	150	0.4	0.79	1.98
3	10	200	0.5	0.94	1.25
4	15	100	0.4	0.52	6.55
5	15	150	0.5	0.60	3.58
6	15	200	0.3	0.62	3.21
7	20	100	0.5	0.44	9.69
8	20	150	0.3	0.59	7.51
9	20	200	0.4	0.65	4.61



(a) $v_s=20\text{m/s}$, $v_w=100\text{mm/min}$, $a_p=0.5\text{mm}$



(b) $v_s=10\text{m/s}$, $v_w=200\text{mm/min}$, $a_p=0.5\text{mm}$

图 6 不同工艺参数下磨削表面三维形貌图

Fig.6 3D topography of grinding surface with different process parameters

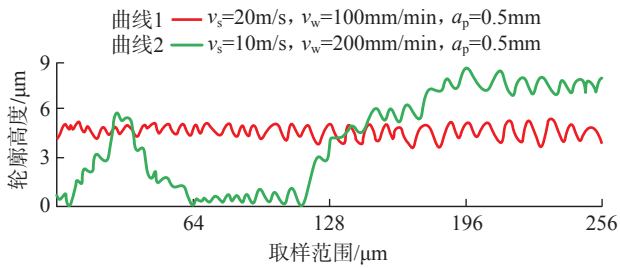


图7 不同工艺参数截面轮廓图

Fig.7 Cross-sectional profile at different process parameters

实质上,磨削表面虽然在宏观上表现为平整/规则,然而从微观来看,磨削表面总存在着高低不平的纹理,这些纹理相当于微小缺口,表面粗糙度越大,缺口越尖锐,越容易造成表面应力集中,从而降低磨削疲劳寿命。

应力集中是指构件由于外界因素或自身因素几何形状、外形尺寸发生突变而引起局部范围内应力显著增大的现象,可用应力集中系数来衡量^[9]。对于拉-拉疲劳试验,应力集中系数的理论计算公式为

$$K_t = 1 + n \sqrt{\gamma \frac{h}{\rho}} \quad (2)$$

式中, h 为表面轮廓微观不平度, μm ; n 为系数,拉-拉疲劳 $n=2$,剪切疲劳 $n=1$; ρ 为粗糙度波谷曲率半径, μm ; γ 为系数。

h 表示微观几何形貌的平均缺口高度,磨削表面纹理中的微观缺口,其 h 值很难准确测量,通常用表面轮廓微观不平度十点高度 R_z 来近似表示。系数 n 与所载荷类型有关,对于剪切载荷 $n=1$,拉伸或弯曲载荷 $n=2$ 。式(2)中,对于常规机加表面轮廓而言,通常取 $\gamma=1$,则式(2)可简化为

$$K_t = 1 + 2 \sqrt{\frac{R_z}{\rho}} \quad (3)$$

由式(3)可知,只需得到 R_z 和表面轮廓波谷处的曲率半径即可计算应力集中系数值。采用粗糙度仪测量 R_z ,结果如表4所示。

如图8所示,进行表面轮廓波谷处曲率半径测量。首先,在三维形貌图沿垂直于磨削表面纹理的方向上取3个位置处的轮廓截面图(每个位置处获取轮廓剖面图的过程如图8(a)所示);其次,在每一轮廓上测量占据主导影响的3个波谷的曲率半径 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 ,图8(b)为3个轮廓波谷处的半径;最后,取平均值得到该轮廓的等效曲率半径 $\rho = (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3) / 3$ 。

应力集中系数测量结果如表5所示,可得出应力集中系数与疲劳寿命的关系。由图9所示,疲劳寿命随着应力集中系数的增加有减小的趋势,即应力集中程度越

大,对疲劳寿命的降低越显著。而应力集中程度的大小和粗糙度的大小有着直接的联系:粗糙度越大,表面起伏程度越大,越容易形成较“尖”的表面纹理微观缺口,而这些微观缺口往往是疲劳裂纹萌生的源头,也是降低疲劳寿命的重要原因。

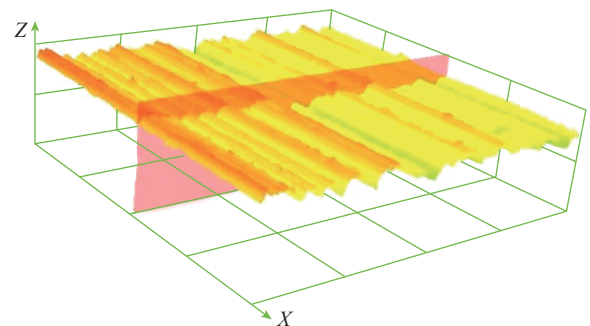
2.3 基于疲劳寿命的磨削工艺参数优化

在适中的砂轮线速度、低的工件进给速度、较低的磨削深度下可以获得较好的表面质量和较高的疲劳寿命。然而,当采用较小的工件速度和低的磨削深度时,会导致磨削加工材料去除率的降低,使得加工效率下降。为此,在上述研究基础上,本文以表面粗糙度、疲劳寿命、材料去除率为优化目标,采用遗传算法对磨削工艺参数进行优化,以达到低表面粗糙度、高疲劳寿命、高材料去除率的目标。

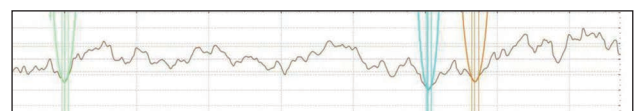
表4 表面轮廓不平度 R_z 测量结果

Table 4 Measurement results of surface contour roughness R_z

序号	工艺参数			$R_z/\mu\text{m}$
	$v_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_w/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	a_p/mm	
1	10	100	0.3	4.31
2	10	150	0.4	5.09
3	10	200	0.5	7.30
4	15	100	0.4	3.29
5	15	150	0.5	4.14
6	15	200	0.3	4.02
7	20	100	0.5	3.19
8	20	150	0.3	4.21
9	20	200	0.4	4.05



(a) 三维形貌剖面示意图



(b) 三维形貌剖切轮廓图

图8 波谷曲率半径测量

Fig.8 Measurement of trough curvature radius

表5 应力集中系数 K_t 测试结果
Table 5 Test results of stress concentration factor K_t

序号	工艺参数			$\rho/\mu\text{m}$	K_t
	$v_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_w/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	a_p/mm		
1	10	100	0.3	16.90	2.01
2	10	150	0.4	10.85	2.37
3	10	200	0.5	8.82	2.82
4	15	100	0.4	41.96	1.56
5	15	150	0.5	25.88	1.80
6	15	200	0.3	21.74	1.86
7	20	100	0.5	15.60	1.32
8	20	150	0.3	28.40	1.77
9	20	200	0.4	17.95	1.95

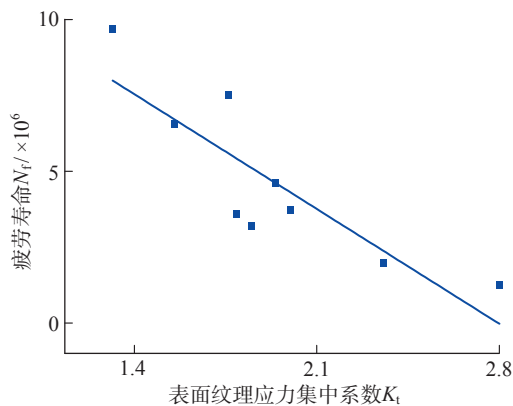


图9 应力集中对疲劳寿命的影响
Fig.9 Effect of stress concentration on fatigue life

首先,建立目标函数,通过目标函数来反映磨削工艺参数与优化目标之间的定量关系,从而对目标进行优化,达到对磨削工艺参数进行控制的目的。本节将以表面粗糙度 R_a 、疲劳寿命 N_f 、材料去除率 Z_w 为目标对磨削工艺参数进行优化,在保证表面粗糙度和疲劳寿命满足要求的前提下,使得材料去除率达到最大。

2.3.1 表面粗糙度模型与疲劳寿命模型

采用指数型函数建立表面粗糙度与疲劳寿命间的映射关系模型为

$$R_a = f(v_s, v_w, a_p) = av_s^b v_w^c a_p^d \quad (4)$$

$$N_f = g(v_s, v_w, a_p) = ev_s^f v_w^g a_p^h \quad (5)$$

基于表5正交试验测试结果,借助多元线性回归法对式(4)和(5)进行求解得到待定系数,最终的粗糙度、疲劳寿命映射关系模型如式(6)和(7)所示:

$$R_a = 0.36v_s^{-0.5607} v_w^{0.4284} a_p^{0.0782} \quad (6)$$

$$N_f = 10^{7.05} v_s^{1.7286} v_w^{-1.2278} a_p^{-0.4751} \quad (7)$$

2.3.2 材料去除率模型

单位时间材料去除率 Z_w 可表示为

$$Z_w = v_w \cdot a_p \cdot B \quad (8)$$

式中, v_w 为工件进给速度; a_p 为磨削深度; B 为砂轮每次磨削的宽度。

本优化试验采用的疲劳试样平均宽度 $B=18\text{mm}$, 因此材料去除率模型可表示为

$$Z_w = 18v_w \cdot a_p \quad (9)$$

2.3.3 约束条件及多目标优化模型建立

已有研究表明,当砂轮线速度 v_s 在 $10\sim 20\text{m/s}$ 之间变化,工件进给速度 v_w 在 $100\sim 200\text{mm/min}$ 之间变化,磨削深度 a_p 在 $0.3\sim 0.5\text{mm}$ 变化时,可以获得较好的表面质量^[10]。因此在保证加工质量的前提下对磨削工艺参数进行优化,可将约束条件定为以下值。砂轮线速度 $10\text{m/s} < v_s < 20\text{m/s}$, 工件进给速度 $100\text{mm/min} < v_w < 200\text{mm/min}$, 磨削深度 $0.3\text{mm} < a_p < 0.5\text{mm}$, 优化变量为 v_s 、 v_w 、 a_p 。

综上所述,多目标优化的模型为

$$\begin{cases} \min f_{R_a} = 0.36v_s^{-0.5607} v_w^{0.4284} a_p^{0.0782} \\ \max f_{N_f} = 10^{7.05} v_s^{1.7286} v_w^{-1.2278} a_p^{-0.4751} \\ \max Z_w = 18v_w a_p \\ 10\text{m/s} < v_s < 20\text{m/s} \\ 100\text{mm/min} < v_w < 200\text{mm/min} \\ 0.3\text{mm} < a_p < 0.5\text{mm} \end{cases} \quad (10)$$

在多目标优化过程中,实际问题中各影响因子对目标的影响程度各有侧重,同时各目标随因子的变化往往具有不同的趋势,为了兼顾到各个目标,就必须建立一个合理的综合评价体系,这样便可以将多目标的优化问题转化为单目标问题,再结合优化算法优选出最优的参数组合。

本研究对 IC10 高温合金进行多目标优化,其试验依据来自于正交试验,将正交试验所得的表面粗糙度、疲劳寿命经验模型以及材料去除率计算模型作为 3 个优化目标的预测模型。然后在约束条件工艺参数范围内采用遗传算法寻找最优解。优化过程中,以 IC10 高温合金缓进磨削过程中 3 个工艺参数(砂轮线速度 v_s 、工件进给速度 v_w 、磨削深度 a_p) 作为变量,以熵权法与线性回归经验模型所建立的加权综合函数为适应度函数,进行优化求解。优化模型相应的数学模型为

$$\begin{cases} y(x) = (y_1(x), y_2(x), y_3(x)) \\ x = [x_1, x_2, x_3] \\ 10\text{m/s} < x_1 < 20\text{m/s} \\ 100\text{mm/min} < x_2 < 200\text{mm/min} \\ 0.3\text{mm} < x_3 < 0.5\text{mm} \end{cases} \quad (11)$$

利用熵权法求解总体目标函数步骤如下。

(1) 指标的归一化处理。如果一个系统有 m 个评价指标、 n 个评价对象, 设其原始数据矩阵为 $\mathbf{X}_{ij} = (x_{ij})_{m \times n}$, 归一化处理后得到的矩阵为 $\mathbf{H}_{ij} = (h_{ij})_{m \times n}$, 对于大者为优的指标而言, 其归一化公式为

$$h_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j \{x_{ij}\}}{\max_j \{x_{ij}\} - \min_j \{x_{ij}\}} \quad (12)$$

对于小者为优的指标而言, 其归一化公式为

$$h_{ij} = \frac{\max_j \{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max_j \{x_{ij}\} - \min_j \{x_{ij}\}} \quad (13)$$

(2) 熵的计算。在一个有 m 个指标、 n 个待评价对象的系统中, 第 i 个指标的熵可以表示为

$$h_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (14)$$

式中, $f_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij}$, $k = 1/\ln n$ 。

(3) 熵权的计算。当第 i 个指标的熵定义后, 就可以根据式(15)定义第 i 个指标的熵权。

$$w_{oi} = \frac{1 - h_i}{m - \sum_{i=1}^m h_i} \quad (0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^m w_i = 1) \quad (15)$$

通过以上 3 个步骤, 就可以求出熵值法下的权重, 但这种权重是完全基于试验数据计算得到的理论权重。实际上, 在生产过程中各个指标在生产者心目中占的比重是不一样的, 所以在理论权重的基础上, 结合生产者给出的主观权重 w_i , 通过几何平均数的方法计算出综合权重, 即

$$W_j = \frac{(W_{sj})^\alpha (W_{oj})^\beta}{\sum_{j=1}^n [(W_{sj})^\alpha (W_{oj})^\beta]} \quad (16)$$

式中, α, β 是客观权重与主观权重在生产者心中所占的比重。

利用式(16)计算权重的步骤进行权重的计算, 计算出的权重为

$$w_j = [0.2178, 0.4185, 0.3637]$$

由以上熵权法得到的权重为客观权重, 在磨削加工过程中疲劳寿命是零件服役性能的重要指标, 应与与重点关注, 其主观权重较大, 另外两个给予较小的权重。取主观权重分别为 $w_s = [0.2, 0.5, 0.3]$ 。主观权重与客观权重的比值相同, 取 $\alpha = \beta = 0.5$ 。最终计算出表面粗糙度、磨削疲劳寿命、材料去除率所占的权重为 $[0.2095, 0.4591, 0.3314]$ 。

利用 Matlab 优化工具箱对目标函数优化时, 由于其算法默认总目标为望小特性, 而本研究中 $y_2(x)$ 和 $y_3(x)$ 分别代表疲劳寿命和材料去除率, 均为望大目标, 因此须对目标函数进行变换。另外, 考虑到疲劳寿命量纲为 10^6 , 其值远大于粗糙度与材料去除率, 为保证优化结果的有效性, 利用归一的方法将各目标的值均变换在 0~1 之间。因此总目标函数可表示为

$$y(x) = w_1 \frac{y_1(x) - y_1(x)_{\min}}{y_1(x)_{\max} - y_1(x)_{\min}} + w_2 \frac{y_2(x)_{\max} - y_2(x)}{y_2(x)_{\max} - y_2(x)_{\min}} + w_3 \frac{y_3(x)_{\max} - y_3(x)}{y_3(x)_{\max} - y_3(x)_{\min}} \quad (17)$$

式中, w_1, w_2, w_3 分别代表表面粗糙度、疲劳寿命和材料去除率所占的权重; $y_i(x)_{\max}, y_i(x)_{\min}$ 分别代表各目标在约束条件下的最大值和最小值。

综上, 总目标函数为

$$y(x) = 0.2095 \times \frac{0.36v_s^{-0.5607} v_w^{0.4284} a_p^{0.0782} - 0.44}{0.4605} + 0.4591 \times \frac{1.24 \times 10^7 - 10^{7.05} v_s^{1.7286} v_w^{-1.2278} a_p^{-0.4751}}{11.05 \times 10^6} + 0.3314 \times \frac{1800 - 18v_w a_p}{1260} \quad (18)$$

2.3.4 磨削工艺参数优化及试验验证

本文利用 Matlab 对目标进行优化过程中, 将砂轮线速度 v_s 、工件进给速度 v_w 、磨削深度 a_p 3 个工艺参数看作一个结构对象, 构成种群的一个因子。种群规模为 50, 交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.05。优化结果及试验验证结果如表 6 所示。可以看出, 虽然试验验证结果与利用遗传算法优化的结果有一定误差, 但是相

表 6 磨削工艺参数优化及试验验证结果

Table 6 Optimization of grinding process parameters and experimental verification results

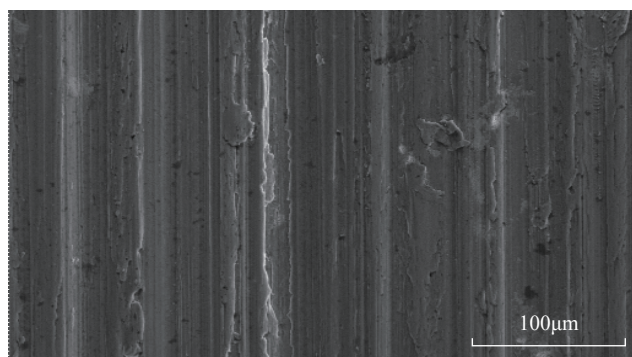
项目	$v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_w / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	a_p / mm	$R_a / \mu\text{m}$	$N_f / \times 10^6$	$Z_w / (\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1})$
经验值	15	150	0.3	0.78	2.23	810
GA 优化	19.893	116.696	0.479	0.48	8.11	1006.153
试验验证	20	117	0.48	0.51	8.15	1010.88

对于经验磨削工艺参数,在优化工艺参数下表面粗糙度 R_a 由 $0.78\mu\text{m}$ 降低到 $0.51\mu\text{m}$,降低了 34.6%;磨削疲劳寿命由 2.23×10^6 增大到 8.15×10^6 ,增加了 265.5%;材料去除率从 $810\text{mm}^3/\text{min}$ 增加到 $1010.88\text{mm}^3/\text{min}$,增加了 24.8%。

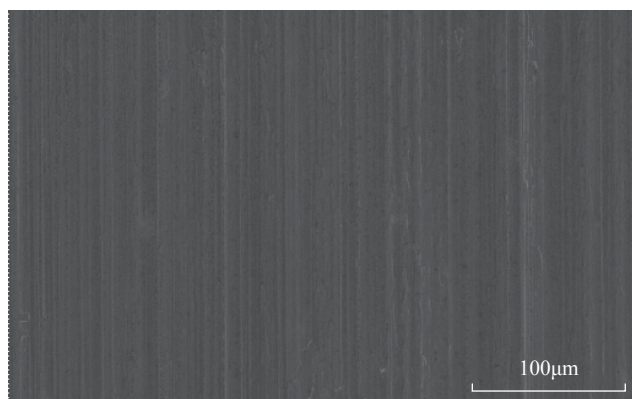
图 10 为经验工艺参数与利用遗传算法优化后参数下的磨削表面形貌图,可以看出优化前磨削表面挤压变形严重,磨粒在工件表面留下的刻划痕迹明显,表面质量较差。而优化后磨削表面纹路清晰且没有明显的挤压变形,磨粒对工件作用减轻,刻划作用不明显,表面质量明显提升。

图 11 为优化前后工件磨削三维形貌的变化。可以看出优化前表面轮廓起伏程度较大,轮廓峰最大高度为 $9.64\mu\text{m}$,表面局部有较深的犁沟,其表面粗糙度为 $0.78\mu\text{m}$ 。而优化后表面起伏程度变小,表面纹路细密紧致,最大波峰高度为 $7.31\mu\text{m}$,表面粗糙度为 $0.51\mu\text{m}$,加工缺陷减少,表面质量明显提升。

综上所述,同经验参数相比,在优化后的参数下,表面粗糙度明显降低,磨削疲劳寿命及材料去除率明显提升,因此本文磨削工艺参数优化是可行的,对 IC10 定向



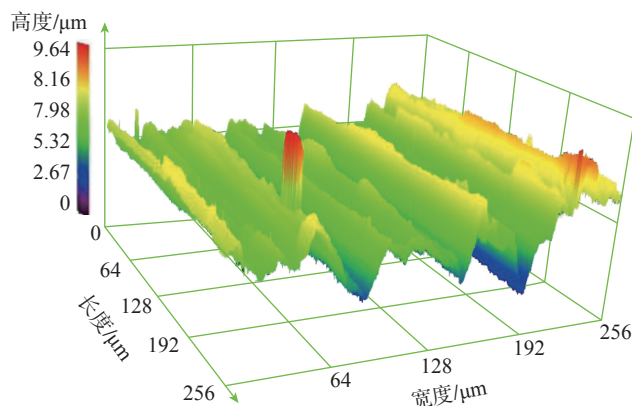
(a) 优化前



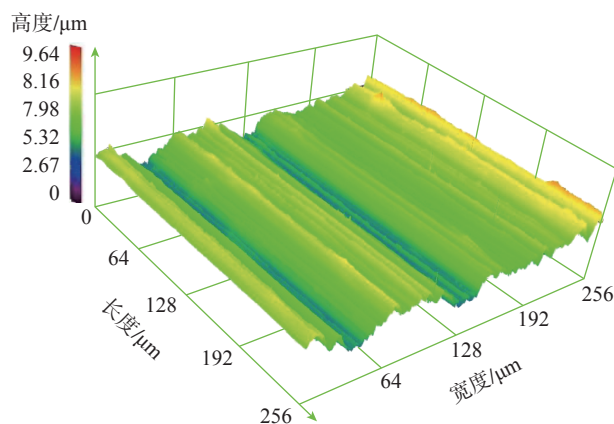
(b) 优化后

图 10 优化前后工件磨削表面形貌

Fig.10 Grinding surface topography before and after optimization



(a) 优化前



(b) 优化后

图 11 优化前后工件磨削三维形貌

Fig.11 3D Grinding surface topography before and after optimization

凝固高温合金缓进给磨削加工表面质量提升有一定的指导作用。

3 结论

通过对 IC10 高温合金缓进磨削工艺参数优化研究可以得出以下结论。

(1) 当表面粗糙度 R_a 由 $0.44\mu\text{m}$ 升高到 $0.94\mu\text{m}$ 时, IC10 合金磨削疲劳寿命 N_f 从 9.69×10^6 降低到 1.25×10^6 ,粗糙度对 IC10 磨削疲劳寿命的影响非常显著。

(2) 通过疲劳寿命经验公式的建立发现, IC10 磨削过程中,磨削疲劳寿命随砂轮线速度的增加而增加,随工件进给速度和磨削深度的增加而减小;疲劳寿命随砂轮线速度的变化最为敏感,工件进给速度次之,对磨削深度的变化敏感度最低。

(3) 通过对磨削工艺参数优化,发现 IC10 高温合金在砂轮线速度 $v_s=20\text{m/s}$,工件进给速度 $v_w=117\text{mm/min}$,磨削深度 $a_p=0.48\text{mm}$ 时,可获得较好的表面质量,同时其材料去除率也可以得到较大的提升。

参考文献

[1] ÖSTERLE W, LI P X. Mechanical and thermal response of a nickel-base superalloy upon grinding with high removal rates[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1997, 238(2): 357–366.

[2] CHEN M, LI X T, SUN F H, et al. Studies on the grinding characteristics of directionally solidified nickel-based superalloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 116(2–3): 165–169.

[3] RABIEI F, RAHIMI A R, HADAD M J, et al. Performance improvement of minimum quantity lubrication (MQL) technique in surface grinding by modeling and optimization[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 86: 447–460.

[4] MIAO Q, LI H N, DING W F. On the temperature field in the creep feed grinding of turbine blade root: Simulation and experiments[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 147: 118957.

[5] MIAO Q, DING W F, KUANG W J, et al. Comparison on grindability and surface integrity in creep feed grinding of GH4169, K403, DZ408 and DD6 nickel-based superalloys[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 49: 175–186.

[6] 黄新春, 张定华, 姚倡锋, 等. 高效抗疲劳磨削加工技术研究[J]. *航空精密制造技术*, 2011, 47(3): 1–4, 7.

HUANG Xinchun, ZHANG Dinghua, YAO Changfeng, et al. Research on high-efficient and anti-fatigue grinding machining technology[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2011, 47(3): 1–4, 7.

[7] 黄新春, 张定华, 姚倡锋, 等. 磨削参数对 GH4169 高温合金磨削表面特征影响研究[J]. *中国机械工程*, 2014, 25(2): 210–214.

HUANG Xinchun, ZHANG Dinghua, YAO Changfeng, et al. A study of influence of grinding parameters on surface characteristics during grinding GH4169 superalloy[J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(2): 210–214.

[8] 赵希宏, 黄朝晖, 谭永宁, 等. IC10 高温合金的微观组织[J]. *航空材料学报*, 2008, 28(3): 28–33.

ZHAO Xihong, HUANG Zhaohui, TAN Yongning, et al. Microstructure of IC10 superalloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2008, 28(3): 28–33.

[9] 杨茂奎, 李雅卿, 冯学廉, 等. 加工表面粗糙度及其对 GH4169 高温合金疲劳寿命的影响[J]. *航空制造技术*, 1997, 40(6): 11–13.

YANG Maokui, LI Yaqing, FENG Xuelian, et al. Surface roughness and its effect on fatigue life of superalloy GH4169[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 1997, 40(6): 11–13.

[10] 杨忠学, 张帅奇, 张强. IC10 定向凝固高温合金缓进给磨削表面完整性研究[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(6): 62–70.

YANG Zhongxue, ZHANG Shuaiqi, ZHANG Qiang. Surface integrity of IC10 directionally solidified superalloy in creep feed grinding[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(6): 62–70.

(上接第 92 页)

LI Feng, LIN Junfeng, LI Chao, et al. Optimization based on extrusion for seamless tube of super hardness aluminum alloy[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, 42(10): 3020–3025.

[31] 康凤, 胡传凯, 舒大禹, 等. Al–Zn–Mg–Cu 系超高强铝合金等温复合挤压研究[J]. *精密成形工程*, 2010, 2(5): 17–19, 30.

KANG Feng, HU Chuankai, SHU Dayu, et al. Research on isothermal multiple-extrusion of Al–Zn–Mg–Cu superduralumin[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2010, 2(5): 17–19, 30.

[32] 王自启, 伍太宾, 唐全波. 7A04 超硬铝合金壳体的精密成形工艺研究[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(13): 106–108, 112.

WANG Ziqi, WU Taibin, TANG Quanbo. Study on precision forming technology of 7A04 super-hard aluminium alloy shell body[J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(13): 106–108, 112.

[33] XUE Y, BAI B, CHEN S, et al. Study on processing and structure property of Al–Cu–Mg–Zn alloy cup-shaped part produced by radial-backward extrusion[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95(1–4): 687–696.

[34] 谢焕. 往复挤压工艺对汽车用 5052 铝合金性能的影响[J]. *轻合金加工技术*, 2017, 45(2): 29–32, 41.

XIE Huan. Effects of reciprocating extrusion on properties of 5052 aluminum alloy for automobile[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2017, 45(2): 29–32, 41.

[35] ROKNI M R, ZAREI-HANZAKI A, ROOSTAEI A A, et al. An investigation into the hot deformation characteristics of 7075 aluminum alloy[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(4): 2339–2344.

[36] SUN Z C, ZHENG L S, YANG H. Softening mechanism and microstructure evolution of as-extruded 7075 aluminum alloy during hot deformation[J]. *Materials Characterization*, 2014, 90: 71–80.

[37] 张显峰, 陆政, 赵钊, 等. 挤压态 7A85 铝合金高温热变形显微组织演变[J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 2017, 44(6): 7–11.

ZHANG Xianfeng, LU Zheng, ZHAO Zhao, et al. Microstructure evolution of as-extruded 7A85 aluminum alloy during high temperature deformation[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(6): 7–11.

[38] 鲍文科, 高世阳, 刘均波, 等. 热挤压及固溶对 Al–7Zn–2.5Mg–2.5Cu 高强铝合金组织与性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(19): 105–107.

BAO Wenke, GAO Shiyang, LIU Junbo, et al. Effects of hot extrusion and solid solution on microstructure and properties of Al–7Zn–2.5Mg–2.5Cu high strength aluminum alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(19): 105–107.

[39] 卢萃萃, 史庆南, 唐广波, 等. 挤压速度对双通道等径角挤压 7003 铝合金力学性能的影响[J]. *金属热处理*, 2014, 39(5): 74–76.

LU Pingping, SHI Qingnan, TANG Guangbo, et al. Effects of extrusion speed on mechanical properties of 7003 aluminum alloy by D–ECAP[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2014, 39(5): 74–76.

通讯作者: 杨忠学, 工程师, 硕士, 研究方向为高温合金缓进给磨削。

(责编 七七 阳光)

通讯作者: 高文理, 教授, 主要从事轻量化高性能铝合金材料研发、成形及应用。

(责编 阳光)