

功能电极烧蚀加工典型难加工材料实验研究

徐安阳 刘志东 李文沛 邱明波 田宗军

(南京航空航天大学机电学院,南京,210016)

摘要:为研究功能电极电火花诱导烧蚀加工对难加工材料的适用性和影响因素,选取镍基高温合金 GH4169、淬火模具钢 Cr12、钛合金 TC4、钛铝合金 TAC-2 四种典型难加工材料进行常规电火花加工(Electric discharge machining, EDM)和功能电极烧蚀加工对比实验。结果表明:烧蚀加工对难加工材料有广泛的适用性,其加工效率分别为相同条件下常规电火花加工的 37.3 倍、13.5 倍、58.7 倍和 13.7 倍。研究发现:随着金属活性的提高,燃烧消耗和燃烧热的熔化作用增强,烧蚀作用增大;烧蚀加工表面的氧化层特性对烧蚀加工效率的提高有决定性作用;内喷液加工反镀现象的减小、烧蚀加工效率的提高量、氧化层的特性等因素决定着电极的相对损耗。

关键词:烧蚀加工;功能电极;难加工材料;金属活性;氧化层

中图分类号:TG662

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2014)05-0763-06

Experimental Study on Function Electrode Ablation Machining of Difficult-to-Machine Materials

Xu Anyang, Liu Zhidong, Li Wenpei, Qiu Mingbo, Tian Zongjun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: In order to study the processing adaptability and influencing factors of discharge-induced combustion with function electrode for difficult-to-machine materials, contrast experiments between conventional electric discharge machining (EDM) with cylindrical electrode and combustion machining with function electrode are carried out. Four typical difficult-to-machine materials, i. e. nickel-base superalloy GH4169, die steel Cr12, titanium alloy TC4 and titanium-aluminum alloy TAC-2 are selected in the contrast experiments. The results show that the efficiencies of combustion machining for GH4169 is 112 mm³/min, for Cr12 is 92.28 mm³/min, for TC4 is 347.7 mm³/min and for TAC-2 is 152.5 mm³/min, which are 37.3, 13.5, 58.7, 13.7 times than those of conventional EDM respectively under the same conditions. With the augmentation of metal activity, the burning intensity and combustion hot melting increase and the combustion effect also becomes more apparent. The characteristics of oxidation layer covering on machining surface plays a significant role in improving alloy material processing efficiency. Some factors determine the relative wear of the electrode, which include the weakened phenomenon on anti-plating of inner ejection liquid, the improvement of ablation processing efficiency, the characteristic of the oxide layer, etc.

Key words: ablation machining; function electrode; difficult-to-machine materials; metal reactivity; oxidation layer

基金项目:国家自然科学基金(51175256,51205197)资助项目;航空基金(2011ZE52060)资助项目;江苏省自然科学基金(BK2011732)资助项目;江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXLX12_0138)资助项目;中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

收稿日期:2014-05-10;**修订日期:**2014-07-10

通信作者:刘志东,男,教授,博士生导师,E-mail:liutim@nuaa.edu.cn.

电火花加工(Electric discharge machining, EDM)因不受工件材料强度、硬度等机械性能的限制、没有宏观切削力等优点,而被广泛地应用在航空、航天、仪器仪表等工业领域。但是 EDM 效率低这一缺点一直制约着该技术的应用与推广^[1-2]。为此,研究人员从不同角度对 EDM 技术进行了改进和创新。

日本东京农工大学的研究人员采用水作为工作介质,同时向放电区域通入氧气进行电火花加工,提高了材料去除率^[3]。其还使用气体介质进行电火花加工,在使用氧气作为工作介质时,加工效率有了明显提高^[4-5]。李立青等也对气体介质中电火花加工的放电机理、工艺等进行了深入研究^[6-7]。顾琳等提出了喷雾电火花铣削加工方法,利用高压雾气良好的冷却作用,提高了加工效率^[8-9]。但上述改进仍以极间放电为主要能源,能量利用率较低。

作者所在的课题组利用金属在氧气中燃烧的特性,提出了功能电极电火花诱导烧蚀加工方法,极大地提高了电火花加工效率。为研究烧蚀加工对材料的适用性及影响因素,选取镍基高温合金 GH4169、淬火模具钢 Cr12、钛合金 TC4、钛铝合金 TAC-2 四种典型难加工材料进行圆柱电极的常规电火花和功能电极电火花诱导烧蚀加工对比实验。

1 实验系统

功能电极烧蚀加工实验系统如图 1 所示。高压工作液和氧气从各自专用通道喷入加工区域,形成气液混合工作介质。电火花放电时产生的高温在蚀除工件材料的同时,形成外部热源,点燃氧气泡中的工件材料,利用金属与氧气的氧化燃烧反应消耗和熔化金属材料。气泡中氧气耗尽或者气泡移出燃烧区间,在工作液的作用下,燃烧终止。完成稳定可控的燃烧蚀除加工过程。图 2 为烧蚀加工 TC4 的现场。

2 实验及结果分析

实验采用北京凝华 NH7125 型数控电火花加工机床,常规电火花加工使用直径 12 mm 的圆柱电极,浸液加工。烧蚀加工使用图 1 所示的功能电极烧蚀加工系统,电极外径 12 mm。全部采用正极性加工。实验参数如表 1 所示, I 为平均电流, t_{on} 为脉宽, t_{off} 为脉间, P_g 为气压, P_1 为水压, n 为电极转速。实验结果如表 2 所示,MRR 为加工效率, G 为电极相对损耗。

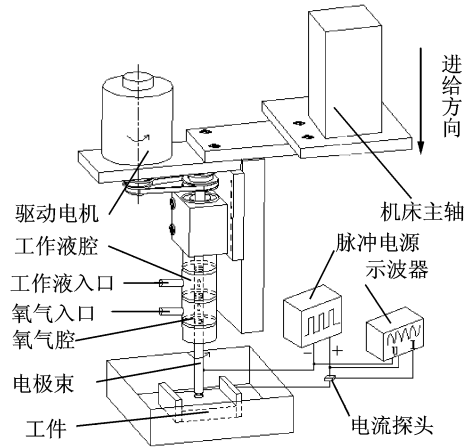


图 1 功能电极烧蚀加工系统

Fig. 1 Ablation machining system with function electrode

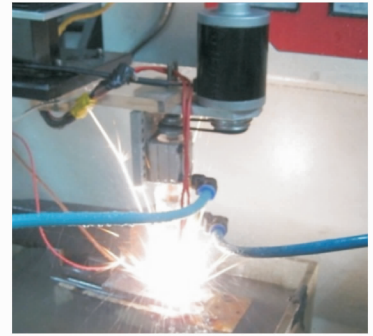


图 2 烧蚀加工 TC4 现场图

Fig. 2 Scene graph of ablation machining of TC4

表 1 对比实验加工参数

Tab. 1 Experimental parameters

参数	I/A	$t_{on}/\mu s$	$t_{off}/\mu s$	P_g/MPa	P_1/MPa (r · min ⁻¹)	$n/$
EDM	17	800	100	0.0	浸液	0
烧蚀加工	16	800	100	0.1	0.1	1 200

表 2 实验结果

Tab. 2 Experimental results

加工方式	参数	GH4169	Cr12	TC4	TAC-2
EDM	MRR/(mm ³ · min ⁻¹)	2.97	6.83	5.92	11.1
	G/%	0	-3.6	-6.8	-4
烧蚀加工	MRR/(mm ³ · min ⁻¹)	112	92.28	347.7	152.5
	G/%	1.87	1.4	0.43	2.22
加工效率提高量(倍数)		37.7	13.5	58.7	13.7

由表 2 可知,在相同加工条件下,不同材料烧蚀加工效率的提高量不同。由前期研究可知,电火花放电的蚀除在烧蚀加工中持续发挥作用^[10-11],因此加工效率的提高量主要由金属燃烧的蚀除作用所决定。

2.1 烧蚀加工效率分析

图 3 为 4 种材料的加工效率对比图。如图 3 所示,在相同电参数条件下,电火花诱导烧蚀加工效率至少是常规电火花加工的 13.5 倍以上。特别是对镍基高温合金 GH4169 和钛合金 TC4 等难加工材料,加工效率提高量达数十倍。因此,烧蚀加工对难加工材料具有广泛的适应性,能有效地解决常规电火花加工难加工材料效率低的问题。

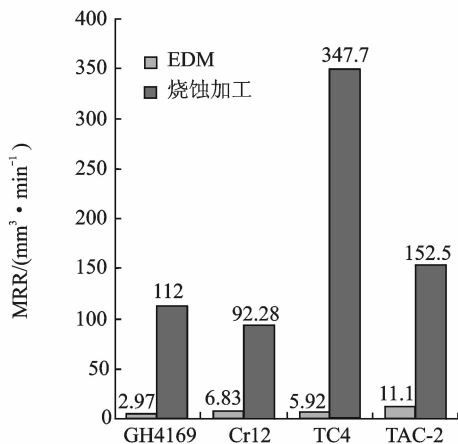


图 3 4 种材料的加工效率对比

Fig. 3 Processing efficiency of different materials

2.2 燃烧蚀除作用的分析

燃烧蚀除作用的影响主要有两部分:金属燃烧的消耗作用和燃烧热的熔化作用。

2.2.1 金属燃烧的消耗作用

金属燃烧的消耗作用是指金属与氧气发生的氧气燃烧反应,消耗金属材料的作用。

燃烧是发光发热的剧烈氧化反应,反应剧烈程

度由金属的活泼性决定。因此,金属的活泼性决定了燃烧消耗的速度。随着金属活泼性的降低,燃烧剧烈程度降低,燃烧消耗的金属量降低。因此,燃烧消耗作用随着金属活泼性的提高而增强。实验合金按主要合金元素的活泼性顺序由高到低分为铝、钛、铬、铁、镍^[12]。其燃烧消耗作用的大小顺序为 TAC-2>TC4>Cr12>GH4169。

2.2.2 燃烧热对材料的熔化作用

金属燃烧是放热过程,燃烧过程中释放出大量的燃烧热。烧蚀加工中燃烧热的影响作用可用燃烧热熔比(ΔN)衡量。

$$\Delta N = \frac{\Delta H^\circ}{\Delta H_p^\circ + \Delta H_m^\circ} \quad (1)$$

式中: ΔH° 为摩尔燃烧热; ΔH_p° 为加热金属到熔点所需热量; ΔH_m° 为金属的熔化热。

如钛的燃烧热熔比 ΔN 为 15.2,即 1 mol 钛材料绝热燃烧产生的燃烧热能使 15.2 mol 的钛材料温度升高到熔点并熔化。因此,燃烧热熔比越大,燃烧热的熔化作用越大。

由于合金成分比较复杂,这里采用简化模型进行计算:设合金成分稳定均匀,取主要合金元素计算,燃烧中,各元素同时参与反应。根据材料物理参数^[13-14],按原子分数计算合金的燃烧热熔比 ΔN 如表 3 所示。

由表 3 可知,4 种合金元素的燃烧热熔比都较大,表明燃烧热的熔化作用对加工效率有极大的促进作用。燃烧热熔比 ΔN 随金属活泼性的提高呈上升趋势,对材料的熔化作用增强。实验中 4 种材料的燃烧热对材料的熔化作用顺序为 TAC-2>TC4>Cr12>GH4169。实验结果也显示了燃烧热熔比对加工效率有明显的提高作用。

表 3 合金材料化学成分及燃烧热熔比

Tab. 3 Chemical composition and ratio of combustion and melting

材料	heat of alloy materials										
	GH4169			Cr12		TC4			TAC-2		
成分	Cr	Fe	Ni	Cr	Fe	Al	V	Ti	Al	Cr	Ti
质量分数/%	21	24	55	12.0	88.0	6.0	4.0	90.0	46.5	2.5	51.0
原子分数/%	24	25	51	12.8	87.2	8.6	3.3	88.1	60.7	1.7	37.6
ΔN (纯金属)	9.8	7	4.48	9.8	7.0	32.8	6.8	15.2	32.8	9.8	15.2
ΔN (合金)	6.39			7.41		16.5			21		

2.3 氧化层对烧蚀的阻碍作用

2.3.1 氧化层的影响特性

金属的燃烧是一个剧烈的氧化过程,会在加工表面生成如图 4 所示的氧化层,能够阻止氧气的渗入,对燃烧的向内发展有阻碍作用。阻碍作用的大

小由氧化层的特性决定,主要是其致密度,用氧化层致密性系数 Pilling-Bedworth 来衡量

$$\alpha = \frac{V_M}{V_A} \quad (2)$$

式中: α 为氧化层致密系数; V_M 为金属氧化物的分

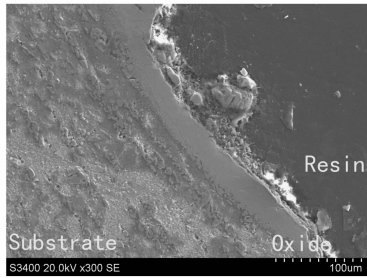


图4 烧蚀加工 Cr12 产生的氧化层

Fig. 4 Oxide layer section in ablation machining of Cr12

子体积; V_A 为金属原子体积之比。室温下实验合金氧化物的 α 值如表 4 所示,其他温度下的 α 值可以通过热膨胀系数进行换算, T 为氧化物熔点^[15]。

表 4 室温氧化物的 α 值和氧化物熔点 T Tab. 4 α and melting point of oxides

金属	氧化物	α	$T/^\circ\text{C}$
Ni	NiO	1.65	1 984
Cr	Cr ₂ O ₃	2.07	2 266
Fe	Fe ₃ O ₄	2.10	1 594
Ti	TiO ₂	1.70	1 850
Al	Al ₂ O ₃	1.28	2 027

由于生成的氧化层结构不同,对氧化扩散的阻力也就不同。对燃烧反应的阻碍作用可以分为以下两类:

(1) 当 $\alpha > 1$ 时,生成的氧化层致密、连续,氧气在此类氧化层内扩散时遇到的阻力较大,扩散速度较慢。对基体材料的氧化燃烧反应有较强的减缓作用。表 4 中 Al₂O₃ 具有这种性质。

(2) 当 $\alpha \gg 1$ 时,生成的氧化层十分致密,但内应力很大,随着氧化层的生长,内应力使部分氧化层鼓泡,发展到一定厚度后自行破裂,氧气在此类氧化层中传播有阻力,但是沿着破裂的裂纹传播,对氧化燃烧有一定的减缓作用,保护性较小。表 4 中 Fe₃O₄ 具有此种特性。

2.3.2 氧化层对烧蚀加工的影响

图 5 为烧蚀表面微观形貌,图 6 为氧化层截面微观结构,通过对表面和氧化层横截面微观形貌的分析,研究氧化层对烧蚀作用的影响。

由图 5(a)可知,GH4169 烧蚀加工表面被烧蚀产物和重凝物覆盖,表面有颗粒状物质,组织比较松散,并有较大的微裂纹。

由图 5(b)可知,Cr12 烧蚀加工表面被重凝层覆盖,有较多的飞溅物质,表面有较大的孔洞和微裂纹。

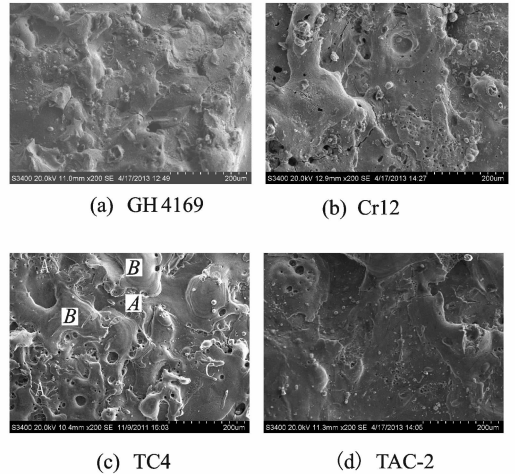


图 5 烧蚀加工微观形貌图

Fig. 5 Micro photograph of ablation surface

由图 5(c)可知,TC4 烧蚀加工表面布满微孔、微坑、微裂纹(A)和大量重凝物(B),重凝物质有流动的痕迹。

由图 5(d)可知,TAC-2 烧蚀加工表面被大面积致密重凝层覆盖,表面有部分微孔,表面较平整。

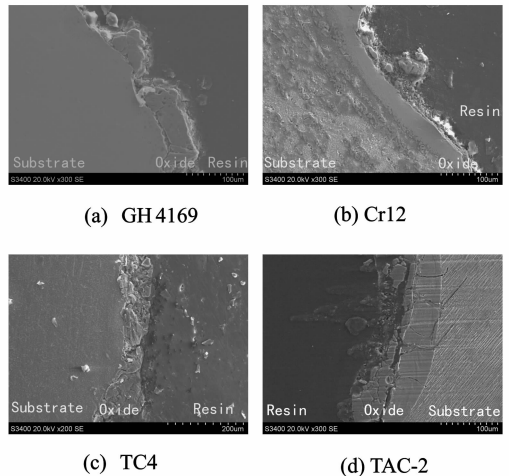


图 6 氧化层截面微观形貌图

Fig. 6 Micro photograph of oxide layer section

由图 6(a)可知,GH4169 的氧化层比较松散,有较多直达基体的纵向裂纹和破碎处,氧化层与基体的结合不紧密,有明显地缝隙,氧气能从氧化层下部扩散至基体并与之发生氧化燃烧反应。因此,镍基高温合金 GH4169 的氧化层对基体不具有保护性。

由图 6(b)可知,Cr12 的氧化层可明显地分为内外两层。外层破碎,由松散的结构组成,很容易脱落;内层致密、连续,与基体结合紧密,对基体有良好的保护作用。

由图 6(c)可知,TC4 的氧化层比较松散,有许多纵向裂纹。氧化层与基体的结合不紧密,有明显的缝隙,氧气能从氧化层下部扩散并与基体发生氧化燃烧反应。氧化层对基体不具有保护作用。

由图 6(d)可知,TAC-2 氧化层具有明显的双层结构。外层组织松散,与内层有较大的缝隙分界;内层致密,与基体结合紧密,厚度较大,对基体有较强的保护作用。

由以上分析可知,不同合金生成的氧化层结构特性不同,对氧气扩散的阻力也不同。对燃烧反应的阻碍作用可以分为以下两类:

(1)氧化层对基体没有保护作用。如镍基高温合金 GH4169 和钛合金 TC4 的氧化层松散、破碎,烧蚀加工中氧气能直接作用于工件基体,氧化层对基体的保护性较差。

这类合烧蚀作用对加工效率提高量极大,镍基高温合金 GH4169 和钛合金 TC4 的加工效率分别是常规电火花加工的 37.3 倍和 58.7 倍。

镍基高温合金 GH4169 烧蚀加工效率的提高量小于钛合金 TC4,主要原因是:首先,钛合金 TC4 活性性强,能与氧气发生剧烈的燃烧反应,消耗大量工件材料;其次,燃烧热熔比高达 16.5,燃烧热的熔化作用明显;再次,燃烧使重熔层形成贯穿性裂纹,使氧气和水能进入工件内部,形成内氧化和局部爆炸,排出生成物和熔融产物,变面燃烧为立体燃烧,从而大大提高蚀除效率。因此,当氧化层无保护作用或者保护作用较小时,金属的活泼性和燃烧热熔比 ΔN 决定着烧蚀加工效率的提高量。

(2)氧化层对基体具有较强的保护作用。如淬火模具钢 Cr12 和钛铝合金 TAC-2,其烧蚀氧化表面,致密且有多层结构,与表面结合紧密,对基体有良好的保护作用,对烧蚀作用有不利的影响。

如钛铝合金 TAC-2,燃烧反应中铝的活泼性大,熔点和燃点都比钛低,氧气优先与铝发生反应,由于钛铝合金中铝的含量高,能独立生成 Al_2O_3 氧化层。由表 3 可知, Al_2O_3 的 $\alpha > 1$,氧化层致密、连续,对表面有很强的保护作用,同时 Al_2O_3 的硬度较大,抗磨损性较高,熔点超过 2 000 $^{\circ}C$,远大于铝的熔点,不易熔化和剥离,抑制了燃烧反应的发展和燃烧热对工件的熔化作用,减弱了燃烧蚀除作用。因此,尽管钛铝合金 TAC-2 的燃烧热熔比 ΔN 高达 21,但是烧蚀加工效率仅是常规电火花加工的 13.7 倍,远小于活泼性和燃烧热熔 ΔN 都比较小的钛合金 TC4。

淬火模具钢 Cr12 氧化层具有相似特点,其活

泼性和燃烧热熔比 ΔN 都比镍基高温合金 GH4169 高,但其加工效率的提高量却小于镍基高温合金 GH4169。因此,氧化层的性质对烧蚀加工效率的提高起着决定性作用。

2.4 电极相对损耗分析

烧蚀加工的电极损耗,这里采用相对损耗表示

$$\theta = \frac{V_c}{V_w} \times 100\% \quad (3)$$

式中: V_c 为工具电极绝对损耗速度; V_w 为加工速度。

由表 2 可知,烧蚀加工的电极相对损耗要大于常规电火花加工,主要是受以下 3 个方面的影响:

(1)烧蚀加工采用内喷液的形式,反镀现象的降低增大了电极的绝对损耗。

常规电火花加工时,由于排屑不畅,极间状态较差,生成物大量反镀沉积在电极表面,使电极加重,特别是钛合金和钛铝合金,此种现象更明显。烧蚀加工采用内喷液方式,对极间的清洗作用较强,极间状态良好,反镀现象降低,对电极的保护作用降低,使电极绝对损耗增大。

(2)烧蚀加工效率提高量的影响。

烧蚀加工采用相同的参数加工不同的材料,电火花和电极烧蚀造成的损耗相似,对电极的蚀除损耗差别较小,工具电极的绝对损耗速度 V_c 稳定。由式(3)可知,当 V_c 稳定时,加工速度 V_w 就成为影响电极相对损耗的关键。烧蚀加工效率的提高量越大,电极的相对损耗率就越小,获得较小的电极相对损耗率。如钛合金 TC4,由于烧蚀作用很强,烧蚀加工效率的提高量很大^[11],则电极的绝对损耗增加较小。

(3)氧化层特性的影响。

氧化层的影响主要是负面的,体现在以下两个方面:

首先,对加工效率的影响。由于烧蚀加工能够在加工表面生成致密氧化膜,而构成氧化膜的氧化物物质大部分不导电或者到电性能较差,影响电火花放电的蚀除效率,也减小诱发产生燃烧反应的几率,同时氧化层阻止氧气与基体材料的进一步反应,降低烧蚀反应的加工速度,造成加工速度 V_w 提高量降低。

其次,对电极绝对损耗的影响。由于在工件表面生成了氧化层,使工件表面导电性下降,击穿电场增大。又由于电源电压一定,则加工中两极间放电距离降低,甚至形成接触放电,且加工中工具电极一直在高速旋转,则电极与工件就会发生磨削磨损,增大电极的绝对损耗。如:模具钢 Cr12,由于

生成 Cr_2O_3 和 Fe_3O_4 氧化层;钛铝合金 TAC-2,能在表面形成连续的 Al_2O_3 氧化层,生成的氧化层的硬度都很高,氧化层与表面的结合强度高、熔点高,加工中,高硬度的氧化层磨削电极端面,极大增加电极绝对损耗 V_e 。由公式(3)可知, V_w 降低, V_e 增大,电极的相对损耗有明显提高。

因此,烧蚀加工中,内喷液加工反镀现象的降低、烧蚀加工效率提高量、氧化层的特性等均是影响电极相对损耗的决定性因素。

3 结 论

(1)烧蚀加工对典型难加工材料广泛适用,加工效率有 13.5~58.7 倍的提高。

(2)随着金属活泼性的提高,燃烧消耗和燃烧热的熔化作用增强,烧蚀作用增大。

(3)氧化层的结构特性对烧蚀加工效率的提高有决定性作用。

(4)内喷液加工反镀现象的降低、烧蚀加工效率提高量、氧化层的特性等均是影响电极相对损耗的决定性因素。

参考文献:

- [1] 刘志东,高长水. 电火花加工工艺及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2011:2-9.
- [2] 李明辉. 电火花加工理论基础[M]. 北京:国防工业出版社,1989:4-8.
- [3] Kunieda M, Furuoya S. Improvement of EDM efficiency by supplying oxygen gas into gap [J]. Annals of the CIRP,1991,40(1):215-218.
- [4] Kunieda M, Yoshida M. Electrical discharge machining in gas[J]. Annals of the CIRP,1997,46(1):143-146.
- [5] Kunieda M, Miyoshi Y, Takaya T, et al. High speed 3D milling by dry EDM [J]. Annals of the CIRP,2003,152(1):147-150.
- [6] 李立青,赵万生,狄士春,等. 气体放电加工基础工艺实验研究[J]. 机械工程学报,2006,42(2):203-207. Li Liqing, Zhao Wansheng, Di Shichun, et al. Experimental study on electrical discharge machining in gas[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006,42(2):203-207.
- [7] 李立青,王振龙,赵万生. 气体放电加工机理分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2004,36(3):359-362. Li Liqing, Wang Zhenlong, Zhao Wansheng. Mechanism analysis of electrical discharge machining in gas [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004,36(3):359-362.
- [8] 顾琳,赵万生,张志华,等. 喷雾电火花铣削加工及其机理的分析[J]. 电加工与模具,2006(2):1-4. Gu Lin, Zhao Wansheng, Zhang Zhihua, et al. Mist-jetting-ED-milling and its mechanism[J]. Electromachining & Mould,2006(2):1-4.
- [9] 李利,顾琳,夏永高,等. 内喷雾式电火花铣削加工的实验研究[J]. 上海交通大学学报,2007,41(10):1569-1572. Li Li, Gu Lin, Xia Yonggao, et al. Experimental study of mist-jetting electric discharge milling[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007,41(10):1569-1572.
- [10] Liu Zhidong, Xu Anyang, Qiu Mingbo, et al. Basic study of combustion-material removal process by multi-function electrode[J]. Elsevier, 2013,47(6):1702-1706.
- [11] 徐安阳,刘志东,许俊,等. 功能电极电火花诱导烧蚀加工模具钢 Cr12 实验研究[J]. 上海交通大学学报,2013,47(11):18-22. Xu Anyang, Liu Zhidong, Xu Jun, et al. The experimental study of the ablation machining to die steel Cr12 by the EDM-induced with the function electrode [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013,47(11):1702-1706.
- [12] 章四琪,黄劲松. 有色金属熔炼与铸锭[M]. 北京:化学工业出版社,2006:4.
- [13] 印永嘉. 物理化学简明手册[M]. 北京:高等教育出版社,1988.
- [14] 使用化学手册编写组. 实用化学手册[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [15] 李美栓. 金属的高温腐蚀[M]. 北京:冶金工业出版社,2001:144-150.

