

金属工件热能去毛刺的数值模拟研究

王昊*, 于玉真#, 赵金库, 刘贺

盐城工学院机械工程学院, 江苏 盐城

收稿日期: 2023年12月12日; 录用日期: 2023年12月28日; 发布日期: 2024年1月31日

摘要

金属材料的零部件表面在机加工过程中产生的毛刺, 会直接影响零件的使用寿命, 因此采取措施去除零件表面的毛刺就十分重要。本文主要研究的热能法去毛刺, 采用CFD软件研究了甲烷在密闭燃烧室的燃烧特性以及金属零部件表面毛刺的去除情况, 对比分析了毛刺的位置、长宽比、混合气体压力(0.8~1.2 MPa)三种影响因素对毛刺去除效果的影响。结果表明: 热能法去毛刺可以有效地去除工件表面的毛刺; 毛刺距离点火点越近, 去除效果越好, 近点火点位置的毛刺根部温度相较于远点火点会高出230°C左右, 毛刺去除效果更好; 对不同长宽比毛刺的去除效果进行研究, 发现毛刺长宽比为3:1时根部温度1200°C, 此时毛刺去除效果最佳; 另外, 当混合气体压力从0.8 MPa提升到1 MPa时, 燃烧后流体的最高温度提升了600°C左右, 毛刺根部的温度提升了220°C, 毛刺的去除效率更高。

关键词

甲烷, 热能法, 毛刺, 根部温度, 数值模拟

Numerical Simulation Study of Thermal Deburring of Metal Workpieces

Hao Wang*, Yuzhen Yu#, Jinku Zhao, He Liu

School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu

Received: Dec. 12th, 2023; accepted: Dec. 28th, 2023; published: Jan. 31st, 2024

Abstract

Metal parts surface burrs generated in the machining process, will directly affect the service life of the parts, so it is very important to take measures to remove burrs on the surface of the parts. In

*第一作者。

#通讯作者。

this paper, the main research deburring method for thermal deburring, the use of CFD software to study the combustion characteristics of methane in the closed combustion chamber and the removal of burrs on the surface of the metal parts, compared and analyzed the location of the burr, aspect ratio, gas mixture pressure (0.8~1.2 MPa) three influencing factors on the effect of burr removal. The results show that: the thermal energy method can effectively remove the burrs on the surface of the workpiece; the closer the burrs are to the ignition point, the better the removal effect is; the temperature of the root of the burr in the near ignition point position is about 230°C higher than that in the far ignition point, and the removal effect of the burr is better; the removal effect of the burrs with different aspect ratios is investigated, and it is found that the temperature of the root of the burr when the burr's aspect ratio is 3:1 is 1200°C, and the removal effect is best; moreover, when the mixed gas pressure is 0.8~1.2 MPa, the removal effect is better. In addition, when the gas mixture pressure is increased from 0.8 MPa to 1 MPa, the maximum temperature of the post-combustion fluid is increased by about 600°C, and the temperature at the root of the burr is increased by 220°C, which results in a higher burr removal efficiency.

Keywords

Methane, Thermal Energy Method, Burr, Root Temperature, Numerical Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

毛刺是指工件表面的微小凸起或尖锐突起,其存在对工件的尺寸精度和形位精度等产生不良影响,同时,毛刺在工件的装配过程中也会对装配精度造成负面影响,由于毛刺可能经历硬化和脱落的过程,这些往往成为裂纹形成的初始点,最终导致工件的使用寿命变短[1][2]。毛刺的存在还可能对操作人员或设备使用者造成伤害,因此毛刺的处理对于安全也十分重要。在零件的使用过程中,毛刺也会对整个系统的正常运行产生不利影响,以液压系统为例,一旦毛刺脱落并进入元件内部,它们就可能阻塞滑阀的正常运动、切割软管、堵塞出液口、甚至损伤零件表面,导致主机性能下降甚至停机[3][4][5]。

目前在应用研发的去毛刺方法有很多,例如广东工业大学的赖增亮[6]就提出一种利用机械视觉自动检测的方法来提高机器人去除毛刺的效率;辽宁科技大学的于克强[7]等人针对航空发动机中的毛刺提出利用旋转电磁场磁力研磨工艺,辅以磁针与磁性磨粒的混合磨料来去除毛刺,最终毛刺的去除效果也十分良好。但是目前热能去毛刺法作为一种高效、清洁的去毛刺方法正在被更多的企业所青睐。

国内的温从众[8]、沈晓安[9]、姜黄海[10]等人在对热能去毛刺技术的研究中,都是侧重于通过实验的方法进行研究分析。其基本原理是利用混合气体的爆燃释放大量的热能来去除零件表面的毛刺。该方法使用天然气和氧气(或氢气和氧气)混合后,通过点燃火花塞,迅速在密闭的燃烧室内产生爆燃现象。燃烧时的瞬时温度可高达 3300°C,同时伴随着极大的冲击波。这样的高温 and 高速热冲击波使得具有大面积但热容很小的毛刺在瞬时高温下快速熔化,并与剩余氧气反应形成氧化灰。随后,这些氧化灰会随冲击波带至零件表面,从而达到去除毛刺的目的。

热能法去毛刺的优点在于可以去除复杂结构处的细小毛刺[11],同时由于零件本身具有较大的热容,其温度上升很低,一般不会超过 150°C,因此零件本体不会受到破坏[12]。相较于其它去除毛刺的方法[13],热能去毛刺的整个去毛刺过程由于爆燃时间极短,可以在较短的时间内完成,处理效率更高。

研究内容侧重于数值模拟分析, 选用工件材料为蠕墨铸铁 RuT350, 混合气体选用甲烷氧气的混合气体, 基于前期对工件表面存在的毛刺进行的分类研究, 对热能去毛刺进行数值建模, 并对整个甲烷燃烧以及去毛刺的过程和结果进行数值模拟, 研究其温度分布特征及规律, 分析热能去毛刺的最终结果以及影响因素。

2. 数值模拟方法

2.1. 物理模型

热能去毛刺装置结构的简略示意图如图 1 所示, 常规热能去毛刺设备主要由燃烧室、进气口、排气口、电火花塞等几部分组成。火花塞位置位于工件的正上方, 加工件则使用夹具固定在燃烧室底座之上, 固定好工件后, 在燃烧室内充入混合气体, 通过火花塞点燃气体, 释放热量, 达到去除毛刺的目的。

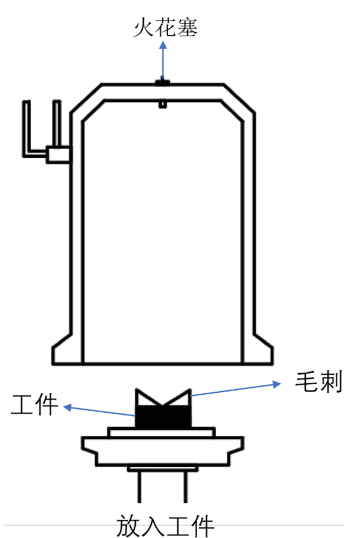


Figure 1. Schematic structure of thermal energy deburring device

图 1. 热能去毛刺装置结构示意图

为了便于网格的划分以及数值模拟的计算, 达到减少计算量以及提高计算精度的目的, 在建模时, 需要对模型进行简化, 删减进气口、排气口, 密闭燃烧室内初始时就充满甲烷氧气的混合气体。具体建模步骤为先建立金属工件以及毛刺的三维模型, 再通过 Designmodle 软件建立流体区域的模型, 最后利用布尔运算将流体域当作计算域进行计算。

在具体建立模型时, 将燃烧室内腔简化为一个直径 500 mm, 高 500 mm 的圆柱形密闭容器, 工件简化为长宽高分别为 400 mm、150 mm、250 mm 的长方体。点火点位于工件正上方 100 mm 处, 点火开始时刻为 0 ms, 持续时间 1 ms, 所有壁面均为固定壁面边界。

前期实验拍摄得到工件表面的毛刺如图 2 所示, 通过测量得到工件表面的毛刺宽度分布在 0.2~0.6 mm 之间, 长度分布在 0.11~2.4 mm 之间, 高度(厚度)分布在 0.17~0.28 mm 之间。

在计算时, 将毛刺形状简化为薄片状的长方体, 分为 4 种规格。毛刺建立位置以距离点火点的距离为参照, 分为工件上部(近距点火点)、工件中部(中距点火点)、工件下部(远距点火点)。毛刺具体参数尺寸见表 1。

在利用 Fluent 对整个热能去毛刺模型的求解时, 不仅需要对工件模型以及毛刺模型进行简化, 也需要对实际的工作情况进行一些程度的简化: 1) 燃烧前后的气体都是处于理想状态; 2) 燃烧室的壁面为完

全绝热壁面,不会向外传热;3) 无需考虑热辐射;4) 火焰扩散时前缘形状为球形,并且无限薄,无褶皱。

Table 1. Burr model size
表 1. 毛刺模型尺寸

序号	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	长宽比
1	3	1	0.2	3:1
2	3	1.2	0.2	5:2
3	2	1.2	0.2	5:3
4	2	1.5	0.2	4:3

2.2. 网格的划分

将需要计算的区域利用 Meshing 软件进行网格划分,同时将流体与工件进行流固耦合处理。考虑到实际需求,对毛刺部分的网格进行加密处理,最终网格划分结果如图 2 所示。

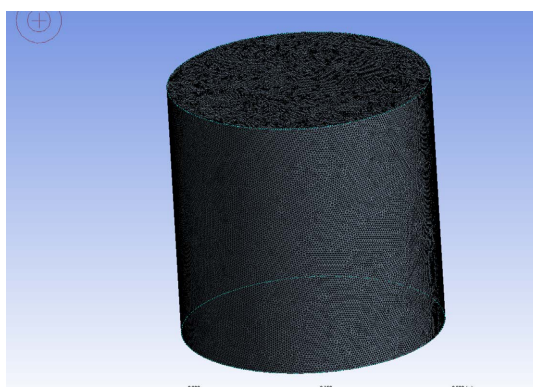


Figure 2. Combustor gas domain meshing results
图 2. 燃烧室气体域网格划分结果

2.3. 网格无关性验证

为了确保网格的划分对模拟结果的影响最小,需要进行网格的无关性验证。分别建立网格数量为 550 万、630 万、716 万、820 万的 4 种非结构化网格,利用这 4 种网格结构进行甲烷的燃烧模拟。由表 2 可知,当网格数量从 550 万增加到 716 万时,气体的最高温度由 3050 摄氏度上升到 3219℃,提升了 5.5%,而当网格数量从 716 万增加到 820 万时,气体最高温度在 3321℃,气体温度变化不到 1%。为了模拟结果的准确性以及尽量节约计算资源,网格数量选取 716 万。

Table 2. Effect of mesh number on finite element analysis results of gas maximum temperature
表 2. 网格数量对气体最高温度有限元分析结果的影响

网格数量	气体最高温度/℃
550 万	3050
630 万	3179
716 万	3219
820 万	3321

2.4. 计算模型选择以及边界条件设置

在湍流燃烧过程中，湍流的流动和化学反应之间存在非常强的相互作用。具体来说，湍流流动能够增强燃料和氧化剂之间的混合，从而提高化学反应的平均反应速率，与此同时，化学反应释放的热量又会反过来影响湍流流场，可能引起湍流强度和结构的变化。因此，在对湍流燃烧过程进行数值模拟时，湍流模型和燃烧模型的选取都非常关键，需要选择能很好描述湍流流动和化学反应特性及其相互作用的模型。只有这样，才能使数值模拟结果更准确地反映湍流燃烧的物理过程。

热能去毛刺过程中的燃烧过程属于扩散燃烧过程，笔者选用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型进行求解计算，燃烧模型则选用的是涡耗散(EDC)模型，点火模块选用电火花点火。甲烷的燃烧化学反应采用甲烷燃烧 3 步简化机理[14]，其中一共包含 6 种组分，分别为 CH_4 、 O_2 、 CO 、 H_2O 、 CO_2 以及 N_2 ，同时将整个 3 步的甲烷燃烧机理反应分为甲烷的氧化反应和 $\text{CO}-\text{CO}_2$ 的双向可逆反应，具体的动力学参数如表 3 所示，当中的温度指数 $\beta=0$ ，同时反应速率 k_i 为一个常数，其计算公式为：

$$k_i = A_i T^{\beta} e^{-E_i/RT} \quad (1)$$

式中的 A_i 代表指前因子； T 代表绝对温度； R 代表摩尔气体常数； E_i 代表反应活化能。 i 为表中的反应序号， $i = 1, 2, 3$ 。

Table 3. 3-step simplified mechanism of methane combustion
表 3. 甲烷燃烧 3 步简化机理

序号	反应	$A_i/(1.s^{-1})$	$E_i/(Kj.mol^{-1})$
1	$\text{CH} + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$	5.012×10^{11}	2.0×10^8
2	$\text{CO} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	2.239×10^{12}	1.7×10^8
3	$\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 0.5\text{O}_2$	5×10^8	1.7×10^8

其中反应 1 甲烷的氧化反应的反应速率设为 γ_1 ， γ_1 越大就代表甲烷燃烧速率越快， γ_1 的计算公式为：

$$\gamma_1 = k_1 c_{\text{CH}_4} c_{\text{O}_2}^{1.5} \quad (2)$$

式中的 k_1 代表甲烷氧化反应的反应速率常数； c_{CH_4} 以及 c_{O_2} 则分别代表了甲烷和氧气的量浓度。

为了具体的研究热能去毛刺的最终结果以及影响因素，设计了三种不同的工况，具体的工况如表 4：

Table 4. Model and operating conditions
表 4. 模型及工况

工况编号	混合气体压力/MPa	甲烷和氧气质量比例	初始温度/k
01	0.8	1:1.8	300
02	1	1:1.8	300
03	1.2	1:1.8	300

3. 计算结果与分析

由于温度是影响热能去毛刺结果的最为关键的因素，而同时毛刺根部往往是热能去毛刺法最难以去除的毛刺位置，因此通过研究不同变量下毛刺根部所能达到的最高温度来判断毛刺的去除情况，对不同位置、不同长宽比以及处在不同气体压力下的毛刺根部温度进行对比分析。

3.1. 毛刺位置对于去毛刺结果影响的分析

从图 3 可以看出，尽管流场的最高温度为 3200℃，但是不同位置流场的温度分布存在着明显的差距，因此不同位置上的毛刺去除效果也不会相同。为了对比不同位置处的毛刺去除情况，绘制了近距点火点、中距点火点、远距点火点三个位置的同一规格毛刺的根部位置的温度变化曲线图，如下图 4 所示。

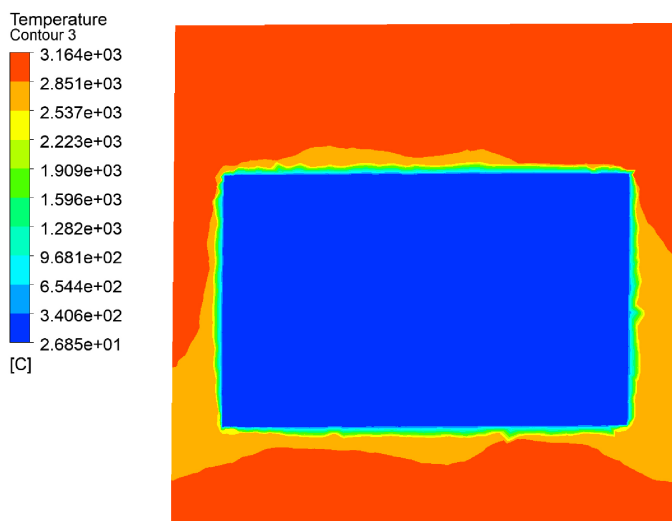


Figure 3. Temperature distribution of flow field
图 3. 流场的温度分布云图

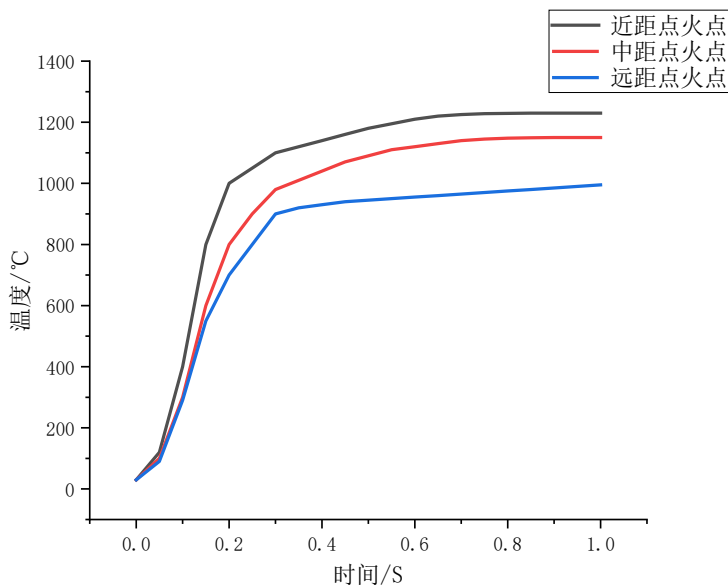


Figure 4. Temperature change curve of burr root at different positions
图 4. 不同位置毛刺根部温度变化曲线

由图 4 可知，毛刺根部温度在 0~0.2 s 时快速上升，并在 0.3 s 时基本达到最高温度，在 0.3~1 s 之间，温度也有增加，但变化趋势很小。不同位置之间毛刺根部达到的最大温度也存在差异，从图 4 中可以明显看出近点火点位置的毛刺根部温度最高可以达到 1230℃左右，中距点火点位置毛刺根部的温度可以达到 1150℃左右，全都高于去除毛刺所需要的 1100℃要求，可以判断为这两处位置的毛刺可以被有效的

去除；但同时远距点火点位置的毛刺根部温度仅达到 1000°C 左右，略低于材料 1100°C 的熔点，因此判断为远距点火点位置毛刺根部可能不会得到有效的去除，毛刺会有部分残留在工件表面。因此从图 5 可以判断出当距离点火点越近时，流体温度越高，毛刺去除效果越好，而距离点火点越远，流体温度越低，毛刺的去除效果就越差。

3.2. 毛刺的长宽比对于去毛刺结果影响的分析

图 5 为同一位置 4 种毛刺上的温度分布云图，图 6 为两种长宽比毛刺的具体温度分布对比云图，如图 5 所示，即使在同一位置，4 种长宽比的毛刺上的温度分布依旧有较大的差别，说明毛刺的长宽比也对毛刺的最终去除效果产生很大的影响，由于不同的横截面积相同时间内能通过的热量有很大的差距，导致最终毛刺的去除结果的出现差异。为了更加直观地展现不同长宽比毛刺的去除效果，绘制了近点火点位置 4 个毛刺的根部位置的温度变化对比曲线，如图 6 所示。

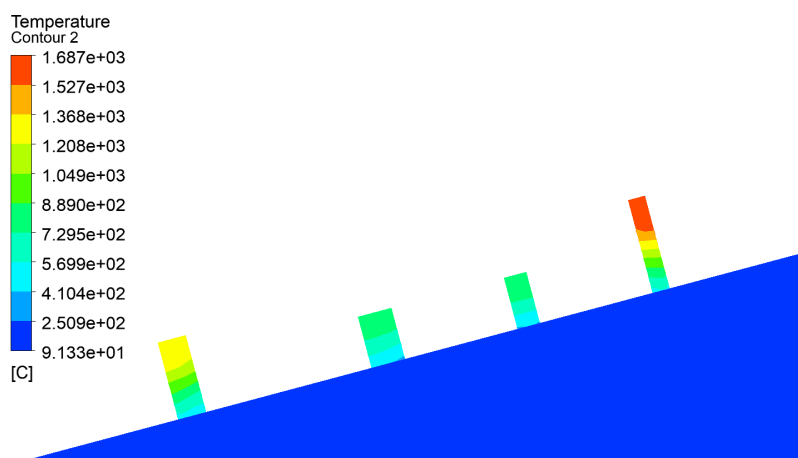


Figure 5. Temperature distribution on 4 aspect ratio glitches
图 5. 4 种长宽比毛刺上的温度分布云图

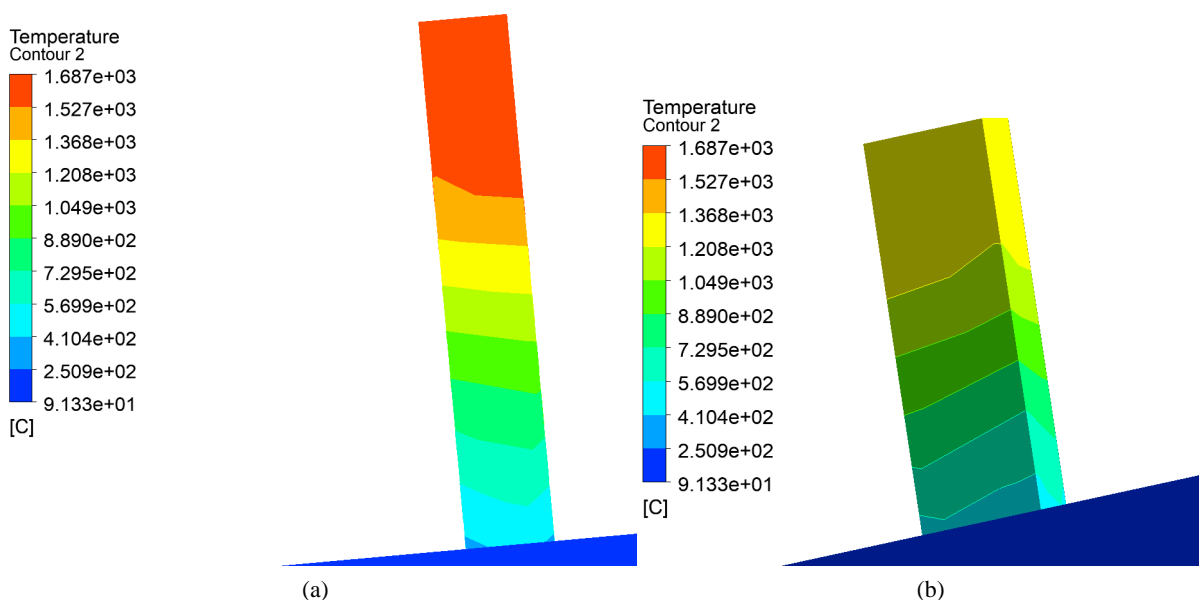


Figure 6. Specific comparison cloud of burr temperature distribution for two aspect ratios
图 6. 两种长宽比毛刺温度分布具体对比云图

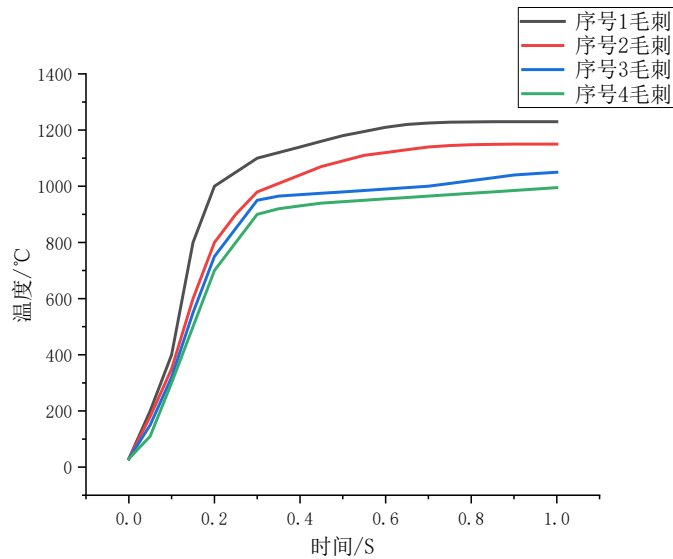


Figure 7. Temperature change curves of burr roots of 4 kinds of specifications

图 7. 4 种规格毛刺根部的温度变化曲线

由图 7 可知, 4 种规格毛刺的根部温度由大到小依次为 1200°C、1130°C、1050°C、960°C, 其中毛刺的长宽比在 4:3 时, 毛刺根部温度为 960°C 左右, 长宽比在 5:3 时, 毛刺根部温度达到 1050°C, 在长宽比为 5:2 时, 根部温度达到 1130°C, 而长宽比提升到 3:1 时, 毛刺的根部温度可以达到 1200°C。当长宽比从 4:3 逐渐上升至 3:1 时, 毛刺根部最高温度提高了 240°C 左右, 毛刺的去除效率也明显得到提高。分析结果也从侧面反映, 相比于飞边类的毛刺, 热能法去毛刺更加适合应用于去除尖角类的毛刺。

3.3. 不同气体压力条件对于去毛刺结果影响的分析

为了研究不同混合气体当量条件下毛刺的去除情况, 分别研究了 3 组不同气体压力下的同一位置毛刺的根部温度变化, 并绘制成曲线图, 如下图 8 所示。

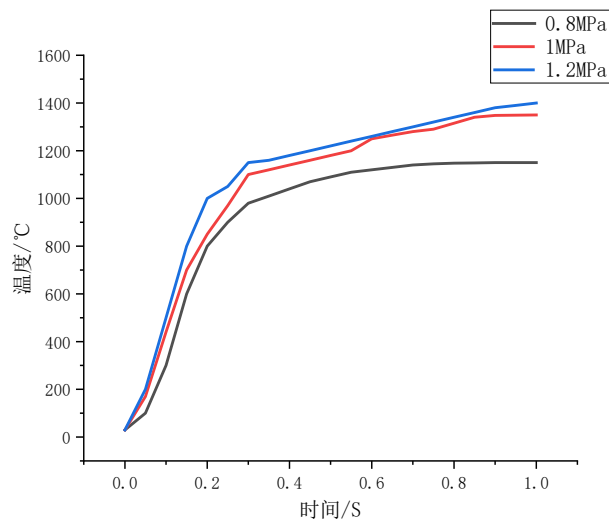


Figure 8. Temperature curve of burr root under three groups of gas pressure

图 8. 3 组气体压力条件下毛刺根部温度变化曲线

由图 8 可知, 当混合气体压力为 0.8 MPa 时, 毛刺根部的最高温度为 1110℃ 左右, 当混合气体的压力增加到 1 MPa 时, 毛刺根部的温度变化幅度较大, 可以增加到 1350℃ 左右, 毛刺的根部上升了 240℃。而混合气体压力再增大至 1.2 MPa 时, 毛刺根部的温度变化幅度稍小, 达到 1400℃ 左右, 仅上升 50℃。可以看出在一定范围内, 毛刺根部的最大温度会随着混合气体的压力的增大而增大, 它们之间成正相关的关系, 但是并不是成线性关系。但同时混合气体压力为 1.2 MPa 时, 工件边缘温度达到了 520℃ 左右, 在如此高的温度下, 工件表面的金相组织会被破坏, 甚至可能使得工件报废, 具体工件边缘温度分布见下图 9。

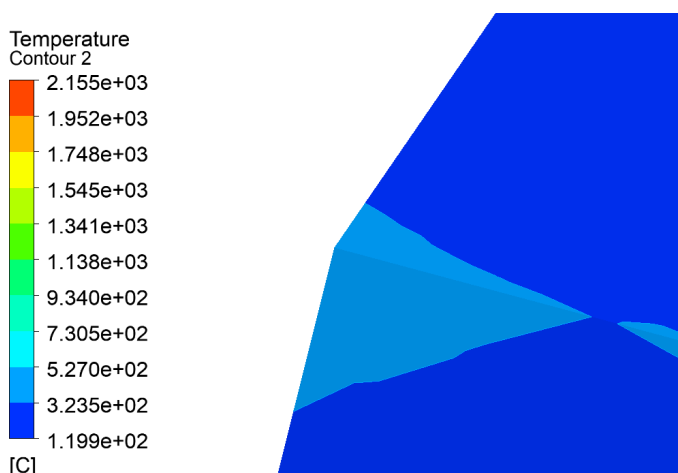


Figure 9. Temperature of workpiece edge and burr under 1.2 MPa pressure
图 9. 1.2 MPa 压力下工件边缘温度

4. 热能去毛刺的实验验证研究

为了验证上述仿真分析结果的准确性, 利用实验设备, 对上述工况二条件下的仿真实验进行实体实验验证, 与仿真分析结果进行对比。具体的实验参数为: 燃烧室体积 0.196 m³; 甲烷体积 0.392 m³; 氧气体积 1.568 m³; 甲烷与氧气的体积比为 1:4; 混合气体压力为 1 MPa; 工件材料为蠕墨铸铁 RuT350。

实验过程中, 流体最高燃烧温度约为 3500℃, 与仿真分析的结果相近, 证明实验与仿真分析结果相互验证, 具有研究价值。

根据上述给出的工艺参数进行实验验证, 最终毛刺的去除结果如下图 10 所示。



Figure 10. Workpiece surface after thermal energy deburring
图 10. 热能去毛刺后工件表面

而从图 10 的结果可以看出, 在工况二的条件下, 工件表面的毛刺基本得到去除, 与工况二条件下的仿真结果的分析基本一致, 同时流体的燃烧温度也和仿真温度相近, 充分证明了仿真分析结果的准确性和可靠性。

在经历热能去毛刺后, 工件表面没有观察到明显的形变, 工件表面未发现残留的毛刺, 毛刺去除结

果良好。同时经过热能去毛刺后的工件表面呈现暗黄色,经过检验分析为毛刺去除过程中产生的氧化灰,经过酸洗后,工件就可以显现出正常的金属光泽。

5. 结论

建立了热能去毛刺的简化物理域及计算域模型,通过数值模拟,研究了不同位置的毛刺、不同长宽比的毛刺、不同压力条件下的毛刺,热能去毛刺结果的变化规律,分析可得:

1) 热能法去毛刺可以通过瞬间高温,将毛刺有效的燃烧去除,可以快速有效的解决加工过程中产生的毛刺问题。

2) 毛刺的位置对去除结果的影也有较大的影响,越接近点火源的毛刺越容易去除。

3) 毛刺的长宽比对于毛刺的去除也会产生较大的影响,长宽比越大去除效果越好,而在处理长宽比较小的毛刺、飞边时,热能去毛刺的去除效果不会十分理想。

4) 在一定范围内,混合燃烧气体压力越大,毛刺去除效果越好,但不宜过大,过高的温度会对工件边缘的金相组织造成破坏,使得零件报废。

基金项目

《弹性力学与有限元分析》课程教学案例(库)建设(KCJSZ2018059)。

参考文献

- [1] 乔凌云, 卢宇, 陈晓莉, 等. 插齿加工时去毛刺研究[J]. 机械制造, 2020, 58(9): 65-66.
- [2] 王贵成, 陈镇宇, 裴宏杰, 等. 车削加工毛刺形成模型及其形态转换的研究[J]. 中国机械工程, 2005(5): 65-67.
- [3] 李海东. 柴油机油道自动去毛刺专机的设计[J]. 制造技术与机床, 2019(6): 199-202.
- [4] Ziliani, G., Visioli, A. and Legnani, G. (2007) A Mechatronic Approach for Robotic Deburring. *Mechatronics*, **17**, 431-441. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2007.04.012>
- [5] 丁建刚, 李宝龙, 石祖飞. 高碳钢制件化学去毛刺工艺[J]. 电镀与环保, 2006(5): 31-32.
- [6] 赖增亮, 刘冠峰. 一种视觉辅助机器人离线编程去毛刺系统[J]. 机械设计与制造, 2021(9): 251-254.
- [7] 于克强, 李彦俊, 李阔, 陈燕. 混合磨料辅助电磁抛光法对喷嘴的试验研究[J]. 机械设计与制造, 2021(8): 95-98.
- [8] 温从众, 耿艳娟, 李苹. 液压腔体零件交接孔热能去毛刺工艺研究[J]. 机床与液压, 2016, 44(16): 33-35.
- [9] 沈晓安. 热能去毛刺的实验研究[J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(4): 35-37.
- [10] 姜黄海. 热能去毛刺技术[J]. 航天制造技术, 2002(1): 21-24.
- [11] 张惠生. 机械零件去毛刺工艺的现状与发展[J]. 北京建筑工程学院学报, 2001(4): 58-63.
- [12] 姚敏茹, 万宏强, 李福援. 机械零件毛刺控制及去除工艺现状[J]. 新技术新工艺, 2005(12): 20-22.
- [13] 徐立华. 柴油机零件加工去毛刺方法及特点分析[J]. 装备制造技术, 2013(12): 98-100.
- [14] Westbrook, K.C. and Dryer, L.F. (1981) Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames. *Combustion Science and Technology*, **27**, 31-43. <https://doi.org/10.1080/00102208108946970>