电子束毛化技术在散热领域的应用研究*

刘增文,吕晓卫,冯展鹰

(南京电子技术研究所, 江苏南京 210039)

摘 要:电子束毛化技术是一种新型的表面改性技术,可以在材料表面制备各种形状的凸起阵列,进而 有效增加材料的表面积,因此在散热领域有较大的应用前景。文中通过对比试验,研究了 6063 铝合金 毛化试样的散热、表面处理和耐腐蚀性能。研究显示,具有较高凸起且密集排列的毛化试样可以有效提 高 6063 铝合金的散热性能。毛化过程对 6063 铝合金的表面导电氧化和耐腐蚀性无影响,但特定的毛 化结构会影响材料的表面处理性能。此外,还要考虑毛刺刚性在长期使用过程中对散热效果的影响。 关键词:电子束毛化技术;铝合金;散热;耐腐蚀

中图分类号:TK124 文献标识码:A 文章编号:1008-5300(2016)04-0054-04

Research on Electron Beam Surfi-sculpt Technology on Thermal Field

LIU Zeng-wen, LV Xiao-wei, FENG Zhan-ying

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Electron beam surfi-sculpt (EBSS) is a new technology that can modify the surface of the materials. Arrays of various shapes are formed on the surface of the material, and thus the surface area is increased greatly, which can improve the heat dissipation properties of the material. In this paper the heat dissipation, surface treatment and corrosion resistance of the aluminum plate with different modified surface are investigated. It is found that the heat dissipation properties of 6063 aluminum alloy can be improved if the height of the protrusion is high. The EBSS process has little influence on the surface conductive oxidation process and corrosion resistance of the 6063 aluminum alloy, but special structure of the protrusion may influence the conductive oxidation process of the material. Besides, the rigidity of the protrusion should be considered in long-term application.

Key words: electron beam surfi-sculpt; aluminum; heat dissipation; corrosion resistance

引 言

电子束以一定的速度在金属材料表面移动时,电 子束熔池中的液态金属将会在表面张力及金属蒸气压 力的共同作用下,向与电子束流移动方向相反的方向 流动。利用电子束的这一特性,英国焊接研究所(The Welding Institute, TWI)近年来开发了一种新型电子束 表面加工技术——电子束毛化技术^[1]。

通过电子束毛化技术,可以在材料表面制备不同 形貌的毛化阵列,进而有效增大材料的表面积,故在提 高材料的散热性能方面具有很大的潜力。本研究在

1 电子束毛化原理和研究现状

电子束毛化技术是在真空环境下,通过高频偏转 线圈和扫描花样控制软件,使电子束可以按照特定的

⁶⁰⁶³ 铝合金表面制备不同的毛化形貌,然后对毛化后的 6063 铝合金的散热性能进行研究。由于在液冷系统中,表面涂覆和耐腐蚀性也是影响液冷系统的重要指标^[2-3],因此对毛化试样的导电氧化和耐腐蚀性也进行了研究,以期为毛化技术在散热领域的应用提供技术支撑。

^{*} 收稿日期:2016-06-14

扫描花样以及一定的频率和扫描速度在材料表面进行 快速重复的扫描。由于电子束在扫描时,熔池金属将会 朝着与电子束移动方向相反的方向流动,因此当电子束 重复扫描同一区域时,熔池前端的金属将会不断向熔池 末端方向流动,随后凝固并堆积。经过不断的重复堆 积,在金属表面便会形成具有一定形状和大小的"凸 起"。与此同时,在熔池前端会形成很小的凹坑或者凹 槽状的"刻蚀",如图1所示。当电子束以特定的花样在 一个区域内快速重复扫描时,就会在材料表面形成具有 特定花样的"凸起",如图2所示。在电子束毛化过程 中,若参数合适,毛刺生长速度很快,在10 s 内就能够使 毛刺的高度生长到1.5 mm^[4-6]。



图1 电子束毛化过程示意图



图 2 毛化形貌

目前电子束毛化技术已经可以在铝合金、钛合金、 不锈钢、铜合金等材料表面制备各种形貌的毛刺阵列, 如柱状、尖刺、三角形、星形等形状的毛刺,如图 3 所 示。根据材料的不同,毛刺高度可以在 10 μm ~20 mm 内变化^[1,4-7]。

在电子束毛化的研究方面,目前的研究主要集中 于成形参数控制和毛刺微观组织研究等方面。在成形 控制方面,研究显示扫描频率和热输入量对毛化形貌 生长速度的影响较为重要^[7]。在微观组织研究方面, 研究发现毛刺一般分为凸起区、热影响区和基体3部 分。由于凝固速度的差异,3个区域的微观组织有较 大差异。在硬度方面,一般热影响区硬度最高,而毛刺 区和基体硬度较低,同时,由于元素蒸发,不同区域的 元素成分也有一定的差异^[8-9]。



图 3 不同的电子束毛化形貌

在电子束毛化技术的应用方面,国内外在金属-复合材料连接、涂层制备等领域已经有一些前沿的研究。在金属和复合材料的连接方面,利用电子束毛化 技术预先在金属表面制备毛刺,然后再将毛化后的金 属与复合材料加温加压固化,使得金属表面的毛刺嵌 入复合材料中间,可以增加复合材料和金属的接触面 积和相互作用,进而提高二者之间的连接强度,如图 4 所示^[4]。在涂层制备领域,可以事先在沉积表面制备 毛刺,然后在其表面制备涂层。研究显示,毛化形貌不 仅可以提高涂层和基体的结合力,还可以影响涂层裂 纹以及晶粒生长。图 5 为毛化的钛合金表面制备铝合 金涂层^[4-5]。



图 4 毛化技术在金属-复合材料连接方面的应用



图 5 毛化技术在涂层制备方面的应用

2 试验过程

试验所用铝合金为6063 铝合金板材,尺寸大小为 100 mm × 100 mm × 5 mm。然后以6063 铝合金板材 为基板,在电子束毛化设备上制备了沟槽、毛刺和颗粒 3 种不同毛化形貌,如图6 所示。



图 6 毛化试样宏观形貌

毛化试样制备完毕后,搭建实验平台,对3种毛化 试样的散热性能进行评估。同时还测量普通 6063 铝 合金板材(表面未进行任何处理)、6063 铝合金微通道 试样的散热效果,用以对比分析,其中微通道试样由 2 mm × 0.6 mm 的翅片阵列组成,翅片间距 1.1 mm, 截面如图 7 所示。



图 7 微型流道截面

实验平台如图 8 所示,由液冷底板、毛化试样、冷却液、发热体和测温系统组成。试验时,先将发热体焊 接在试样表面,然后将不同的测试试样镶嵌进液冷底 板中,用夹具固定,形成具有中空腔体的液冷冷板,通 冷却液,同时通电使发热体发热,待系统达到热平衡 后,用热电偶测量发热体表面的温度。



图 8 实验平台示意图

试验完毕后,按照 QJ/Z 120 铝及铝合金化学导电 氧化膜层生产说明书中流程对普通铝板、微通道试样 以及3 种毛化试样进行表面导电氧化处理,并将氧化 后的试样浸入去离子水中12 h,利用 DDB-303A 型电 导率测试仪测量(上海雷磁)浸泡前后去离子水的电 导率,以分析试样表面的离子残留。最后在环境试验 箱中对毛化试样进行96 h 盐雾试验,以评估毛化试样 的耐腐蚀性能。

3 结果与讨论

图 9 为毛刺和沟槽状毛化试样的截面形貌。可以 看出毛刺状毛化表面主要由 1.5 mm 高的三角形阵列 组成。由于毛刺厚度较薄,在外力作用下部分毛刺出 现了变形和倒伏。沟槽状毛化表面主要由1.5 mm 高 的三角形凸起以及1.8 mm 深的沟槽组成。由于凸起 和凹槽连成一体,刚性较好,因此毛化阵列没有发生变 形。在散热结构中,毛刺的强度也是需要考虑的一个 因素。毛刺强度过低,在长期使用过程中,有可能导致 毛刺脱落,进而导致流道堵塞。



图 9 毛化试样截面形貌

利用散热装置,测量在使用普通铝板、微通道试样 以及不同毛化试样的情况下,发热体表面的温度,结果 见表1。可以看出,焊接在微通道试样表面的发热体 表面温度最低,沟槽状试样次之,普通铝板、毛刺试样 以及表面颗粒状试样无明显区别。这表明微通道试样 的散热性能最好,沟槽状试样次之,而毛刺及颗粒状试 样和普通铝板的散热效果无明显区别。对于微通道试 样,凸起阵列形状规则,且排列密集,有效增加了试样 的表面积,同时微通道之间有1.1 mm 的间隙允许液 体流过,因此散热性能最好。对于沟槽状试样,其表面 分布有沟槽,使得其表面积也有一定的增加,但由于凹 槽间隔较大,排列较为稀疏,因此散热效果较微通道试 样低。对于毛刺状和颗粒状毛化试样,凸起过于细小, 且高度较矮,因此试样的散热效果无明显改善,其散热 性能和普通铝板的散热效果差别不大。

表1 不同试样的测温结果

试板类型	普通 铝板	微通道 试样	沟槽 试板	毛刺 试板	颗粒 试板
电阻表面温度/ ℃	52	49.5	50.8	51.5	51.4

导电氧化后的3种试样表面如图10所示。可以 看出各个毛化试样表面均覆盖了一层均匀的氧化膜。 由于毛刺状试样存在较多盲孔,因此分析了盲孔内部 的导电氧化情况,如图11所示。可以看到,盲孔底部 区域没有导电氧化层覆盖。这是由于试样表面盲孔不 利于液体流动,因此导电氧化液无法进入盲孔底部,故 此处导电氧化效果较差。3种毛化试样的导电氧化结 果表明,电子束毛化过程本身不会改变6063铝合金的 表面导电氧化能力,但特殊毛化结构(如盲孔等)的存 在会影响导电氧化液的流动,进而影响6063铝合金毛

化表面的导电氧化性能。



图 11 毛刺状毛化试样盲孔内导电氧化效果

由于毛化后试样表面比较粗糙,导电氧化完毕后, 粗糙的表面有可能导致导电氧化液中的离子残留,进 而影响材料的耐腐蚀性能,因此在毛化试样导电氧化 完毕后,将3种毛化试板、微通道试样和普通铝板浸入 去离子水中12h,然后对比试样浸入前后去离子水电 导率的变化,结果见表2。从结果中可以看到,5种试 样导电氧化后电导率无明显差异,这说明虽然毛化试 样使材料表面变得粗糙,但并不会造成离子残留。

计记录型	电导率	≝ μS∕cm
风极关型	浸入前	浸泡 12 h 后
普通铝板	1	3
微通道试样	1	3
沟槽状毛化试样	1	3
毛刺状毛化试样	1	3
颗粒状毛化试样	1	3

试样导电氧化后,为了评估其耐腐蚀性,将其放置 于盐雾试验箱中96h。实验发现,24h以后,沟槽状毛 化试板和颗粒状毛化试板表面无明显的腐蚀斑点,但 是毛刺状毛化试板的盲孔口部已经出现了褪色现象, 且随着时间的延长,盲孔口部褪色区不断扩展。96h 以后的试样形貌如图12所示。





可以看到沟槽状毛化试板和颗粒状毛化试板表面 仍然较好,出现了部分褪色现象,毛刺状试样在部分盲 孔处导电氧化层褪色严重,但3种试样均无腐蚀斑点 出现。对比毛化试样周围未毛化的区域,同样出现了 导电氧化层的褪色,这表明毛化过程本身并不会影响 6063 铝合金毛化试样的耐腐蚀性能。

4 结束语

具有较高凸起且密集排列的毛化形貌,可以提高 6063 铝合金的散热效果,但若毛化凸起较矮,则毛化 处理对 6063 铝合金试样的散热效果无明显提升。同 时在散热结构中,要考虑电子束毛化阵列的刚性,较薄 的毛刺刚性较差,在长期使用过程中可能会脱落,进而 堵塞流道。毛化过程本身不会改变 6063 铝合金的导 电氧化性能,但部分毛化结构(如盲孔等)会妨碍导电 氧化液的流动,进而影响材料的导电氧化性能。同时, 6063 铝合金毛化后粗糙的表面不会造成离子残留增 加。毛化过程不会改变 6063 铝合金的耐腐蚀性,毛化 后试样的耐腐蚀性和 6063 铝合金材料本体的耐腐蚀 性能没有明显差异。

参考文献

- [1] BUXTON A L, DANCE B G I. Surfi-sculpt-revolutionary surface processing with an electron beam [C]//Proceedings of 4th International Surface Engineering Congress. Minnesota, USA, 2005.
- [2] 余建祖,谢永奇.电子设备热设计及分析技术[M].北 京:北京航空航天大学出版社,2008.
- [3] 杨冬梅,徐德好.液冷冷板的研究[J].电子机械工程, 2006,22(1):4-6.
- [4] WANG X C, GONG S L, GUO E M, et al. Primary study on electron beam surfi-sculpt of Ti-6Al-4V [J]. Advanced Materials Research, 2012, 418-420: 772-776.
- [5] 王西昌, 巩水利, 郭恩明, 等. 电子束毛化技术及其在复合材料制造领域中的应用[J]. 航空制造技术, 2009 (S1): 53-55.
- [6] WANG X C, GUO E M, GONG S L, et al. Study of electron beam surfi-sculpt during composite materials joining[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(S4): 292–296.
- WANG X C, AHN J, BAI Q, et al. Effect of forming parameters on electron beam surfi-sculpt protrusion for Ti-6Al-4V[J]. Materials and Design, 2015, 76: 202-206.
- [8] WANG X C, GONG S L, GUO E M, et al. Realization and experimental analysis of electron beam surfi-sculpt on Ti-6Al-4V Alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(4): 0819-0822.
- [9] 徐恒栋,赵海燕,孟令瑶,等. TA15 钛合金表面电子束毛 化处理的组织特征[J].金属学报,2012,48(8):989-994.

刘增文(1983-),男,工程师,主要从事机械工艺 设计、液冷散热、市场项目营销与管理工作。