

无铅易切削铝合金*

黄志其,尹志民

(中南大学材料科学与工程学院,长沙 410083)

摘要 综述了国内外无铅易切削铝合金的研究概况,介绍了目前在美国铝业协会注册的易切削铝合金以及它们的化学成分范围,阐明了无铅易切削铝合金的两种切削机制以及合金元素对合金性能的影响,简述了易切削铝合金切削性能的等级分类,并指出了今后无铅易切削铝合金的研究方向。

关键词 无铅 易切削 铝合金 切削机制 合金元素

Lead-free Free-cutting Aluminum Alloy

HUANG Zhiqi, YIN Zhimin

(College of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

Abstract The paper summarizes the general situation of the research of lead-free free-cutting aluminum alloy in domestic and foreign countries, introduces some free-cutting aluminum alloy registered in America Aluminum Association and their chemical composition range, illustrates two kinds of cutting mechanism of lead-free free-cutting aluminum alloy and the effect of alloying elements on the property of alloy, briefly states the ranking system of the machinability of free-cutting aluminum alloy, and points out the research direction of lead-free free-cutting aluminum alloy for the future.

Key words lead-free, free-cutting, aluminum alloy, cutting mechanism, alloying elements

传统易切削铝合金是在2×××系和6×××系铝合金的基础上,通过加入少量铅和铋而制成。在合金中,铅和铋形成低熔点的组织组成物,工件在切削过程中由于摩擦生热使得工件与刀具接触点处的温度接近或达到低熔点的组织组成物的熔点时,组织组成物将发生软化或溶化,切屑易断,表面光洁度好。合金牌号包括:2007、2030、2011、6012、6262^[1,2],这类合金切削性能好,氧化着色性能也很好。但是,由于铅对人体有害,国外已经颁布法令,2006年年底主要工业国家将禁止人为加铅的易切削铝合金的生产和使用。因此,研制开发无铅易切削铝合金势在必行。

本文介绍了国际上无铅易切削铝合金的发展过程,列举了在美国铝业协会注册的易切削铝合金和它们的化学成分范围,阐明了无铅易切削铝合金的两种切削机制,简述了易切削铝合金切削性能的等级分类,并指出了今后无铅易切削铝合金的研究方向,以期对国内对这类合金的研究与开发提供参考。

1 无铅易切削铝合金的研究概况

1.1 国外无铅易切削铝合金

1.1.1 国外传统易切削铝合金

传统易切削铝合金中代表性的合金有2011和6262。前者注册于1954年,是一种Pb、Bi含量分别为0.5%的2×××系Al-Cu合金,由于Pb和Bi形成的低熔点共晶相在切削变形的过程中的软化和融化有利于在工件和刀具界面上形成细小的切屑,这种合金具有优良的(A等)切削性能。后者注册于1960年,是在6061Al-Mg-Si合金的基础上加入了0.5%的Pb和0.5%的Bi形成的合金。与2011合金相比,这种合金抗腐蚀性能、钎焊和软焊性能、阳极氧化性能优良,但切削性能不如2011

合金,切削性能等级为B。

1.1.2 国外2×××系无铅易切削铝合金

J. Faltus等^[3]研究了含Sn、Bi的Al-Cu-Mg合金中Sn对于过饱和固溶体分解序列的影响以及Mg含量对合金切削性能的影响。结果表明,Sn通过压缩预沉淀时间改变了过饱和固溶体分解序列,这种含Sn、Bi的Al-Cu-Mg合金完全可以取代含Pb的EN AW-2007和EN AW-2030合金,其机械性能与含Pb的商用易切削硬铝合金相当,可切削性能与Mg含量有关,含Sn、Bi的低Mg无铅易切削Al-Cu-Mg合金的切削性能比含Pb的商用易切削硬铝合金稍好。

美国铝业公司开发了一种含Bi和Sn的无铅易切削2×××系Al-Cu合金,其专利发表于2000年^[4],研究了Bi和Sn比例的变化对合金性能的影响,当Bi与Sn的比例控制在1:1~3:1之间时,这种合金具有与2011合金相当的机械性能和可切削性能。

日本住友轻金属公司^[5]研制开发了两种称之为CB-56和CB-156合金的Al-Cu系无铅易切削铝合金,结果表明:其力学性能与2011合金大体相当,抗拉强度达420MPa,屈服强度为320MPa,延伸率为14%。可切削性能与耐腐蚀性能也与2011相当甚至稍好,可以取代传统含Pb的2011易切削铝合金。

Impol铝业公司的Smolej等^[6]研制了加Sn的无铅2×××易切削铝合金,并研究了不同Sn含量和热处理加工工艺对合金性能的影响,确定了该合金的最佳成分和热处理工艺,该合金申请的专利发表于2001年。与传统的2011和2030含Pb易切削铝合金相比,该合金具有类似的或者较好的机械性能、抗腐蚀性能和可切削性能。

Kaiser公司还开发了一种用Sn来取代Pb的含Bi和Sn的

* 国家重点基础研究发展规划项目(2005CB623701)

黄志其:男,1983年生,硕士,从事易切削铝合金的研究 尹志民:联系人,男,教授 Tel:0731-8830262 E-mail:yin-grp@mail.csu.edu.cn

无铅 $2\times\times\times$ Al-Cu 合金,研究了该合金 Sn 和 Bi 的最佳含量以及最佳热处理加工工艺,这种合金注册于 1999 年^[7],全面性能与 2011 相当。

总之,国外一些铝业公司所研制的无铅易切削 $2\times\times\times$ 系铝合金产品的全面性能基本上能够达到传统的 2011 合金的水平,在微观组织结构方面,微合金元素 Sn 对于合金的组织与性能影响也有一些报导^[8~10],然而,微合金元素 Bi 对于合金的作用机理却少见报导,这将是今后无铅易切削铝合金材料科学工作者的研究重点。

1.1.3 国外 $6\times\times\times$ 系无铅易切削铝合金

Yoshihara S 等^[11]采用了调整传统合金元素含量的相对水平来改善切削性能的方法,特别考虑了调整 Si、Mn、Fe 和 Ni 的含量,注册了一种牌号为 KE6 的合金。合金中含有多余的 Si,在切削加工的过程中,由于切屑应力的引入使得 Si 的周围产生了流体应变,破碎的 Si 粒子加速了裂缝在切屑上的扩展,使得合金具有良好的切削加工特性,其切削性能与 6262 合金相当,可以用于 ABS 制动部件、OA 部件以及其它的精加工部件。

日本 Furukawa 铝业公司的 Ara 等^[12]研究了含 Sn 的无铅 $6\times\times\times$ 易切削铝合金,研究了合金元素的加入量和低熔点物质在合金中的尺寸对切削性能的影响。当含 Sn 的化合物在基体中弥散分布且直径不超过 $20\mu\text{m}$ 时,这种合金有很好的切削性能,又有很好的表面光洁度,可以用于汽车引擎中,以替代 JIS6061 合金和 6262 合金。

日本住友轻金属公司^[5]研制了一种 GT-209 无铅易切削铝合金,用来替代该公司大量生产含铅的 GT-09、GT-109 易切削铝合金,它既不含有害的铅,又保持了原有合金的特性,切屑细碎,有很好的可切削性能,可在数控机床床上切削加工汽车、电机、机械等的精密零件。经用户使用,证明新合金的可切削性和耐腐蚀性与传统的含铅 6262 合金相同,机械性能也与 6262 相当,抗拉强度达 310MPa,屈服强度为 270 MPa,延伸率为 14%。

Kaiser 铝业和化学公司的 Farrar 等^[13]研究了用 Sn 来取代 Pb 的 KA62 合金,此种合金注册于 1998 年。研究了 Sn、Bi 含量和热处理工艺对合金性能的影响,指出 Sn、Bi 含量的最佳含量范围分别为 0.15~0.25、0.2~0.8。这种合金有类似于 6262 合金的性能。Reynolds 金属公司研究了添加元素对于一系列合金性能的影响,研究主要集中于以 6262 为基本成分的合金,首先研究了采用 In 和 Sn 来取代 Pb 和 Bi 的 6030 合金,研究结果总结在 1996 年出版的论文上^[14],结果表明:用 In 和 Sn 来取代 Pb 和 Bi 形成了想要的低熔点共晶相,这些相的熔点比其他含 Sn、Bi 的合金的熔点要低,切削性能比 6262 稍好。这种含 In 和 Sn 的 X6030 合金在 1995 年进行了注册^[15]。进一步研究所申请的专利发表于 1998 年,包括含 Bi、Bi+Sn 的合金^[16]。研究发现单独加 Bi 时,Bi 的最佳含量为 0.3%~1.2%,Bi 和 Sn 同时加入时,Bi 和 Sn 的最佳含量分别为 0.3%~1.0%和 0.3%~0.7%。含 Bi、In 的合金于 2001 年进行了注册^[17],确定了 In、Bi 的最佳含量范围分别为 0.01%~0.3%和 0.10%~1.5%。与此同时,他们还在另一方面进行了卓有成效的工作,通过向传统 $6\times\times\times$ 系铝合金中添加高熔点的元素或者化合物来改善切削性能,这种合金在美国的专利注册于 2002 年^[18]。

美国铝业公司开发了一种无铅的可供选择的 Al-Mg-Si 合金。在工作中,他们不仅对形成低熔点共晶的添加元素种类进行了研究,而且还考虑了对基本合金元素成分进行调整,以期获得想要的平衡性能。他们选择含 Sn 作为添加元素来取代 Bi+

Pb,名义含量为 1.1%,形成低熔点的 β -Sn 和 Mg_2Sn 共晶。此外,他们提高了合金中 Cu 的含量来提高合金的强度。这种合金成分的专利于 1995 年注册,名为 6020 合金^[19]。与 2011 相比,对这种合金的可切削性能研究表明其具有 A 等切削性能^[20,21],能够显著地提高机械加工的效率^[22,23]。然而,根据文献^[16,17],易切削铝合金只添加 Sn 会反过来影响合金的机械性能,特别是抗冲击性能,也就是说会使得合金变脆,不抗冲击;此外,加 Sn 会使得有热制动油存在的情况下抗腐蚀性能变差,由这种含 Sn 的易切削铝合金所制造的制动系统部件在制动油存在的情况下会过量腐蚀。因此,以后的研究将专注于生产一种合金在切削性能和抗冲击性能方面有很好的平衡点的合金。目前还没有这种合金的注册。

其它的在美国铝业协会注册的无铅易切削合金包括 6012A、2111 和 2012 等。表 1 介绍了在铝业协会注册的所有含铅和不含铅易切削铝合金牌号和成分范围。

1.2 国内无铅易切削铝合金的研究

国内天津有色金属研究所的曹颜顺等^[24]研究了一种含 Sn 和 Cd 用来替代黄铜的名为 LKX-1 的无铅耐蚀易切削 Al-Mg-Si 合金,其共晶融化温度为 177°C ,研究了其切削性能和耐腐蚀性能,结果表明:LKX-1 合金的切削阻力小,约为含铅黄铜的 1/2,其切屑为短卷断型,切屑的处理性能良好,而且精加工表面光洁度高,切削性能优于 LY12、2011、H59-1 等合金;其耐蚀性能比较好,也优于 LY12、2011 合金,与 H59-1 相当。然而,Cd 也是一种有害元素,对环境也将产生危害。

本文作者研究了时效工艺对含铅 2011 和无铅易切削 Al-Cu 合金的微观组织结构与性能影响,以及时效工艺对含 Sn 和具有不同 Sn、Bi 含量的含 Sn、Bi 的 3 种无铅 $6\times\times\times$ 系铝合金的微观组织结构与性能的影响,弄清了 Sn、Bi 在合金中的存在形式和分布特征及其形成的低熔点物质的熔点。结果表明,从力学性能、腐蚀性能和切削性能三方面来讲,无铅的 Al-Cu 合金与 Al-Mg-Si 合金都能取代传统的含铅 2011 与 6262 合金。基于以上成果,作者对无铅易切削铝合金的研究有了较全面的认识,今后的工作重点应集中于合金元素 Sn、Bi 在合金中的作用机制及其对合金性能的影响。此外,In 作为一种低熔点元素具有比 Sn、Bi 更低的熔点,它们之间的结合所产生的物质必将具有更低的熔点,合金可能有更好的切削性能,也是今后工作的重点。

目前国内还没有其它无污染无铅易切削铝合金研制成功的文献报导,含 Pb 易切削铝合金产品也是国外的同种产品,我国是传统易切削铝合金的主要生产国,且国外工业国家的易切削铝合金主要从国内进口,每年的消费量较大。易切削铝合金用于主缸制动活塞、连接器传送阀门、AC 充气阀和零件、汽车、液压设备和电子产业的压力部件以及仪器仪表工业需要高表面光洁度的精密铝合金结构件,有广泛的应用前景,且随着汽车、电子等工业的发展,易切削铝合金将会有更大的用量。美铝等国外铝业公司已经研制成功了 $2\times\times\times$ 系和 $6\times\times\times$ 系的无铅易切削铝合金,合金全面性能良好,能够替代传统的含 Pb 易切削铝合金 2011、2030 和 6262 等。然而,出于商业方面的考虑,其完整的制备工艺并没有公开。因此,研究无铅易切削铝合金的成分、制备工艺、组织性能并形成有自主知识产权的成果对我国铝加工业的技术进步有重要理论和实际的意义。由于目前国外已经全面禁止含 Pb 易切削铝合金产品的生产和销售,因此,我国应尽快立项启动无铅易切削铝合金方面的研究。

表1 美国铝业协会注册的易切削铝合金成分

合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Pb	Sn	Bi	Each	Total	Al
2005	0.8	0.7	3.5~5.0	1.0	0.20~1.0	0.10	0.5	0.2	1.0~2.0		0.20	0.05	0.15	rem
2011	0~0.4	0~0.7	5.0~6.0				0.3		0.2~0.6		0.2~0.6	0.05	0.15	rem
2011A	0.4	0.5	4.5~6.0				0.3		0.2~0.6		0.2~0.6	0.05	0.15	rem
2028	0.8	0.8	3.3~4.6	0.5~1.0	0.4~1.8	0.10	0.8	0.2	1.0	0.1~1.0	0.1~1.0	0.05	0.15	rem
2030	0.8	0.7	3.3~4.5	0.2~1.0	0.5~1.3		0.5		0.8~1.5		0.20	0.05	0.15	rem
2007	0.8	0.8	3.3~4.6	0.50~1.0	0.40~1.8	0.10	0.8	0.2	0.8~1.5	max0.2	max0.2	0.05	0.15	rem
2007A	0.8	0.8	3.3~4.6	0.20~1.0	0.40~1.8	0.10	0.8	0.2	max0.05	0.8~1.5	max0.2	0.05	0.15	rem
2111	0.4	0.7	5.0~6.0				0.3			0.1~0.5	0.2~0.8	0.05	0.15	rem
2111A	0.4	0.7	5.0~6.0	0.15	0.15		0.3	0.05	max0.05	0.2~0.6	0.2~0.6	0.05	0.15	rem
2111B	0.3	0.5	4.6~6.0	0.05	0.05					0.3~0.7	0.3~0.6	0.05	0.15	rem
2012	0.4	0.7	4.0~5.5				0.3			0.2~0.6	0.2~0.7	0.05	0.15	rem
2015	0.8	0.8	3.9~5.2	0.3~1.0	0.3~1.3	0.15		0.05~0.15	0.2	0.7~1.5	0.40	0.05	0.15	rem
X2316	0.5~1.5	1.2	3.5~5.0	0.5~1.0	0.3~0.6	Ni0.6	0.8		0.3					
6012	0.6~1.4	0.5	0.1	0.4~1.0	0.6~1.2	0.30	0.30	0.20	0.4~2.0		0.7	0.05	0.15	rem
6012A	0.6~1.4	0.5	0.4	0.2~1.0	0.6~1.2	0.30	0.30	0.20		0.4~2.0	0.7	0.05	0.15	rem
6262	0.4~0.8	0.7	0.15~0.4	0.15	0.8~1.2	0.04~0.14	0.25	0.15	0.55		0.55	0.05	0.15	rem
6020	0.4~0.9	0.5	0.3~0.9	0.35	0.6~1.2	0.15	0.20	0.15	0.05	0.9~1.5		0.05	0.15	rem
6021	0.6~1.5	0.40	0.20	0.4~1.0	0.8~1.5	0.25	0.20	0.10		0.6~1.5		0.05	0.15	rem
6023	0.6~1.4	0.50	0.2~0.5	0.2~0.6	0.4~0.9					0.6~1.2	0.3~0.8	0.05	0.15	rem
6033	0.8~1.3	0.50	0.4~1.0	0.05	0.7~1.3	0.10	0.5~1.0	0.15	0.05		0.3~1.0	0.05	0.15	rem
6040	0.4~0.8	0.7	0.2~0.8	0.15	0.8~1.2	0.15	0.25	0.15		0.3~1.2	0.15~0.7	0.05	0.15	rem
X6030	0.4~0.6	0.7	0.15~0.4	0.15	0.8~1.2	0.04~0.35	0.25	0.15	0.05~0.5In		0.05~0.5	0.05	0.15	rem
6026	0.6~1.4	0.7	0.2~0.5	0.2~1.0	0.6~1.2	0.3	0.3	0.20	0.4	0.05	0.5~1.5	0.05	0.15	rem
6262A	0.4~0.8	0.7	0.15~0.4	0.15	0.8~1.2	0.04~0.14	0.25	0.10		0.4~1.0	0.4~0.9	0.05	0.15	rem
6065	0.4~0.8	0.7	0.15~0.4	0.15	0.8~1.2	0.15	0.25	0.10	0.05		0.5~1.5	0.05	0.15	rem

2 无铅易切削铝合金的切削机制

在前人的基础上,目前国际上无铅易切削铝合金的研究主要是向2×××和6×××合金中添加低熔点元素In、Sn、Bi或者添加高熔点元素或者化合物来改善铝合金的切削性能,发展了许多不同的可供选择的易切削铝合金。In、Sn、Bi能够代替Pb的原因主要有:(1)也不固溶于铝基体,而能够相互之间或者与其他主要合金元素形成低熔点共晶物质;(2)在切削加工过程中能够形成网状延伸组织;(3)与Pb相比,In、Sn、Bi毒性低,其中Bi还是一种绿色金属。

这些元素与合金元素或者相互之间形成不溶于基体的低熔点相,典型的这种合金含有易切削组元如Bi-Sn、In-Bi、Sn、Bi、In-Sn等来改善切削性能,各添加元素的熔点与组合的共晶温度如表2所示,当它们的重量百分数比例不在共晶点时,相应的熔点也会有变化。其切削机制为:工件在高速切削过程中机械能转变成热能,工件温度升高,当摩擦生热使得在切削刀具和材料的接触点附近的温度升高达到或接近低熔点组元的熔点时,在接触点的这种化合物发生了软化和熔化。

另外一种^[18]是向2×××系和6×××系铝合金中添加高熔点硬化相,硬化相可以是元素或者化合物,元素包括硼、碳、石墨以及各种耐火元素或者类似元素;化合物包括氧化物、氮化物、硼化物、碳化物、硅化物、铝化物等或者它们之间的结合体。这

些元素和化合物都具有相对较高的熔点,能够在合金中稳定的存在,在切削过程中不软化和融化,其熔点比铝基体要高很多。其切削机制为:在切削过程中,在切削刀具和材料的接触点,由于Al基体和这种物质的流动特性存在差异,在切削应力的作用下,由于其不同的变形特性会形成空位(void formation),随着进一步的变形,这种空位会传播和聚集。

表2 无铅易切削铝合金中添加元素的熔点及共晶组成和温度

	Bi	In	Sn
Bi	271.3℃	(34%Bi)72℃	(57%Bi)139℃
In		156.4℃	(48%In)117℃
Sn			231.9℃

作为上述两种变化的结果,切削过程中切屑不连续,容易断裂,切屑比较细小,不缠刀具,减少了机加工过程中停工时间,显著提高了切削加工的效率。

3 合金元素对性能的影响

目前应用的易切削铝合金主要是2×××系Al-Cu合金和6×××系Al-Mg-Si合金。加入的合金元素也有所不同。

3.1 合金元素对2×××系Al-Cu合金性能的影响

在2×××合金中,主合金元素有Cu、Mg,Cu有助于合金的切削性能、强度、阳极反应、焊接性能和抗腐蚀反应,Mg能够改

善合金的耐蚀性,并提高合金的强度。添加元素有 Mn、Sn、Bi 等, Mn 提高了合金的耐蚀性,同时消除 Fe 的有害影响,提高合金的耐热强度, Sn 有助于合金的切削性能、机械性能和人工时效反应,能够压缩 GP 区和 θ' 的沉淀时间,促进 θ' 的形核,从而减少达到峰值时效的时间以及提高合金的强度^[25]; Bi 有助于合金的切削性能,特别是合金总体的断屑特性。Fe、Si、Zn 一般被认为是杂质,应该尽量降低合金中的杂质含量。但是在 Bartges 所申请的专利合金^[4]中,含 Sn、Bi 的 $2 \times \times \times$ 系易切削 Al-Cu 合金可以容纳更多的 Fe、Si 杂质含量,甚至可以达到不需要除杂的程度,而对合金的性能没有明显的影响。在这种合金中加入 Sn、Bi 可能有助于消除杂质元素对于合金性能的不利影响,但是未见具体的有关报导,其机制有待深入的研究。

3.2 合金元素对 $6 \times \times \times$ 系 Al-Mg-Si 合金性能的影响

$6 \times \times \times$ 系 Al-Mg-Si 中,主合金元素有 Mg、Si、Cu, Mg 和 Si 能够形成 Mg_2Si , 这是 Al-Mg-Si 的主要强化相, Cu 有助于合金的总体切削加工性能,改善合金在热加工时的塑性,增加热处理强化的效果,降低合金的各向异性。添加元素有 Mn、Sn、Bi、In、Cr、Ti 等, Mn 可以提高强度,改善耐蚀性、冲击韧性和弯曲性能,并对再结晶和耐摩擦性能有贡献; Cr 有助于微细弥散相的形成以及阻止热加工和热处理过程中的再结晶; Ti 能够细化晶粒; Sn 对于合金的切削性能和人工时效反应有贡献,然而,文献^[13]的研究结果表明,只含 Sn 的 Al-Mg-Si 合金的抗冲击性能会变坏,且当用于有高温制动油存在的部件时,合金的抗腐蚀性会变差,合金会提前失效,因此,考虑到合金的综合性能, Sn 应该同其它低熔点元素一同加入。Bi 有助于合金的切削性能,但是, Bi 在 $6 \times \times \times$ 系易切削铝合金中更加容易与 Mg 结合形成 Mg_3Bi_2 ^[15], 从而阻止或者延缓主要强化相 Mg_2Si 的形成,因此会在一定程度上影响合金的强度,作者在工作中也发现了此现象,含 Sn0.9%、Bi0.4% 的无铅易切削 $6 \times \times \times$ 系铝合金比只含 Sn 的无铅易切削 $6 \times \times \times$ 系铝合金的强度低 40MPa 左右,但切削性能稍好。而且根据 Sircar^[16] 等的研究成果,当 Bi 和 Sn 的含量对应控制在一定的成分范围之内时,可将 Bi 对合金的性能影响降低到较低值,他们在调整合金元素含量后 (Bi0.62%、Sn0.25%), 合金强度回升至只含 Sn 的无铅 $6 \times \times \times$ 系合金的水平,但其原因有待进一步研究。

4 铝合金切削性能的等级分类

不同成分的合金有不同的切削性能,相同成分的合金不同热处理状态的切削性能也不相同,合金的切削性能取决于基体第二相粒子的种类和体积百分数。一般来讲,要严格评估合金的切削性能是比较困难的,切削性能等级分类主要考虑以下几个方面:

(1) 切削的尺寸,一般来讲需要比较小的尺寸,这样会使得切削加工变得简单,比大尺寸的切屑更加容易去除切削加工所产生的热量,但是切削也不能够太小,否则会与润滑剂作用,薄的切屑容易卷曲,需要人工去除。

(2) 刀具磨损,降低刀具的磨损,能够减少因为刀具磨损超过了合金的给定公差而更换刀具的停工时间,也就是说减少了停工换刀具的时间,提高了生产效率。

(3) 表面光洁度,合金经切削加工后的表面光洁度越高,能消除或者减少接下来进行的精整操作,比如磨或者去毛刺操作。

(4) 切削阻力,较低的切削阻力能够减少能量的损耗,以及工件、刀具和刀头之间的摩擦生热,在相同的能量供给的情况下能够增加切削加工数量或者余料的去除。

(5) 机械性能和抗腐蚀性能,机械性能比如强度,或者其它性能比如抗腐蚀性能与切削性能相比可能会比较灵活,取决于所应用的条件和场合。

有一种分类方法^[19]是按照所产生切屑的尺寸和加工制品的表面光洁度分为 A~E 五个等级, A 等的切削性能最好,被定义为“易切削,非常细小的切屑,以及非常好的表面光洁度; B 等是卷曲或者易断切屑,表面光洁度较好。更低等级的特征是切屑更加连续,表面质量降低。尽管 A~E 的等级基于以上所提到的 5 个方面,然而每个方面的相对重要性会随着合金的最终性能要求而改变。

5 结束语

由于易切削铝合金能够显著提高机加工的效率,有着广阔的市场前景。目前,国内还未见无铅而对环境有益的易切削合金研制成功的报导,我国作为稀土元素的主要生产国,在原材料方面有巨大的优势,应尽快开展无铅易切削合金的研究,弄清楚稀有元素在合金中的存在形式和作用机制,及其对合金性能的影响,并开发相应具有自主知识产权的产品,打破欧美国家在技术上的垄断,为我国国民经济的发展做出应有的贡献。

参考文献

- 1 黄志其,尹志民,等. 铝加工, 2006, 167(2): 15
- 2 Aluminum Now (USA). 2002, 4(1): 25
- 3 Faltus J, et al. Mater Sci Forum, 2002, 396-402(n3): 1641
- 4 Bartges, et al. US Pat, 6113850. 2000-09-05
- 5 王祝堂. 轻合金加工技术, 2001, 29(1): 1
- 6 Smolej A, et al. US Pat, 6423163. 2002-07-23
- 7 Coats II. US Pat, 5916385. 1999-06-29
- 8 Bondan T, Sofyan. Mater Sci Forum, 2002, 396-402: 613
- 9 Silcock J M, Flower H M. Scripta Materialia, 2002, 46: 389
- 10 kent D, Schaffer G B, Drennan. Mater Sci Eng, 2005, 405: 65
- 11 Yoshihara S, Hirano M. Reserch and Development Kobe steel Engineering Reports, 2001, 51(n1): 17
- 12 Ara, et al. US Pat, 5282909. 1994-02-01
- 13 Farrar Jr, et al. US Pat, 5810952. 1998-09-22
- 14 Sircar S. Mater Sci Forum, 1996, 217-222(npt3): 1795
- 15 Sircar, Subhasish. US Pat, 5587029. 1996-12-24
- 16 Sircar, Subhasish. US Pat, 6409966. 2002-06-25
- 17 Sircar, Subhasish. US Pat, 6315947. 2001-11-13
- 18 Sircar, Subhasish. US Pat, 6416598. 2002-07-09
- 19 Bartges, et al. US Pat, 5522950. 1996-06-04
- 20 Edwards B J, Scott G D. Alluminioe Leghe, 2004, 16(171): 44
- 21 Anon. Adv Mat Proc, 2004, 162(n11): 11
- 22 David W Hohman. Adv Mater Proc (USA), 2002, 160(12): 7
- 23 Design News(USA). 1998, 53(off-Highway suppl) 14
- 24 曹颜顺. 轻金属, 1987, 5: 41
- 25 Laure Bourgeois, Jian-Feng Nie, Barry C Muddle. Mater Sci Forum, 2002, 396-402: 789