

- duction in macrophages via PKA- and NF- κ B independent mechanisms[J]. Cell.Signal,2007,19:251—260.
- [44] Euteneuer F, Mills PJ, Rief W, et al. Association of In vivo β -adrenergic receptor sensitivity with inflammatory markers in healthy subjects[J]. Psychosomatic Medicine,2012,74(3):271—277.
- [45] Eisenhut M. Inflammation-induced desensitization of beta-receptors in acute lung injury[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2012,185:894—895.
- [46] Mills PJ, Dimsdale JE. The promise of adrenergic receptor studies in psychophysiologic research ii:Applications, limitations, and progress[J]. Psychosom Med,1993,55:448—457.
- [47] Mugabo Y, Li L, Renier G. The connection between c-reactive protein (crp) and diabetic vasculopathy. Focus on pre-clinical findings[J]. Current Diabetes Reviews,2010,6:27—34.
- [48] Elenkov IJ. Neurohormonal- cytokine interactions: implications for inflammation, common human diseases and well-being[J]. Neurochem Int,2008,52:40—51.
- [49] Johnson JD, Campisi J, Sharkey CM, et al. Catecholamines mediate stress-induced increases in peripheral and central inflammatory cytokines[J]. Neuroscience,2005,135: 1295—1307.
- [50] Jenkins NP, Keevil BG, Hutchinson IV, et al. Beta-blockers are associated with lower c-reactive protein concentrations in patients with coronary artery disease[J]. Am J Med, 2002,112:269—274.
- [51] Hu A, Jiao X, Gao E, et al. Tonic beta-adrenergic drive provokes proinflammatory and proapoptotic changes in aging mouse heart[J]. Rejuvenation Res,2008,11:215—226.
- [52] Kizaki T, Takemasa T, Sakurai T, et al. Adaptation of macrophages to exercise training improves innate immunity[J]. Biochem. Biophys Res Commun,2008,372:152—156.
- [53] Hong S, Dimitrov S, Pruitt C, et al. Benefit of physical fitness against inflammation in obesity: role of beta adrenergic receptors[J]. Brain Behavior and Immunity,2014,39:113—120.
- [54] Plourde G, Rousseau-Migneron S, Nadeau A. Beta-adrenoceptor adenylate cyclase system adaptation to physical training in rat ventricular tissue[J]. J Appl Physiol,1991,70: 1633—1638.
- [55] Euteneuer F, Mills PJ, Rief W, et al. Association of in vivo β -adrenergic receptor sensitivity with inflammatory markers in healthy subjects[J]. Psychosomatic Medicine,2012,74(3):271—277.
- [56] Kao PC, Shiesh SC, Wu TJ. Serum C-reactive protein as a marker for wellness assessment[J]. Ann Clin Lab Sci, 2006,36:163—169.
- [57] Petersen AM, Pedersen BK. The role of IL-6 in mediating the antiinflammatory effects of exercise[J]. J Physiol Pharmacol,2006,57 (Suppl. 10):43—51.

· 综述 ·

轮椅用材料研究进展*

程 轩^{1,2} 王孟君^{1,3} 王 剑² 葛 鹏^{1,2} 梁 岩^{1,2}

由于我国的人口基数大,在未来十年内,人口老龄化和残疾人问题将成为我国社会发展所面临的严重社会问题和巨大挑战。我国社会老龄化形势严峻,2013年全国老龄人口(60岁以上)突破2亿大关,达到2.02亿,老龄化水平达到了14.8%^[1];第六次全国人口普查统计全国肢体残疾人数达到了2472万。老年人和下肢残疾人行动的不便使得他们与外

界交流变得困难,而轮椅的使用能使他们更好地融入社会。然而有关资料显示^[2],由于我国残疾人的整体消费水平普遍偏低,仅有23.3%左右的残疾人得到了康复服务,其中残疾人主动要求配置康复器械的占38.56%,而实际配置的只占7.31%,因此,必须大力发展高性能且价廉的康复器械,来减轻家庭护理的负担。

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2016.02.023

*基金项目:湖南省社会发展支撑计划重点项目(2014SK4030)

1 中南大学有色金属材料科学与工程教育部重点实验室,湖南长沙,410083; 2 湖南健行康复器材科技发展有限公司; 3 通讯作者
作者简介:程轩,男,硕士研究生; 收稿日期:2014-06-30

1 现代轮椅用材料要求

轮椅要求具有牢固、轻量、舒适等基本特点,随着残疾人事业的发展,使得轻量化、多功能化、智能化及设计人性化等成为轮椅设计与制作的主要发展趋势。轻量化、多功能化、智能化及设计人性化充分合理地将机械、材料、电子电气及人机工程学相结合,使得轮椅增添了许多现代化设计,提高了轮椅的使用便捷性、安全性和舒适性。

1.1 质轻

目前市售轮椅多为手动轮椅,基本是依靠看护人或轮椅使用者人力使其运动,因此要求轮椅越轻越好,以此来减轻推进负担。即使一些靠电机驱动的电动轮椅,在所搭载的蓄电池容量功率有限的情况下,所用材料仍以轻质材料为好,这样可以提供更长久的续航能力,在一定程度上提高了电动轮椅的使用性。一方面,轮椅质量会影响轮椅的行进阻力,轮椅车架质量减轻30%将减少行进阻力约10%^[3],另一方面,现阶段市售主要为手动轮椅,使用者主要通过上肢力量来自主操控,减轻操控时使用者肩部及手腕的用力负担显得尤为重要,因此轮椅轻量化将使手动轮椅的使用性大大提升。

1.2 高强度

如前所述,轮椅运动机构的复杂性和灵活性要求轮椅在保证强度的同时尽可能的轻量化,降低材料密度是减重的一个重要途径。若材料本身强度达到使用要求,则在达到相同的力学性能要求的条件下减少材料的用量,从而实现轮椅的轻量化。尤其是具有高比强度、比模量、比韧性的材料越来越成为轮椅理想的轻量化材料。

1.3 耐腐蚀

多数轮椅会在户外使用,会受到光照、紫外线的照射,也会与空气直接接触,甚至雨水及患者的汗液尿液等的侵蚀及高温的交替作用,使得耐蚀性较差的材料容易发生锈蚀及表面氧化,影响轮椅车架的稳定性及美观,这就要求轮椅用材料具有良好的耐腐蚀性。

1.4 减震性能好

轮椅使用者面向各种情况的患者,有偏瘫、截肢、腿骨折等情况,尤其对于术后或者其他康复期的腿脚不便的患者,减少身体受伤部位的震动避免二次创伤显得尤为重要。因此金属结构材料的阻尼系数越大,吸震减震效果越好,用于轮椅的车架及大轮毂可减少震动,提高轮椅使用的安全性和舒适性^[4]。

1.5 其他方面

轮椅用材料的应用除了考虑上述原则外,还应考虑材料的安全、舒适及性价比等。在轮椅强度达到安全保证的前提下,对长时间使用轮椅的轮椅使用者,应该考虑乘坐的舒适性,如轮椅材料良好的触感、对皮肤接触没有明显刺激及过敏反应、材料低的热导率及比热使得接触时没有冰凉的感觉。

经过多年的发展,可供轮椅车架用材料的选择也越来越丰富,由最开始的木质车架逐步替换到钢制车架,之后铝合金、钛合金、碳纤维、镁合金及其他复合材料得到应用和大批量生产。总之,轮椅的制作趋势主要是朝着轻量化、高强度、舒适性以及低成本等方面发展。

2 轮椅车架用材料

轮椅车架中使用的材料主要有钢、铝合金和钛合金,高性能碳纤维复合材料和镁合金目前还没有得到广泛应用。部分用于轮椅车架的材料性能见表1。

市场上手动轮椅的价格一般取决于手动轮椅所用的材质,轻量化轮椅价格相对要更高。钢制轮椅质量高达22.5kg,铝制轮椅质量为11.25—13.5kg,钛合金轮椅质量可进一步减轻到6.3—9kg,而钛合金轮椅的售价比钢制轮椅贵3到5倍甚至更高。

2.1 轮椅用钢

钢是目前在轮椅制造业当中应用范围最为广泛、应用历史最久的材料。应用于轮椅车架材料的钢主要有合金钢、不锈钢和碳素结构钢。尽管轮椅用钢管的技术相当成熟,通过成分的优化、先进的热处理工艺和加工工艺,使得钢管的管壁在保证性能的前提下达到了比较理想的厚度^[6],钢制轮椅的质量在不断减轻,但是用作轮椅车架的钢管管壁厚度几乎接近极限,在更高轻量化的要求下,钢制轮椅难有突破。

2.2 轮椅用钛合金

钛合金由于其质轻、高强、韧性好、耐高低温性能好、无毒以及较好的耐蚀性等优点,应用于航天航空、机械、医疗、能源等许多领域^[7]。钛合金的比强度高于铝,且在一般环境下基本不会发生腐蚀,不需要额外的防腐蚀处理。钛制轮椅的主要优点是牢固、轻量、舒适、美观、使用寿命长。钛合金主要应用在轮椅系列中的运动轮椅,比如篮球轮椅、赛车轮椅等,因价格昂贵,在普通轮椅上的应用受到了限制。目前,Ti-3Al-2.5V^[8]合金因其管成形性、耐蚀性、延展性好,是车架常用的钛合金^[9]。Ti-6Al-4V^[10]合金的弹性模量指标和拉伸强度均高于Ti-3Al-2.5V合金,但其加工成小直径管材很困难,因而不适合做车架,但可做车架上的曲轴定位器、脚踏及车把。目前钛合金在轮椅上的应用因高成本及产品高售价导致在市场没有很明显的优势,只有钛合金材料成本降下来,

表1 部分轮椅用材料的力学性能^[5]

| 材料名称 | 密度/ (g·cm ⁻³) | 弹性模量/ GPa | 剪切模量/ GPa | 拉伸强度/ MPa | 轮椅质量/ kg |
|------|------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| 钢 | 7.89 | 200 | 77 | 1100 | 22.5 |
| 铝 | 2.70 | 73 | 28 | 310 | 11.25—13.5 |
| 钛 | 4.72 | 115 | 44 | 300 | 6.3—9 |

才可能代替目前部分铝合金。

2.3 轮椅用镁合金

镁合金是目前世界上最轻质的商用金属结构材料^[11]。与其他结构材料相比,镁合金具有一系列的优点^[12]:出众的比强度和比刚度;良好的铸造性能,适用于高压铸造;突出的疲劳无记忆性;较好的动力学性能;相对于钢、铝等金属部件,具有极佳的减振特性;机加工性能好;易回收。

镁合金作为轮椅轻量化结构材料非常具有潜力^[13]。日本千叶工业大学镁合金研究所用AZ31^[14]镁合金制造轮椅。该轮椅除车轮外其余部件基本上都用镁合金制造,轮椅总质量仅为9.6kg,其用于轮椅车架的管材为镁合金挤压管材^[15],管材组织为再结晶态,管材的横截面晶粒为等轴状,纵断面有挤压加工时的加工流线组织存在。制作镁合金轮椅最主要的问题是:①由于镁是密排六方晶体结构,在室温下其塑性变形能力较差,且结构件连接一般通过焊接连接,焊缝处疲劳强度低;②是镁合金焊接^[16]时易形成疏松且热脆性较大的氧化膜及夹渣焊口附近的热影响区内部纤维组织发生了变化,镁的低熔点使得镁合金的焊接热影响区较宽,使该处材料性能下降;③镁合金作为结构材料,其耐蚀性比较差^[17]。使得目前市场上还基本没有镁合金轮椅。

2.4 轮椅用铝合金

铝合金的强度与钢铁的强度相当,密度是钢铁的1/3,与其他材料相比,轻量化效果好,且具有良好的耐腐蚀性、回收利用性好,易于加工成形,表面喷涂和阳极氧化处理工艺成熟^[18]。其生产成本相对较低、工艺技术完善、不需要专业的生产设备和技术,使得铝合金成为目前轻量化综合性能最理想也是最受欢迎的材料^[19]。轮椅所使用的铝合金多数为6XXX系和7XXX系两种,使用前可进行热处理以改善性能来满足需求。

6XXX系铝合金(Al-Mg-Si)主要合金元素是镁与硅,强化相为Mg₂Si相,属于热处理可强化铝合金,是耐腐蚀、强度、焊接性都比较好的材料^[20]。6063铝合金是6XXX系合金的典型代表^[21],可进行热处理强化,挤出性、阳极氧化性优良、抛光性、阳极氧化着色性及涂漆性能优良,具有中等强度、耐蚀性高、无应力腐蚀破裂倾向、焊接性能良好、焊接区腐蚀性能不变、成形性和工艺性能良好等优点。

7XXX系铝合金主要合金元素是锌和镁,可以形成强化效果显著的MgZn₂相,经热处理后该系合金能达到非常高的强度,该系材料一般都会加入少量铜、铬等合金元素,包括Al-Zn-Mg系和Al-Zn-Mg-Cu系合金^[22],都具有密度低、高的比强度和硬度、较好的耐腐蚀性能和较高的韧性,优良的加工性能及焊接性能等优点^[23],广泛应用于航空、航天领域,成为该领域中重要的结构材料之一。7003铝合金是一种Al-Zn-Mg系中强铝合金,具有良好的热变形能力和加工性能,

人工时效热处理后能够得到较高的强度,焊接性能良好,可很好应用于轮椅及其他康复器械上。

轮椅实现轻量化最主要是从材料角度实现,钛合金和镁合金的综合性能相对铝合金有优势,但在生产成本及技术要求的限制下,钛制轮椅和镁制轮椅相对价格便宜的铝合金轮椅优势并不明显。

2.5 轮椅用复合材料

复合材料因密度小、比强度高、耐腐蚀性好、高疲劳强度等突出优势已成为当今材料的研究热点之一^[24]。复合材料用途很广,从飞机结构制造到高尔夫球杆、医疗器械等民用领域^[25]。目前,绝大部分轮椅车架的制作是将长度合适的金属管材弯曲成适当的形状,然后通过焊接、铆接等方式进行组装,这样可以减少轮椅的制作成本。而超轻轮椅的设计,要求在保持车架结构的完整性同时尽可能的轻量,复合材料的一个突出优点是可以整体成形方法来成形复杂的整体结构^[26-27]。但制作的高成本是制约复合材料得到广泛应用的主要原因,另外复合材料的结合强度和断裂韧性不理想,且复合材料的修复要比金属材料难度大,甚至一些影响性能的缺陷和裂纹无法第一时间发现,因此,目前复合材料在轮椅上的应用也不很广泛。

3 轮椅用轻质材料研发对策

综合以上各种轮椅用材料:钢材虽然技术、工艺成熟,成本低,但是钢制轮椅不能满足人们对轻量化越来越高的要求;钛合金、镁合金及复合材料相对铝合金在医疗器械上的应用之所以很少,是因为与铝合金相比,钛合金、镁合金及复合材料在医疗器械上的使用性能并没有多大的优势,而成本却高出了很多。基于此铝合金无疑是目前轮椅轻量化最具竞争力的轻质材料。笔者认为我国对轮椅用轻质铝合金的发展应该从以下几个方面开始着手:

①科研院校应加大轮椅用铝合金材料研究,与铝加工企业通力合作,共同研发。②通过对轮椅结构优化设计,设计合理化车架结构,采用整体成形的方式减少不必要的焊接或铆接,达到整体结构稳定性要求。③进一步加大轮椅用铝合金挤压管材、铝合金锻铸件的研究力度,通过微合金化理论进一步优化铝合金的成分、显微组织和力学性能。④加强铝合金与其他金属材料之间的焊接机制的研究,提高其焊接性能。⑤加强新型铝基复合材料的研发,如铝基增强复合材料,实现轮椅安全、轻量及舒适性的要求。

4 小结

从舒适、美观、耐用、轻量化、价格等方面综合来看,铝合金无疑是轮椅轻量化的首选材料。加大高性能铝合金在轮椅上应用的研发投入,不仅能提高国产轮椅的技术含量和国

际竞争力,更能为健全残疾人社会保障体系、服务体系和辅助器械适配体系提供保障。

参考文献

- [1] 吴玉韶,党俊武. 中国老龄事业发展报告(2013)[R]. 北京: 社会科学文献出版社, 2013.
- [2] 张晓玉. 我国康复辅具的发展与策略. 中国康复医学会康复治疗专业委员会康复辅助器具学组成立暨全国康复辅助器具学术研讨会论文集[C]. 2011:13.
- [3] Monique AM Berger, Marieke van Nieuwenhuizen, Martijn van der Ent, et al. Development of a new wheelchair for wheelchair basketball players in the Netherlands[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 34: 331—336.
- [4] 马戎,董选普,陈树群,等. 准晶增强 Mg-0.6%Zr 合金的力学与阻尼性能[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 21(10): 2705—2712.
- [5] 高敬,王方. 钛在轮椅中的应用[J]. *稀有金属快报*, 2004, 23(3): 34—35.
- [6] 王殊,师春生,赵乃勤,等. 自行车车架材料以及镁合金的应用[J]. *材料导报*, 2006, 20(8): 87—89+93.
- [7] 赵永庆. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. *中国材料进展*, 2010, 29(5): 1—8+24.
- [8] Bolzoni L, Ruiz-Navas EM, Gordo E. Investigation of the factors influencing the tensile behaviour of PM Ti 3Al 2.5V alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 609: 266—272.
- [9] 丁长安. 钛在自行车和轮椅领域的应用[J]. *钛工业进展*, 1997, (5):23—25.
- [10] Yadroitsev I, Krakhmalev P, Yadroitsava I. Selective laser melting of Ti6Al4V alloy for biomedical applications: Temperature monitoring and microstructural evolution[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 583: 404—409.
- [11] BL Mordike, Tü Ebert. Magnesium: Properties-applications-potential[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, 302(1): 37—45.
- [12] 常丽丽. 变形镁合金 AZ31 的结构演变与力学性能[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [13] Mark Easton, Aiden Beer, Matthew Barnett, et al. Magnesium alloy applications in automotive structures[J]. *JOM*, 2008, 60(11): 57—62.
- [14] Jitka Stráská, Miloš Janeček, Jakub Čížek, et al. Microstructure stability of ultra-fine grained magnesium alloy AZ31 processed by extrusion and equal-channel angular pressing (EX ECAP)[J]. *Materials Characterization*, 2014, 94: 69—79.
- [15] 张小明. 镁合金轮椅[J]. *稀有金属快报*, 2000, 3: 1.
- [16] 毛萍莉,席通,刘正,等. 高应变率下 AZ31 镁合金焊接接头动态力学性能[J]. *材料工程*, 2014, (5): 53—58+65.
- [17] 李锴锴,王冰,严彪. 镁合金作为生物医用材料的腐蚀与防护研究进展[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2012, 24(3): 181—186.
- [18] 吴璐,董万鹏,龚红英,等. 铝合金的形变热处理研究进展[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(4): 27—31.
- [19] Dung D. Luong, Oliver M. Strbik Iii, Vincent H. Hammond, et al. Development of high performance lightweight aluminum alloy/SiC hollow sphere syntactic foams and compressive characterization at quasi-static and high strain rates[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 550: 412—422.
- [20] Yi Meng, Jianzhong Cui, Zhihao Zhao, et al. Effect of vanadium on the microstructures and mechanical properties of an Al Mg Si Cu Cr Ti alloy of 6XXX series[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 573: 102—111.
- [21] 孙迪. 6063-T6 铝合金薄壁管材最佳时效工艺研究[J]. *有色金属加工*, 2013, 42(2): 26—28.
- [22] 复生,丁非. 铝合金及应用[M]. 化学工业出版社, 2006.
- [23] 陈小明,宋仁国,李杰. 7xxx 系铝合金的研究现状及发展趋势[J]. *材料导报*, 2009, 23(3): 67—70.
- [24] Napo Bonfoh, Mamadou Coulibaly, Hafid Sabar. Effective properties of elastic composite materials with multi-coated reinforcements: A new micromechanical modelling and applications[J]. *Composite Structures*, 2014, 115: 111—119.
- [25] 陈绍杰. 我国先进复合材料产事业发展[J]. *玻璃钢*, 2014, (1): 13—26.
- [26] H Lee Hall, Mona Bhuta, John M Zimmerman. Kenaf fiber reinforced composite athletic wheelchair[C]. *IEEE*, 1998:5—5.
- [27] 张靠民,李敏,顾轶卓,等. 先进复合材料从飞机转向汽车应用的关键技术[J]. *中国材料进展*, 2013, 32(11): 685—695.